



ICAO

PROJECT FUNDED BY



European Union

BURKINA FASO



ÉTUDE DE FAISABILITÉ SUR LE DÉVELOPPEMENT DE CARBURANTS D'AVIATION DURABLES

PROJET D'ASSISTANCE OACI-UNION EUROPÉENNE : RENFORCEMENT
DES CAPACITÉS POUR L'ATTÉNUATION DES ÉMISSIONS DE CO₂
DE L'AVIATION INTERNATIONALE

Auteur: M. Christoph Weber, LL.M.
Consultant Technique



Le présent document a été produit avec l'assistance financière de l'Union européenne. Les opinions qui y sont exprimées ne peuvent être en aucun cas interprétées comme reflétant le point de vue de l'Union européenne.

© OACI 2018. Tous droits réservés.

Le présent document a été produit dans le cadre du projet d'assistance conjoint OACI-Union européenne, Renforcement des capacités pour l'atténuation des émissions de CO₂ de l'aviation internationale. Les points de vue exprimés dans la présente publication ne représentent pas nécessairement les opinions individuelles ou collectives ou positions officielles de ces organisations ou de leurs États membres.

Les désignations employées et la présentation du contenu dans la présente publication n'impliquent pas l'expression de quelque opinion que ce soit concernant le statut légal d'un pays, d'un territoire ou d'une ville ou de ses autorités, ou concernant la délimitation de ses frontières et ses limites. Les lignes en pointillé sur les cartes représentent des frontières approximatives au sujet desquelles il est possible que des points de désaccord subsistent.

La mention d'entreprises ou de produits de fabricants spécifiques ne signifie pas que ceux-ci ont été évalués ou sont recommandés de préférence à d'autres entreprises ou produits de nature similaire qui ne sont pas mentionnés.

Toutes les précautions raisonnables ont été prises afin de vérifier les informations contenues dans la présente publication. Les éléments publiés le sont en l'état, sans garanties d'aucune sorte, expresses ou implicites, quant à la précision, la complétude et l'actualité de l'information. L'OACI et ses partenaires déclinent expressément toute responsabilité découlant d'un lien avec l'interprétation ou l'utilisation des éléments du présent rapport.

RÉSUMÉ ANALYTIQUE

L'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) est une institution spécialisée des Nations Unies travaillant avec ses 191 États membres et les groupes de l'industrie pour parvenir à des consensus sur des normes et pratiques recommandées (SARP) et politiques pour l'aviation civile internationale, à l'appui d'un secteur de l'aviation civile internationale sûr, efficace, sécurisé, économiquement durable et respectueux de l'environnement.

Dans ses efforts visant à réduire les émissions de dioxyde de carbone, l'Organisation de l'aviation civile internationale a établi des partenariats avec des organisations internationales et des États afin de mettre sur pied des projets d'assistance technique et de promouvoir un panier de mesures conçues pour appuyer les États dans la réalisation des objectifs ambitieux mondiaux. Ces objectifs, adoptés par la 37^e session de l'Assemblée en 2010, visent à améliorer le rendement du carburant de 2 % par an à partir de 2020 et à maintenir les émissions nettes de dioxyde de carbone aux mêmes niveaux (c'est-à-dire une croissance neutre en carbone à partir de 2020).

La 39^e session de l'Assemblée de l'OACI, qui s'est tenue du 27 septembre au 7 octobre 2016, a adopté la Résolution A39-2 : Exposé récapitulatif de la politique permanente et des pratiques de l'OACI dans le domaine de la protection de l'environnement — Changements climatiques, qui précise que l'OACI et ses États membres reconnaissent qu'il est très important de guider sans relâche l'aviation civile internationale dans ses efforts visant à limiter ou à réduire ses émissions qui contribuent aux changements climatiques dans le monde. À sa 39^e session, l'Assemblée de l'OACI a également réaffirmé les objectifs ambitieux mondiaux pour le secteur de l'aviation internationale adoptés en 2010.

Un élément central de la Résolution A39-2 est la demande faite aux États de préparer volontairement et de communiquer à l'OACI des plans d'action sur les efforts de réduction des émissions de CO₂ pour l'aviation internationale. La Résolution établit également un ambitieux programme de travail portant sur le renforcement des capacités et l'assistance aux États pour l'élaboration et la mise en œuvre de leurs plans d'action nationaux afin de réduire les émissions. Les plans d'action nationaux des États de l'OACI sont l'occasion pour les États de mettre en valeur des politiques et mesures et sont destinés à être adaptés au niveau individuel ; ils reflètent les circonstances nationales spécifiques de chaque État membre de l'OACI et les possibilités dont ils disposent pour la mise en œuvre de mesures pour atténuer les émissions de CO₂ provenant des activités de l'aviation internationale¹. En date de novembre 2018, 111 États membres représentant 92,3 % des TKP pour le monde avaient volontairement préparé et communiqué des plans d'action à l'OACI, dont le Burkina Faso.

Le projet d'assistance conjoint OACI — Union européenne (UE), Renforcement des capacités pour l'atténuation des émissions de CO₂ de l'aviation internationale, vise à appuyer les 14 États membres sélectionnés en Afrique et dans les Caraïbes dans leurs efforts d'élaboration et de mise en œuvre de leurs plans d'action nationaux ; d'amélioration de leur système environnemental en aviation ; et d'identification, d'évaluation et de mise en œuvre de mesures d'atténuation dans les États sélectionnés. Le Burkina Faso figure parmi les États bénéficiaires de ce projet.

Afin de contribuer à la réalisation des objectifs ambitieux mondiaux de l'OACI pour le secteur de l'aviation internationale, le Burkina Faso a défini un Plan d'action pour la réduction des émissions de CO₂ (APER), dans lequel une mesure prometteuse a été retenue, qui consiste à développer et à utiliser des carburants alternatifs durables (SAF), qui peuvent réduire le cycle de vie des émissions de CO₂ par rapport au carburant d'aviation actuel.

La durabilité est un élément crucial du développement des SAF, car au cours de leur production et lors de leur utilisation, ces carburants ne produisent pas d'effets environnementaux ou sociaux négatifs et devraient donc aboutir à une réduction des émissions de carbone (gaz à effet de serre).

¹ L'OACI a préparé le Doc OACI 9988, Orientations relatives à l'élaboration des plans d'action des États sur la réduction des émissions de CO₂, pour décrire le processus d'élaboration ou d'actualisation d'un plan d'action.

L'étroite interaction entre les politiques mondiales sur le climat et les mesures d'atténuation nationales est un facteur important de la production et de la mise en œuvre progressive des SAF.

Des incitations politiques, des politiques favorables, de nouveaux cadres réglementaires internationaux et efforts ambitieux visant à réduire les émissions de l'aviation constituent la base de la mise en œuvre d'une chaîne d'approvisionnement des SAF. À la suite d'années de promotion, de programmes d'essais moteur et de vols de démonstration, les SAF sont devenus un élément clé de la réduction de l'impact environnemental de l'aviation civile internationale. Indépendamment de la filière sous jacente de production des SAF, les industries travaillent actuellement à l'élaboration de procédés optimaux qui utilisent des matières premières durables et peuvent être appliqués économiquement. Le nombre sans cesse croissant de technologies de conversion de SAF disponibles élargit la gamme de sources de matières premières potentiellement appropriées.

Au cours de la dernière décennie, de multiples initiatives portant sur la culture de diverses matières premières et la production de SAF ont été lancées. L'échelle et la portée de ces initiatives vont de plantations d'essai à petite échelle à des exercices pleine grandeur de mobilisation d'agriculteurs, couvrant des dizaines de milliers d'hectares.

Dans l'Afrique sub-saharienne, les changements climatiques ont un impact significatif sur la région. Étant donné les importants défis que comporte l'adaptation aux changements climatiques et du fait que les ressources disponibles pour ce faire sont limitées, une adaptation réussie aux impacts défavorables des changements climatiques exigera une planification rigoureuse et la participation de toutes les parties prenantes nationales, du Gouvernement jusqu'aux communautés locales. Cette adaptation exigera également une assistance adéquate de la part de la communauté internationale pour appuyer les efforts des États dans ce domaine. Alors que l'Afrique offre d'amples opportunités pour la production nationale de biocarburants à partir de la biomasse, l'expérience a déjà montré que la production de biocarburants peut potentiellement avoir des impacts socio économiques et environnementaux défavorables. S'agissant d'initiatives à l'échelle commerciale au Mozambique, à Madagascar, au Rwanda, en Tanzanie et au Burkina Faso, des rendements faibles, des lacunes de viabilité économique non résolues, des coûts de main d'œuvre sous-évalués et d'autres conséquences non voulues ont, au bout du compte, abouti à des ruptures de la chaîne de valeur, à des licenciements, à l'abandon de plantations et à des échecs coûteux de projets. L'abandon précoc et l'effondrement de ces projets ont eu des conséquences négatives pour les communautés rurales locales, en raison de la perte de droits fonciers et de l'accès aux ressources naturelles et d'occasions manquées de revenus.

Si l'on garde à l'esprit les risques potentiels, il existe maintenant un besoin réel de recadrer ce secteur afin d'identifier et d'utiliser des ressources de biomasse convenables de manière responsable et durable.

Compte tenu des intérêts économiques, sociaux, environnementaux et stratégiques en jeu, ce recadrage exige une évaluation solide des hypothèses fondamentales et des paramètres clés de la chaîne logistique, ainsi que des impacts sociétaux et environnementaux. Cela ne peut être fait sans prendre en compte le contexte régional spécifique. Les circonstances de mise en œuvre des projets varient selon le lieu d'implantation, les conditions agro climatiques et les parties prenantes en cause, de sorte qu'une hiérarchisation opportune et pragmatique peut donc se révéler particulièrement précieuse, et permettre de préserver ainsi le capital, la confiance et la réputation. Cela met l'accent sur le tri, la catégorisation et éventuellement l'évaluation des hypothèses sous jacentes fondamentales.

Le portefeuille de références internationales disponibles et d'initiatives en matière de biocarburants d'aviation ainsi que la montée et la chute de l'industrie du jatropha servent à nous rappeler les risques en cause ; l'histoire récente offre en particulier des renseignements précieux sur les défis, obstacles et écueils qu'il faut surveiller de près, ajuster en permanence et maîtriser de manière professionnelle en cours de route.

En fin de compte, la collaboration étroite entre les parties prenantes de l'industrie de l'aviation, de l'industrie du raffinage du pétrole, du Gouvernement, des compagnies de biocarburants, des organismes agricoles et du monde universitaire s'impose pour répondre aux objectifs environnementaux et équilibrer de manière appropriée les coûts et les risques.

De l'autre côté de la chaîne logistique, des solutions innovatrices de technologies de conversion des combustibles s'offrent, accompagnées de leur lot spécifique de défis. Toutefois, n'entre pas dans le champ de cette étude l'analyse des détails de toutes les filières chimiques, biologiques et thermiques (en cours d'utilisation ou en cours d'élaboration) qui mènent à la conversion d'un type spécifique de biomasse en SAF. Alors qu'un nombre croissant de technologies de conversion ont la capacité de produire des SAF, il est plus que vraisemblable que certains paramètres, au début de la chaîne de valeur, constitueront les principaux facteurs limitatifs. En particulier, le type, le prix et la disponibilité de la matière première sont certains des paramètres les plus importants lorsqu'on étudie la faisabilité commerciale de projets de carburants d'aviation alternatifs.

Outre la productivité de la biomasse, le coût de production des SAF dépend ultimement des efforts de synergie dans tous les domaines, y compris le coût de la main d'œuvre, le rendement d'extraction, l'économie d'énergie que permet le procédé et l'équilibre entre le carburéacteur obtenu et les coproduits à valeur ajoutée.

Alors qu'il reste encore de nombreux défis à surmonter et à résoudre, la présente étude de faisabilité a pour objectif d'offrir un arbre de décision pour la mise en place de la production de matières premières et de SAF au Burkina Faso. L'étude répartit dans des catégories les principaux obstacles comme les ressources biogéniques, l'approvisionnement en biomasse, l'infrastructure, le cadre politique, le risque d'investissement, les problèmes sociaux, l'atténuation des gaz à effet de serre (GES), l'évaluation de la durabilité, et elle présente des lignes directrices, des repères et des aides à la décision pour les institutions gouvernementales, les décideurs et les développeurs de projet.

L'évaluation de chaque étape de l'arbre de décision et l'application d'une échelle de notation permettront l'élaboration d'un "indice de mise en œuvre des SAF", et cet indice pourra servir d'outil pour les gouvernements et les autorités, afin :

- a) de déterminer les mesures appropriées à prendre ;
- b) de hiérarchiser les mesures de mise en œuvre ;
- c) de définir un cadre politique propice en fonction d'un ensemble donné de circonstances agroclimatiques et écologiques dans une région spécifique.

Les enseignements tirés de l'échec de projets de biocarburants dans l'Afrique sub saharienne et ailleurs devraient offrir des indications pratiques supplémentaires pour la production de matières premières bioénergétiques et de conception de politiques en matière de bioénergie au Burkina Faso, notamment la nécessité :

- a) d'une approche prudente avant d'autoriser la culture de toute nouvelle matière première bioénergétique ;
- b) de recherche classée par ordre de priorité sur le potentiel de bioénergie spécifique des plantes et cultures indigènes au Burkina Faso.

Il est essentiel, dans la stratégie du pays, d'avoir en place un système de carburant à base de matières premières qui soit diversifié, indigène et renouvelable, afin :

- a) d'atteindre la sécurité énergétique ;
- b) de remplacer une proportion importante du carburant d'aviation nécessaire afin de répondre à la demande commerciale ;
- c) faciliter le respect de la réglementation environnementale et des objectifs ambitieux ;
- d) d'augmenter la gérance de l'environnement.

La présente étude analyse la mise en œuvre d'une chaîne logistique de SAF et établit une ventilation et l'ordre de priorité des paramètres clés et des livrables qui faciliteront le succès de la mise en

œuvre des mesures d'atténuation prioritaires et la définition d'un cadre politique approprié pour les SAF au Burkina Faso. Par-dessus tout, l'étude entend sensibiliser davantage à ces questions, afin de mobiliser un soutien financier et industriel, ainsi qu'un soutien politique indispensable de la part des autorités burkinabè.

En résumé, les résultats clés, les principales ressources nationales de biomasse qui se prêtent à la conversion en SAF comprennent :

- les herbes tropicales, comme l'herbe à éléphant ;
- les résidus agricoles (sorgo) ;
- les oléagineux à haut rendement, comme les accessions améliorées du jatropha ;
- les déchets solides urbains (DSU) ;
- l'anacarde et l'huile de noix de karité ;
- les graisses animales fondues (suif).

Les coquilles de noix d'anacarde et de karité sont une spécialité burkinabè. Elles constituent des sous-produits sans valeur attribuée, et des quantités décentes de matières premières sont disponibles pour traitement et conversion d'énergie avec effet immédiat.

Le potentiel énergétique cumulatif des sources nationales de matières premières disponibles représente au moins neuf fois le volume des importations de pétrole du pays et pourrait facilement dépasser les importations annuelles de combustible fossile du Burkina Faso.

La vaste gamme de matières premières potentielles disponibles au Burkina Faso s'accompagne d'une diversité tout aussi grande de solutions correspondantes pour la transformation des combustibles en SAF.

On peut soutenir que le plus grand potentiel de carburants alternatifs est orienté vers le procédé Fischer Tropsch d'hydrotraitement de kérosène paraffinique synthétique (FT-SPK), procédé qui s'appuie sur la matière première lignocellulosique à bas coûts qui peut être dérivée de déchets ou de cultures énergétiques spécifiques.

En ce qui concerne la filière de gazéification/FT, des travaux complémentaires de recherche développement (R & D) pourraient potentiellement permettre de mettre au point des réacteurs modulaires, à petite échelle, qui peuvent convertir en SAF du gaz de synthèse dérivé de la biomasse.

Pour l'instant, la non-existence d'une infrastructure pétrochimique ou de raffinement de base ne semble pas permettre une capacité autonome de production de carburants d'aviation au Burkina Faso. Des contraintes d'infrastructure et de logistique, toutefois, n'excluent pas l'exportation à titre temporaire de matières premières et la conversion en SAF dans des installations de traitement outre-mer.

En fait, le Burkina Faso est bien placé pour se concentrer initialement sur la production de matières premières et le traitement de la biomasse (par exemple la transestérification) qui exigent des installations d'infrastructures moins capitalistiques.

Les carburants alternatifs pour le transport produits nationalement, comme le biodiesel produit à partir de graisses animales fondues, de jatropha ou de baume de cajou (CNLS) ne peuvent pas remplacer les SAF, mais ils peuvent néanmoins aider à sensibiliser le public et à attirer les investisseurs ; ils constituent ainsi des premières mesures viables et pragmatiques vers la mise en œuvre progressive d'une future chaîne de valeur de SAF.

Les mélanges de biodiesel (EMAG) d'esters méthyliques d'acide gras qui en résultent pourraient être utilisés, par exemple, par la société de services d'escale de l'aéroport de Ouagadougou qui exploite la flotte de camions et de remorques de l'équipement sol utilisant du diesel (GSE).

Les résultats et recommandations pourraient être utilisés comme un modèle évolutif et largement reproductible en Afrique sub-saharienne. Idéalement, ils peuvent aider à ouvrir la voie aux États voisins pour que ceux-ci suivent l'exemple burkinabè et créent un mouvement vers un développement conscient de l'environnement à l'avenir, c'est-à-dire en même temps économiquement viable et socialement acceptable.

TABLE DES MATIÈRES

p4	Résumé analytique
p10	Abréviations et acronymes
p12	Listes des figures, tableaux et photos
p14	1. Introduction
p14	1.1 L'OACI et l'environnement
p16	1.2 Projet OACI – Union européenne (UE)
p16	1.3 Méthodologie de l'étude des carburants d'aviation et mandat de l'OACI
p17	1.4 Définir la problématique
p18	1.5 Accent sur la matière première
p19	1.6 Classification des matières premières
p20	1.7 Potentiel de la biomasse au niveau national
p22	1.8 Procédés de conversion du combustible
p24	2. Paramètres de production propres aux pays
p24	2.1 Géographie
p24	2.2 Commerce et Gouvernement
p25	2.3 Démographie
p26	2.4 Climat/Sol
p28	2.5 Vulnérabilité aux changements climatiques
p29	2.6 Dégradation des sols
p29	2.7 Agriculture
p30	2.8 Énergie
p32	2.9 Infrastructures de transport
p35	3. Évaluation des sources de matière première pour la production de biocarburants
p35	3.1 Plantes sucrières ou contenant de l'amidon (sucrose)
p35	3.1.1 Canne à sucre
p39	3.1.2 Sorgo
p43	3.2 Biomasse lignocellulosique
p43	3.2.1 Résidus agricoles
p50	3.2.2 Résidus forestiers
p52	3.2.3 Cultures spécifiquement énergétiques (Herbe à éléphant)
p54	3.2.4 Procédés de conversion lignocellulosique
p56	3.3 Déchets
p56	3.3.1 Déchets solides urbains (DSU)
p59	3.3.2 Graisses provenant de déchets animaux
p65	3.4 Jatropha
p65	3.4.1 Physiologie et phytoécologie de la plante
p66	3.4.2 L'huile brute de jatropha (CJO)
p66	3.4.3 Le contexte burkinabè : Principaux acteurs et initiatives
p68	3.4.4 Les enseignements tirés
p70	3.4.5 Capitaliser sur l'expérience/Principaux défis
p77	3.4.6 Procédés de conversion des combustibles
p80	3.4.7 Matrice de faisabilité

p81	3.5 Autres matières premières oléagineuses (Oléagineux)
p81	3.5.1 Huile de coton
p83	3.5.2 Noix d'anacarde (CNSL)
p85	3.5.3 Noix de karité (Karité)
p86	3.5.4 Margousier
p87	3.5.5 Dattier du désert
p88	4. Développement et marché potentiel des matières premières
p88	4.1 Canne à sucre
p89	4.2 Sorgo
p90	4.3 Balles et paille de riz
p91	4.4 Herbe à éléphant
p91	4.5 Jatropha
p94	4.6 Noix d'anacarde
p95	4.7 Considérations financières et stratégiques
p96	5. Facteurs déterminants de succès
p96	5.1 Mobilisation des agriculteurs
p96	5.2 Sélection des semences et amélioration des plantes
p97	5.3 Essais agronomiques
p98	5.4 Intervention et participation du Gouvernement
p99	5.5 Coopération intragouvernementale
p101	5.6 Demande du marché et engagements de consommation du produit national
p101	5.7 Optimisation de la chaîne logistique
p104	5.8 Transfert de technologie
p105	6. Sources de financement
p105	6.1 Partenariats public-privé
p105	6.2 Revenus de l'exploitation aurifère : redistribution de la richesse naturelle
p107	6.3 Miser sur le reboisement et l'agroforesterie
p109	6.4 Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD+)
p110	6.5 Gestion du surcoût des SAF
p113	6.6 Détermination des coavantages de l'atténuation des changements climatiques
p116	7. Conclusions
p116	7.1 Hiérarchisation des matières premières
p117	7.2 Technologies de conversion des combustibles
p121	7.3 Changement d'affectation des terres et cycle de vie des GES
p122	7.4 Indicateur de suivi des carburants d'aviation alternatifs
p125	8. Feuille de route pour l'avenir
p125	A. Organisation structurelle
p127	B. Plan d'activités et mise en œuvre
p129	C. Financement
p133	D. Matière première
p134	E. Traitement et technologie
p134	F. Structure du marché et logistique
p136	G. Cadre réglementaire et politiques d'appui
p139	Bibliographie

ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

- ABDC** - Compétition de démonstration de biocarburants avancés
- AES** - Système environnemental en aviation
- AFTF** - Équipe de travail sur les carburants alternatifs
- ANAC** - Agence nationale de l'aviation civile
- ANADEB** - Agence nationale pour le développement des biocarburants
- ANEREE** - Agence nationale des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique
- ANOC** - African National Oil Corporation
- APER** - Plan d'action pour la réduction des émissions de CO₂
- APROJER** - Association pour la promotion du jatropha et des énergies renouvelables
- ASTM** - American Society for Testing and Materials
- AtJ** - Le procédé Alcohol-to-Jet
- ATM** - Gestion du trafic aérien
- BAfD** - Banque africaine de développement
- BCC** - Bureau de la coordination et de la coopération du projet
- Bep** - Baril équivalent pétrole
- BIRD** - Banque internationale pour la reconstruction et le développement
- BME** - Bureau de la mise en œuvre et de l'exécution du projet
- BMZ** - Ministère fédéral allemand de la coopération économique et du développement
- Bpj** - Barils/jour
- CAAF/1** - Première conférence de l'OACI sur l'aviation et les carburants alternatifs
- CAAF/2** - Deuxième conférence de l'OACI sur l'aviation et les carburants alternatifs
- CAAFI** - Initiative sur les carburants alternatifs de l'aviation commerciale
- SAF** - Carburants d'aviation durables
- CAEP** - Comité de la protection de l'environnement en aviation de l'OACI
- CCNUCC** - Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
- CCO** - Bureau de la coordination et de la coopération
- CDN** - Comité directeur national
- CE** - Conseil de l'entente
- CÉDÉAO** - Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest
- CEN-SAD** - Communauté des États sahélo-sahariens
- CHP** - Production combinée de chaleur et d'électricité
- CICAFIB** - Comité interministériel chargé de la coordination des activités de développement des filières biocarburants
- CIF-FIP** - Programme d'investissement forestier du Fonds d'investissement climatique (CIF FIP)
- CIRAD** - Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
- CJO** - Huile brute de jatropha
- CNRST** - Centre national de la recherche scientifique et technologique
- CNS** - Communications, navigation et surveillance
- CNSL** - Baume de cajou ou huile de coque de noix de cajou
- CNULCD** - Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification
- CO₂** - Dioxyde de carbone
- CO₂eq** - Équivalent en dioxyde de carbone
- CORSIA** - Régime de compensation et de réduction de carbone pour l'aviation internationale
- CPP** - Programme national de partenariat pour la gestion durable des terres
- CTFT** - Centre technique forestier tropical
- DARPA** - Agence pour les projets de recherche avancée de défense
- DDO** - Distillat pour gazole moteur
- Def Stan** - Norme 91-091 du Ministère de la défense britannique, Issue 09 (Turbocombustible, Type kérosène aviation, JET A-1)
- DFT** - Ministère britannique des transports
- DGM** - Distillat pour gasoil moteur
- DLR** - Agence aérospatiale allemande
- DOA** - Ministère américain de l'agriculture
- DOD** - Ministère américain de la défense
- DOE** - Ministère américain de l'énergie
- \$ É.-U.** - Dollar des États-Unis
- DSCH** - Transformation directe de sucres en hydrocarbures
- EE** - Efficacité énergétique
- EFPPA** - Association européenne des industries de traitement des graisses et des fondoirs
- EMAG** - Esters méthyliques d'acide gras
- ER** - Énergie renouvelable
- EU** - Union européenne
- EUEI** - Initiative de l'Union européenne pour l'énergie
- FAO** - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
- FCFA** - Franc de la Communauté financière d'Afrique
- FIE** - Fonds d'intervention pour l'environnement
- FIP** - Programme d'investissement forestier
- FNZ** - Fédération Nian Zwé
- FRL** - Niveau de maturité opérationnelle des carburants
- FSRL** - Taux de fiabilité de la matière première
- FT** - Procédé Fischer-Tropsch
- GCF** - Groupe de travail des gouverneurs sur le climat et les forêts
- GES** - Gaz à effet de serre
- GGGI** - Institut mondial pour la croissance verte
- GIEC** - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- GJ** - Gigajoule
- GPC** - Groupements de producteurs de coton
- GWS** - Sélection à l'échelle génomique
- H** - Hydrogène
- Ha** - Hectares

- HDI** - Indice du développement humain
- HEFA** - sters hydrotraités et acides gras
- HRJ** - Carburant renouvelable hydrotraité pour avion
- HVO** - Fioul lourd
- ICCT** - Conseil international des transports propres
- ICROA** - Alliance internationale pour la réduction et la compensation des émissions de carbone
- IEO** - Bureau de la mise en œuvre et de l'exécution des projets
- IFSET** - Outil d'estimation des économies de carburant de l'OACI
- ILUC** - Changement indirect d'affectation des terres
- INERA** - Institut national de l'environnement et de recherches agricoles
- IPS** - Service de promotion industrielle
- IRAM** - Institut de recherches et d'applications des méthodes de développement
- IRENA** - Agence internationale pour les énergies renouvelables
- IRSAT** - Institut de recherche en sciences appliquées et technologies
- ISFL** - Initiative du Fonds du carbone en vue de l'aménagement durable des forêts
- JMI** - Jatropha Mali Initiative
- JSC** - Tourteau de jatropha déshuilé
- Kg** - Kilogramme
- Km²** - Kilomètre carré
- LAE** - Laboratoire de l'aviation et de l'environnement
- LCA** - Analyse du cycle de vie
- LFO** - Mazout léger
- LIC** - Pays en développement à faible revenu
- mbar** - Millibar
- MBM** - Mesures basées sur le marché
- MIC** - Pays africains à revenu intermédiaire
- MIT** - Institut de technologie du Massachusetts
- MJ** - Mégajoule
- MRV** - Mesure, notification et vérification
- DSU** - Déchets solides urbains
- Mt** - Mégatonne
- MW** - Mégawatts
- N-P-K** - Azote-Phosphore-Potassium
- NREL** - Laboratoire national des énergies renouvelables
- OACI** - Organisation de l'aviation civile internationale
- OCDE** - Organisation de coopération et de développement économiques
- ODD** - Objectifs de développement durable (Nations Unies)
- ONG** - Organisation non gouvernementale
- ONU-REDD** - Programme de collaboration des Nations Unies sur la réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement
- PIB** - Produit intérieur brut
- PNDES** - Plan national de développement économique et social
- PNUD** - Programme des Nations Unies pour le développement
- PNUE** - Programme des Nations Unies pour l'environnement
- PPM** - Parties par millions
- PPO** - Huile végétale pure
- PPP** - Partenariat public-privé
- RACGAE** - Régie administrative chargée de la gestion de l'assistance en escale
- REDD+** - Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts
- REEEP** - Partenariat pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (Renewable Energy and Energy Efficiency Partnership)
- REM** - Programme pionnier REDD
- ROPPA** - Réseau des organisations paysannes et des producteurs agricoles
- SARP** - Normes et pratiques recommandées
- SCADD** - Stratégie de croissance accélérée et de développement durable
- SDR** - Stratégie de développement rural
- SEFA** - Fonds des énergies durables pour l'Afrique
- SIP** - Isoparaffines synthétiques
- SIP-HFS** - Isoparaffines synthétiques produites par hydrotraitement de sucres fermentés
- SN-Sosuco** - Nouvelle société sucrière de la Comoé
- SONABEL** - Société nationale d'électricité du Burkina Faso
- SONABHY** - Société nationale burkinabè d'hydrocarbures
- SP/CONEDD** - Secrétariat permanent du Conseil national pour l'environnement et le développement durable
- STJ** - Conversion de sucre en carburéacteur
- T** - Tonnes
- T1** - Niveau de technologie #1
- T2** - Niveau de technologie #2
- TER** - Technologies écologiquement rationnelles
- TKP** - Tonne-kilomètre payante
- TPP** - Taxe sur les produits pétroliers
- TSE** - Effluents des eaux usées épurées
- UA** - Union africaine
- UE** - Union européenne
- UEMOA** - Union économique et monétaire ouest-africaine
- UNAPROFIJA** - Union nationale pour la promotion de la filière jatropha Curcas (National Union for the promotion of the Jatropha value chain)
- UNPA** - Union nationale des producteurs d'anacarde
- VCS** - Norme sur les émissions de carbone vérifiées
- WASCAL** - Centre ouest-africain de service scientifique sur le changement climatique et l'utilisation adaptée des terres

LISTE DES FIGURES

- Figure 1** Contribution des mesures visant à réduire les émissions nettes de CO₂ de l'aviation p14
- Figure 2** Disponibilité réelle de biomasse au Burkina Faso p20
- Figure 3** Disponibilité potentielle de biomasse au Burkina Faso p21
- Figure 4** Le Burkina Faso, pays enclavé dans la région de l'Afrique sahélienne p24
- Figure 5** Union européenne, commerce avec le Burkina Faso p25
- Figure 6** Zones agroécologiques p26
- Figure 7** Schémas des migrations des isohyètes p27
- Figure 8** Augmentation régulière des températures à Ouagadougou p27
- Figure 9** Ventilation des sources de matières premières pour la production d'électricité p31
- Figure 10** Corridors routiers jusqu'aux ports maritimes internationaux p33
- Figure 11** Principales zones de production de canne à sucre p36
- Figure 12** Production de bioéthanol à partir de la canne à sucre et de mélasse p37
- Figure 13** Principales zones de production de sorgho p40
- Figure 14** Principales zones de production rizicole p44
- Figure 15** Procédé de conversion des balles de riz en énergie p46
- Figure 16** Principales zones de production de blé d'Inde p48
- Figure 17** Zones agroécologiques p52
- Figure 18** Zones d'exclusion p52
- Figure 19** Procédé de conversion thermochimique p54
- Figure 20** Procédés de conversion biochimique p55
- Figure 21** Schéma de procédé de la conversion des déchets solides urbains en carburant d'aviation alternatif p57
- Figure 22** Utilisation potentielle de graisses de déchets animaux selon l'Association européenne des industries de traitement des graisses et des fondoirs (EFPRA) p60
- Figure 23** Proportion de graisse animale fondue p60
- Figure 24** Schéma de procédé du carburéacteur vert UOP p61
- Figure 25** Schéma de principe d'une usine de production de biodiesel à partir de multiples matières premières p63
- Figure 26** Rapports de poids fruits/graines de jatropha et commercialisation des sous-produits p73
- Figure 27** Ventilation de la valeur énergétique des composants du jatropha p74
- Figure 28** Usine de fabrication de biodiesel à partir de multiples matières premières (schéma) p79
- Figure 29** Principales zones de production de coton p81
- Figure 30** Noix de cajou dans sa coque p83
- Figure 31** Principales zones de production de noix de cajou p84
- Figure 32** Développement et marché potentiel de la canne à sucre p88
- Figure 33** Développement et marché potentiel du sorgho p89
- Figure 34** Développement et marché potentiel des résidus de riz p90
- Figure 35** Production rizicole et potentiel d'irrigation dans la vallée du Sourou p90
- Figure 36** Développement et marché potentiel de l'herbe à éléphant p91
- Figure 37** Développement et marché potentiel du jatropha p91
- Figure 38** Ceinture jatrophiq ue p92
- Figure 39** Principales zones de culture du jatropha p92
- Figure 40** Écorégions du Burkina Faso p93
- Figure 41** Développement et marché potentiel de l'anacarde p94
- Figure 42** L'effet d'hétérosis p97
- Figure 43** Chaîne logistique pour les carburants d'aviation durables p103
- Figure 44** Combl er l'écart entre le prix et les éléments de coût des carburants alternatifs p111
- Figure 45** Disponibilité potentielle de biomasse p116
- Figure 46** Faciliter la production de SAF en atteignant le risque d'investissement p118
- Figure 47** Le choix des technologies de procédés : aperçu de sa complexité et des coûts p119
- Figure 48** Indice de mise en œuvre des carburants d'aviation alternatifs p123,124
- Figure 49** Environnement favorable et organisation structurelle p126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Inventaire de la biomasse p21
Tableau 2	Synopsis des taux de conversion d'énergie sous-jacents p22
Tableau 3	Procédés de conversion approuvés comme annexes de la spécification ASTM D7566 p22
Tableau 4	Obstacles au commerce p33
Tableau 5	Paille et balles de riz : ratio résidu/grain p45
Tableau 6	Statistiques des abattoirs pour Bobo-Dioulasso p60
Tableau 7	Comparaison des propriétés essentielles du soja et du jatropha p74
Tableau 8	Scénarios et composition de la valeur des cultures intermédiaires p76
Tableau 9	Procédés de conversion de carburants alternatifs actuellement soumis au processus d'approbation ASTM p119
Tableau 10	Installations de fabrication de carburants d'aviation et de diesel vert pour l'aviation opérationnelles ou prévues aux États Unis (2017) p120

LISTE DES PHOTOS

Photo 1	La rareté de la ressource en eau affecte la sécurité alimentaire p28
Photo 2	Les sécheresses récurrentes, l'aggravation de la désertification et de la déforestation affectent gravement les activités agricoles et contribuent à la dégradation des sols p29
Photo 3	Journée nationale du paysan 2017, Kaya (Burkina Faso) p30
Photo 4	Méthode traditionnelle de ramassage de bois combustible p30
Photo 5	Infrastructure routière p34
Photo 6	Plantation burkinabè de canne à sucre p35
Photo 7	Ramassage de bois combustible par des femmes burkinabè p50
Photo 8	La collecte et le tri des déchets engendrent des défis logistiques p56
Photo 9	Autres installations de conversion et de raffinage de carburants alternatifs p61
Photo 10	Grappe de jatropha p65
Photo 11	Graines de jatropha à haute teneur énergétique p66
Photo 12	Belwet Biocarburant – Installations de foulage du biocarburant et d'un traitement du biodiesel, Kossodo p67
Photo 13	Pépinière de jatropha à grande échelle à 30 km de Ouagadougou p71
Photo 14	Échantillons de cultures intermédiaires p71
Photo 15	Aire de trafic à l'aéroport de Ouagadougou p78
Photo 16	Installations de SN CITEC à Bobo-Dioulasso p83
Photo 17 et 18	Décorticage manuel de noix d'anacarde à l'usine Anatrans située à l'extérieur de Bobo-Dioulasso p84
Photo 19	Noix de karité p85
Photo 20	Dattier du désert et baobabs polyvalents près de Yako, Burkina Faso p87
Photo 21	Exploitation aurifère artisanale au Burkina Faso p105
Photo 22	Récolte de cultures destinées à la bioénergie et de cultures vivrières p117

1. INTRODUCTION

Les émissions de l'aviation internationale comptent actuellement pour 1,3 % du total des émissions de CO₂ d'origine anthropique et on prévoit qu'elles augmenteront en raison de la croissance continue du transport aérien. L'OACI et ses États membres reconnaissent l'importance critique de continuer à jouer un rôle de premier plan afin de limiter ou de réduire les émissions de l'aviation qui contribuent aux changements climatiques dans le monde. À sa 39e session, l'Assemblée de l'OACI a réaffirmé les objectifs ambitieux mondiaux pour le secteur de l'aviation internationale, à savoir améliorer le rendement du carburant de 2 % par an et maintenir les émissions nettes de carbone, à partir de 2020, au même niveau établi par l'Assemblée à 37e session en 2010. L'Assemblée a reconnu également les travaux entrepris pour étudier un objectif ambitieux mondial à long terme pour l'aviation internationale au vu des objectifs de température de 2 °C et 1,5 °C prévus par l'Accord de Paris et que davantage d'objectifs ambitieux sont nécessaires pour mettre l'aviation sur une voie de développement durable, car il est improbable que l'objectif ambitieux d'une amélioration de 2 % par an du rendement du carburant permette d'atteindre le niveau de réduction nécessaire pour stabiliser puis réduire la contribution des émissions de l'aviation aux changements climatiques.

Afin de réaliser les objectifs ambitieux mondiaux de l'aviation internationale, comme il est indiqué dans la **figure 1** ci-dessous, il faut une approche globale, consistant en un panier de mesures, notamment dans les domaines de la technologie et des spécifications, des carburants alternatifs durables (SAF), des améliorations opérationnelles et des mesures basées sur le marché (MBM) visant à réduire les émissions

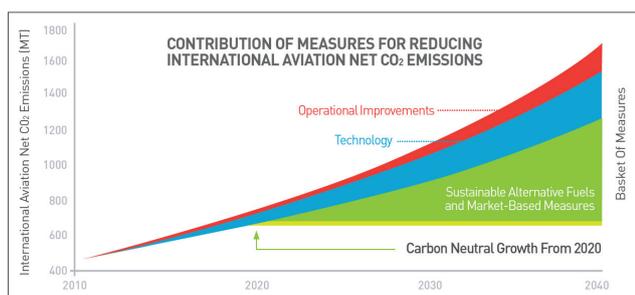


FIGURE 1

Contribution des mesures visant à réduire les émissions nettes de CO₂ de l'aviation²

Source: OACI

La réduction de la libération des émissions de CO₂ dans l'atmosphère est la principale incitation à la promotion de l'utilisation et du déploiement des SAF en aviation. La combustion des SAF donne lieu à des émissions de CO₂ ; toutefois, ce

carbone provient de plantes et sera donc absorbé par des plantes en croissance, dans un système en circuit fermé. Ce CO₂ étant réabsorbé, le SAF offre un avantage environnemental sur le cycle de vie complet du produit, par comparaison avec la production et la combustion du carburéacteur conventionnel. Selon la filière SAF, les SAF peuvent donner jusqu'à 80 pour cent de réduction des émissions, par rapport au carburéacteur conventionnel.

Au-delà des réductions de CO₂, il pourrait aussi y avoir des avantages supplémentaires, par exemple la promotion d'industries et systèmes de production nationaux nouveaux, l'amélioration de la compétitivité des secteurs de l'aviation et du tourisme dans l'État sur le long terme, ainsi qu'une amélioration de la qualité de l'air local grâce à une diminution des matières particulaires (MP)³ émises par les aéronefs⁴.

Avec l'interconnexion entre l'énergie et le développement durable, la bioénergie⁵ est une illustration parfaite de la façon dont l'énergie peut être reliée à d'autres domaines, notamment la qualité et la disponibilité de l'eau, les écosystèmes, la santé publique, la sécurité alimentaire, l'éducation et les moyens de subsistance, et de comment valoriser de multiples avantages, dans la mesure où le développement est correctement planifié et géré. Grâce à l'utilisation des carburants alternatifs pour les transports et la bioénergie, le développement de bioénergie durable et moderne peut être encouragé à la fois à petite échelle pour utilisation locale dans des applications ou miniréseaux indépendants et à grande échelle pour la production et la banalisation la bioénergie. En même temps, la bioénergie moderne peut remplacer des systèmes bioénergétiques inefficaces et moins durables.

1.1 L'OACI ET L'ENVIRONNEMENT

L'OACI est une institution spécialisée de l'ONU, créée par les États en 1944 et chargée de gérer l'administration et la gouvernance de la Convention relative à l'aviation civile internationale (Convention de Chicago).

L'OACI travaille avec les 191 États membres de la Convention et des groupes de l'industrie pour parvenir à des consensus sur les normes et pratiques recommandées et politiques pour l'aviation civile internationale, à l'appui d'un secteur d'aviation civile sûr, efficace, sécurisé, économiquement durable, et respectueux de l'environnement. Ces SARP et politiques sont utilisées par les États membres de l'OACI pour s'assurer que leurs opérations et réglementations locales d'aviation civile sont conformes aux normes mondiales, ce qui permet l'exploitation en toute sécurité

² Environnement OACI : GFAAF – Cadre mondial de l'OACI pour les carburants d'aviation alternatifs. Extrait de <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/default.aspx>

³ À l'échappement des moteurs, les émissions de particules consistent principalement en des émissions de suie ultrafine ou de carbone noir. On sait que les émissions de matières particulaires (MP) ultrafines ont des effets négatifs sur la santé et le climat (ICAO. Environmental Report: Aviation and Climate Change. Tiré de <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>)

⁴ S. Christie, 2016. Rapport sur les émissions et base de données des paramètres clés de performance des systèmes. s.l.: D4.9 ITAKA project. 3 On entend par bioénergie l'utilisation bioénergétique d'une matière d'origine biologique, comme la biomasse ou les biocarburants

⁵ Nogueira, L. et al., 2015. Développement durable et innovation. Dans: Bioenergy & Sustainability: Bridging the Gaps. [Bioénergie & durabilité : Comblant le fossé]. Paris: Cedex, pp. 184-217

et de manière fiable dans toutes les régions du monde de plus de 100 000 vols quotidiens du réseau aéronautique mondial⁶.

La 39e session de l'Assemblée de l'OACI a réitéré les objectifs ambitieux mondiaux pour le secteur de l'aviation internationale, qui visent à améliorer le rendement du carburant de 2 % par an et à maintenir les émissions nettes de carbone au même niveau à partir de 2020, et elle a reconnu les travaux entrepris pour étudier un objectif ambitieux mondial à long terme pour l'aviation internationale au vu des objectifs de température de 2 °C et 1,5 °C prévus par l'Accord de Paris.

La 39e session de l'Assemblée a également reconnu qu'il est peu probable que l'objectif ambitieux d'une amélioration de 2 % par an du rendement du carburant permette d'atteindre le niveau de réduction nécessaire pour stabiliser puis réduire la contribution absolue des émissions de l'aviation aux changements climatiques et que des objectifs plus ambitieux sont nécessaires pour mettre l'aviation sur une voie de développement durable. Pour réaliser les objectifs ambitieux mondiaux de l'aviation internationale, une approche globale, consistant en un ensemble de mesures, a été définie, comme suit :

- Mise au point de technologies liées aux aéronefs – acquisition de nouveaux aéronefs et de nouveaux équipements pour la modification en rattrapage d'aéronefs existants, grâce à des technologies à plus faible consommation de carburant.
- Carburants alternatifs – investissements dans la mise au point et le déploiement de carburants d'aviation alternatifs.
- Amélioration de l'utilisation de la gestion du trafic aérien et de l'utilisation des infrastructures – amélioration de l'utilisation des systèmes de communications, navigation et surveillance/gestion du trafic aérien (CNS/ATM) afin de réduire la consommation de carburant.
- MBM – travaux de recherche et sensibilisation concernant des mesures basées sur le marché à faibles coûts visant à réduire les émissions comme les échanges de droits d'émission, les prélèvements liés aux émissions et la compensation des émissions.

Toutes ces mesures, outre qu'elles contribuent à atteindre une croissance neutre en carbone, font progresser le développement social et économique associé aux objectifs de développement durable (ODD).

L'OACI a lancé un programme volontaire par lequel les États sont invités à élaborer un plan d'action national sur la réduction des émissions de CO₂ provenant de l'aviation internationale et comprenant les mesures d'atténuation ci-dessus pendant toute sa phase de mise en œuvre. Ce programme encourage les États à rendre compte à l'OACI de leurs activités d'atténuation du CO₂ et promeut une communication améliorée sur les

questions environnementales au sein de l'industrie de l'aviation. Les SAF ont été retenus comme étant une importante mesure d'atténuation pour aider les États à réaliser les objectifs ambitieux de l'OACI et notamment une croissance neutre en carbone⁷. En matière de carburants d'aviation alternatifs, l'accent est mis spécifiquement sur les "carburants interchangeableables", qui sont des carburants pleinement compatibles avec les exigences de certification des carburants, l'infrastructure actuelle de transport, de distribution et d'entreposage du carburant, ainsi qu'avec les moteurs d'aéronefs actuels. Ces carburants sont traités exactement de la même façon que le carburéacteur actuel. L'OACI participe activement à des activités visant à promouvoir et à faciliter l'émergence de carburants interchangeableables dans les carburants d'aviation durables en échangeant et en diffusant de l'information, en favorisant le dialogue entre les États et les parties prenantes, et en réalisant des travaux dédiés à la demande des États membres de l'OACI, pour servir de base à la prise de décisions⁸.

L'OACI apporte également son soutien aux États membres dans leurs efforts d'amélioration de la performance environnementale de l'aviation. L'OACI a élaboré un éventail de "normes et pratiques recommandées (SARP), de politiques et d'orientations sur l'application de mesures intégrées"⁹ afin de réaliser les trois grands objectifs qu'elle avait adoptés en 2004 :

- a) limiter ou réduire le nombre de personnes exposées à un niveau élevé de bruit des aéronefs ;
- b) limiter ou réduire l'incidence des émissions de l'aviation sur la qualité de l'air locale ;
- c) limiter ou réduire l'incidence des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation sur le climat mondial.

Le Comité de la protection de l'environnement en aviation (CAEP), Comité technique du Conseil de l'OACI, est chargé de la plupart de ces travaux, en aidant le Conseil de l'OACI à formuler de nouvelles politiques et à adopter de nouvelles SARP liées au bruit et aux émissions des aéronefs et, de manière plus générale, aux effets environnementaux de l'aviation¹⁰. Ce comité technique se compose de 24 États membres et de 16 observateurs d'États et d'organisations internationales qui représentent les intérêts environnementaux du secteur de l'aviation.

En outre, l'OACI a mis au point des outils et des éléments indicatifs pour aider les États membres à s'attaquer aux problèmes des émissions de l'aviation internationale^{11,12} notamment :

- i. Le Doc OACI 9988, Orientations relatives à l'élaboration des plans d'action des États sur la réduction des émissions de CO₂ – inclut des orientations sur une démarche progressive pour le calcul du scénario de base, le panier de mesures d'atténuation et la quantification des mesures sélectionnées.

⁶ OACI : Au sujet de l'OACI. Tiré de: <http://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>

⁷ Pour davantage de renseignements sur les objectifs ambitieux de l'OACI, voir <http://www.icao.int/annual-report-2013/Pages/progress-on-icaos-strategic-objectives-strategic-objective-c1-environmental-protection-global-aspirational-goals.aspx>

⁸ Environnement OACI: Carburants alternatifs : Questions et réponses. Tiré de <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/AltFuel-IcaoAction.aspx>

⁹ Environnement OACI: Protection environnementale. Tiré de <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>

¹⁰ Environnement OACI: Comité de la protection de l'environnement en aviation (CAEP) de l'OACI. Tiré de: <http://www.icao.int/ENVIRONMENTAL-PROTECTION/Pages/CAEP.aspx>

¹¹ Environnement OACI: Tiré de <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>

¹² Environnement OACI: Tiré de <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>

- ii. Outil de détermination des avantages environnementaux – Cet outil est un cadre pour automatiser le calcul des émissions de base de CO₂ de l’aviation internationale et pour l’estimation des résultats attendus, obtenus par la mise en œuvre des mesures d’atténuation choisies dans le panier de mesures de l’OACI.
- iii. Calculateur d’émissions de carbone de l’OACI – Ce calculateur permet aux États d’estimer la partie de l’inventaire des émissions de CO₂ attribuable aux voyages aériens, en utilisant uniquement un volume limité d’information d’entrées.
- iv. Outil d’estimation des économies de carburant de l’OACI (IFSET) – Cet outil peut être utilisé pour estimer les économies de carburant provenant de mesures opérationnelles d’une manière conforme aux modèles approuvés.
- v. Calculateur des éco-réunions de l’OACI – Pour appuyer la prise de décisions pour choisir le lieu d’une réunion offrant une empreinte carbone minimale due aux voyages aériens
- vi. Site des plans d’action pour la réduction des émissions de CO₂ (APER) – Site interactif réservé aux coordonnateurs des plans d’action nationaux pour les aider à préparer et à communiquer leurs plans d’action à l’OACI.
- vii. Systèmes environnementaux en aviation (AES) – Système efficace de suivi des émissions de CO₂ pour l’aviation internationale, mis au point dans chaque État bénéficiaire du projet d’assistance conjoint OACI UE.

1.2 PROJET OACI – UNION EUROPÉENNE (UE)

Projet d’assistance OACI-UE : Renforcement des capacités pour l’atténuation des émissions de CO₂ provenant de l’aviation internationale.

Le 17 décembre 2013, l’OACI et l’Union Européenne ont signé un accord pour mettre en œuvre le **Projet d’assistance OACI-UE, Renforcement des capacités pour l’atténuation des émissions de CO₂ de l’aviation internationale**. Ce projet vise à aider 14 États sélectionnés en Afrique et dans les Caraïbes pour réduire les émissions de CO₂ du secteur de l’aviation. Le Burkina Faso est l’un des États bénéficiaires de ce projet d’assistance.

Le **Projet d’assistance OACI-UE, Renforcement des capacités pour l’atténuation des émissions de CO₂ de l’aviation internationale** est un programme de 4 ans visant à appuyer 14 États membres sélectionnés en Afrique et dans les Caraïbes. Il offre des orientations, des ressources pour préparer des études de faisabilité et l’accès à des ressources financières dans le cadre de partenariat avec des parties intéressées, à l’appui de la mise en œuvre des mesures d’atténuation décrites dans leurs plans d’action. L’objectif suprême est de contribuer à l’atténuation des émissions de CO₂ de l’aviation internationale en mettant en œuvre des activités de renforcement des capacités qui appuieront la mise en place de transports aériens à faibles émissions de carbone et la durabilité environnementale. Le projet d’assistance OACI EU est articulé autour des trois domaines d’activités ci après :

- a) améliorer la capacité des autorités nationales de l’aviation

- civile d’élaborer leur plan d’action de réduction des émissions de CO₂ de l’aviation internationale ;
- b) élaborer un système efficace de suivi des émissions de CO₂ provenant de l’aviation internationale dans chaque État membre sélectionné ;
- c) identifier, évaluer et mettre en œuvre partiellement des mesures d’atténuation prioritaires, en particulier ces mesures qui figurent dans les plans d’action nationaux et qui peuvent être reproduites dans d’autres États.

Le modèle peut être reproduit et adapté à des pays supplémentaires, créant ainsi un système mondial de coopération pour prendre des mesures visant à réduire les émissions de CO₂.

1.3 MÉTHODOLOGIE DE L’ÉTUDE DES CARBURANTS D’AVIATION ET MANDAT DE L’OACI

La 38e session de l’Assemblée de l’OACI, en 2013, a reconnu les nombreuses mesures que les États membres de l’OACI ont prises et qu’ils ont l’intention de prendre à l’appui de la réalisation des objectifs mondiaux ambitieux, notamment l’élaboration et le déploiement des SAF, et elle a encouragé la poursuite de tels efforts.

L’Assemblée a également demandé aux États de reconnaître les approches existantes pour évaluer la durabilité de tous les carburants alternatifs en général, notamment ceux à utiliser dans l’aviation, qui devraient :

- a) parvenir à une réduction nette des émissions de GES sur la base du cycle de vie ;
- b) respecter les régions de grande importance pour la biodiversité, la conservation et les retombées que tirent les personnes des écosystèmes, conformément aux règlements internationaux et nationaux ;
- c) contribuer au développement social et économique local, une concurrence avec les produits alimentaires et l’eau devant être évitée.

Un carburant alternatif n’est pas nécessairement durable. Pour qu’un carburant alternatif soit considéré comme carburant durable, il lui faut répondre à des critères de durabilité. L’OACI élabore actuellement des critères de durabilité dans le cadre des travaux sur le régime de compensation et de réduction de carbone pour l’aviation internationale (CORSA).

La première génération de carburants alternatifs, que l’on appelle généralement les “biocarburants”, était produite à partir de sources biosynthétiques, comme les cultures, qui peuvent faire l’objet de préoccupations supplémentaires de durabilité au-delà de la réduction de carbone (par exemple la compétition avec l’alimentation et l’eau, les modifications de l’utilisation des terrains). Toutefois, les techniques actuelles permettent la production de carburants à partir de sources non biosynthétiques, comme les déchets municipaux, les huiles de cuisson usagées et les résidus agricoles qui soulèvent moins de problèmes de durabilité. Cette diversification des matières premières facilite la

production de SAF car il y a une dépendance moindre vis-à-vis de ressources naturelles spécifiques, permettant la mise en place d'industries des SAF dans plusieurs États, notamment les pays en développement et développés. Elle peut également permettre la production de SAF plus près des aéroports, ce qui réduira les coûts associés au transport du carburant. Cette souplesse est censée augmenter la production de SAF.

L'Assemblée a également demandé au Conseil de l'OACI "d'adopter des mesures pour assurer la durabilité des carburants alternatifs pour l'aviation, en tirant parti des approches existantes ou d'une combinaison d'approches, de surveiller, au niveau national, la durabilité de la production des carburants alternatifs pour l'aviation".

Pour répondre à ces demandes de l'Assemblée, en 2013 le Comité de la protection de l'environnement en aviation (CAEP) de l'OACI a créé un groupe d'experts, l'Équipe de travail sur les carburants alternatifs (AFTF), pour qu'elle apporte une contribution technique concernant le remplacement des carburants d'aviation actuels par des SAF. Au cours du cycle CAEP/10 (2013 à 2016), l'AFTF a été chargée de fournir des renseignements sur les carburants alternatifs, en vue de leur inclusion dans les projections de tendances environnementales de l'OACI. Cette démarche incluait la définition d'une méthodologie d'évaluation des émissions des carburants pendant le cycle de vie, et des projections de scénarios pour la production de carburant alternatif jusqu'en 2050, l'objectif final étant d'évaluer la gamme possible des réductions des émissions dues à l'utilisation de carburants d'aviation alternatifs. Les résultats définis de cette analyse ont été présentés lors de la 39e session de l'Assemblée de l'OACI en 2016.

En outre, le CAEP travaille actuellement sur le calcul des émissions liées à la modification de l'affectation des terres et qui sont attribuables à des carburants alternatifs mis au point à partir de diverses matières premières, le calcul leur valeur par défaut d'émissions du cycle de vie, à élaborer des éléments indicatifs sur les politiques potentielles et à élaborer un ensemble de critères en matière de durabilité que les carburants alternatifs doivent respecter afin d'être considérés comme durables par l'OACI. Ces critères de durabilité sont actuellement à l'étude par l'OACI.

En octobre 2017, l'OACI a convoqué sa deuxième Conférence sur l'aviation et les carburants alternatifs (CAAF/2) à Mexico (Mexique). Faisant fond sur les résultats de la première Conférence CAAF de l'OACI (CAAF/1) tenue en 2009, la Conférence CAAF/2 est convenue d'une Déclaration, entérinant la Vision 2050 pour les carburants d'aviation durables de l'OACI comme voie mobilisatrice vivante et appelant les États, l'industrie et autres parties prenantes à faire en sorte qu'une proportion importante du carburant soit remplacée par des SAF d'ici 2050, et que l'aviation civile internationale réduise les émissions de carbone de manière significative tout en poursuivant toutes les possibilités dans le panier de mesures d'atténuation afin de réduire les émissions en

tant que de besoins. La Conférence est convenue en outre que la vision serait revue régulièrement dans le cadre d'un processus d'inventaire et qu'elle serait élaborée à la prochaine Conférence sur l'aviation et les carburants alternatifs, qui doit se tenir au plus tard en 2025.

1.4 DÉFINIR LA PROBLÉMATIQUE

La combustion de 1 kilogramme (kg) de carburéacteur génère environ 3,16 kg de CO₂, le GES le plus abondant. Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration atmosphérique de CO₂ a augmenté et est passée de 280 parties par million (ppm) en 1850 à environ 400 ppm en 2015¹³. Aujourd'hui, l'aviation génère environ 2,5 % des émissions de CO₂ liées à l'utilisation d'énergie. L'industrie aéronautique produit aux alentours de 800 millions de tonnes d'équivalent dioxyde de carbone (équivalent CO₂) et est responsable d'à peu près 12 % des émissions du transport mondial¹⁴.

La part du Burkina Faso, et plus généralement la part globale de l'Afrique en termes d'émissions, est faible. Sur la base de tous les vols internationaux à destination et en provenance du Burkina Faso, le pays ne produit que 0,02 % des émissions de CO₂ de l'aviation civile internationale. Pris dans son intégralité, le continent africain n'est responsable que de moins de 4 % de toutes les émissions associées de l'aviation¹⁵. Toutefois, l'atténuation des changements climatiques n'est ni une question de responsabilité ni une causalité ou une responsabilité. Des millions de personnes sont menacées par des phénomènes météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses, inondations erratiques) et par l'insécurité alimentaire, sans protection au niveau des infrastructures. Les dangers des changements climatiques font payer un lourd tribut à la population en termes de vies et de moyens de subsistance au Burkina Faso, en ce sens que certains aspects de la vie économique et agricole quotidienne sont sévèrement touchés. En cas de nouvelles détériorations des conditions de vie, de la vulnérabilité liée à la pauvreté et de l'intégrité environnementale en raison de l'accélération des changements climatiques, cela pourrait également avoir une incidence négative sur les flux migratoires à grande échelle. Selon de nombreux experts, l'impact des changements climatiques comme facteurs de migrations humaines dans un avenir proche devrait éclipser tous les autres facteurs. Actuellement, le plus grand corridor migratoire en Afrique sub saharienne s'étend du Burkina Faso jusqu'à la Côte d'Ivoire. Les migrations vers l'Europe pour des raisons économiques augmentent rapidement.

Compte tenu des graves conséquences des changements climatiques, qui sont réelles et généralisées au Burkina Faso, des mesures urgentes s'imposent. Il est donc nécessaire de recenser les mesures et politiques efficaces qui peuvent contribuer à la réduction des émissions de GES. Aussi petites que puissent paraître les mesures d'atténuation individuelles dans un contexte global,

¹³ Martin Kaltschmitt/ Ulf Neuling (ed.), *Biokerosene, Status and Prospects Biokérosène, État et perspectives*, Hamburg 2018; Christopher J. Chuck (ed.), *Biofuels for Aviation, Feedstocks, Technology and Implementation* [Biocarburants pour l'aviation, matières premières, technologies et mise en œuvre] 2016; Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA), *BIOFUELS FOR AVIATION - TECHNOLOGY BRIEF* [BIOCARBURANTS POUR L'AVIATION - PRÉCIS TECHNIQUE], Jan. 2017

¹⁴ Voir: OACI, *Onboard a Sustainable Future* [Vers un avenir durable], ICAO ENVIRONMENTAL REPORT 2016, Aviation and Climate Change, Chapter 4, p.97-176.

¹⁵ Voir par exemple Scott Fields, *Continental Divide: Why Africa's Climate Change Burden Is Greater* [Pourquoi le fardeau des changements climatiques est plus lourd en Afrique], *Environmental Health Perspectives* 2005 Aug; 113(8): A534-A537

tous les efforts qui servent à réduire ou à éviter les émissions de GES sont des contributions valides, qu'ils soient entrepris aux fins de la protection de l'environnement, de la sécurité alimentaire, du développement durable, de la croissance verte ou de la neutralité climatique de l'aviation internationale. Compte tenu des conditions et limitations locales au Burkina Faso, la culture de plantes énergétiques et la production de biocarburants sont une occasion efficace de faire face de manière active aux conséquences négatives des changements climatiques, tout en mettant en œuvre des mesures d'accompagnement qui peuvent arrêter, sinon inverser le processus de dégradation des sols, de désertification et de déforestation. À cet égard, l'objectif ambitieux de l'OACI d'une croissance neutre en carbone à partir de 2020, qui est au centre de la justification du CORSIA, offre la possibilité au Burkina Faso de hiérarchiser et de mettre en œuvre des mesures d'atténuation effectives.

Les SAF peuvent jouer et joueront un rôle essentiel dans la réduction des émissions de CO₂ du transport aérien. La forte croissance continue prévue de la demande de transport aérien, soit environ 5 % par année pour les prochaines décennies, ne peut être compensée uniquement par des améliorations de l'efficacité des carburants. Des progrès technologiques et opérationnels ne peuvent pas réduire suffisamment les émissions de l'aviation pour répondre à l'objectif de l'OACI d'une croissance neutre en carbone. Indépendamment de la technologie, les améliorations des trajectoires de vol et de l'infrastructure, il n'y a toujours pas de solutions de remplacement à l'introduction progressive des SAF si on veut réduire dans le temps l'impact environnemental de l'aviation. Ainsi, la seule et la plus forte possibilité de décarboniser les voyages aériens est de remplacer les carburateurs par des SAF. Les conclusions de l'OACI indiquent qu'avant de tenir compte de la contribution des compensations du carbone, le gros des réductions d'émissions nécessaires pour l'aviation internationale devra venir du passage aux SAF. La Résolution A39-3 de l'OACI affirme la préférence pour l'utilisation de carburants alternatifs, qui offrent des avantages sur le plan de l'environnement par rapport aux mesures basées sur le marché.

Lors de la deuxième Conférence sur l'aviation et les carburants alternatifs (CAAF/2) qui s'est tenue à Mexico en octobre 2017, l'OACI a recherché un mandat explicite pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un mécanisme visant à garantir un passage sans heurts de l'utilisation de MBM mondiales à l'utilisation des SAF, comme moyen de garantir la faisabilité à long terme de l'objectif ambitieux de maintenir les émissions nettes de CO₂ mondiales provenant de l'aviation internationale à partir de 2020 au même niveau.

Toutefois, la commercialisation des SAF n'en est encore qu'à ses débuts, en raison de divers défis économiques et commerciaux. Les défis de l'élaboration d'un carburant efficace sont importants, car les critères exigeants en matière de carburants d'aviation ne sont pas satisfaits par les biocarburants traditionnels comme le biodiesel et le bioéthanol. En plus des normes de certification technique, la disponibilité de matières premières convenables ou de biomasse au bon endroit, pour le bon prix et en quantité voulue, pose un défi supplémentaire.

1.5 ACCENT SUR LA MATIÈRE PREMIÈRE

Les carburants alternatifs s'entendent généralement de carburants interchangeable dérivés de sources de matières premières qui peuvent remplacer le carburant d'aviation sans qu'il soit nécessaire de modifier les moteurs d'aéronefs ou l'infrastructure de distribution de carburants. En conséquence, les carburants alternatifs sont devenus un élément clé de la stratégie de l'industrie de l'aviation pour réduire les impacts environnementaux.

Pour se conformer aux lignes directrices et aux exigences juridiques de l'industrie, les parties prenantes de l'aviation, notamment les gouvernements, les chercheurs, les sociétés de biocarburants, les organismes agricoles, le milieu universitaire et l'industrie de raffinage de pétrole collaborent pour mettre au point des solutions technologiques alternatives qui peuvent produire des carburants alternatifs avec de moindres émissions de GES.

Principalement, les carburants alternatifs doivent satisfaire à des spécifications physiques et chimiques internationales (par exemple ASTM et Def Stan), afin de pouvoir être des carburants interchangeables de remplacement des carburants d'aviation existants. La viabilité commerciale globale reste un souci principal pour l'utilisation à grande échelle et la commercialisation, mais l'aptitude du secteur de l'aviation à respecter les objectifs de production de SAF et de réduction des GES dépend au bout du compte de la quantité de matières premières durables qui sera disponible pour le secteur. La disponibilité de matières premières est l'un des premiers facteurs de coûts et l'un des plus importants obstacles à surmonter dans la mise à l'échelle de la production de SAF. La disponibilité et le coût des matières premières sont essentiels pour la faisabilité et la viabilité économique de chaque activité de traitement de la biomasse, indépendamment du produit final. L'approvisionnement en matières premières, qui représente l'un des plus gros composants de coûts dans la production des SAF, est encore aggravé par le fait qu'il y a des utilisations concurrentes pour la biomasse, par exemple la chaleur, l'électricité et les produits chimiques. Chaque matière première a des avantages et des inconvénients en termes de coûts, de disponibilité, de rendements, etc.

Avant d'aborder toute discussion sur la production de SAF, les ressources en matières premières disponibles et appropriées devront être examinées de manière approfondie et identifiées. L'évaluation du potentiel de matières premières et la mise au point de carburants d'aviation ne peuvent être examinées isolément. Il ne s'agit pas d'une opération autonome, mais plutôt d'une composante intégrale d'un processus plus complexe, à plusieurs volets, qui comprend également des aspects socio-économiques, climatiques et politiques. Cela s'applique d'autant plus aux pays en développement comme le Burkina Faso, où les défis liés à la sécurité alimentaire, à la réduction de la pauvreté, au développement économique rural, à la croissance de la population,

à la désertification, à la dégradation des sols et aux contraintes climatiques sévères doivent être traités simultanément afin de recueillir une acceptation sociale, de stimuler l'engagement public et de mobiliser un soutien essentiel au niveau national. Plus il y aura d'effets secondaires et de coavantages positifs qui peuvent être associés à la mise au point d'une chaîne de valeur des SAF, meilleures seront les chances de succès de la mise en œuvre. En raison même de cette interdépendance, une étude de faisabilité devra nécessairement inclure des aspects agronomiques, économiques, sociaux et écologiques.

Par conséquent, des directives politiques durables et une mise en œuvre réussie de projets de bioénergie exigent une stratégie intégrée. Afin de mieux refléter les conditions locales au Burkina Faso, une telle stratégie exigera un équilibre entre les intérêts de l'industrie de l'aviation, la demande croissante d'énergie et la nécessité d'assurer la sécurité alimentaire et la production alimentaire.

Le Burkina Faso a un énorme potentiel en termes de biomasse, qui peut convenir pour la production de biocarburants. Toute une gamme de matières premières différentes peut être identifiée. Certaines sont basées sur la culture d'oléagineux et autres matières premières non alimentaires, alors que d'autres sont basées sur des sources de déchets comme les écorces d'anacarde, les déchets solides municipaux et les graisses animales. Dans la présente étude, les principales ressources de biomasse disponibles pour la production de carburants au Burkina Faso sont soulignées, notamment la distribution géographique et les principaux défis quant à la livraison de quantités minimales de biomasse. Tous les types de matières premières régionalement appropriés sont inclus à condition que la matière première puisse :

- être livrée dans les quantités, qualités et coûts requis pour les plates formes de conversion existantes ou émergentes ;
- être convertie en carburants d'aviation alternatifs interchangeables tout en offrant des avantages environnementaux et sociaux.

Les données empiriques figurant dans le présent rapport ont été largement obtenues lors de longues missions sur le terrain en avril, mai et novembre 2017, dans le cadre d'entretiens avec des informateurs clés parmi les agriculteurs, les agronomes, les chefs de village, les représentants du Gouvernement et les parties prenantes locales.

L'évaluation de toute matière première ne se limite pas à son identification et à sa conformité avec les exigences environnementales de base. Elle inclut également l'évaluation des rendements potentiels, des intrants nécessaires, de la logistique et d'une première analyse quantitative. La quantification des carburants alternatifs est influencée par une grande diversité de facteurs comme la disponibilité et la qualité des terres, le régime foncier, les conditions climatiques, l'infrastructure disponible,

la logistique, les installations d'entreposage, les utilisations concurrentielles et les demandes existantes pour d'autres fins établies (par exemple la production alimentaire humaine et animale), ainsi que le développement de marchés locaux, régionaux, nationaux et internationaux.

Alors que des sources individuelles de biomasse peuvent, à première vue, sembler convenables, une estimation du potentiel réel exigera une compréhension intégrée de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Il y a des risques que des contraintes sur l'infrastructure, la mécanisation, l'entreposage et le transport puissent gêner ou même empêcher la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement fonctionnelle capable d'utiliser les sources de biomasse disponibles localement. Au lieu de viser directement la production ambitieuse de SAF, des contraintes constatées peuvent plutôt suggérer une approche par phases, permettant la mise en œuvre progressive d'une chaîne d'approvisionnement qui peut initialement comprendre également l'électrification rurale et des options de biodiesel comme premières mesures tangibles vers la production future de SAF.

Afin de mieux tenir compte des conditions nationales existantes en termes de base de matières premières renouvelables cultivées dans le pays, une quantification de haut niveau différenciera a) la biomasse qui est théoriquement disponible si les conditions sont remplies et b) la biomasse qui est déjà utilisable. N'importe quel coefficient delta indiquera le potentiel supplémentaire de futures sources de biomasse.

1.6 CLASSIFICATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

Les matières premières recensées au Burkina Faso sont réparties en quatre groupes principaux selon la nature des composés qui peuvent être utilisés pour la récupération d'énergie et la production de carburants :

- I. sucrose/amidon (canne à sucre, sorgho à sucre) ;
- II. biomasse lignocellulosique (résidus agricoles, déchets de bois forestiers, cultures spécifiquement énergétiques et herbes tropicales) ;
- III. déchets (déchets solides urbains et graisses de déchets animaux) ;
- IV. plantes oléagineuses (coton, jatropha, autres arbres indigènes).

Les carburants produits à partir de la biomasse lignocellulosique et de matières premières provenant de déchets agricoles donnent généralement les réductions d'émissions les plus élevées sur la base du cycle de vie¹⁶. De plus, il y a une possibilité d'accroître la production vivrière en même temps que la production de carburant. La raison en est qu'à mesure que la production alimentaire s'étend pour répondre

¹⁶ Voir: Laboratoire de l'aviation et de l'environnement (LAE), Institut de technologie du Massachusetts (MIT), Seamus J. Bann, A Stochastic Techno-Economic Comparison of Alternative Jet Fuel Production Pathways (Comparaison techno-économique stochastique des filières de production de carburants d'aviation alternatifs), June 2017; Patricia Thornley et al. Maximizing the greenhouse gas reductions from biomass: The role of life cycle assessment, Biomass and Bioenergy, (Maximisation des réductions de gaz à effet de serre à partir de la biomasse: rôle de l'analyse du cycle de vie, biomasse et énergie) Volume 81, October 2015, Pages 35-43; Jitendra Kumar Saini et al., Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments [Déchets agricoles lignocellulosiques comme matière première de biomasse pour la production de bioéthanol de la deuxième génération : concepts et évolution récente], 3 Biotech. 2015 Aug; 5(4): 337-353.

aux besoins nutritionnels du pays, il y a également un accroissement de la production de résidus agricoles qui restent largement inutilisés. Généralement, pour chaque tonne de récolte produite, une certaine quantité de résidus est disponible dans le champ après la récolte. Avec des systèmes de collecte efficaces en place, les déchets de la production agricole peuvent être utilisés comme carburants pour l'électricité, le chauffage et la production de carburants alternatifs. Toutefois, la conversion des résidus agricoles peut être entravée par la nécessité de maintenir la fertilité des sols et de les garder comme aliments pour animaux pendant la saison sèche. Ainsi, dans certains cas, seule une fraction peut être recueillie sans trop d'incidences défavorables sur l'environnement, en particulier sur la qualité des sols ou sur les utilisations existantes ou concurrentes.

Des cultures spécifiquement énergétiques et les herbes tropicales, comme l'herbe à éléphant, offrent une grande possibilité de produire de la matière cellulosique lorsque la production se fait sur des terres marginales qui ne conviennent pas à la production d'agriculture traditionnelle, avec de faibles stocks de carbone et une faible biodiversité, qui peuvent être convertis avec des coûts environnementaux minimes.

En plus des plantes oléagineuses, les déchets peuvent également jouer un rôle important dans l'élargissement du portefeuille de matières premières potentielles pour les SAF. Les déchets, comme les déchets solides urbains ou les graisses provenant de déchets animaux, sont une source alternative commode pour les SAF car les avantages sont doubles : ils n'entrent pas en concurrence avec la production alimentaire en termes de terrains ou d'autres ressources et leur utilisation peut éviter ou réduire le coût et l'impact de leur élimination dans l'environnement. En outre, les déchets sont généralement de source ponctuelle, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de mettre en place une infrastructure dédiée de collecte et de production de matières premières. Toutefois, les déchets sont des matières hétérogènes, le coût de séparation et de traitement est normalement élevé et il se pourrait qu'il y ait des contraintes de législation environnementale à respecter.

1.7 POTENTIEL DE LA BIOMASSE AU NIVEAU NATIONAL

À l'issue d'une exploration et d'une identification exhaustives des ressources en matières premières résumées à la **figure 2** ci-dessous, les principales ressources en biomasse existantes au Burkina Faso comprennent, entre autres :

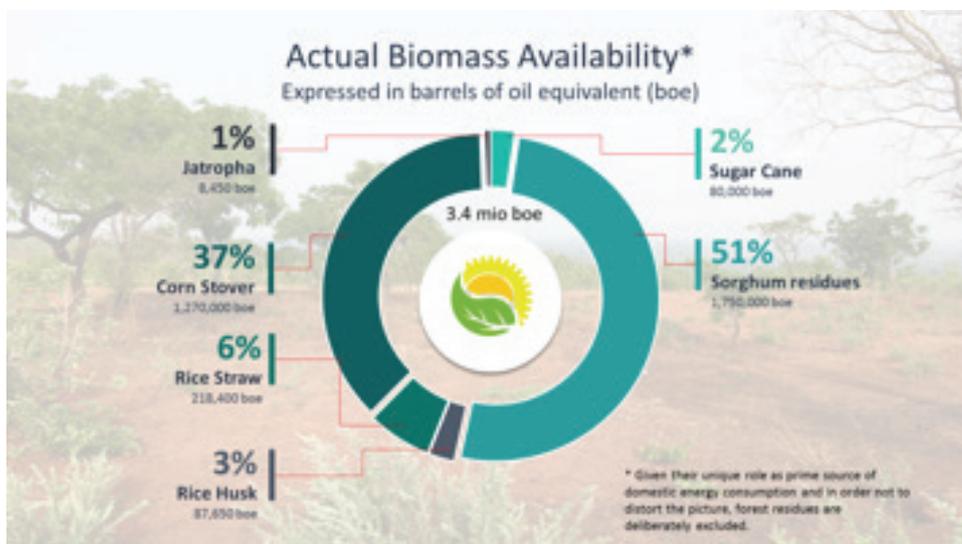
- la biomasse pour la production d'éthanol (sorgo à sucre, canne à sucre, etc.) ;
- les résidus agricoles (cannes de maïs, balles et pailles de riz, bagasse, etc.) ;
- les résidus de la biomasse forestière dans les plantations de forêts.

En outre, comme il est souligné dans la **figure 3** ci-dessous, les principales ressources futures de biomasse qui conviennent à la conversion en SAF peuvent être identifiées parmi :

- les herbes tropicales, comme l'herbe à éléphant ;
- les oléagineux à haut rendement, comme les accessions améliorées du jatropha ;
- les déchets solides urbains et les eaux usées ;
- l'huile de coques de noix de cajou et de karité ;
- les graisses de déchets animaux (suif).

Le **tableau 1** (à droite) fait l'inventaire des divers types de biomasse qui sont considérés comme une source d'énergie pour la conversion en des carburants liquides en général et en SAF en particulier. Il a été décidé de manière délibérée que cet aperçu sommaire ne serait axé que sur un synopsis de haut niveau de paramètres choisis. Afin de renforcer la valeur informative de ce synopsis, l'accent est principalement mis sur la comparaison de valeurs énergétique calculées. Le pouvoir calorifique du carburant, mesuré en mégajoule par kilogramme (MJ/kg), est la quantité d'énergie (chaleur) produite pendant la combustion d'une unité de masse du combustible, à pression constante et dans des conditions "normales" (standard) (c'est-à-dire à 0 °C et sous une pression de 1,013 mbar). Elle constitue la base de la détermination de la performance d'un système d'énergie.

FIGURE 2
Disponibilité réelle de biomasse au Burkina Faso
Source: Auteur



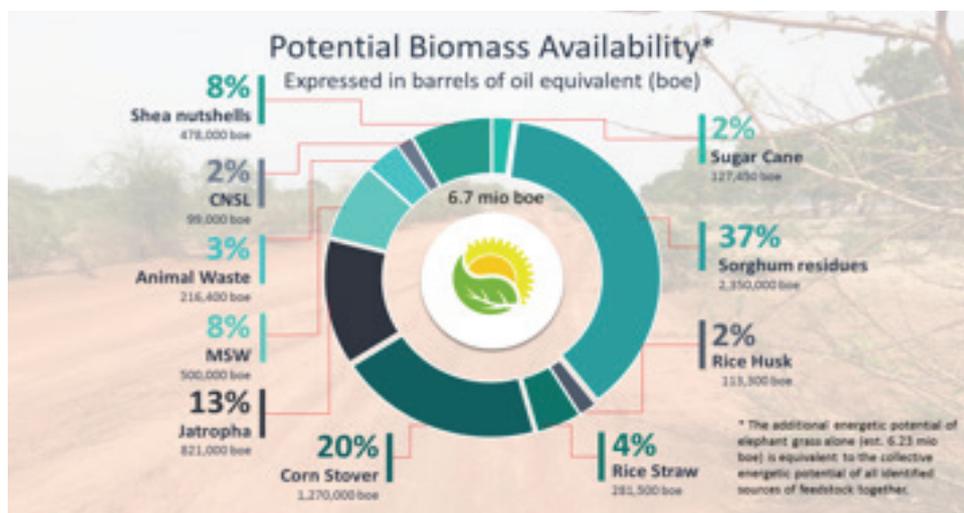


FIGURE 3
Disponibilité potentielle de biomasse au Burkina Faso
Source: Auteur

	Production/Zone de récoltes		Volume de production	Valeurs énergétiques		
				Pouvoir calorifique spécifique (MJ/kg)	Gigajoule (Gj)	Baril équivalent pétrole (bep)
Canne à sucre	5 000 ha		500 000 tonnes → 35 000 tonnes sucre → 15 800 tonnes éthanol	29,6 (éthanol)	468 000	80 000
Potentiel	8 000 ha		800 000 tonnes → 25 300 tonnes éthanol	29,6 (éthanol)	747 000	127 450
Sorgo	1 620 000 ha		1 730 000 tonnes de grains 3 460 000 tonnes de résidus			
Minoration	• Utilisation concurrentielle comme fourrage • Contraintes logistiques	- 30 % - 20 %	→ 1 730 000 tonnes de résidus → 347 000 tonnes éthanol	29,6 (éthanol)	10 ⁷	1 750 000
Potentiel	Augmentation du rendement [sélection des plantes] [sélection des cultivars]	+ 30 %	→ 2 249 000 tonnes de résidus → 451 100 tonnes éthanol	29,6 (éthanol)	1,3 x 10 ⁷	2 350 000
Riz	172 000 ha		270 000 tonnes			
Balle de riz	172 000 ha		68 500 tonnes			
Minoration	Production de combustion et de vapeur	- 50 %	→ 34 250 tonnes	15	514 000	87 650
Potentiel	• Augmentation du rendement • Élargissement de la vallée du Sourou		+ 10 000 tonnes → 44 250 tonnes	15	664 000	113 300
Paille de riz	172 000 ha		205 500 tonnes			
Minoration	• Utilisation concurrentielle comme fourrage • Contraintes logistiques	- 25 % - 25 %	→ 102 250 tonnes	12,5	1 280 000	218 400
Potentiel	• Augmentation du rendement • Élargissement de la vallée du Sourou		+ 30 000 tonnes → 132 250 tonnes	12,5	1 650 000	281 500
Mais/Blé d'Inde	790 000 ha		1 500 000 tonnes			
Minoration	• Engrais et enrichissement des sols • Contraintes logistiques	- 50 % - 15 %	→ 1 286 000 tonnes cannes de maïs → 450 000 tonnes cannes de maïs	16,5		
Résidus forestiers	5 500 000 ha		10 000 000 tonnes	20,0	(2 x 10 ⁶)	(34 000 000)
Minoration	Utilisation concurrentielle (bois combustible)	- 100 %	→ 0,0	20,0	0	0
Herbe à éléphant	0 ha		0 tonne	14,6	0	0
Potentiel	≥ 250 000 ha		5 000 000 tonnes	14,6	(7,3 x 10 ⁷)	(12 450 000)
Minoration	• Contraintes de logistiques et d'infrastructures • Inefficacité de la conversion	- 25 % - 25 %	→ 2 500 000 tonnes	14,6	3,6 x 10 ⁷	6 225 000
Déchets urbains solides	--		580 000 tonnes	6 – 20 Ø 10		
Minoration	• Inefficiences de la collecte • Prétraitement, séparation	- 25 % - 25 %	→ 270 000 tonnes	Ø 10	2 900 000	500 000
Grasse provenant de déchets animaux	--		9 000 tonnes	40	360 000	61 400
Potentiel	--		+ 22 700 tonnes → 31 700 tonnes	40	1 268 000	216 400
Graine de coton	330 000 ha		116 000 tonnes d'huile	41,5	4 800 000	821 000
Minoration	• Utilisation concurrentielle (alimentation)	- 100 %	→ 0	41,5	0	0
Jatropha	3 000 – 8 000 ha		≤ 5 000 tonnes de graines → 1 200 tonnes d'huile (CJO)	40	48 000	8 450
Potentiel	• 100 000 ha • Amélioration sélective des plantes • Introduction de plantes hybrides à haut rendement		400 000 tonnes de graines → 120 000 tonnes d'huile (CJO)	40	4 800 000	821 000
Baume de cajou	90 000 ha		50 000 tonnes			
Potentiel	• + 100 % dans les 5 ans • Optimisation de la chaîne de valeur		→ 35 000 tonnes de baume → 70 000 tonnes de baume → 14 000 tonnes CNSL	19 – 22 19 – 22 39 – 42	700 000 1 400 000 580 000	120 000 240 000 99 000
Noix de karité	6 500 000 ha		450 – 600 000 tonnes de noix			
Potentiel	• Optimisation de la chaîne de valeur		→ ≥ 150 000 tonnes de boulettes de coques	18,7	2 800 000	478 000

TABLEAU 1
Inventaire de la biomasse

Afin d'assurer une meilleure comparabilité et de permettre une comparaison des carburants dans une unité d'énergie commune, le baril équivalent pétrole (bep) a été choisi comme unité d'énergie collective et comme dénominateur commun pour toutes les matières premières. Selon les caractéristiques de la matière première individuelle, de multiples taux de conversion peuvent s'appliquer pour en arriver à des résultats calculés (voir aperçu et synopsis des taux de conversion d'énergie au tableau 2). D'autres détails sur les dérivés scientifiques, les spécifications des produits, les rendements moyens et les taux de conversion sous-jacents seront traités dans les sections relatives aux matières premières spécifiques.

TABLEAU 2

Synopsis des taux de conversion d'énergie sous-jacents

Calorific value and energy content - conversion ratios					
Kilojoules (kj)	Megajoules (MJ/kg)	Gigajoules (GJ/kg)	Kilocalories (kcal)	Kilowatt hours (kWh)	Barrels of oil equivalent (boe)
1.000	1	0.001	239	0.28	17 x 10 ⁻⁴
10 ⁶	1,000	1	238,846	278	0.1706
4.184	4.18	0.00418	1,000	1.16	71 x 10 ⁻⁴
3.600	3.6	0.0036	860	1	61 x 10 ⁻⁴
5.861.520	5,861	5.861	1,400,000	1,628.2	1
3,6 x 10 ⁶	3,600	3.6	859,845	1,000	0.614

1.8 PROCÉDÉS DE CONVERSION DU COMBUSTIBLE

La combustion des carburants d'aviation se fait à partir d'une matière première donnée qui est convertie par des procédés industriels en carburants. D'un point de vue technique et s'agissant des caractéristiques du carburant, l'aviation se concentre sur les carburants dits "interchangeables", qui sont des carburants d'aviation de remplacement des carburants actuels et qui sont complètement interchangeables et compatibles avec les carburants d'aviation actuels. Pour le carburant interchangeable, il n'est pas nécessaire d'adapter les systèmes carburants des avions/moteurs ou du réseau de distribution du carburant, et ces carburants peuvent être utilisés "tels quels" sur les avions à turbomoteurs qui sont en service, sous forme pure et/ou mélangée en n'importe quelle proportion avec d'autres carburants interchangeables purs, mélanges interchangeables ou carburants d'aviation actuels¹⁷. Ces dernières années, d'énormes progrès techniques ont été réalisés vers la transformation de la biomasse en carburants interchangeables et la commercialisation de carburants d'aviation durables.

À la date de novembre 2017, cinq procédés de conversion pour la production de carburants alternatifs avaient été certifiés selon la spécification ASTM D7566, avec des limites spécifiques de mélanges avec les carburants d'aviation actuels (comme il est indiqué dans le **tableau 3** ci dessous).

TABLEAU 3

Procédés de conversion approuvés comme annexes à la spécification ASTM D7566

Annexe	Procédé de conversion	Abréviation	Matières premières possibles	Taux de mélange par volume	Propositions de commercialisation
1	Procédé Fischer-Tropsch d'hydrotraitement de kérosène paraffinique synthétique	FT-SPK	Charbon, gaz naturel, biomasse	50 %	Fulcrum Bioenergy, Red Rock Biofuels, SG Preston, Kaldi, Sasol, Shell, Syntroleum
2	Production de kérosène paraffinique synthétique par hydrotraitement d'esters et d'acides gras	HEFA-SPK	Biohuiles, graisse animale, huiles recyclées	50 %	AltAir Fuels, Honeywell UOP, Neste Oil, Dynamic Fuels, EERC
3	Production d'isoparaffines synthétiques par hydrotraitement de sucres fermentés	SIP-HFS	Biomasse utilisée pour la production de sucre	10 %	Amyris, Total
4	Kérosène synthétique avec des aromatiques obtenus par alkylation d'aromatiques légers à partir de sources non pétrolières	SPK/A	Charbon, gaz naturel, biomasse	50 %	Sasol
5	Procédé Alcohol-to-jet de production de kérosène paraffinique synthétique	ATJ-SPK	Biomasse utilisée pour la production d'amidon et de sucre et de biomasse cellulosique pour la production d'isobutanol	30 %	Gevo, Cobalt, Honeywell UOP, Lanzatech, Swedish Biofuels, Bvoxy

¹⁷ Voir: CAAF/2-WP/03 disponible pour téléchargement à: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Documents/CAAF2.WP.003.1.en.pdf>

Des milliers de vols commerciaux utilisent déjà des carburants d'aviation alternatifs "interchangeables" et, à la date de novembre 2017, quatre aéroports distribuait des carburants alternatifs de manière régulière. De nombreux autres procédés de conversion sont en cours de mise au point et en sont à divers stades du processus d'approbation ASTM. Afin de reconnaître et d'évaluer le potentiel et la viabilité de toute combinaison entre une source spécifique de biomasse nationale et un procédé de conversion technologique éprouvé, une Matrice de faisabilité de critères d'évaluation sélectionnés a mis en lumière les possibilités et les contraintes principales concernant la maturité d'une chaîne d'approvisionnement de matières premières nationales potentielles ainsi que la faisabilité de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, y compris les options technologiques disponibles (à la fin de chaque section concernant une matière première). Les options non réalisables sont éliminées, et les autres scénarios de filière pour le Burkina Faso sont classés par ordre de priorité sur la base des matières premières candidates les plus faisables et selon qu'elles peuvent potentiellement s'adapter aux technologies de conversion. Les critères d'évaluation permettant d'évaluer la faisabilité de tout scénario de filière comprennent, entre autres, l'état de préparation et la disponibilité des matières premières (y compris les volumes actuels et potentiels de production future de biomasse), les distances de transport, l'entreposage et la logistique, les exigences en matière d'engrais et d'eau, la préparation du marché et l'établissement des prix de marché, la maturité et la complexité des techniques de conversion ainsi que le soutien stratégique et financier disponible.

L'état de la technologie permet de faire la différence entre deux niveaux technologiques. Le niveau technologique 1 (T1) concerne le traitement de la biomasse et inclut les installations de base pour le traitement des matières premières, les activités prétraitement, la conversion de la matière première en carburant et l'expulsion de l'huile. En comparaison, le niveau technologique 2 (T2) concerne les installations avancées de traitement de carburant et les procédés de conversion de carburants pertinents, notamment, entre autres, le raffinage, l'hydrotraitement et le fractionnement du brut.

Étant donné le faible niveau de mécanisation agricole au Burkina Faso, l'installation de solutions technologiques au premier niveau (T1) est un grand défi avant que l'on puisse envisager des scénarios de conversion de carburants alternatifs.

Les paramètres ci-dessus ressemblent quelque peu au Niveau de maturité opérationnelle des carburants (FRL) et au Taux de fiabilité de la matière première (FSRL), qui sont des guides élaborés par l'Initiative sur les carburants alternatifs de l'aviation commerciale (CAAFI) pour communiquer l'état de la recherche et passer du laboratoire à l'utilisation commerciale. Il n'entre pas dans le cadre de la présente étude d'analyser la viabilité économique ultime de tout appariement d'une matière première spécifique et d'un procédé de conversion, car cela dépendra de toute une gamme de facteurs et d'une vaste panoplie de paramètres hétérogènes qui évoluent constamment et exigent des investigations approfondies. En outre, les données fiables sont limitées et ne peuvent être simplement extrapolées tant que les technologies en sont encore au stade de la démonstration ou au stade pré commercial. Toutefois, le cas échéant et dans la mesure du possible, des suggestions d'appariement pragmatique seront avancées qui reflèteront au mieux le portefeuille de paramètres trouvés.

En général, les huiles et graisses végétales exigent moins de traitement que les autres matières premières (lignocellulose, sucre et amidon) car les molécules de triglycérides et d'acides gras sont plus semblables aux hydrocarbures finals que l'on trouve dans le carburacteur. Le sucre et l'amidon doivent être transformés en produits intermédiaires par fermentation et les matières premières lignocellulosiques exigent des mesures supplémentaires car elles doivent être hydrolysées pour transformation en sucres simples ou transformées en du gaz synthétique ou des biohuiles intermédiaires. Les déchets solides urbains exigent le traitement le plus exigeant en raison de la nature de la matière première et de la complexité du traitement en cause. La production d'éthanol à partir de cultures contenant du sucre est une technologie courante et elle est utilisée dans des États comme le Brésil depuis des décennies.

2. PARAMÈTRES DE PRODUCTION PROPRES AUX PAYS

2.1 GÉOGRAPHIE

FIGURE 4
Le Burkina Faso, pays enclavé dans la région de l'Afrique sahélienne



Le Burkina Faso est un pays enclavé d'Afrique de l'Ouest, d'une superficie de 274000 km². Situé entre le désert du Sahara, au nord, et les forêts pluviales côtières au Sud, le Burkina Faso partage ses frontières avec six États : le Ghana, le Togo et le Bénin au Sud, la Côte d'Ivoire à l'Ouest, le Mali au Nord et le Niger à l'Est. Trois bassins fluviaux traversent le pays : le bassin de la Volta (63 % de la surface totale), le bassin du Niger (30 %), et le bassin de la Comoé (7 %). Situé au cœur de l'Afrique de l'Ouest environ à une heure et trente minutes de vol des capitales des États voisins, le Burkina Faso offre une base régionale idéale pour atteindre la Communauté économique des États de l'Afrique de l'Ouest (CÉDEAO). Cette union économique régionale de 15 pays situés en Afrique de l'Ouest occupe une superficie d'environ 5300000 km², soit un cinquième du continent africain. La population de la CÉDEAO est estimée à 350 millions, dont 65 % au moins vivent en zone rurale. La nature de la végétation de la sous-région fait que l'agriculture de subsistance est la principale préoccupation.

2.2 COMMERCE ET GOUVERNEMENT

Selon les statistiques de la base de données des perspectives de l'économie mondiale du Fonds monétaire international, le produit intérieur brut du Burkina Faso se montait à 33 milliards \$ É.-U. en 2016 (sur une base de parité de pouvoir d'achat). Les exports se montaient à environ 7,6 % des recettes totales Burkinabè. Les principaux partenaires commerciaux sont la Chine, la France et la Côte d'Ivoire (importations) et la Suisse, Singapour et la Côte d'Ivoire (exportations). La première et plus importante destination des exportations du Burkina Faso est la Suisse, avec des exportations d'une valeur d'environ 2 milliards \$ É.-U., ce qui représente 59 % de toutes les exportations et révèle une brusque augmentation du commerce de l'or dans le pays. Le plus important partenaire commercial unique est le bloc de l'UE, avec une valeur totale commerciale de 810 millions \$ É.-U. (711 millions d'euros) en 2016. Quatre-vingts % de toutes les exportations du Burkina Faso à destination de l'EU sont constituées majoritairement de produits minéraux (or) et de substances végétales (coton).

L'économie du Burkina Faso a connu des niveaux élevés de croissance ces dernières années et le pays connaît une reprise de l'exploration, de la production et des exportations aurifères. On prévoit un taux de croissance économique de 5,9 % en 2017, grâce à la reprise de l'exploitation minière. Le taux de croissance urbaine a augmenté au cours de la dernière décennie et la population urbaine pourrait atteindre 35 % du total d'ici 2026, mais les villes et cités sont encore médiocrement équipées pour gérer de manière durable cette croissance.

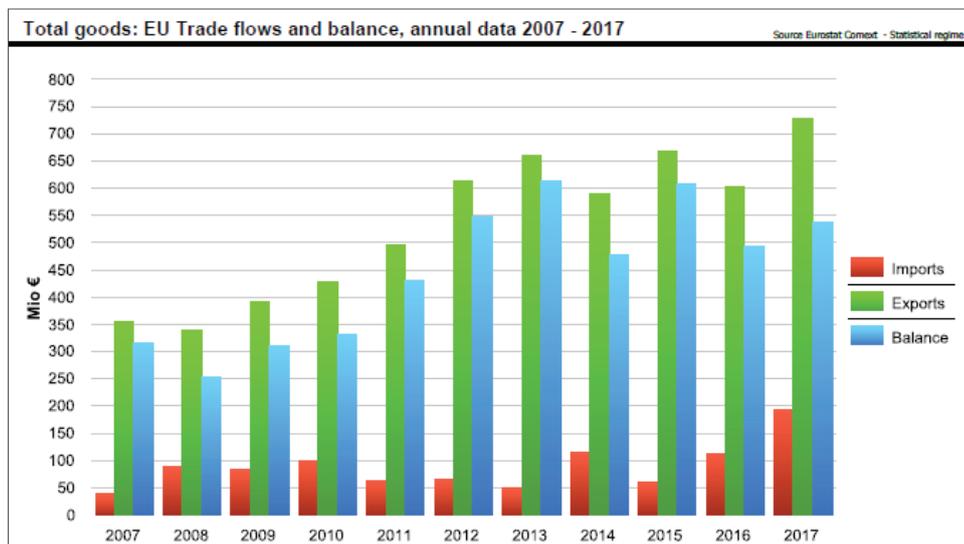


FIGURE 5

Union européenne, commerce avec le Burkina Faso

Source : Commission de l'UE, Direction générale du commerce

Le Burkina Faso est administrativement divisé en 13 régions, 45 provinces et 351 communes, dont 302 communes rurales et 49 communes urbaines.

Aux niveaux régional et sous régional, le Burkina Faso participe aux efforts de regroupement des principaux groupements géopolitiques et géoéconomiques existants, à savoir l'UA, la CEDEO, l'Union économique et monétaire ouest africaine (UEMOA), le Conseil de l'Entente (CE) et la Communauté des États sahélo sahariens (CEN-SAD).

En juillet 2016, le Burkina Faso a adopté son *plan national de développement économique et social* (PNDES), comme principal instrument pour définir les lignes directrices pour le développement économique et social pendant la période allant de 2016 à 2020. Le PNDES identifie des objectifs stratégiques et des mesures d'application pour soutenir la croissance et la résilience et améliorer, entre autres, l'efficacité de la gouvernance environnementale.

2.3 DÉMOGRAPHIE

Le Burkina Faso figure sur la liste des pays dont la croissance est la plus rapide au monde, avec taux d'accroissement annuel de la population de plus de 3 %. Depuis l'an 2000, la population a augmenté d'environ 65 %. À ce jour (septembre 2017), le pays compte une population de 19,4 millions d'habitants, et étant donné le taux d'accroissement sous-jacent, la projection pour 2040 laisse envisager un doublement de population. Cela mettra une lourde pression sur les ressources naturelles et sur les services publics et sociaux.

Cette tendance démographique a des conséquences particulièrement négatives sur la sécurité alimentaire puisque les terres arables du pays sont limitées et que la productivité est encore à un niveau relativement bas. Pour compenser cette faible productivité, les zones agricoles s'étendent rapidement.

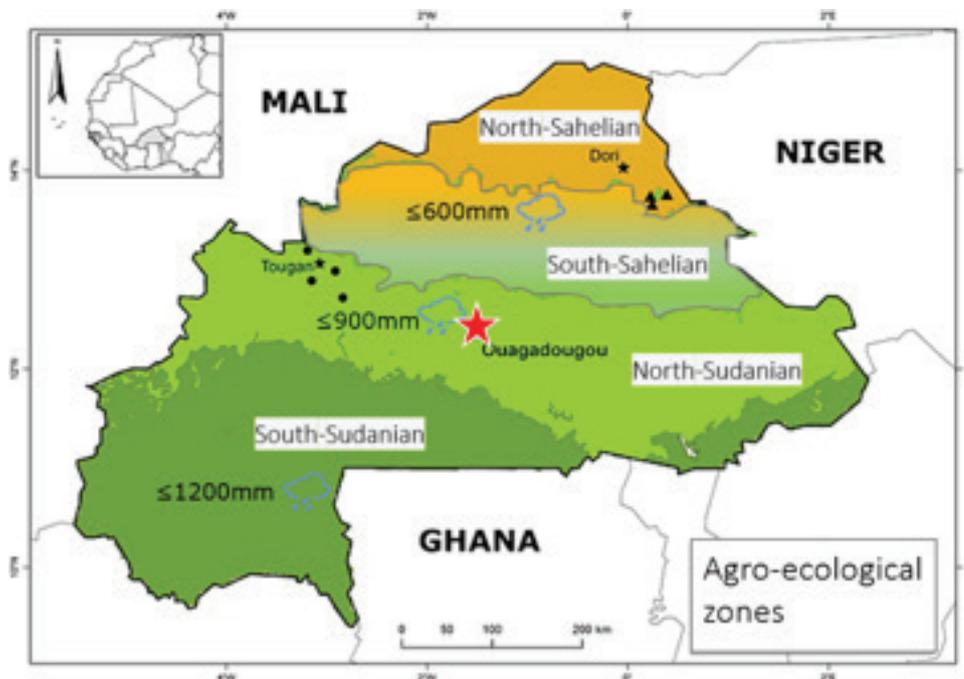
La population agricole compte 16 millions de personnes, ce qui représente un peu plus de 80 % de la population totale.

Seul un tiers de la population est alphabétisé et le chômage est endémique. Le Burkina Faso a une structure d'âge jeune. Plus de 65 % de la population a moins de 25 ans et 47% de la population a moins de 15 ans.

La migration était un mode de vie traditionnel pour les Burkinabè, avec une migration saisonnière qui cède actuellement la place à des absences allant jusqu'à deux années passées à l'étranger. Pendant la colonisation Française, le Burkina Faso est devenu une source principale de main-d'œuvre agricole et ouvrière pour la Côte d'Ivoire. En dépit des pénuries alimentaires et d'un taux de pauvreté élevé¹⁸, le Burkina Faso est devenu une destination pour les réfugiés ces dernières années.

2.4 CLIMAT/SOL

FIGURE 6
Zones agroécologiques



Avec une altitude moyenne de 400 m, le Burkina Faso jouit d'un climat tropical sec soudano-sahélien avec deux saisons opposées : une saison des pluies courte allant de la fin mai à octobre et une longue saison sèche de novembre à mai. La durée et l'intensité des saisons respectives varient et sont de plus en plus imprévisibles.

En moyenne, les précipitations annuelles atteignent moins de 300 mm dans le Nord et jusqu'à plus de 1 200 mm dans le Sud. Le climat est caractérisé par un gradient d'humidité Nord-Sud et principalement influencé par l'interaction entre d'une part le climat des moussons d'Afrique de l'Ouest apportant des pluies du sud-ouest pendant la saison des pluies et d'autre part les vents de l'Harmattan venus du nord-est apportant de l'air chaud et des poussières du Sahara pendant la saison sèche. Les pluies de la mousson sont un élément clé du climat régional, en particulier dans le Sahel semi-aride où la végétation est fortement sensible aux variations de précipitations.

Sur la base de la répartition annuelle moyenne des pluies, le pays peut être divisé en trois zones éco-climatiques : 1) zone sahélienne dans le nord, qui reçoit moins de 600 mm de pluies sur une période de 3 à 4 mois ; 2) la zone soudano-sahélienne sur le Plateau Mossi, où la moyenne des pluies annuelles est de 600 to 900 mm pendant quatre à cinq mois de l'année; 3) la zone soudanienne, méridionale et plus humide, où la moyenne annuelle de précipitations est de plus de 1 000 mm sur une période de cinq à six mois de l'année (voir **figure 6**). Au cours des dernières décennies, les isohyètes de 600 mm et 900 mm ont migré sur plus de 200 km vers le sud, ce qui est un signe de désertification. Les isohyètes d'autrefois de 1 400 mm dans le sud du pays ont totalement disparu (voir **figure 7**).

En cohérence avec les zones éco-climatiques, plusieurs types de végétation peuvent être observés du nord au sud : des steppes arbustives et de la brousse tigrée dans le nord, la savane arbustive et les herbes annuelles (*Piliostigma reticulatum*, *Guiera senegalensis*, *Acacia seyal*, *Acacia radiana*,

¹⁸ En 2014, plus de 40 % de la population dans toutes les parties du pays vivaient en dessous du seuil de pauvreté avec moins de 153 530 FCFA (260 \$ É.-U. par an) ou 2 \$ É.-U. par jour. En dépit d'un PIB par habitant estimé à environ 660 \$ É.-U. pour 2017 et une croissance soutenue de +/- 6 % au cours des récentes années, le Burkina Faso se classe en 185^e position sur 188 pays au classement de l'Indice de développement humain (IDH) du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) de 2011, soit un classement inférieur à la moyenne pour les pays de la même catégorie en Afrique sub saharienne.

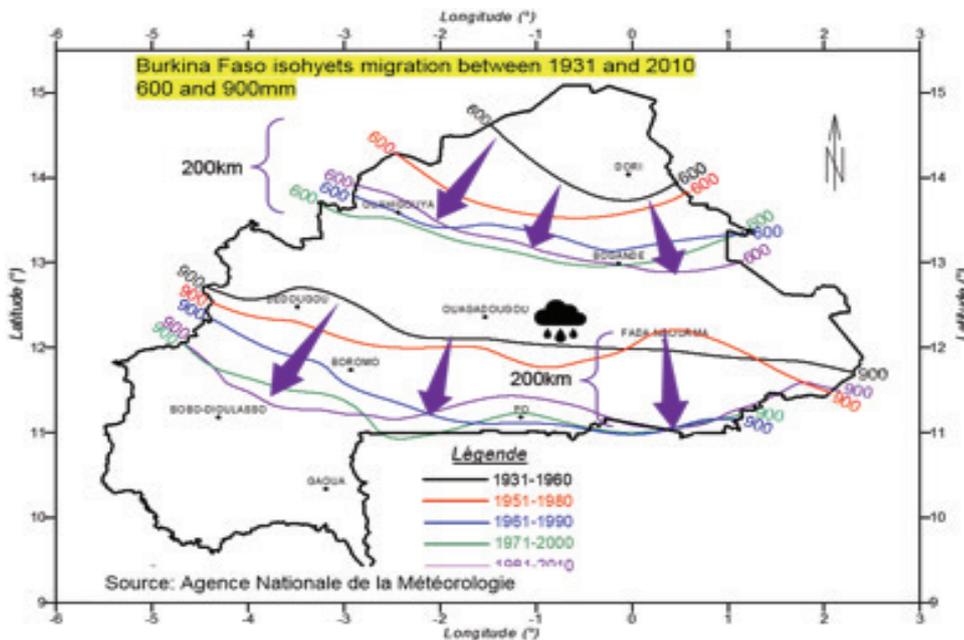


FIGURE 7
Schémas des migrations des isohyètes

Balanites aegyptiaca) dans le centre, et les arbres des savanes (*Khaya senegalensis*/"Mahogany de zone sèche", *Tamarindus indica*, *Lanea microcarpa*, *Parkia Biglobosa*, *Butyrospermum parkii*, *Adansonia digitate*/"Baobab", *Vitellaria paradoxa*/"Arbre à beurre d'Afrique" et *Pterocarpus*) ainsi que les herbes pérennes (*Andropogongayanus*, *Cymbopogon*/"Citronnelle") dans le sud et le sud-ouest. La partie sud du pays est située dans la savane soudanienne ouest ; sa végétation naturelle est caractérisée par une zone arbustive plus dense et décidue et zone arborée et est connue pour son fort potentiel agricole. Relativement fertile, la terre arable non cultivée avec un accès au marché limité représente des zones potentielles d'expansion uniquement si l'infrastructure de transport est en place.

Dans le sud-ouest du Burkina Faso, en particulier autour de la ville de Banfora, on trouve des plantations d'arbres fruitiers tels que les manguiers, les agrumes de même que les arbres à fruits à coques (par exemple : noix de cajou et noix de karité). Ces dernières années, les produits de ces plantations ont connu une augmentation considérable de leur valeur de production et d'exportation. La durée de la saison de croissance varie et va de moins de 60 jours dans le nord jusqu'à 160 jours dans le sud, avec de grandes variations interannuelles.

Les observations depuis 1902 indiquent que la région sèche du pays s'est étendue vers le sud au cours du XX^e siècle. Pendant la même période, les températures mensuelles moyennes ont augmenté. Les températures mensuelles moyennes vont de 24 °C à 36 °C. Les pics en avril et en mai peuvent atteindre les 43 °C et plus.

Depuis les années 1970, le pays subit de fréquentes sécheresses et une augmentation graduelle des températures moyennes (voir **figure 8** sur l'évolution interannuelle de la température maximale à Ouagadougou).

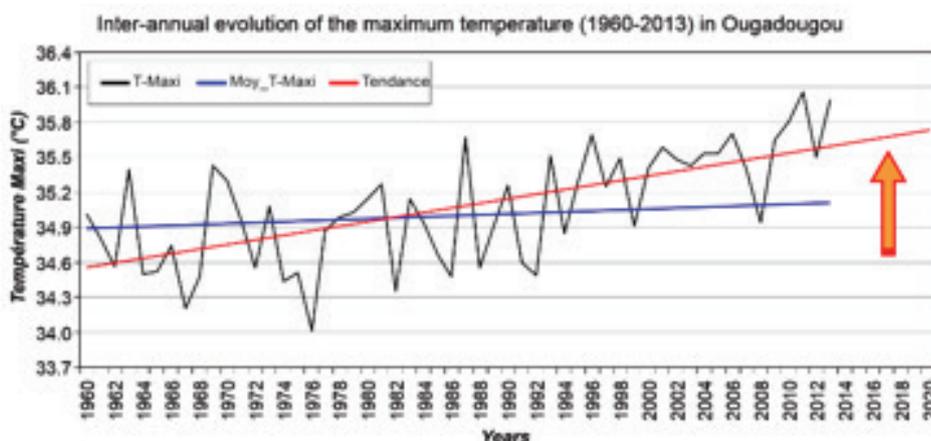


FIGURE 8
Augmentation régulière des températures à Ouagadougou

En outre, toutes les parties du pays ont connu une augmentation de la fréquence et de l'ampleur de phénomènes météorologiques extrêmes, comme des crues éclair pendant la saison des pluies et une diminution générale des précipitations, compliquant la vie pour la majorité des agriculteurs, car il y a peu d'accès à l'approvisionnement en eau d'irrigation.



PHOTO 1

La rareté de la ressource en eau affecte la sécurité alimentaire

Le Burkina Faso est fréquemment confronté au manque d'eau et à des crises alimentaires récurrentes, qui désorganisent directement les moyens de subsistance des communautés locales et de milliers d'agriculteurs.

La variabilité du climat est déjà une contrainte majeure sur la sécurité alimentaire, sur la santé, sur l'environnement et la réduction de la pauvreté, en raison de la forte dépendance vis-à-vis du secteur agricole primaire, qui contribue pour environ 30 % au produit intérieur brut (PIB). Les chocs exogènes, comme les sécheresses, les inondations, les vagues de chaleur, les locustes et les tempêtes de poussière sont les principaux risques liés au climat au Burkina Faso et ils contribuent aux problèmes comme la désertification, la dégradation des sols, les épidémies (par exemple méningite, choléra), l'insécurité alimentaire, les phénomènes d'aggravation de la pauvreté, l'exode des populations de la région centrale du pays et aux problèmes de développement en général.

2.5 VULNÉRABILITÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Du point de vue du changement climatique, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) définit comme suit la vulnérabilité : "Degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité, et de sa capacité d'adaptation".

Sa position géographique, son climat tropical avec de longues périodes de sécheresse, des vagues de chaleur et de fortes précipitations, ainsi que les crues récurrentes des grands fleuves (Niger, Comoé et Volta) font du Burkina Faso un pays à forte vulnérabilité structurelle. Cette vulnérabilité est accentuée encore par une variabilité imprévisible du climat, régime climatique de plus en plus erratique et une forte dépendance sur l'agriculture pluviale. Le Burkina Faso est ainsi particulièrement vulnérable aux changements climatiques. Une pauvreté généralisée augmente encore la vulnérabilité aux effets des changements climatiques, qui touchent régulièrement toutes les régions du Burkina Faso. Les graves sécheresses, les précipitations excessives et des inondations fréquentes sont les contraintes les plus graves. Les effets négatifs des changements climatiques contraignent les ménages dans de nombreuses parties du pays à se procurer partiellement leur gagne pain en dehors de la ferme. Face au niveau élevé de la pauvreté rurale et de l'insécurité alimentaire, la vulnérabilité socio économique de la population rurale au Burkina Faso est élevée. Les dangers liés au climat détruisent à maintes reprises les barrages et les réservoirs d'eau d'où de faibles rendements agricoles et une perte grave de production agricole ainsi que de mauvaises récoltes. Dans la région du Plateau central, trois quarts des 85 barrages et réservoirs sont envasés et doivent être réhabilités. En outre, des invasions de locustes migrateurs et de nombreux épisodes de maladies épidémiques ont été enregistrées.

En conséquence, le Burkina Faso est fréquemment confronté au manque d'eau et à des crises alimentaires récurrentes, qui désorganisent directement les moyens de subsistance des communautés locales et de milliers d'agriculteurs. Le Burkina Faso est également touché par la sous nutrition et des maladies infectieuses. Les changements climatiques entraîneront vraisemblablement des changements du moment de la survenue, de la saisonnalité et de la portée géographique de maladies épidémiques, en particulier le paludisme et la méningite (par exemple en déplaçant vers le sud la ceinture méningitique). L'accès limité à des systèmes d'approvisionnement en eau et d'assainissement, ainsi que les fréquentes inondations et sécheresses aggravent les conditions sanitaires et désorganisent les moyens de subsistance des populations rurales et urbaines.

2.6 DÉGRADATION DES SOLS

Près de 90 % de la population burkinabè dépend de l'agriculture pour sa subsistance. Le fonctionnement du secteur agricole devient ainsi une condition préalable au développement économique général du pays. Toutefois, le secteur agricole se caractérise par une faible productivité, l'érosion des sols et une baisse de fertilité des sols. L'absence de minéraux de base comme l'azote, le potassium et le phosphore est aggravée par la pratique de la culture extensive avec très peu de matière organique pour la conservation et la restauration. La culture extensive, associée à des sécheresses, inondations récurrentes, à la désertification et à la déforestation qui progressent, nuisent gravement aux activités agricoles et contribuent à la dégradation des sols.

La dégradation des sols est définie comme la perte à long terme de fonction et de la productivité des écosystèmes causée par des perturbations dont la terre ne peut récupérer sans assistance. La détérioration des sols se produit lentement et cumulativement et elle a des effets durables sur les populations rurales, qui deviennent de plus en plus vulnérables. La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULCD), dont le Burkina Faso est signataire, reconnaît la dégradation des sols comme un problème de développement et d'environnement de portée mondiale. La dégradation environnementale et l'érosion des sols continuent de menacer la disponibilité de terres arables au Burkina Faso.

Actuellement, 9 234 500 hectares de terres, soit un tiers du territoire national, ont été dégradés en raison d'activités anthropiques et des effets des changements climatiques.

L'utilisation extensive des terres pour l'agriculture par un nombre toujours croissant de producteurs agricoles et éleveurs de bétail, ainsi que l'abattage non durable du bois (principale source d'énergie pour tous les ménages ruraux) sont considérés comme les principales causes directes de la dégradation des sols et de la déforestation au Burkina Faso. Le manque de capitaux personnels et d'accès aux crédits a pour conséquence une agriculture extensive caractérisée par a) un faible niveau d'intrants agricoles ; b) une médiocre mécanisation ; et c) une application minimale (presque négligeable) d'engrais. Face à une population qui croît rapidement et à une productivité agricole qui augmente peu, les agriculteurs compensent en étendant les zones cultivées. Entre 2001 et 2014, la zone agricole a été agrandie de plus de 60 %. On estime donc que le pays atteindra bientôt ses limites en termes de terres arables. En outre, cette expansion menace également les ressources naturelles et la pression exercée sur ce qu'il reste de végétation naturelle augmente. En plus, la désertification et la dégradation des terres contraignent les villageois à déboiser la forêt ou à laisser leur bétail en pâturage libre pour être en mesure de nourrir leurs familles et de gagner leur vie.

Une façon d'endiguer l'expansion agricole et la déforestation consiste à augmenter l'utilisation efficace et durable des zones agricoles existantes et à améliorer la productivité agricole par hectare, par exemple au moyen d'une utilisation contrôlée des engrais. Les paramètres et contraintes soulignés doivent

également être pris en compte lors de l'analyse des sources potentielles de matière première pour la production de SAF.

L'OACI examine actuellement les exigences en matière de durabilité pour les SAF. En ce qui concerne les conditions agro climatiques spécifiques au Burkina Faso, la matière première parfaite devrait idéalement réaliser plusieurs objectifs en même temps, à savoir :

- être reconnue comme source durable pour la conversion en SAF ;
- préserver la biodiversité et maintenir l'écosystème ;
- arrêter la dégradation et l'érosion des sols ;
- régénérer les sols dégradés ;
- fournir un engrais organique relativement bon marché.

Étant donné l'ampleur et l'impact des conséquences de la dégradation des sols et de la déforestation, la mise en place des bonnes politiques et mesures d'atténuation devient une question d'importance stratégique nationale. Certains des nombreux problèmes de la gestion durable des terres sont traités, entre autres, dans a) le Programme d'investissement forestier (FIP), qui constitue le cadre de la définition et de la mise en œuvre des projets REDD+ et en particulier b) dans le Programme national de partenariat pour la gestion durable des terres (CPP), qui est mis en œuvre par le Secrétariat permanent du Conseil national pour l'environnement et le développement durable (SP/CONEDD).

Les initiatives ci-dessus sont conformes à l'objectif stratégique n° 3.5 du PNDES. En conséquence, le Gouvernement entend inverser la tendance à la dégradation environnementale et poursuivre la transition vers une économie verte.



PHOTO 2

Les sécheresses récurrentes, l'aggravation de la désertification et de la déforestation affectent gravement les activités agricoles et contribuent à la dégradation des sols

2.7 AGRICULTURE

Sur un total de 27 400 000 hectares, 22 % sont des terres arables, soit 6 millions d'hectares. Les terres arables comprennent les terres définies par l'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture comme étant les terres affectées aux cultures temporaires (les zones en double culture sont comptées une seule fois), les terres de prairies et de pâturages temporaires, les terres affectées aux cultures maraîchères ou potagères et

les terres en jachère temporaire. Les terres abandonnées dans le cadre du nomadisme agricole sont exclues. Soixante % des terres arables sont utilisés pour la production céréalière, ce qui représente environ 13 % de la superficie totale du pays.

La superficie de terre agricole par personne est faible et est en déclin. Le secteur est dominé par de petites exploitations agricoles avec une moyenne de surface agricole par habitant rural inférieur à 1,5 hectare. Par comparaison, la taille moyenne d'une exploitation agricole dans l'Afrique sub saharienne est de 2,4 hectares, par rapport à 178,4 hectares aux États Unis et 111,7 hectares en Amérique latine.

Les femmes représentent plus de 70 % de la main d'œuvre agricole, mais ne possèdent pratiquement pas de terres. Traditionnellement, les femmes sont chargées de la culture des champs familiaux et des périmètres collectifs des associations de femmes agricultrices.

L'agriculture pluviale est dominante au Burkina Faso et les exploitants agricoles utilisent majoritairement des techniques agricoles fortement rudimentaires. À quelques exceptions près, les agriculteurs n'ont pas accès à des tracteurs ou à de la machinerie agricole. Traditionnellement, ce sont les ânes qui sont les principaux animaux de trait et les principaux partenaires de travail des familles agricultrices au Burkina Faso.

Au cours des années à venir, le défi consistera à accélérer la croissance de la production et de la productivité, en contrôlant son impact sur l'environnement et les ressources naturelles comme la terre, l'eau et l'énergie, et à encourager l'adaptabilité des systèmes agricoles aux changements climatiques. L'augmentation de la production agricole ne peut être réalisée que par l'intensification de l'agriculture durable. Cela signifie qu'il faut favoriser l'accès aux intrants — y compris aux moyens de politiques de subventions des engrais et des semences et garantir l'accès au financement et à des ressources pour les femmes en particulier. Malheureusement, les facteurs qui sous tendent la transformation dans l'agriculture — l'adoption de la technologie et l'accès aux finances et à la formation aux compétences — sont souvent difficiles à fournir de manière économique aux petits exploitants, qui sont géographiquement dispersés et médiocrement connectés aux marchés.



PHOTO 3

Journée nationale du paysan 2017, Kaya (Burkina Faso)

Le Président du Burkina Faso, Roch Marc Kaboré, s'adresse à des milliers d'agriculteurs à la "Journée nationale du paysan" à Kaya le 12 mai 2017.

2.8 ÉNERGIE

Le Burkina Faso est simultanément confronté à des difficultés d'accès à l'énergie, de sécurité énergétique et d'atténuation des effets des changements climatiques. Avec très peu de ressources énergétiques propres, le pays est constamment confronté à un approvisionnement insuffisant en énergie face à une demande toujours changeante, notamment en raison d'une augmentation des activités économiques et minières, de la croissance de la population et d'une urbanisation galopante. Au cours de la dernière décennie, la demande locale d'électricité a augmenté d'environ 13 % par an en moyenne, contre une augmentation de 8 % de l'approvisionnement. En conséquence, le Burkina Faso dépend fortement d'importations énergétiques.

La biomasse (bois combustible, charbon) constitue 85 % de la consommation d'énergie primaire, dont 14 % sont tirés d'hydrocarbures (produits pétroliers) et 1 % de l'hydro-électricité.

2.8.1 BOIS COMBUSTIBLE

Le bois combustible (ou bois de chauffage/combustible ligneux) est le principal produit commercial des forêts burkinabè. Seuls 17 % de la population, y compris 3 % des ménages ruraux, ont accès à l'électricité, et le bois combustible constitue plus de 85 % de la consommation totale d'énergie primaire au Burkina Faso.

Dans les zones rurales, presque toute l'énergie consommée est à base de biomasse. Plus de 90 % de tous les ménages au Burkina Faso utilisent le bois comme source principale de combustible de cuisson. Par comparaison, le gaz butane ne représente que 7,8 % de la consommation nationale d'énergie. Selon les statistiques de la FAO, le Burkina Faso a produit quelque 13 millions de m³ de bois combustible et 0,6 million de tonne de charbon en 2012. On estime qu'une famille utilisera au moins 3 tonnes de bois chaque année avec une cuisinière traditionnelle à charbon composée de quelques pierres posées au sol.



PHOTO 4

Méthode traditionnelle de ramassage de bois combustible

Faute d'alternatives disponibles et abordables, la dépendance par rapport au bois combustible et l'épuisement correspondant des ressources forestières se poursuivra en principe et augmentera même au cours des prochaines décennies. Alors que la collecte de bois combustible peut être utile à court terme et sur une base ad hoc, elle exacerbe les crises d'énergie et contribue à la détérioration des ressources naturelles, augmentant encore la vulnérabilité aux changements climatiques. Vu les médiocres rendements agricoles, l'exploitation du bois combustible devient de plus en plus une source supplémentaire de revenus. Face à la pauvreté et à l'insécurité alimentaire, de plus en plus de femmes rurales dépendent de la collecte, du transport et de la vente de bois combustible.

Si l'on tient compte des difficultés et des coûts logistiques et de transport, les ramasseurs de bois ne reçoivent que 10 % des revenus. On estime que seuls 20 % du bois combustible est ramassé dans des forêts gérées, alors que jusqu'à 70 % provient de sources illégales. La pratique généralisée et non contrôlée de l'abattage d'arbres sans permis est une préoccupation environnementale grave. En plus de l'expansion agricole et de l'exploitation minière, l'exploitation du bois combustible est devenue un des principaux facteurs de la déforestation et de la dégradation des forêts. Afin de ralentir la déforestation et de réduire la pollution provenant du bois combustible, le Gouvernement burkinabè essaye de promouvoir des cuisinières à gaz butane à rendement énergétique élevé.

2.8.2 HYDROCARBURES ET COMBUSTIBLES FOSSILES

L'Afrique est le continent ayant le moins de raffineries de pétrole au monde. Les producteurs de pétrole du continent comptent sur les importations de carburant pour compléter leur propre production, car la capacité de raffinage ne leur permet pas de répondre à la demande. Alors que le Burkina Faso lui-même n'a pas d'installations pétrochimiques, les raffineries de pétrole les plus proches se trouvent au Ghana (Tema Oil Refinery/Tullow Oil) et en Côte d'Ivoire (Société ivoirienne de raffinage). Le Bénin n'a que des installations de stockage à Cotonou. Le Nigéria, la plus grande économie d'Afrique, est le producteur de pétrole dominant de la région, avec une production de 2,4 millions de barils par jour en 2015 et 4 raffineries de pétrole, à Kaduna, Warri et 2 à Port Harcourt.

Ne disposant pas de ses propres approvisionnements en pétrole et de capacité nationale propre de raffinage, le Burkina Faso dépend complètement de produits raffinés importés. Les activités d'importation et de stockage des hydrocarbures sont le monopole de la Société nationale burkinabè d'hydrocarbures (SONABHY), tandis que les activités de transport et de distribution sont ouvertes à la concurrence (par exemple Total Burkina, Shell). Faute de réserves propres de carburant fossile, les importations annuelles d'hydrocarbures en 2016 se sont élevées à 180 000 tonnes (principalement par camion venant de 3 ports maritimes : Lomé au Togo, Cotonou au Bénin, et Abidjan en Côte d'Ivoire). Ces importations ont consisté à 83 % (c'est à dire 150 000 tonnes) de distillat pour gazole moteur (DDO) et 17 % (c'est à dire 30 000 tonnes) de fioul lourd (HVO). Les produits pétroliers raffinés représentent à peu près 20 % des importations totales du Burkina Faso. En tant qu'entreprise étatique, la SONABHY est le fournisseur exclusif de carburant à SONABEL, Société nationale d'électricité du Burkina Faso, responsable de la transmission et de la distribution d'électricité au Burkina Faso.

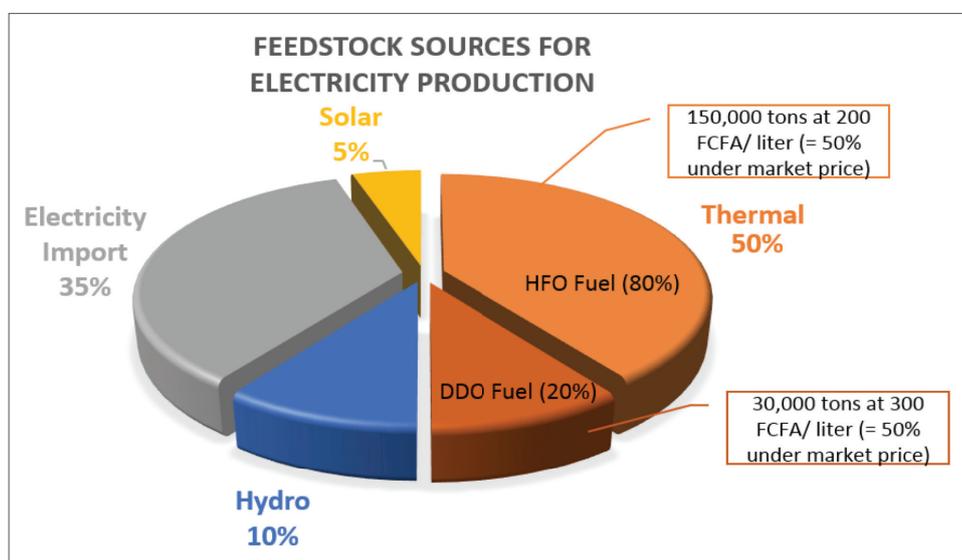


FIGURE 9
Ventilation des sources de matières premières pour la production d'électricité

En termes d'électricité, le Burkina Faso compte également fortement sur les carburants fossiles thermiques. En 2016, la production nationale thermique a fourni 60 % de la capacité totale de production d'énergie électrique du pays (50 % d'hydrocarbure thermique et 10 % d'hydroélectricité thermique) alors que 35 % de l'électricité était importée de la Côte d'Ivoire voisine. Néanmoins, le niveau de l'accès à l'électricité au Burkina Faso est l'un des plus faibles du monde. Quinze % seulement de la population a accès à l'électricité, contre une moyenne en Afrique de 40 %. La part des énergies renouvelables (principalement l'énergie solaire) s'élève actuellement à 5 % seulement.

Afin de faciliter l'accès à l'énergie, les hydrocarbures sont hautement subventionnés. Les subventions de l'État sont censées maintenir les prix artificiellement bas du carburant fourni à la SONABEL pour la production d'énergie électrique à 300 FCFA (0,52 \$ É.-U.) par litre de DDO et 200 FCFA (0,34 \$ É.-U.) par litre de fioul lourd. En 2016, les subventions étatiques totales à la SONABHY ont atteint 39,5 milliards de FCFA (soit près de 70 millions \$ É.-U.) Alors que les subventions pétrolières gouvernementales peuvent sembler bénéfiques à première vue, les effets à long terme sont très néfastes, et le Gouvernement burkinabè dépense régulièrement des millions de dollars par an pour les paiements de subventions, de redevances d'exportation et de redevances d'importation. Le mécanisme d'ajustement des prix des hydrocarbures est défini par des ordonnances ministérielles.

La crise énergétique au Burkina Faso est exacerbée par les pannes récurrentes du matériel de production d'énergie thermique, les retards de la remise en service des générateurs, l'interruption de l'alimentation de carburant pour les usines de production d'énergie, l'insuffisance des investissements pour la réhabilitation des installations électriques et la diminution de l'énergie importée de Côte d'Ivoire. Depuis 2017, le Gouvernement envisage d'importer 100 MW d'électricité du Ghana et 300 MW du Nigéria.

2.8.3 PERSPECTIVES DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

L'amélioration de l'approvisionnement énergétique et de l'accès à l'énergie sont des éléments clés du plan de développement stratégique du Gouvernement. Conformément aux objectifs établis dans le PNDES, le Gouvernement entend, entre autres : a) augmenter la part des énergies renouvelables et de l'énergie importée dans le mélange énergétique nationale ; b) promouvoir l'autonomie énergétique à l'échelle du pays ; et c) réduire l'utilisation du carburant diesel pour le fioul lourd, ce qui devrait aider à abaisser les coûts de production de la SONABEL. À cette fin, le Gouvernement a décidé de créer l'Agence nationale des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (ANEREE), dont les attributions sont les suivantes :

- suivi, supervision et promotion du marché des énergies renouvelables (ER) et de l'efficacité énergétique (EE) ;
- établissement d'une Stratégie nationale pour la promotion de l'efficacité énergétique ;
- appui, renforcement et direction de projets pilotes d'ampleur nationale ;

- rassembler le secteur privé, les organisations non gouvernementales (ONG) et les partenaires techniques et financiers ;
- réaliser des missions de services commerciaux et autres services publics dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ;
- appuyer la recherche, l'innovation et la formation dans ses deux domaines.

Afin de favoriser la transition vers une économie verte, de réduire les émissions de GES et de mettre en place la capacité de résilience aux changements climatiques, l'objectif stratégique n° 3.5.1. du PNDES prévoit également la création de 2 000 écovillages d'ici 2020 (à un coût estimé par le Ministère de l'environnement et du développement durable de 144 millions \$ É.-U.). Simultanément, le Gouvernement entend faire passer la contribution des énergies renouvelables à la production totale énergétique de 5 % à 30 %.

L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le mixte énergétique actuel du pays non seulement améliorerait l'accès à l'électricité mais réduirait également la coûteuse dépendance du pays par rapport aux carburants fossiles importés pour la production d'énergie électrique.

2.9 INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

Le secteur du transport, et en particulier l'infrastructure routière, constitue un important atout du développement socio-économique de n'importe quel pays. Comme la figure 10 ci-après le montre, le plus grand défi du Burkina Faso en matière d'infrastructure réside dans le secteur du transport. Du fait de son enclavement, le Burkina Faso dépend totalement de corridors routiers opérationnels pour accéder aux ports maritimes dans les États voisins de la Côte d'Ivoire (Abidjan), du Ghana (Accra/Tema), du Togo (Lomé), du Bénin (Cotonou) et du Nigéria (Lagos).

Alors que son emplacement géographique désigne le Burkina Faso comme une plate forme de transit naturelle pour l'Afrique de l'Ouest, son enclavement impose une grande majoration des coûts d'importation et d'exportation. Les liaisons par corridors routiers et les distances jusqu'aux principales plates formes commerciales nationales (Ouagadougou, Bobo-Dioulasso) jusqu'aux ports maritimes disponibles font toutes environ 1 000 kilomètres ou davantage. Le délai moyen de transit sur le corridor routier entre Ouagadougou et le port de Tema (Ghana) prend 12 à 15 jours. En conséquence, les coûts du transport sont aggravés par tous dysfonctionnements de la chaîne de transit, par exemple, dans les administrations douanières, les délais d'attente pour traverser les frontières et les coûts logistiques, et y sont très sensibles. Dans le cas du transport d'huile végétale brute par camion-citerne, le délai et les conditions climatiques difficiles peuvent entraîner en outre la détérioration de produits car les acides gras non estérifiés risquent de se développer pendant les longs temps de transit terrestre.



FIGURE 10
Corridors routiers jusqu'aux ports maritimes internationaux

Le Burkina Faso est totalement dépendant des couloirs routiers terrestres pour l'accès aux structures de raffinage, de chargement et de manutention sur les ports maritimes internationaux.

En dépit du bon état des routes principales, l'importance de la distance à couvrir désavantage le pays en termes de compétitivité. Les données de 2011 de la Banque mondiale et de la Banque internationale pour la reconstruction et le développement (BIRD) révèlent que les délais et coûts de l'exportation sont non seulement plus élevés que ceux imposés aux États membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) de 2011, mais également que ceux des autres États africains. Ces obstacles affecteront, à n'en pas douter, la viabilité économique du transport de biomasse à faible valeur et de la production de biocarburant.

Les obstacles au commerce au Burkina Faso

Indicateur	Burkina Faso	Niger	Mali	Cameroun	Côte d'Ivoire	Ghana	Sénégal	OCDE
Délai d'exportation (jours)	41	59	32	23	25	19	11	11
Coût d'exportation (\$ par conteneur)	2 662	3 545	2 075	1 250	1 969	1 013	1 098	1 090
Délai d'importation (jours)	49	64	37	26	36	29	14	11
Coût d'importation (\$ par conteneur)	3 830	3 545	2 955	2 002	2 577	1 203	1 940	1 146

TABLEAU 4

Obstacles au commerce

Source: Banque Mondiale, Faire des affaires 2011, et la BIRD, Infrastructure du Burkina Faso : Une perspective Continentale, 2011

Un précurseur nécessaire au développement, à la production et à l'utilisation de SAF économiquement viables est l'identification d'une chaîne d'approvisionnement locale fonctionnelle. Cela dépendra, entre autres, de l'infrastructure routière existante et de l'accessibilité de zones de culture de matières premières.

Alors que les principales routes traversant le Burkina Faso sont en général pavées et en relativement bon état, la connectivité et l'accessibilité décroissent en dehors des tronçons principaux du réseau, en particulier dans les zones rurales et zones de production agricoles où les routes sont faites de terre ou de sable. De plus, au moins 50 % des routes classées du réseau tertiaire sont impraticables pendant

la saison des pluies. Il en résulte que certaines zones à haut potentiel agricole (comme la zone de Bagré dans le sud du pays) sont sous-exploitées, car les fermiers ont des difficultés à acheminer leurs produits vers les marchés. Cette situation est aggravée par le fait que Ouagadougou et Bobo-Dioulasso comptent pour 70 % de la population urbaine du pays et que les capitales régionales manquent d'infrastructures économiques et de connectivité avec ces centres urbains plus grands et leurs arrière-pays.

PHOTO 5
Infrastructure routière



L'état des routes constitue un sérieux défi à la récupération et au transport de biomasse et de biocarburants.

La déconnexion entre les centres urbains et la campagne est un facteur particulièrement critique dans la récupération de grands volumes de biomasse à faible valeur en et dans son transport vers des unités de conversion situées au centre. Les énormes quantités de biomasse nécessaires au maintien des opérations de transformation du carburant local à une échelle commerciale font du transport et de la logistique de grands défis. En raison de leur faible densité énergétique, de grandes quantités de biomasse sont nécessaires pour alimenter des unités de production potentielles. La gestion de ce matériau volumineux peut se révéler onéreuse et peu rentable au-delà d'un certain rayon. Selon le rapport BIRD référencé ci-dessus, moins d'un quart de la population du Burkina Faso vivrait dans un rayon de 2 km d'une route praticable par tous temps. Comparée à celle d'autres États africains, l'accessibilité rurale au Burkina Faso est de 27 % plus basse que celle des pays africains à bas revenus (LIC) et même 60 % plus basse que dans les pays africains à revenus moyens (MIC). Cependant, l'accès routier aux zones de production agricole et aux fermes rurales est une condition indispensable à l'organisation d'un marché fonctionnel et d'une chaîne d'approvisionnement de biocarburant. Autrement, même les potentiels de rendement et cultures à haute valeur ajoutée les plus prometteurs ne suffiront pas au Burkina Faso pour surmonter l'insuffisance de connectivité des transports ruraux inadéquate et compenser les coûts de logistique disproportionnellement élevés. Comme la culture à grande échelle de matières premières et la production de biocarburants dépendent directement des conditions infrastructurelles sous-jacentes, des investissements continus dans le réseau routier et dans la maintenance routière sont nécessaires. Tout investissement de ce type non seulement favorise le secteur du transport en soi, mais il contribue simultanément à des objectifs plus élevés de développement régional et rural et garantit potentiellement une production agricole valant des millions de dollars. Le Gouvernement a un programme spécifique d'amélioration de 5 000 km de routes rurales par an. La Stratégie de réduction de la pauvreté du pays [Stratégie de croissance accélérée et de développement durable (SCADD)] met également en exergue le développement des infrastructures et des services de transport comme élément central de l'amélioration de la connectivité interne et externe et de l'amélioration du commerce et des activités économiques.

3. ÉVALUATION DES SOURCES DE MATIÈRE PREMIÈRE POUR LA PRODUCTION DE BIOCARBURANTS

3.1 PLANTES SUCRIÈRES OU CONTENANT DE L'AMIDON (SUCROSE)

3.1.1 CANNE À SUCRE

3.1.1.1 Adéquation de la matière première

Une des matières premières dominantes pour la production de biocarburants inclut les sucres des amidons agricoles et de la canne à sucre. La canne à sucre est l'une des cultures les plus efficaces en termes de photosynthèse, cultivée principalement dans des régions tropicales et chaudes. Les tiges de la canne constituent plus de 7 % de la plante à maturité et contiennent jusqu'à 20 % de saccharose au poids.

La canne à sucre peut être utilisée comme matière première pour produire des carburants. Par exemple, le saccharose produit au Brésil est actuellement la principale matière première pour les technologies de fermentation dans le domaine de l'aviation, comme la production de farnésène par Amyris. Cependant, la production de sucre de canne dépend d'un climat spécifique et en dépit de sa grande efficacité en termes de photosynthèse, la zone terrestre nécessaire pour une culture significative est encore substantielle et potentiellement en compétition directe avec les autres productions alimentaires. De plus, tout SAF produit à partir de sucre de canne serait en compétition directe avec le bio éthanol en tant que substitut à l'essence.

En 2014, la Banque de Développement du Brésil a financé une étude internationale analysant la faisabilité de la production de biocarburants dans les États membres de la CÉDÉAO (Étude de viabilité de la production de biocarburants dans l'UEMOA). Tous les États de la CÉDÉAO sont confrontés aux défis d'une productivité agricole faible et de l'insécurité alimentaire. La privation d'énergie durable crée des obstacles supplémentaires. Dans ce contexte, la production de biocarburants ne peut être poursuivie isolément ; elle devrait idéalement être une partie intégrante d'un plan plus global pour l'agro-énergie au sein et à travers des secteurs qui assurent aussi en même temps l'autosuffisance alimentaire et l'accès à l'énergie.

Lors de la recherche de la matière première la plus appropriée pour la production de biocarburants dans les États de la CÉDÉAO, 12 cultures en tout ont été analysées quant à leurs potentiels énergétiques respectifs. Les principaux critères de sélection incluaient l'utilisation agricole, la productivité et le rendement, les besoins en eau, l'occupation des sols et la viabilité financière.

Selon les conclusions de cette étude, parmi toutes les sources de matières premières, seuls les carburants à base de canne à sucre offrent des perspectives commerciales correctes, non seulement pour le Burkina Faso mais également pour les autres États de la CÉDÉAO. L'étude a conclu en outre qu'en raison de sa parfaite adaptation aux conditions agro-climatiques locales et de ses impacts socio-économiques positifs, la canne à sucre se révélait la matière la plus compétitive en termes de coûts. La disponibilité de main d'œuvre qualifiée et de systèmes d'irrigation efficaces, en combinaison avec les technologies de production Brésiliennes, a constitué les principaux facteurs sous-jacents pour la mise en place d'un modèle commercial à succès dans les États de la CÉDÉAO.

Trois macro-régions furent identifiées pour la production de biocarburants par transformation de la canne à sucre en éthanol au Burkina Faso, en raison de leurs sources d'eau naturelle et de leur accès à l'irrigation, de l'aptitude culturale des sols et de la proximité d'infrastructures essentielles de logistique, de stockage et de transport. Elles sont :

- la province de la Comoé, dans la région administrative des Cascades près de la frontière avec la Côte d'Ivoire ;
- les provinces de Moun Houn, Nayala et Kossi, sur les rives de la Volta noire et au nord de la ville de Dédougou ;
- la province de Boulgou, au sud-est de Ouagadougou (voir figure 11).



PHOTO 6

Plantation burkinabè de canne à sucre

4 000 ha de plantation de canne à sucre irriguée près de Banfora/des Cascades dans la zone agroécologique sud-soudan

La canne à sucre demande une terre agricole de premier choix, des engrais et de grandes quantités d'eau (1 500 à 2 500 mm par an). Dans les terres sèches du Burkina Faso, la canne à sucre ne peut donc être cultivée sans irrigation. À la date de juin 2017, 3 % seulement des terres agricoles du Burkina Faso étaient irriguées. En raison du climat et de gros problèmes d'eau, la culture de la canne à sucre est limitée à une zone relativement petite dans la partie méridionale du pays. Les contraintes naturelles sont reflétées dans la taille réelle de la zone de culture.

Entre 2000 et 2014, la zone irriguée pour la culture de la canne à sucre au Burkina Faso est passée de 4 000 ha à 4 728 ha. Selon les estimations les plus récentes, la zone totale cultivée en 2017 dépassait légèrement les 5 000 hectares.

En se basant sur un rendement de +/- 100 tonnes/ha, les récoltes de cannes à sucre du pays se montent à 500 000 tonnes. En supposant un rendement moyen de conservation de 4 000 litres d'éthanol par ha, le Burkina Faso a actuellement une capacité de production théorique de 20 000 m³ ou 20 millions de litres de bioéthanol à base de canne à sucre. Si l'on considère une densité d'énergie de 0,789 kg/m³ et une contenance énergétique spécifique de 29,6 MJ/kg, cela représente 15 800 tonnes et un pouvoir calorifique équivalent de 468 000 gigajoule (GJ) ou 79 850 bep, respectivement.

FIGURE 11
Principales zones de production de canne à sucre



La société sucrière précédemment détenue par l'État, SN Socuco, (Nouvelle société sucrière de la Comoé) produit 35 000 tonnes de sucre et 12 000 tonnes de mélasse. SN Sosuco est le plus important employeur privé du Burkina Faso, contrôlé à 52 % par le Fonds Aga Khan pour le développement économique à travers ses services de promotion industrielle (IPS) de l'Afrique de l'Ouest. Elle est basée à la périphérie de Banfora, exactement au centre de la province de la Comoé dans la région des Cascades. Profitant de la disponibilité de ressources d'eau naturelle (fleuve Comoé, cascades) et d'un système automatique d'irrigation par aspersion, la SN Sosuco cultive 4 000 ha de canne à sucre. L'usine, qui date de 1968, a une capacité de traitement de 2 400 tonnes de canne à sucre par jour. En attendant l'installation de structures d'irrigation supplémentaires, une expansion de la zone de culture jusqu'à 6 000 ha est à l'étude. La capacité de production de la SN Sosuco est limitée par l'accès à l'eau pour l'irrigation.

En ajoutant la zone de culture dans la province de Boulgou, qui offre l'accès, pour l'irrigation, aux ressources en eau du barrage hydroélectrique de Bagré sur la Volta Blanche, la zone totale favorable pour une culture irriguée de la canne à sucre au Burkina Faso pourrait potentiellement se monter à un maximum de 8 000 ha. En appliquant les mêmes ratios de conversion que précédemment, on obtient une capacité de production théorique de 32 000 m³ ou de 32 millions de litres de bioéthanol à base de canne à sucre pour l'avenir, avec un pouvoir calorifique (contenu énergétique) de 747 000 GJ, ce qui équivaut à 122 460 bep.

3.1.1.2 Conversion et valorisation de la matière première

Dans le processus de production du sucre cristallisé, plusieurs sous-produits sont générés. Parmi les plus importants, la mélasse, la bagasse et le jus de canne.

La principale source d'éthanol au Burkina Faso est la mélasse de canne à sucre, un sous-produit de la production sucrière alimentaire. Le rendement de la mélasse de cannes broyées va de 2 à 4 % ; étant donné qu'on a un rendement théorique actuel de canne à sucre de +/- 500 000 tonnes, il atteint entre 10 000 et 20 000 tonnes de mélasse. La matière peut être fermentée grâce à des levures ou autres organismes et distillée en alcools qui peuvent alors subir un processus chimique supplémentaire de transformation en SAF. À ce jour, la mélasse de canne à sucre au Burkina Faso est principalement utilisée pour fabriquer de l'alcool à usage pharmaceutique. En raison de la faible demande d'alcool à usage pharmaceutique, il y a actuellement une surproduction de mélasse. La distillerie intégrée de la SN Sosuco a une capacité de traitement limitée de 7 000 litres de bioéthanol par jour, soit environ 2 millions de litres par an. Pendant le processus de fermentation de l'éthanol un déchet biologique riche est produit ; il est généralement rejeté dans les champs comme fertilisant pour les plants de canne à sucre.

La bagasse est le résidu ligneux qui demeure une fois que les tiges de la canne à sucre ont été broyées pour en extraire le jus. Chaque fois que 10 tonnes de cannes à sucre sont broyées et traitées, une usine sucrière produit près de 3 tonnes de bagasse humide. La bagasse est généralement brûlée pour fournir de l'énergie au moulin à sucre et à la distillerie. Alors que le fort taux d'humidité de la bagasse, généralement de 40 à 50 %, la rend impropre à une utilisation en tant que carburant, le potentiel de la bagasse riche en cellulose pour une production d'éthanol cellulosique est sérieusement envisagé. En comparaison avec d'autres déchets agricoles, la bagasse offre l'avantage d'être disponible au moulin, ce qui signifie que le coût du ramassage et du transport est généralement attribué aux coûts du sucre ou de l'éthanol.

En complément de la mélasse et de la bagasse mises à disposition par la production sucrière, il serait également possible d'utiliser

le jus de canne à sucre comme matière première. Cependant, détourner le jus de cannes de la production sucrière pour alimenter la filière de biocarburants perturberait directement la production alimentaire et résulterait en une pénurie de sucre.

Même si la capacité de production locale a augmenté de façon significative depuis 2012, la production annuelle de sucre de 35 000 tonnes ne répond même pas à 40 % de la demande locale. La pénurie chronique de sucre, d'au moins 90 000 tonnes par an, encourage un trafic de sucre venu du Brésil. En plus, les importations illégales du Brésil et de l'Union européenne profitent des subventions gouvernementales. Par exemple, la "subvention aux producteurs régionaux" est une subvention directe payée par le Gouvernement brésilien afin de financer les producteurs de canne à sucre des États du nord-nord-est afin d'équilibrer leurs coûts de production par rapport à ceux des zones de cultures les plus développées du centre-sud du Brésil. Alors qu'une tonne de sucre local produite au Burkina Faso rapporte 500 000 FCFA (874 \$ É.-U.), les importations brésiliennes transitant via les ports de Lomé, Abidjan ou Tamalé se vendent à 420 000 FCFA la tonne (734 \$ É.-U.), tous frais compris. Avec un différentiel de prix d'au moins 80 000 FCFA (140 \$ É.-U.) par tonne, l'industrie sucrière burkinabè n'est pas compétitive à l'international. Les financements gouvernementaux exercent même une pression supplémentaire sur l'industrie sucrière locale. De plus, les importations de sucre non réglementées peuvent même poser un risque de santé publique puisque les produits agricoles importés ont généralement subi des traitements chimiques. Jusqu'à présent, l'annulation des permis d'importation n'a pas protégé les marchés locaux de la concurrence étrangère.

Alors que la demande de sucre au Burkina Faso dépasse déjà quatre fois les quantités disponibles produites localement, tout détournement du jus de cannes au bénéfice d'une augmentation de la production d'éthanol semble inintéressant et devrait assurément être rejeté.

Les étapes individuelles du processus de conversion menant à la production de bioéthanol comme précurseur de SAF sont illustrées dans la **figure 12** ci dessous.

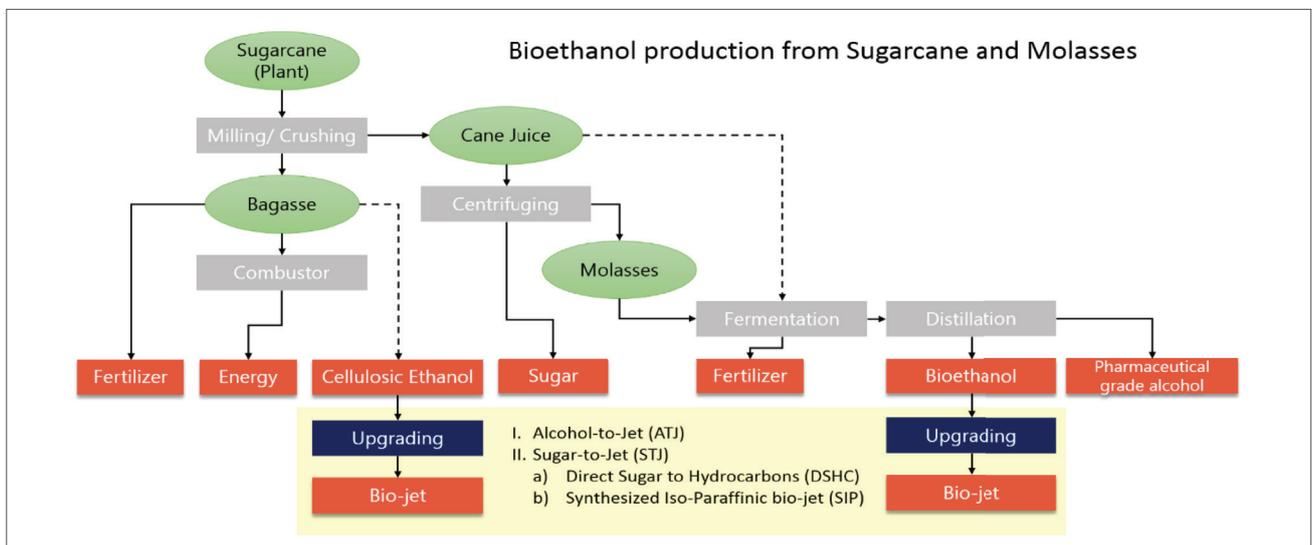


FIGURE 12 Production de bioéthanol à partir de canne à sucre et de mélasse

Une fois que la biomasse de canne à sucre a été convertie en alcool, le bioéthanol qui en résulte peut alors être transformé en SAF. Pour cela, l'éthanol doit être raffiné en kérosène de haute qualité à chaîne longue. Deux procédés biochimiques qui convertissent les sucres en hydrocarbures sont en usage dans l'industrie.

3.1.1.2.1 Le procédé Alcohol-to-Jet (conversion d'alcool en carburant)

Le procédé Alcohol-to-jet implique la fermentation des sucres en alcools, tels que l'éthanol ou le butanol. Ceux-ci sont ensuite raffinés en un courant de produit final incluant non seulement le SAF, mais également d'autres hydrocarbures, produits chimiques et produits dérivés supplémentaires. Le processus de conversion comprend généralement : la déshydratation à l'alcool, l'oligomérisation catalytique donnant des hydrocarbures éthyléniques simples de qualité carburacteur et enfin l'hydrogénation, comme l'ont démontré des sociétés comme Swedish Biofuels and Gevo, le premier producteur commercial de carburants Atj. De même, tout sucre contenant une matière première d'origine bio est d'abord transformé en isobutanol par fermentation, avant d'être raffiné en kérosène iso-paraffinique synthétique. Le carburant Atj de Gevo à base d'isobutanol a été approuvé par l'ASTM en avril 2016, admissible jusqu'à un taux de mélange de 30 % pour les vols commerciaux.

3.1.1.2.2 (SIP-HFS) Isoparaffines synthétiques produites par hydrotraitement de sucres fermentés (SIP-HFS)

Des SAF à base d'isoparaffines synthétiques (SIP) peuvent être produits biologiquement grâce à la fermentation aérobie de sucres par les micro-organismes afin de créer une molécule d'hydrocarbure appelée farnésène. L'association franco-américaine entre Total et Amyris convertit directement les sucres en hydrocarbures (comme le farnésène) par fermentation avec des levures génétiquement modifiées. Le farnésène est alors transformé par hydro transformation en une molécule appelée farnésène, qui peut être mélangé avec les carburants actuels d'aviation. Le circuit de production du SIP HFS, précédemment connu comme étant la transformation directe de sucres en hydrocarbures (DSHC), a été approuvé par l'ASTM International en 2014. En raison de la composition homogène en hydrocarbures de ce carburant (seulement une longueur de chaîne carbonée), le taux de mélange certifié avec le carburant actuel d'aviation est pour l'instant limité à 10 %.

La conversion enzymatique directe des sucres en hydrocarbures est un défi plus important et plus complexe en termes de procédé technologique que l'hydrogénation d'huile végétale, ce qui explique pourquoi on estime que les coûts de production seront remarquablement plus importants que ceux des produits HEFA selon les connaissances actuelles.

Un aspect essentiel de la production de SAF est la nécessité de disposer d'hydrogène (H₂) pour valoriser les matières premières ç base d'hydrate de carbone, de lignine ou de lipides, qui sont riches en oxygène, en hydrocarbures riches en hydrogène qui, d'un point de vue fonctionnel, sont équivalents au carburant d'aviation actuel. Ainsi, il faudra vraisemblablement une coûteuse

étape d'hydrotraitement pour la plupart des plates-formes de technologie SAF, avec des sources externes d'hydrogène utilisées pour extraire l'oxygène sous forme d'eau du matériau de départ, ou pour saturer les liaisons doubles lors d'une étape finale de polissage.

3.1.1.3 Problématiques et contraintes

L'analyse de matières premières commerciales potentielles à base d'éthanol au Burkina Faso révèle que la canne à sucre est le candidat privilégié. Cependant, la viabilité commerciale d'une unité de production d'éthanol demande une ressource sûre et régulière de matière brute et présuppose une production agro-industrielle à grande échelle. La difficulté pourrait être d'avoir un approvisionnement suffisamment important de mélasse en un lieu donné afin de minimiser les coûts de transport pour justifier la construction et l'exploitation d'une unité de production d'éthanol économiquement efficace. Le volume de matières premières dérivées du sucre disponible aujourd'hui ne semble pas encore suffisant pour justifier une chaîne d'approvisionnement régionale autonome avec une infrastructure de production intégrale. En supposant un approvisionnement suffisant, l'utilisation de la canne à sucre comme matière première entraîne encore jusqu'ici plus du double du coût de production de la conversion du maïs en éthanol. Tant qu'il sera plus profitable de produire de l'éthanol à partir du maïs aux États-Unis, il reste plutôt peu probable que les distilleries existantes au Burkina Faso seront mises à niveau ou que de nouvelles installations commerciales de production d'éthanol seront créées.

3.1.1.4 Matrice de faisabilité

Afin de mieux évaluer le potentiel et la viabilité de n'importe laquelle des combinaisons données entre une source spécifique de biomasse nationale (telle que la canne à sucre) et une filière technologique de conversion éprouvée, une matrice de faisabilité incluant des critères d'évaluation sélectionnés illustre les opportunités et les contraintes majeures quant à la maturité d'une chaîne potentielle d'approvisionnement en matières premières locales, ainsi que la faisabilité de l'ensemble d'une chaîne d'approvisionnement, y compris les options technologiques disponibles.

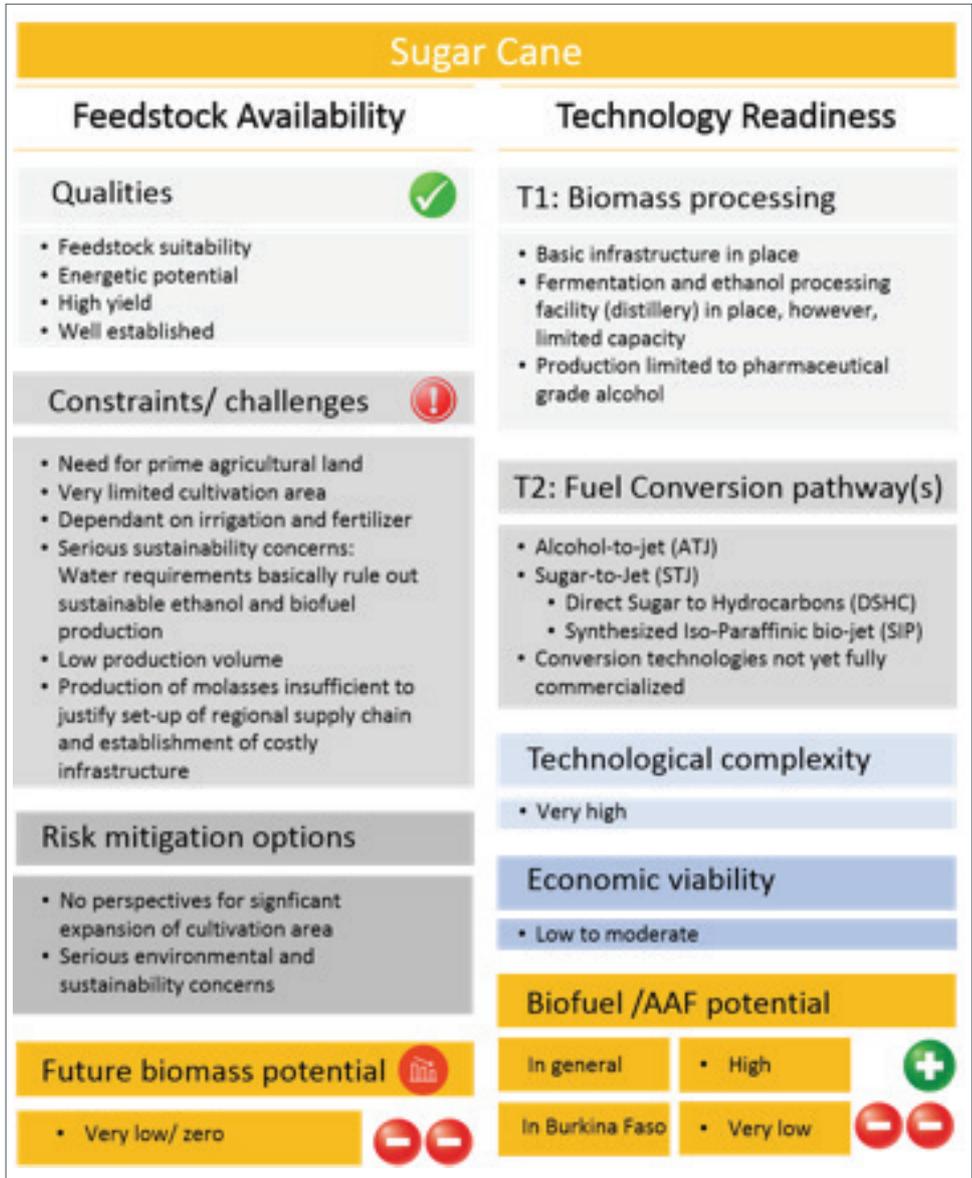
Pour faciliter un aperçu rapide, les critères d'évaluation en fonction desquels tout scénario de faisabilité pourra être mesuré sont ramenés à deux catégories majeures : Disponibilité de la matière première et Niveau de maturité technologique.

L'analyse de la Disponibilité de la matière première prend en compte non seulement le volume actuel et le volume potentiel futur de production de biomasse, mais également les exigences en termes de terre, d'engrais et d'eau, ainsi que les conditions du marché, la tarification, la logistique, le transport, le stockage et autres contraintes et défis potentiels.

L'adéquation de la technologie fait la différence entre deux niveaux de technologie. Les technologies de niveau 1 (T1) se rapportent à la transformation de la biomasse et comprennent les unités de transformation de base des matières premières, les activités de prétraitement, la conversion de la matière première en carburant et l'extraction de l'huile. En comparaison, les technologies de

niveau 2 (T2) désignent les unités de transformation avancée et les filières pertinentes de conversion de combustible, y compris, entre autres, le raffinage, l'hydrotraitement et le craquage du brut.

Étant donné le niveau très faible de mécanisation de l'agriculture au Burkina Faso, l'installation de solutions technologiques de premier niveau constitue déjà un défi majeur avant même que des scénarios de conversion de SAF plus avancés technologiquement ne puissent être envisagés.



3.1.2 SORGO

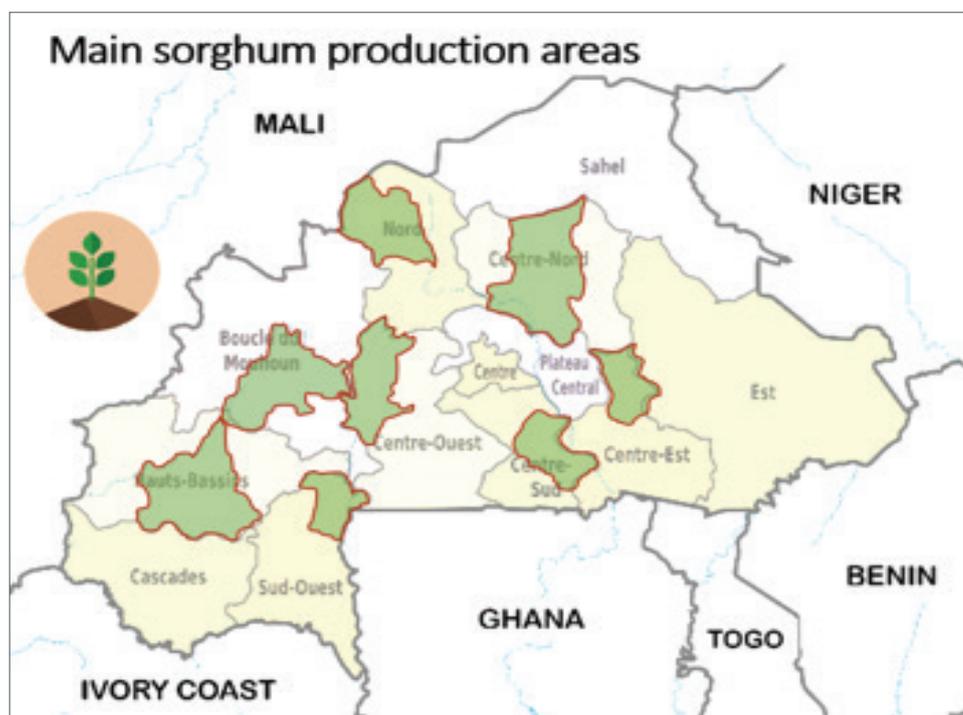
3.1.2.1 Adéquation de la matière première

Le sorgo, avec les millets (un groupe d'herbacées à petites graines hautement changeantes), est la culture céréalière la plus importante du Burkina Faso, juste avant le maïs et le riz. La demande principale de sorgo et de millets est alimentaire, particulièrement dans les régions sèches de l'Afrique sub saharienne où ce sont les principales cultures céréalières.

Les environnements dans lesquels le mil et le sorgo sont cultivés sont soumis aux plus intenses défis environnementaux, qui incluent des précipitations faibles et irrégulières, des températures élevées, des sols pauvres et des pratiques agronomiques inappropriées. Le sorgo et les millets sont bien adaptés à cet environnement difficile et aux conditions climatiques du Burkina Faso, même dans des zones où les autres cultures ont un rendement faible ou ne poussent pas du tout. Ils sont généralement cultivés par des petits agriculteurs dans presque tout le pays à l'exception du sud-

ouest, avec des ressources en eau limitées et sans utilisation d'aucun engrais ou autres intrants. Les zones de production principales de sorgho incluent les provinces de Yatenga (Nord), Mouhoun (Boucle du Mouhoun), Houet (Hauts-Bassins), Kouritenga (Centre-Est), Sanmatenga (Centre-Nord), Sanguié (Centre-Ouest), Loba (Sud Ouest) et Zoundweogo (Centre-Sud) (voir **figure 13**).

FIGURE 13
Principales zones de production de sorgho



Apprécié en tant que culture à usages multiples, le sorgho doux est aussi surnommé le “chameau des cultures” car il est bien adapté aux tropiques semi arides, résiste à la sécheresse, tolère le sol à forte salinité et fait une utilisation très efficace de l’eau. Compte tenu de sa courte période de pousse, son fort potentiel de biomasse et de produit bio, sa tolérance à la sécheresse, à l’engorgement, à la salinité et à l’acidité, et son faible besoin d’eau, le sorgho doux est la culture favorite sur terre sèche dans les tropiques semi-arides. S’agissant des défis des changements climatiques et de la dégradation des sols, les céréales de terre sèche vont devenir de plus en plus adaptées à une production en terre sèche peu favorable, là où d’autres cultures ne peuvent prospérer. Au Burkina Faso et à travers l’Afrique sub-saharienne, le sorgho et les millets sont déjà devenus la source première d’éléments traces, en particulier pour les communautés rurales à faibles revenus. Ceci explique pourquoi le sorgho et les millets constituent de 75 à 90 % du régime alimentaire de la population rurale du Burkina Faso.

Le sorgho doux fournit du grain pour la consommation alimentaire humaine et du fourrage (tiges et feuilles), de plus, les résidus de la plante sont de plus en plus utilisés comme matière première pour la production industrielle de carburants alternatifs. Les variétés de sorgho cultivées de sorgho sont communément regroupées selon leurs utilisations finales, par exemple, le sorgho à grain (nourriture pour l’homme et pour le bétail), le sorgho fourrager, le sorgho doux (pour la production de sucre) et le sorgho bioénergétique. Il existe des différences notables dans la morphologie et la partition carbone relative entre ces groupes : les variétés “à grains” produisent de grosses têtes de grains riches en amidon ; les sorghos doux produisent une longue tige riche en sucre ; et les sorghos fourragers et bioénergétiques produisent une grande quantité de biomasse végétative. La composition du plant de sorgho semble donc idéale ; alors que les grains peuvent servir de nourriture, d’autres parties de la plante peuvent simultanément être utilisées pour produire du carburant. Par comparaison avec le maïs, le riz et le blé, le sorgho et les millets offrent une source d’énergie relativement bon marché sans effet de vase communicant nourriture/carburant. En tant que culture destinée à la production de biocarburant, le sorgho est grandement apprécié pour sa conversion efficace du CO₂ atmosphérique en sucre, ce qui en fait une alternative viable à la canne à sucre ou au maïs pour la production d’éthanol.

Le sorgho a été considéré comme matière première potentielle pour la production d’éthanol parce qu’il accumule dans sa tige du sucre fermentable. Le jus extrait des tiges de sorgho doux (jus de

sorgo) contient généralement environ entre 16 et 18 % de sucres fermentables qui sont principalement composés de saccharose, de glucose et de fructose et qui peuvent être broyées pour en extraire le jus de sorgo comme matière brute pour la production d'éthanol. Alors que les carburants produits à partir de la canne à sucre sont réduits à être produits à partir de mélasse, un produit dérivé de la production de sucre alimentaire, la production de carburant à partir du sorgo peut mettre entièrement à profit l'hydrolysate de sucre de jus de sorgo.

En comparaison directe avec la canne à sucre, le sorgo doux est bien moins gourmand en eau puisqu'il n'extrait qu'un septième de l'eau. Alors que la canne à sucre consomme deux unités et demie d'eau pour produire une unité d'éthanol, le sorgo doux n'utilise qu'une unité d'eau pour produire une unité d'éthanol.

Pour évaluer l'énergie théorique et potentielle de carburant produit à partir de résidus de sorgo, la quantité disponible de matière nécessaire doit être calculée. La quantification dépend de la production annuelle de récoltes de sorgo et du ratio sous-jacent grain-à-résidu (tige). La coexistence de plus de 250 variétés permet seulement une estimation approximative mais néanmoins réaliste. En conséquence, le ratio de grain-à-résidu est estimé à 1:2, soit 1 tonne de grain récoltée pour produire 2 tonnes de tiges. Selon le Ministère de l'agriculture, la production de sorgo au Burkina Faso se monte à un total de 1 730 000 tonnes en 2016-2017. Si l'on considère une zone de récolte de 1 620 000 ha, cela représente un rendement moyen de 1,1 tonne de grains par hectare. En se basant sur le ratio spécifique de grain-à-résidu, la production totale de résidu de sorgo se monte alors à 3 460 000 tonnes.

Toutefois, la fraction de la production totale de biomasse disponible au final pour la bioénergie va dépendre de ses usages compétitifs de même que des contraintes de récolte, de stockage et de logistique. Alors que la production de sorgo doux pour les biocarburants fournit sans nul doute un revenu important aux agriculteurs sur sols secs, la vente de cannes de sorgo aux distilleries au lieu de les conserver à la ferme et de les utiliser comme nourriture pour le bétail pourrait accroître le problème de rareté. Cependant, une fois que le jus de sorgo pour la production d'éthanol a été extrait des tiges, la bagasse (résidu de tiges) devient une source de nourriture alternative pour les animaux, riche en micronutriments et en minéraux en lieu et place des résidus de la culture d'origine. En conséquence, le rabais de 50 % doit être appliqué. Le résultat, c'est que seuls 50 % des quantités de matière première potentielle calculées, soient 1 730 000 tonnes, sont supposées être disponibles pour la production de carburant pour le transport sans entraîner un impact négatif significatif sur la chaîne d'approvisionnement alimentaire.

Le jus de sorgo peut être directement fermenté pour produire le carburant à l'éthanol. La taille de la plante est la caractéristique principale influençant le rendement bioénergétique. De plus, les rendements en éthanol dépendent non seulement des quantités fermentables de sucre dans la plante, mais également de la présence, de la quantité et des types de molécules inhibitrices, telles que la lignine et la cendre, et la quantité totale de biomasse produite par plante. Nonobstant la variation en caractéristiques

de biomasse dans les divers génotypes de sorgo, la productivité moyenne en éthanol peut être estimée à environ 200 g d'éthanol par kg de tige au départ. Si on considère la densité énergétique de l'éthanol (soit 0,789 Kg/m³), 1 tonne de tiges sèches de sorgo produit en théorie environ 254 litres d'éthanol, équivalant à peu près à 560 litres d'éthanol par hectare.

En tenant compte des paramètres ci-dessus, le Burkina Faso a une capacité de production théorique de 440 000 m³ ou 4,4 x 10⁸ millions de litres d'éthanol à base de sorgo. Cela peut être converti en environ 347 000 tonnes d'éthanol et la valeur calorifique équivalente de 107 gigajoule (GJ) ou 1 750 000 bep.

3.1.2.2 Conversion et valorisation de la matière première

Plusieurs méthodes ont été explorées pour la transformation des tiges de sorgo doux pour en extraire le plus de jus possible et pour alimenter une conversion rapide du sucre récolté en éthanol par la fermentation et la distillation. Une fois que la matière première de biomasse de sorgo a été convertie en un carburant combustible propre avec un fort taux d'octane, l'éthanol qui en résulte peut alors être transformé plus avant en carburant pour l'aviation. Pour être envisagé comme carburant pour l'aviation, la qualité de l'éthanol doit être améliorée pour le transformer en kérosène à longue chaîne de haute qualité. Les deux principales filières de conversion sucre à carburant qui sont examinées par l'industrie comprennent la filière AtJ et la filière isoparaffines synthétiques (SIP). Cependant, les deux procédés en sont encore à un stade pré-commercial. Pour soutenir le processus de certification SIP ASTM, une usine de démonstration à petite échelle, produisant approximativement 24 000 tonnes par an de farnésène a été l'unique structure mise en service à Brotas au Brésil. Un aperçu plus détaillé de la filière de conversion de biomasse lignocellulosique est fourni dans la section 3.2.4.

3.1.2.3 Problématiques et contraintes

Le Burkina Faso jouit d'une grande disponibilité de ressources de biomasse à bas coût. Alors que le potentiel du sorgo doux le rend intéressant, les tiges de sorgo et les résidus de la plante représentent une matière première de faible valeur à grand volume. Le résultat est que la mécanisation, l'infrastructure et la logistique sont des préoccupations majeures. Les énormes quantités de biomasse nécessaires pour soutenir le fonctionnement commercial à grande échelle de ces opérations font du transport et de la logistique un grand défi. En raison de leur faible densité énergétique, de grandes quantités de biomasse sont nécessaires pour alimenter des structures potentielles de production.

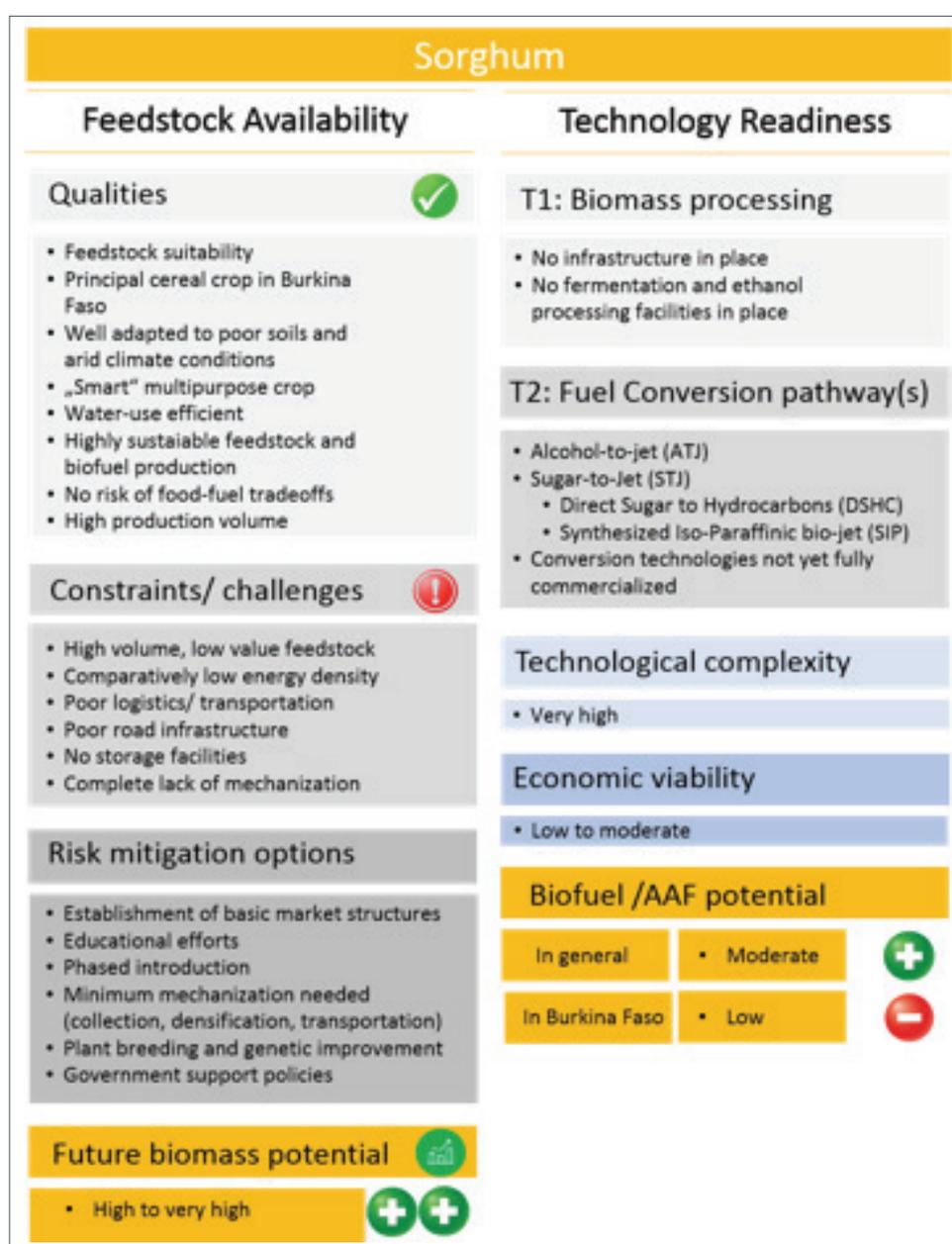
Gérer ce matériau volumineux peut être coûteux et non économique en dehors d'une certaine zone. Une infrastructure routière pauvre et le manque de structures de stockage adéquates compliquent un peu plus l'établissement d'une chaîne d'approvisionnement efficace. En définitive, le faible niveau de mécanisation au Burkina Faso est un obstacle important à l'avancement du secteur agricole en général et à la promotion de la culture, de la récolte et de la transformation de biomasse volumineuse en particulier.

La puissance agricole en Afrique de l'Ouest repose de façon massive sur la main-d'œuvre, est basée sur des exploitations qui dépendent de la houe et autres outils manuels. De tels outils

ont des limitations implicites en termes d'énergie et de résultat opérationnel, en particulier dans un environnement tropical. Ces méthodes sont sources de graves limites en termes de quantité de terre pouvant être cultivée par famille. Elles réduisent l'efficacité de l'exploitation fermière et limitent l'efficacité d'activités essentielles telles que la préparation du sol, la culture, le désherbage, la moisson et les opérations d'après récolte, réduisant ainsi le rendement des cultures.

L'utilisation des tracteurs est particulièrement limitée en Afrique de l'Ouest. Selon la FAO, moins de 8 % des zones cultivées en Afrique de l'Ouest le sont par des tracteurs. La disponibilité et l'usage de tracteurs sont concentrés dans peu d'États (Côte d'Ivoire, Guinée, Nigéria). En concordance avec les données de recensement collectées par le Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD), le nombre total de tracteurs utilisés au Burkina Faso en 2006 était de 8 600 ce qui ne représente que 14 tracteurs pour 100 km² de terre arable, utilisés sur uniquement 0,4 % de la totalité des fermes (cf. Side, Stratégie de mécanisation de l'agriculture familiale en Afrique sub saharienne). En comparaison, on a 130 tracteurs au Brésil, 200 en Inde, 257 aux États-Unis et 728 au Royaume-Uni. Avant d'examiner le potentiel de production de carburant alternatif et de biomasse au Burkina Faso, une question doit être posée, à savoir si une croissance durable à long terme dans le secteur agricole est possible en s'appuyant massivement sur une technologie d'outillage manuel.

3.1.2.4 Matrice de faisabilité



3.2 BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

En raison d'une disponibilité limitée de canne à sucre, les carburants lignocellulosiques de deuxième génération peuvent offrir une alternative viable aux matières premières régionalement appropriées. La lignocellulose peut être dérivée de l'une de quatre sources principales : 1) les résidus agricoles ; 2) les résidus de bois ; 3) les déchets alimentaires ; et 4) les cultures énergétiques spécifiques. Au regard des conditions agroéconomiques et climatiques autant que des pratiques de culture traditionnelle au Burkina Faso, les résidus agricoles impliquent de conduire une analyse plus poussée.

3.2.1 RÉSIDUS AGRICOLES

Les résidus agricoles, et plus particulièrement les résidus de cultures agricoles constituent une grande ressource de biomasse et de potentiels matériaux bruts pour produire plusieurs produits à haute valeur tels que l'éthanol pour carburant, le biodiesel et la bioélectricité. Les résidus agricoles sont composés de matériaux lignocellulosiques, ce qui inclut les tiges et feuilles, ce qui reste une fois que la partie comestible de la plante, telle que le grain, a été extraite. Les résidus de cultures agricoles incluent une grande variété de parties de plantes et de matériaux de biomasse tels que les cannes de maïs, la paille, les balles, tiges et feuilles produits pendant la culture et la récolte de plantes et qui ne sont en général pas retirées des champs avec le produit alimentaire ou fibreux principal. L'activité de culture céréalière génère des quantités considérables de résidus de paille (plus de 60 % de la plantation totale, tributaire de la disponibilité en eau et en nitrogène) qui sont généralement laissés sur la terre cultivée afin de conserver les nutriments du sol, ou incinérés pour prévenir la propagation de nuisibles et de feux incontrôlés. Une certaine fraction de la paille peut être durablement collectée (en laissant suffisamment de nutriments dans le sol) et utilisée pour la conversion en énergie dans une bioraffinerie. Les résidus de biomasse contiennent des quantités variables de cellulose (polymères de glucose), d'hémicellulose (polymères consistant en divers sucres monomères avec à la fois, cinq et six atomes de carbone), de lignine et de petites quantités de lipides, de protéines, de sucres simples et amidons. La combinaison de cellulose, d'hémicellulose et de lignine compte pour environ la moitié des matières végétales produites par photosynthèse et représente la ressource organique renouvelable la plus abondante sur terre.

Les ressources de biomasse lignocellulosique représentent une importante source future d'énergie renouvelable. On peut avancer que le potentiel le plus grand pour des carburants alternatifs passe par un procédé qui fait usage d'abondantes matières cellulosiques à bas coût. Cependant, l'utilisation effective de matière lignocellulosique n'est pas toujours pratique à cause de sa disponibilité saisonnière, de sa qualité variable et des coûts élevés du transport et du stockage. De plus, la fraction ligneuse augmente la rigidité de la matière première et pourrait compliquer la conversion en biocarburants. Selon les propriétés de la matière première considérée, la lignine peut contenir jusqu'à 50 % du contenu énergétique de la biomasse d'origine. Ceci diminuerait plus que probablement l'efficacité globale de la conversion. La fraction ligneuse peut, cependant, être utilisée pour d'autres motifs, tels que la cocombustion pour la chaleur et l'énergie.

Plusieurs facteurs sont importants dans l'évaluation de la pertinence de résidus agricoles en tant que matières premières pour les biocarburants. Ceux-ci incluent le rendement total pour la culture, la quantité de résidus produite, la composition de la culture, et la teneur énergétique inhérente.

3.2.1.1 Résidus de riz

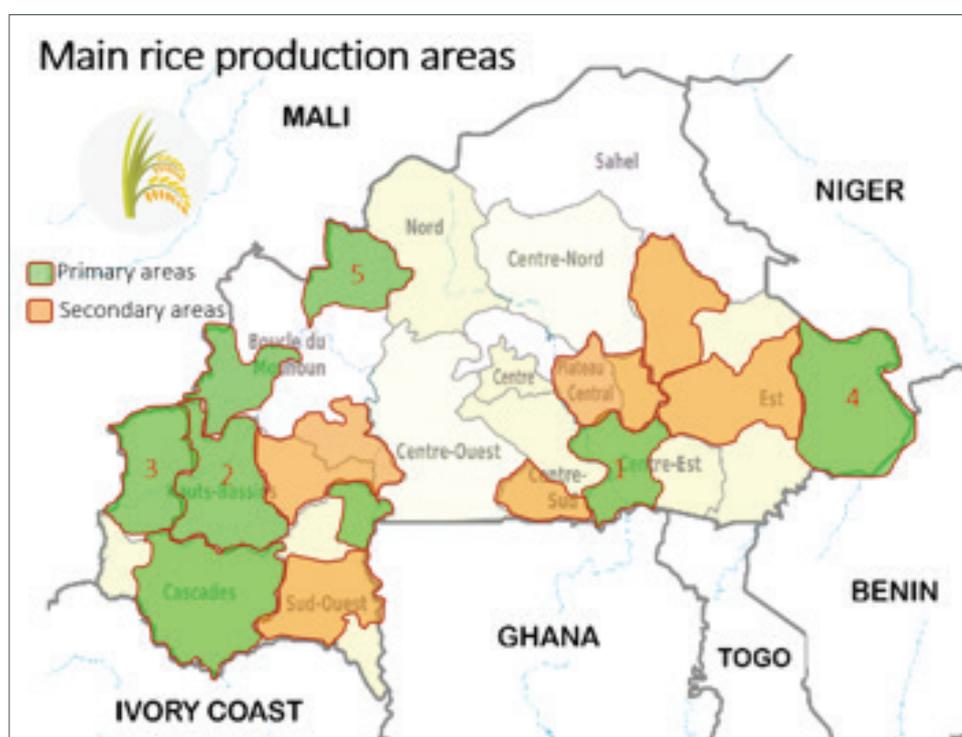
3.2.1.1.1 Adéquation de la matière première

Après le sorgo/millet, le maïs et le coton, le riz est classé à la quatrième place en termes de production et de consommation. La production de riz au Burkina Faso est prometteuse. Elle emploie plus de 150 000 de petits cultivateurs de riz et les rendements sont relativement bons. Cependant, la production nationale réelle de riz d'environ 270 000 tonnes couvre à peine 45 % des besoins de consommation actuels. En conséquence, le pays a dû recourir aux importations de riz pour plus de 330 000 tonnes par an au cours des 6 dernières années afin de pourvoir à la demande locale.

La production de riz au Burkina Faso est soit pleinement irriguée, soit irriguée par retenue (basse terre), ou faite exclusivement en culture sèche, en comptant sur les pluies. Les rendements varient en conséquence et peuvent aller de 1 tonne/ha (alimentation pluviale), à 4 sur 7 tonnes/

ha (pleinement irriguées) en raison de la saison de double culture rendue possible par la maîtrise totale de l'eau. Alors que la culture du riz irrigué ne compte que pour moins de 20 % de la zone rizicole, elle fournit environ 55 % de la production nationale de riz. Par contre, la culture de riz en basse terre compte pour 70 % de la surface rizicole et fournit 40 % de la production nationale de riz, alors que la culture du riz alimentée uniquement par les pluies se monte à 10 % environ de la zone rizicole et fournit 5 % de production nationale de riz. La culture du riz en basse terre est la forme de production traditionnelle la plus largement pratiquée à travers toutes les régions du Burkina Faso, que ce soit sur des sites permettant le contrôle de l'eau (basse terre traditionnelle non développée) ou grâce à un contrôle partiel de l'eau (basse terre simple développée ou basse terre améliorée). Les chiffres de la croissance potentielle du riz montrent 500 000 ha de zone terrestre exploitable dont moins de 15 % a été développé. La production de riz est encore basée sur une importante contribution de main d'œuvre manuelle. Le riz est généralement récolté à la faucille et laissé dans le champ pour sécher. Le chaume est partiellement brûlé et partiellement incorporé dans le sol afin d'améliorer la matière organique.

FIGURE 14
Principales zones de production rizicole



Les principales zones de production rizicole incluent Boulgou (Centre-Est), Houet (Hauts-Bassins), Kénédougou (Hauts-Bassins), Tapoa (Est) et Sourou (Boucle de Mouhoun). Profitant des possibilités d'irrigation offertes par le barrage de Bagré sur la Volta Blanche dans le Centre-Est de la province de Boulgou, la production de riz, rien que dans le Centre-Est, compte pour 23 % de la production rizicole du pays. Bagré est une région prioritaire à cause de sa proximité avec le marché, de bonnes connexions vers Ouagadougou en termes de transports, la récente expansion de la terre irriguée de 1 800 ha à plus de 20 000 ha en 2016 et l'importance du riz pour les petits planteurs locaux en tant que culture vivrière et commerciale.

Afin d'évaluer le potentiel énergétique et le potentiel en biocarburant théoriques des résidus de riz au Burkina Faso, la quantité disponible de matière première doit être calculée. La quantification dépend de la production annuelle de riz et le ratio sous-jacent de grain-à-résidu. La culture du riz produit deux types principaux de résidus, paille et balle de riz, qui ont un intéressant potentiel en termes d'énergie.

La paille de riz est la partie végétative de la plante de riz (*Oryza sativa* L.), coupée à la récolte du grain. C'est un des déchets lignocellulosiques inutilisés les plus abondants au Burkina Faso. La paille de riz contient de façon prédominante de la cellulose (32 à 47 %), de l'hémicellulose (19 à 27 %), de la lignine (5 à 24 %) et de la cendre (18,8 %). La paille de riz est séparée des grains après que les plantes ont été battues manuellement. En raison du faible taux de mécanisation, la plupart des cultivateurs n'ont pas accès aux batteuses mécaniques.

Les balles de riz sont le résidu agricole le plus prolifique dans les pays producteurs de riz dans le monde. Les balles de riz, principal produit dérivé du processus d'usinage, sont la couche dure qui protège les grains de riz comestibles ; elles constituent environ 25 % du poids du riz en paille. Les balles de riz, composées principalement de lignocellulose et de silice ne sont actuellement pas utilisées de façon significative au Burkina Faso. Quoi qu'il en soit, elles ont du potentiel comme source alternative d'énergie. Une analyse grossière des valeurs calorifiques sous-jacentes illustre l'importance de la balle de riz et de la paille de riz comme source viable d'énergie. En comptant sur un ratio moyen de grain-à-balle de 0,25, 1 tonne de riz produit 250 kg de balle de riz avec une teneur énergétique moyenne de 15 MJ/kg pour 5 à 12 % d'humidité et un pouvoir calorifique équivalant à 3 600 kcal/kg.

En comparaison avec les balles, il est plus difficile de calculer le volume potentiellement disponible de paille de riz. Selon les variétés de plantes, la hauteur de coupe des tiges, la qualité du sol et l'humidité retenue pendant la récolte, la biomasse de paille est sujette à de grandes fluctuations. Si l'on considère un ratio moyen de grain-à-paille de 0,75, 1 tonne de riz blanc usiné produit approximativement 750 kg de paille avec une teneur énergétique de 12,5 MJ/kg à 10 % d'humidité et une valeur calorifique équivalant à 3 000 kcal/kg. La production de riz au Burkina Faso est estimée à 274 000 tonnes en 2016-2017. En considérant une zone de moisson de 172 000 ha, cela représente un rendement moyen de 1,6 tonne de riz usiné/ha.

En tenant compte du ratio spécifique de grain-à-résidu, comme mis en évidence dans le tableau 5, le potentiel théorique résiduel se monte ainsi à 68 500 tonnes par an pour les balles de riz et à 205 500 tonnes par an pour la paille de riz. Le facteur disponibilité de la paille de riz et des balles de riz dépend largement de la région, des pratiques de récolte et des usages compétitifs potentiels.

En ce qui concerne les balles de riz, environ la moitié des balles provenant des rizeries est généralement brûlée pour générer de la vapeur afin de faire fonctionner les équipements d'usinage mécanique. Ainsi, en moyenne, seuls 50 % de la totalité de la matière première potentielle (34 250 tonnes), sera au final disponible pour une conversion en énergie. Étant donné son fort taux de cellulose et d'hémicellulose, la balle restante peut être transformée en éthanol.

Concernant la paille de riz, l'enlèvement de la totalité de la paille restant sur un champ après la moisson n'est pas faisable car les résidus sont importants pour le maintien des nutriments, de l'humidité dans le sol et pour le contrôle de l'érosion. La quantité de résidus qui peut être enlevée d'un champ de manière durable dépend, inter alia, du carbone organique du sol, du vent et de l'érosion par l'eau et de l'équilibre de la plante en termes de nutriments. Dans le contexte actuel, l'utilisation pour l'énergie de la quantité de paille jusqu'alors utilisée pour nourrir le bétail n'est pas considérée comme étant socialement et économiquement durable. De plus, la logistique, une faible mécanisation, une infrastructure routière médiocre et le manque d'unités de stockage adaptées sont des obstacles majeurs à l'organisation d'une chaîne d'approvisionnement efficace et soucieuse des coûts. En supposant que 25 % des résidus de la plante soient nécessaires pour une mise en valeur du sol et un autre 25 % soit actuellement dédié au fourrage, des réductions pertinentes selon la disponibilité seraient appliquées. En conséquence, seuls 50 % de la production totale de paille de riz (102 250 tonnes) seraient considérés comme potentiellement disponibles pour une conversion en énergie et pour la production de carburants.

Étant donné les paramètres spécifiques de densité énergétique et de pouvoir calorifique des balles de riz et de la paille, 34 250 tonnes de balles de riz ont un contenu énergétique de 514 000 GJ ce qui équivaut à 87 650 bep. En outre, 102 250 tonnes de balles de riz se traduisent en 1 280 000 GJ et 218 400 bep respectivement (voir **tableau 5**).

Potentiel de paille et de balles de riz pour la production bioénergétique au Burkina Faso				
Type de résidus	Production totale de résidus (t)	Ratio grain-résidus	Facteur d'actualisation/Minoration	Disponibilité de résidus pour la conversion et la production de carburant (tonnes)
Paille	205 500	4:3 (0,75)	50 % (25 % fourrage + 25 % contraintes logistiques)	102 250
Balle	68 500	4:1 (0,25)	50 % (combustion/usinage)	34 250

TABLEAU 5

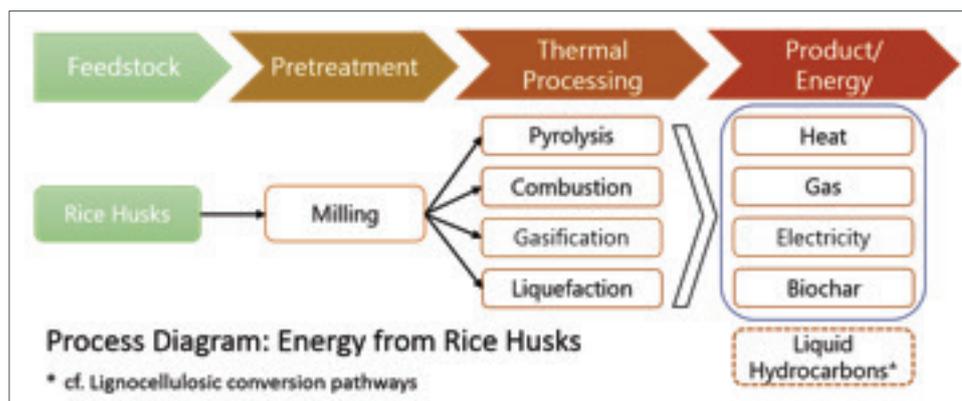
Paille et balles de riz : ratio résidu/grain

3.2.1.1.2 Procédés de valorisation et de conversion de l'énergie

Balles de riz

Bien que les solutions technologiques pour l'utilisation des balles de riz soient bien prouvées, les technologies de traitement et de conversion n'ont pas encore été introduites en Afrique de l'Ouest. Les balles de riz peuvent produire des combustibles, de la chaleur ou de l'électricité par des procédés thermiques, chimiques ou biologiques. Par exemple, les balles de riz peuvent être utilisées pour la production d'énergie électrique ou comme matière première dans les rizeries pour produire de la vapeur pour l'étuvage. En Asie, environ la moitié des balles de riz générées pendant l'usinage sont généralement brûlées pour la production de vapeur pour faire fonctionner l'équipement d'usinage mécanique. Les procédés de récupération d'énergie thermique qui peuvent inclure la combustion, la gazéification et la pyrolyse, mènent généralement à des produits énergétiques alternatifs, comme la chaleur, la bioélectricité et le gaz synthétique.

FIGURE 15
Procédé de conversion des balles de riz en énergie



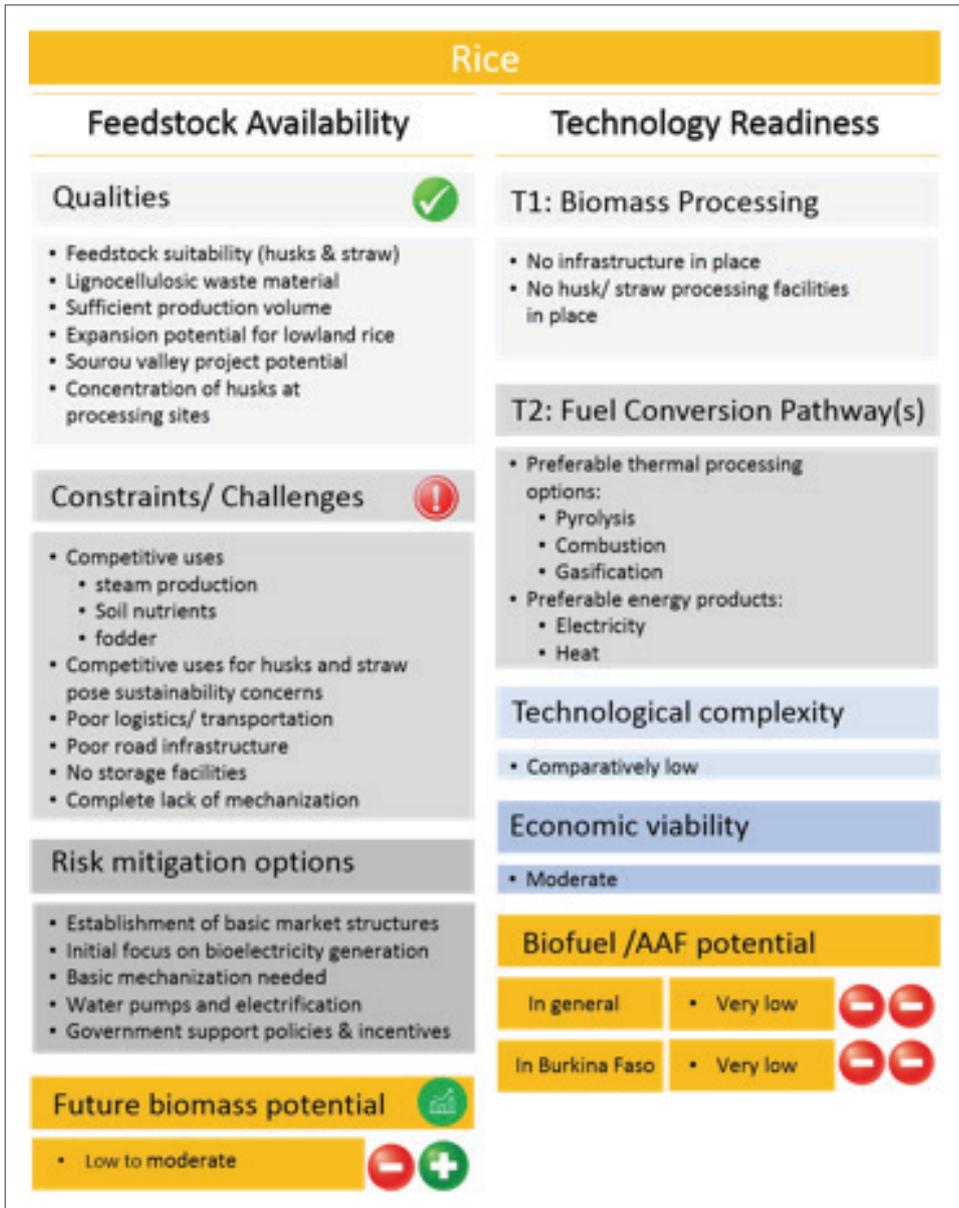
Autrement, la balle de riz pourrait également être transformée en éthanol qui sert de précurseur pour la valorisation sous forme d'hydrocarbures liquides, comme carburant alternatif. Étant donné que ce procédé est fondamentalement lié à la conversion de cellulose et d'hémicellulose, les détails du procédé seront analysés collectivement pour tous les résidus agricoles et les cultures énergétiques qui contiennent des composants lignocellulosiques appropriés pour la conversion en hydrocarbures renouvelables (voir Section 3.2.4 pour plus de détails).

Paille de riz

La paille de riz peut être traitée seule ou mélangée avec d'autres matières de biomasse dans une combustion directe, pour laquelle des chaudières à combustion peuvent être utilisées en combinaison avec des turbines à vapeur pour produire de l'électricité et de la chaleur dans des centrales de cogénération brûlant de la paille ou des usines de production combinée de chaleur et d'électricité (CHP). Par exemple, l'excédent de paille des grains de céréales joue un grand rôle dans la stratégie d'énergie renouvelable du Danemark.

Étant donné ses composantes cellulose et hémicellulose, la paille de riz est tout autant admissible comme matière première pour la production d'éthanol et de carburant (voir Section 3.1.1.2 pour plus de détails).

3.2.1.1.3 Matrice de faisabilité



3.2.1.2 Maïs/Blé d'Inde

3.2.1.2.1 Adéquation de la matière première

Selon les données de la FAO, le blé d'Inde est la culture vivrière la plus généralement cultivée en Afrique sub-saharienne, occupant plus de 33 millions d'ha de terre et fournissant une ressource alimentaire et financière pour plus de 300 millions de personnes. Le blé d'Inde constitue un cinquième des calories et protéines consommées en Afrique de l'Ouest. Au cours de dernières décennies, le blé d'Inde est devenu la céréale la plus vendue et la plus exportée du Burkina Faso. Il constitue désormais 30 % de la production totale de grains. En plus de ses valeurs nutritionnelles, le blé d'Inde représente également une ressource substantielle d'énergie emmagasinée.

Alors que l'amidon de maïs a été largement contesté comme matière première pour la production d'éthanol en raison de la compétition évidente qu'il implique avec la production alimentaire, en particulier aux États-Unis, cette section traite de la production potentielle d'éthanol cellulosique, non pas à partir des grains de maïs, mais plutôt à partir de l'utilisation des résidus agricoles de la culture du maïs, soit les portions cellulosiques (non alimentaires) du maïs. Ces autres parties de la plante de maïs incluent principalement la canne de maïs, qui est un produit dérivé de la production de grain de maïs. La canne de maïs est un terme générique qui désigne presque toute la biomasse épiquée de la culture du maïs à l'exception du grain. Cette biomasse est composée de composants structurels qui incluent les tiges, les épis et les feuilles. Lorsque le maïs est récolté dans le champ, le grain de maïs est séparé des épis, tiges et feuilles. Alors que le grain est emporté pour entreposage et transformation, la canne de maïs n'est actuellement généralement pas récoltée ou utilisée à d'autres fins. Contrairement aux grains de maïs, dont la composante principale est l'amidon, les principaux composants de la canne de maïs sont la cellulose, l'hémicellulose, et la lignine. La cellulose et l'hémicellulose sont des ressources potentielles de sucres fermentables pour la production d'éthanol. La technologie de conversion de cellulose consiste en un prétraitement, l'hydrolyse et la fermentation en utilisant la levure ou d'autres micro organismes. Par contraste avec les matières premières à base de grains, la production d'éthanol à base de cellulose nécessite des micro-organismes capables de produire de l'éthanol à la fois à partir du glucose et du xylose.

Pour plus de détails sur le procédé, se référer à l'analyse des filières de conversion lignocellulosique.

Selon le Ministère de l'agriculture, la production annuelle de blé d'Inde du Burkina Faso est en moyenne de 1,5 million de tonnes. En fonction des besoins d'eau spécifiques à la plante, les zones principales de production couvrent 790 000 ha et sont concentrées dans les provinces de Kéné Dougou, Houet, Tuy et la Comoé dans les régions du Sud-Ouest des Hauts-Bassins et des Cascades (figure 16). Alors que le rendement moyen au Burkina Faso de 1,9 tonne par ha est environ de 20 % plus élevé que le rendement moyen régional en Afrique de l'Ouest, il demeure encore bien en deçà du rendement moyen mondial pour le blé d'Inde (~ 5 tonnes/ha).

FIGURE 16
Principales zones de production de blé d'Inde



En supposant un ratio estimé de grain-à-cannes de 7:6, 1 tonne de grains récoltée produira 0,86 tonne de cannes de maïs avec un contenu énergétique moyen de 16,5 MJ/kg. En appliquant ce ratio à la production annuelle de blé d'Inde on obtient en théorie un résultat de 1 286 000 tonnes de cannes de maïs. Cependant, comme la canne de maïs contient des nutriments fertilisants vitaux, son retrait total entraînerait une diminution des niveaux de carbone ou de matière organique dans le sol. Puisque les coûteux engrais commerciaux ne sont pas une option de remplacement, une quantité significative de cannes de maïs doit donc demeurer sur le champ afin de maintenir la qualité et la fertilité du sol. Pour ces raisons, seuls environ 50 % de la canne de maïs sera considérée comme disponible pour enlèvement et la conversion d'énergie. En raison des inefficacités supposées de ramassage et de stockage, il faudra déduire encore 15 %. Cela laisse malgré tout 450 000 tonnes de matière première issue de résidus de cultures pour la production d'éthanol. Considérant la densité énergétique spécifique et les valeurs paramétriques calorifiques, 450 000 tonnes de cannes de maïs ont un contenu énergétique de 7 425 000 gigajoules (GJ) ce qui équivaut à 1,27 million de bep. Si des pratiques agricoles durables, à bas coûts, compatibles avec l'environnement et des filières d'approvisionnement peuvent être développées et couplées à une technologie de conversion de cellulose, les composants non-alimentaires de la production de blé d'Inde au Burkina Faso pourraient potentiellement fournir 1,27 million de bep par an.

3.2.1.2.2 Matrice de faisabilité

Corn/ Maize							
Feedstock Availability	Technology Readiness						
Qualities  <ul style="list-style-type: none"> • Feedstock suitability (corn stover) • Lignocellulosic non-food by-product • High production volume 	T1: Biomass Processing <ul style="list-style-type: none"> • No infrastructure in place • No corn stover processing facilities in place 						
Constraints/ Challenges  <ul style="list-style-type: none"> • Focus not on corn grains but only on non-food parts of the plant • Competitive uses and sustainability concerns: <ul style="list-style-type: none"> • Soil nutrients • Fodder • A significant amount of agricultural residues (stover) needs to remain on the field to maintain soil quality and fertility • Poor logistics/ transportation • Poor road infrastructure • No storage facilities • Complete lack of mechanization 	T2: Fuel Conversion pathway(s) <ul style="list-style-type: none"> • Alcohol-to-jet (ATJ) • Sugar-to-Jet (STJ) <ul style="list-style-type: none"> • Direct Sugar to Hydrocarbons (DSHC) • Synthesized Iso-Paraffinic bio-jet (SIP) • Conversion technologies not yet fully commercialized 						
Risk mitigation options <ul style="list-style-type: none"> • Establishment of basic market structures • Improvement of agricultural practices • Basic mechanization needed • Government support policies & incentives 	Technological complexity <ul style="list-style-type: none"> • Very high 						
	Economic viability <ul style="list-style-type: none"> • Low to moderate 						
	Biofuel /AAF potential <table border="1"> <tr> <td>In general</td> <td>• High</td> <td></td> </tr> <tr> <td>In Burkina Faso</td> <td>• Low</td> <td></td> </tr> </table>	In general	• High		In Burkina Faso	• Low	
In general	• High						
In Burkina Faso	• Low						
Future biomass potential  <ul style="list-style-type: none"> • High 							

3.2.2 RÉSIDUS FORESTIERS

3.2.2.1 Adéquation de la matière première

Outre la biomasse agricole, la biomasse forestière ou biomasse d'origine forestière représente aujourd'hui l'une des plus grandes sources de matière première pour l'énergie renouvelable. Parmi les exemples, on peut citer les tiges de petite taille, les branches, les éclaircissements dans la forêt et les souches d'arbres ainsi que la sciure de bois, les bois de chauffe et les coproduits de plantations forestières sous gestion. Les bois de chauffe, en général, comprennent tous les combustibles constitués de matière ligneuse, comme les granulés de bois, les briquettes de bois et les copeaux de bois, mais également la biomasse tirée de la forêt et collectée manuellement, comme les branches, les brindilles et autres résidus forestiers. Les plantations forestières ne sont pas limitées à la production de bois à des fins industrielles, mais elles peuvent également donner de grandes quantités de bois pour la production d'énergie et le remplacement des combustibles fossiles. Les plantations forestières dites à rotations rapides avec des espèces d'arbres à croissance rapide et des rotations inférieures à 20 à 25 ans sont mises en place de plus en plus comme source d'énergie renouvelable.

La teneur énergétique du bois varie peu en pouvoir calorifique entre des espèces lorsqu'elles sont testées à la même teneur en eau. Le pouvoir calorifique de la matière sèche varie légèrement d'une espèce d'arbre à l'autre (~ 18 à 22 MJ/kg), étant légèrement supérieur dans les conifères que dans les espèces d'arbres à feuilles caduques. Cela vient du pourcentage plus élevé de lignine et de résine dans les résineux. Selon l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA), le pouvoir calorifique de la biomasse ligneuse est égal à 8 400 Btu/lb. Cela équivaut à 19,5 MJ/kg.

Du point de vue technique, diverses filières ont été développées et sont commercialisées pour convertir la biomasse ligneuse en énergie. La biomasse ligneuse peut être utilisée indirectement en étant d'abord transformée en diverses autres formes de combustibles solides, liquides ou gazeux. Comme cela s'est fait tout au long de l'histoire, le bois peut, par exemple, être converti en charbon par pyrolyse partielle. La conversion de la biomasse tirée de la forêt en SAF exigerait une combinaison de gazéification et de conversion Fischer Tropsch (FT) du gaz synthétique en carburant d'aviation. De nombreux pays scandinaves démontrent actuellement comment les biocarburants peuvent être une partie importante de la chaîne de valeur de l'industrie forestière. Les grands acteurs des industries énergétiques et forestières norvégiennes explorent la possibilité de la production à grande échelle de SAF à partir de la forêt.

3.2.2.2 Problématiques et contraintes

Alors que la biomasse ligneuse et les résidus forestiers semblent bien convenir pour la conversion en SAF, les utilisations concurrentielles, les contraintes logistiques et les besoins de capitaux peuvent encore limiter le potentiel total de récupération d'énergie. Dans le cas du Burkina Faso, les utilisations concurrentielles peuvent être particulièrement pertinentes.

Les forêts sont la principale ressource naturelle du Burkina Faso. Elles couvrent à peu près 5,5 millions ha, ce qui équivaut à 20 % du territoire national. Toutefois, cela n'indique pas automatiquement que la biomasse forestière est disponible comme source nationale potentielle pour la production de carburant d'aviation.

Indépendamment des aspects de durabilité, de transport et de viabilité économique, la disponibilité de la biomasse dépend grandement des pratiques et coutumes traditionnelles. Non seulement au Burkina Faso mais dans toute l'Afrique de l'Ouest, les forêts jouent un rôle important dans la vie sociale, culturelle et économique des gens. La production de bois de chauffe et de charbon est l'utilisation prédominante de la biomasse ligneuse. Au Burkina Faso, la biomasse d'origine forestière, et en particulier le bois de chauffe, représente 90 % de la consommation totale d'énergie. Peu importe combien les méthodes traditionnelles de chauffage et de cuisson peuvent être inefficaces, cette dépendance vis à vis du bois de chauffe pour les besoins énergétiques quotidiens de base, ainsi que l'épuisement connexe des ressources forestières se poursuivront vraisemblablement et même s'accéléreront au cours des quelques prochaines années.



PHOTO 7

Ramassage de bois combustible par des femmes burkinabè

Comme il est de plus en plus difficile de trouver du bois dans de nombreuses zones où les ressources forestières se sont détériorées, les femmes et les enfants doivent marcher des heures à la recherche de bois, dans de vastes zones

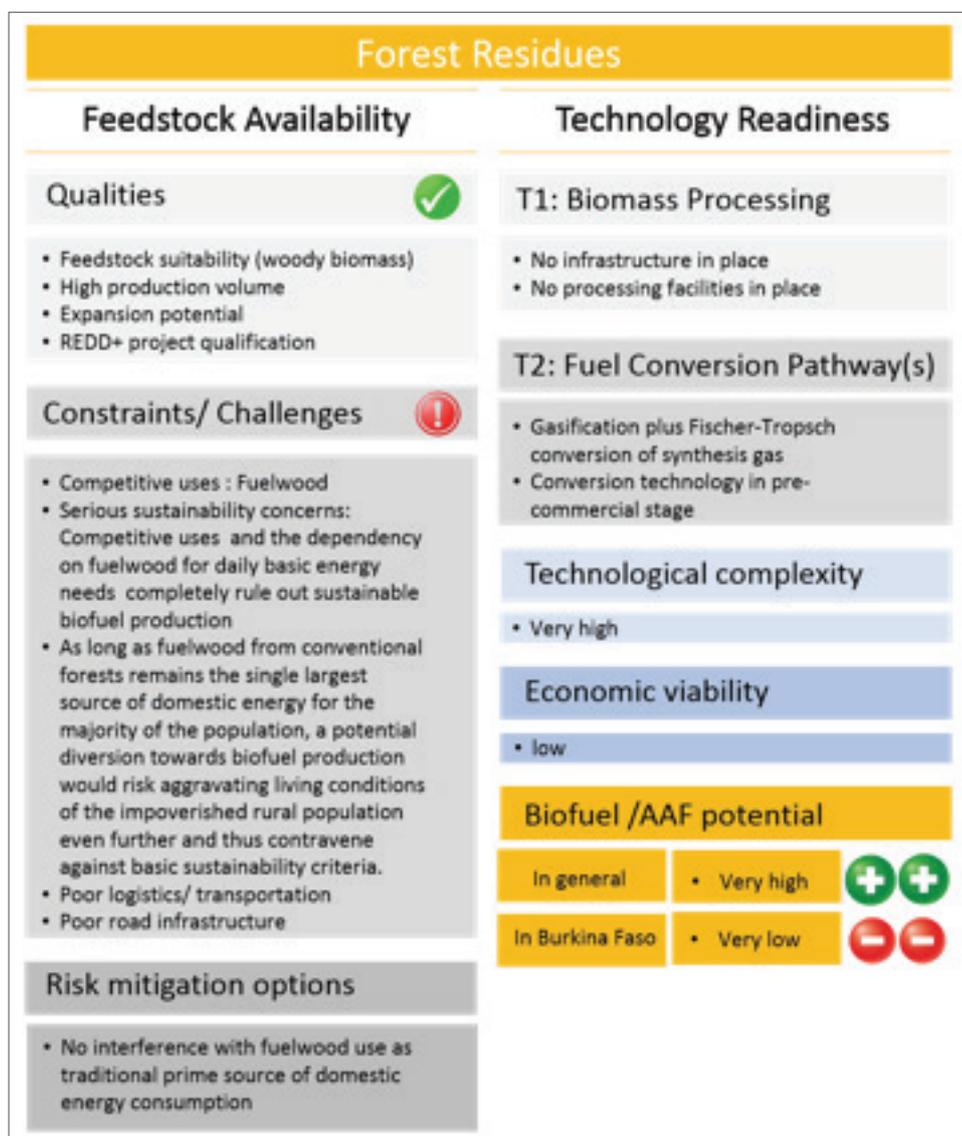
En moyenne, le Burkina Faso produit quelque 15 millions de m³ de bois de chauffe annuellement. Selon la densité spécifique, cela équivaut à peu près à 10 millions de tonnes. En supposant un pouvoir calorifique moyen de 20 MJ/kg, le potentiel énergétique est égal à 2 x 10⁸ GJ ou 34 millions de bep. Néanmoins, les besoins de consommation de bois de chauffe dépassent encore l'offre de 40 %. La consommation moyenne de bois de chauffe par habitant est deux fois plus élevée dans les villes que dans les zones rurales, ce qui conduit à une surexploitation des ressources en bois et à l'épuisement progressif de ces ressources dans un grand rayon autour des villes. Ce phénomène a tant progressé que le rayon d'approvisionnement en bois pour la ville de Ouagadougou est d'environ 200 km, et arrive jusqu'aux régions du Sud Ouest, du Centre Ouest et de l'Est.

On estime qu'environ 110 000 ha de forêts sont perdus chaque année. Les tendances démographiques, ainsi que les changements économiques et environnementaux ont exercé des pressions sur presque toutes les forêts de la région, laissant un paysage dégradé frappé par l'érosion, la sécheresse et l'infertilité des sols. Avec la pauvreté, la croissance de la population et les aléas climatiques comme facteurs sous jacents, l'expansion agricole et la consommation de bois de chauffe sont considérés comme les causes majeures. Le taux de déforestation et l'utilisation

traditionnelle du bois de chauffe interdisent toute utilisation concurrentielle pour la production de biocarburant. Tant que le bois de chauffe provenant de forêts conventionnelles restera la plus grande source d'énergie nationale pour la majorité de la population, un détournement potentiel vers la production de biocarburants risquerait d'aggraver les conditions de vie. Même l'introduction de fourneaux à meilleur rendement énergétique ou de sources alternatives d'énergie, comme l'énergie solaire ou le biogaz, ne devrait pas libérer un potentiel de bioénergie pour des utilisations alternatives dans un avenir proche.

En conséquence, la biomasse ligneuse potentielle ne peut devenir disponible que par la reforestation et/ou des efforts d'afforestation. Dans ce contexte, les plantations forestières sous gestion d'arbres à croissance rapide sur des terres dégradées et normalement non productives peuvent offrir une solution alternative. C'est un défi que de réussir une conversion de terres non gérées, dégradées, en plantations forestières gérées qui combinent la restauration des terres avec une production de bioénergie durable, tout en maintenant les services des écosystèmes et les besoins traditionnels de la communauté. Même si des initiatives de boisement se concentraient sur des espèces d'arbres à croissance rapide comme l'acacia, l'eucalyptus, le Calliandra calothyrsus ou le Gliricidia sepium, faisaient intervenir les communautés locales et étaient conformes au développement par le pays d'un programme national REDD+ et du "Projet de gestion des forêts et des régions boisées", financé par la Banque mondiale, il est peu vraisemblable que de telles initiatives puissent libérer suffisamment de potentiel de bioénergie pour la production de SAF. Indépendamment du taux actuel de boisement et de la productivité moyenne des plantations forestières, la pénurie de bois de chauffe est simplement trop grande pour répondre aux besoins de la population. Cela exclura les utilisations alternatives pour l'avenir prévisible.

3.2.2.3 Matrice de faisabilité



¹⁹ L'afforestation est l'établissement d'arbres sur des terres arides qui autrefois supportaient la couverture forestière naturelle, mais ont été éclaircies pour d'autres utilisations des terres, généralement l'agriculture, et en général il y a très longtemps.

3.2.3 CULTURES SPÉCIFIQUEMENT ÉNERGÉTIQUES (HERBE À ÉLÉPHANT)

3.2.3.1 Adéquation de la matière première

Au-delà des déchets et résidus agricoles il existe également des cultures dédiées à l'énergie qui peuvent être cultivées spécifiquement pour l'utilisation de leur lignocellulose comme matière renouvelable potentielle pour la production de carburants alternatifs. Les cultures dédiées à l'énergie qui peuvent convertir l'énergie solaire en biomasse à un taux élevé d'efficacité incluent les cultures de bois herbacés, les cultures forestières à courte rotation telles que les saules ou peupliers et les herbes pérennes comme le miscanthus ou le millet vivace. Les caractéristiques clés de ces cultures énergétiques sont leur faible demande en engrais, leur culture peu exigeante en énergie, et leur capacité à pousser sur des sols marginaux.

En théorie, de grandes zones de terres soit marginales, dégradées ou autrement non arables sont disponibles en Afrique de l'Ouest. Confiner la culture d'espèces bioénergétiques à des régions arides et semi-arides (telles que les zones climatiques Sud-Sahélienne et Nord-soudanienne, ainsi qu'indiqué dans les **figures 17 et 18** ci-dessous) qui sont impropres à la production alimentaire en raison de contraintes sévères en matière de sol, de terrain ou d'eau, semble une option intéressante. L'identification systématique et ciblée de zones considérées comme dégradées ou "marginales" pourrait non seulement prévenir tout conflit potentiel entre alimentation et carburant, mais pourrait en fait améliorer la sécurité alimentaire et l'autosuffisance des agriculteurs Burkinabè car certaines cultures pourraient aider à atténuer les processus d'érosion, à restaurer les sols dégradés et à améliorer la matière organique du sol.



FIGURE 17
Zones agroécologiques

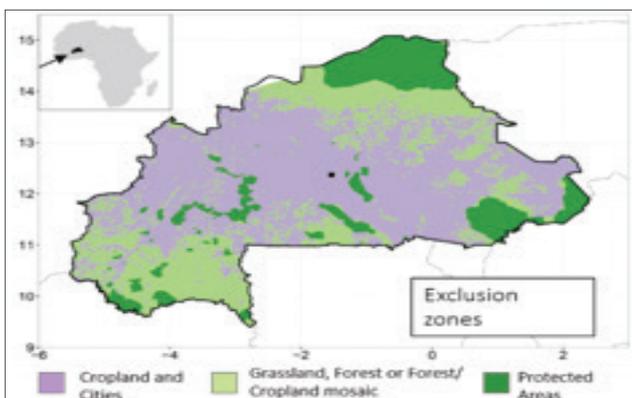


FIGURE 18
Zones d'exclusion

Au Burkina Faso, la zone Sud-Sahélienne qui connaît des précipitations de moins de 600 mm par an et la zone Nord-Soudanienne avec ses précipitations annuelles moyennes entre 600 et 900 mm, sont d'un intérêt particulier. La couverture du sol dans ces zones agro-climatiques inclut des steppes arbustives et la brousse tigrée dans le nord et des savanes arbustives et des graminées annuelles plus au sud. Bien qu'impropres à la culture pour des espèces alimentaires traditionnelles comme les céréales, ces zones marginales tropicales et subtropicales à faible fertilité fournissent encore des conditions acceptables pour la plantation de cultures énergétiques pérennes et herbes énergétiques tropicales à fort rendement, tolérant la sécheresse, comme l'herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*), aussi connue comme Pennisète pourpre.

L'herbe à éléphant est une espèce tropicale d'herbes pérennes native de la steppe africaine. C'est une plante herbacée à croissance rapide avec un potentiel significatif en tant que source d'énergie renouvelable et en tant que matière première pour la transformation en biocarburant. L'herbe à éléphant a de faibles besoins en eau et en nutriments et peut donc s'épanouir sur des terres non arables et marginales. Indépendamment de son potentiel de séquestration de carbone et de son potentiel énergétique, l'herbe à éléphant représente une amélioration précieuse pour les paysages Burkinabè puisqu'elle empêche et réduit l'érosion du sol. De plus, l'herbe à éléphant peut restaurer la biodiversité des sols dégradés et améliorer l'état général du sol. Elle peut également servir de brise vent et de barrière antifeu. Alors qu'elles ont un plus faible impact environnemental, les cultures énergétiques lignocellulosiques comme l'herbe à éléphant fournissent typiquement plus de biomasse par hectare que les cultures conventionnelles. Étant donné ses caractéristiques uniques, l'herbe à éléphant est mise en avant, par exemple par le Gouvernement Thaïlandais. Le Conseil national pour la politique énergétique a porté le seuil cible de production d'énergie à partir de cette culture énergétique à 3 000 MW grâce à un plan de développement alternatif sur moins de 10 ans (2012 à 2021).

Cependant, l'expérience limitée de cultures énergétiques à plus grande échelle au Burkina Faso rend difficile la prédiction de leur potentiel pour l'avenir en tant que source de biomasse pour une production de carburants durables. Un des facteurs clés déterminant si les cultures énergétiques poussant au Burkina Faso peuvent être utilisées pour la production de SAF sera le rendement par hectare.

L'herbe à éléphant a généralement un taux de consommation/production d'énergie plus élevé que celui de la plupart des autres cultures énergétiques. Elle est mieux adaptée aux conditions saisonnières chaudes dans des environnements secs et convertit les radiations solaires de façon plus efficace pendant la photosynthèse, ce qui implique un potentiel de rendement plus important. La productivité de biomasse rapportée de l'herbe à éléphant va de 5 à 43 tonnes/ha annuellement ce qui correspond à un équivalent de 100 bep par hectare.

La culture de l'herbe à éléphant se fait selon les pratiques agricoles conventionnelles. Elle supprime les herbes folles et ne nécessite aucun nutriment complémentaire, ce qui en retour se traduit par des coûts d'établissement relativement bas. L'herbe

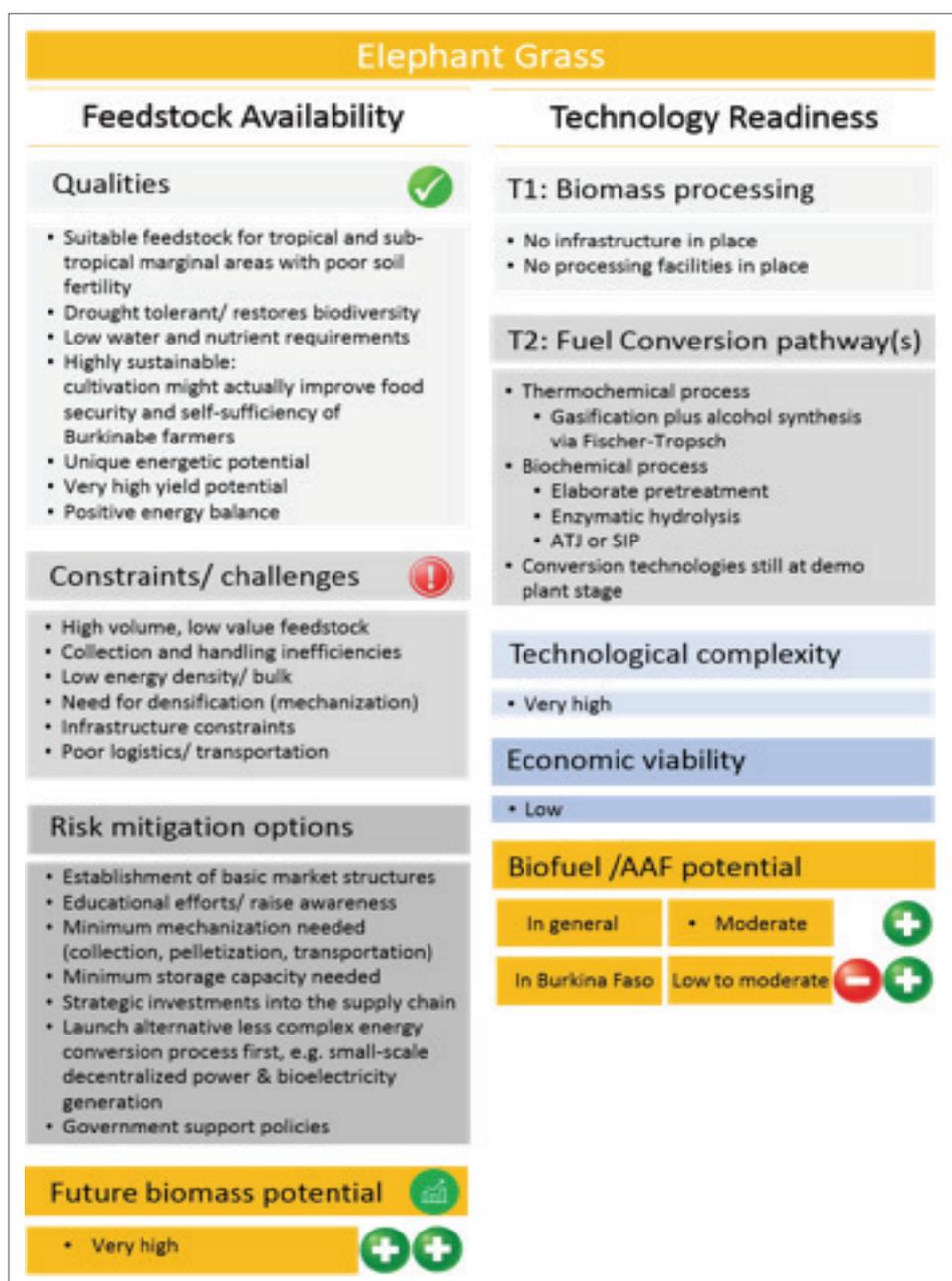
à éléphant possède un équilibre énergétique très positif avec un taux de sortie pour une absorption d'énergie allant jusqu'à 25:1, ce qui en fait une des meilleures cultures à énergie potentielles pour le développement de systèmes de bioénergie économiques et efficaces.

3.2.3.2 Problématiques et contraintes

Alors que la production de biomasse à grande échelle semble faisable au Burkina Faso et que les cultures énergétiques dédiées comme l'herbe à éléphant semblent se révéler les plus intéressantes comme ressource en carburant, les coûts attendus de récupération et de manutention doivent être pris en compte. Le faible taux de mécanisation au Burkina Faso est un énorme obstacle à l'avancement du secteur agricole en général, et à la promotion de la culture d'espèces énergétiques, en particulier. Les défis majeurs sont liés à l'infrastructure de transformation et à l'établissement d'une chaîne d'approvisionnement en biomasse à bas coût. Avec un taux de moins de 15 tracteurs

agricoles pour 100 km² de terre arable au Burkina Faso, la chaîne d'approvisionnement en énergie renouvelable envisagée dépendra principalement de la main d'œuvre manuelle. Cependant, les herbes tropicales sont un commerce à grand volume, à faible densité qui nécessite au moins de la machinerie de base et des équipements agricoles motorisés pour la récolte, le ramassage de matière première et pour le stockage. Comme la plupart des ressources de biomasse sont à faible densité, elles ne peuvent être transformées de façon économique que si elles sont rendues plus denses. Ceci nécessitera quelque degré de compaction en une forme plus gérable, ce qui signifie que les investissements en unités de fabrication de granules de bois pourraient s'avérer nécessaires. Le transport est également un facteur essentiel dans l'utilisation d'herbes tropicales volumineuses, et pour cette raison, les distances doivent être réduites au minimum afin de ne pas induire de dépenses inutiles si la matière première devait demeurer économiquement attractive en tant que source de carburant.

3.2.3.3 Matrice de faisabilité



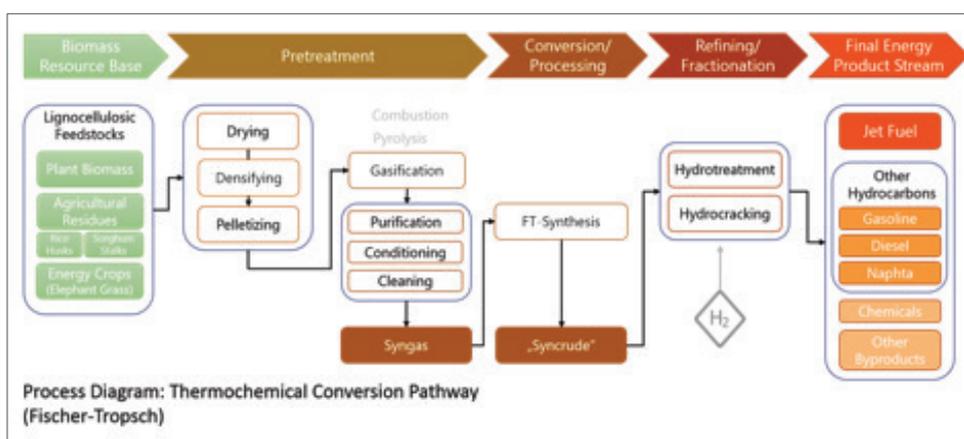
3.2.4 PROCÉDÉS DE CONVERSION LIGNOCELLULOSIQUE

En général, les matières premières lignocellulosiques comme les résidus agricoles et les cultures spécifiquement énergétiques peuvent être converties en énergie (par exemple chaleur ou électricité) ou en vecteurs énergétiques (par exemple de l'huile ou du gaz) au moyen de technologies de conversion thermochimique et biochimique. Dans le procédé biochimique, la cellulose et l'hémicellulose sont transformées par hydrolyse enzymatique en sucres solubles puis on les fait fermenter avec de la levure ou des bactéries pour produire de l'éthanol. Inversement, le procédé thermochimique produit de l'éthanol par gazéification et synthèse d'alcools mixtes.

3.2.4.1 Procédé thermochimique (Synthèse Fischer-Tropsch)

Le procédé thermochimique transforme d'abord les matières premières lignocellulosiques en un gaz synthétique par gazéification à température et pression élevées. Le gaz synthétique purifié et conditionné, qui comprend du monoxyde de carbone et de l'hydrogène peut alors être converti en de nombreux gaz et produits chimiques liquides et en hydrocarbure liquide par synthèse et catalyse FT. Les dernières opérations de valorisation pendant le processus de raffinage comprennent l'hydrotraitement et l'hydrocraquage. Généralement, le gaz synthétique obtenu à partir de biomasse cellulosique doit être enrichi dans de l'hydrogène et nettoyé des impuretés comme les goudrons, l'azote et autres atomes composés de tous autres éléments que du carbone ou de l'hydrogène. Les carburants FT sont généralement sans soufre et contiennent très peu d'aromatiques quand on les compare à la gazoline et au diesel, donnant ainsi des émissions plus faibles lorsqu'ils sont utilisés dans des réacteurs. Les carburants produits par synthèse FT ont d'abord été certifiés en tant que carburants d'aviation alternatifs en 2009. Un certificat de carburant FT générique a été approuvé par l'ASTM pour être mélangé à des carburants d'aviation actuels jusqu'à hauteur de 50 %. Le procédé FT à partir de biomasse a été prouvé à l'échelle de l'usine de démonstration, mais le développement de ce procédé à forte intensité de capital reste un défi. Les défis techniques et la difficulté de trouver du financement pour des projets à forte intensité de capital ont conduit à l'absence de projets de gazéification et de synthèse catalytique de la biomasse à l'échelle commerciale ou pour des démonstrations à grande échelle. Il existe actuellement dans le monde peu de projets opérationnels ou prévus pour la synthèse du méthane et d'alcools mixtes.

FIGURE 19
Procédé de conversion thermochimique



3.2.4.2 Procédé biochimique

Le procédé de transformation de cellulose en éthanol peut également suivre une voie biochimique par hydrolyse enzymatique. L'hydrolyse enzymatique transforme d'abord la biomasse lignocellulosique en des sucres fermentables C5 et C6, y compris du glucose et/ou des oligomères qui peuvent alors être transformés encore en de précieux produits intermédiaires par des approches biologiques ou chimiques. La conversion biochimique de la biomasse cellulosique en carburants et produits chimiques par hydrolyse enzymatique d'hémicellulose et de cellulose offre la possibilité de rendements supérieurs, d'une sélectivité plus élevée, de coûts d'énergie inférieurs et de conditions d'exploitation plus douces par rapport aux procédés thermochimiques. Toutefois, les matières premières lignocellulosiques exigent généralement un prétraitement élaboré de la biomasse pour libérer les fractions de cellulose et d'hémicellulose de la lignine. Pendant le prétraitement, la structure cellulosique est perturbée, le sceau ligneux est rompu et l'hémicellulose est partiellement extraite. Cela augmente la zone de surface spécifique qui est accessible aux enzymes.

Le procédé Alcohol-to-Jet

L'hydrolyse enzymatique peut être suivie de la fermentation ultérieure des molécules de sucre pour en faire des alcools, au moyen de levure ou de bactéries. Les produits intermédiaires sont alors

transformés en carburants alternatifs à la suite de plusieurs étapes de conversion et notamment l'oligomérisation catalytique, la distillation et l'hydrotraitement. Ce procédé est désigné par l'expression "Alcohol-to-Jet" (AtJ).

Isoparaffines synthétiques

Autrement, les molécules de sucre peuvent également être converties directement en hydrocarbures sans un produit intermédiaire à base d'alcool. Alors que les micro organismes qui procèdent à la fermentation peuvent être modifiés génétiquement pour optimiser une production de carburants hautement spécialisée, la fermentation aérobie exige une alimentation continue d'oxygène, ce qui augmente les coûts d'exploitation. Ce procédé est désigné "Isoparaffines synthétiques" (SIP).

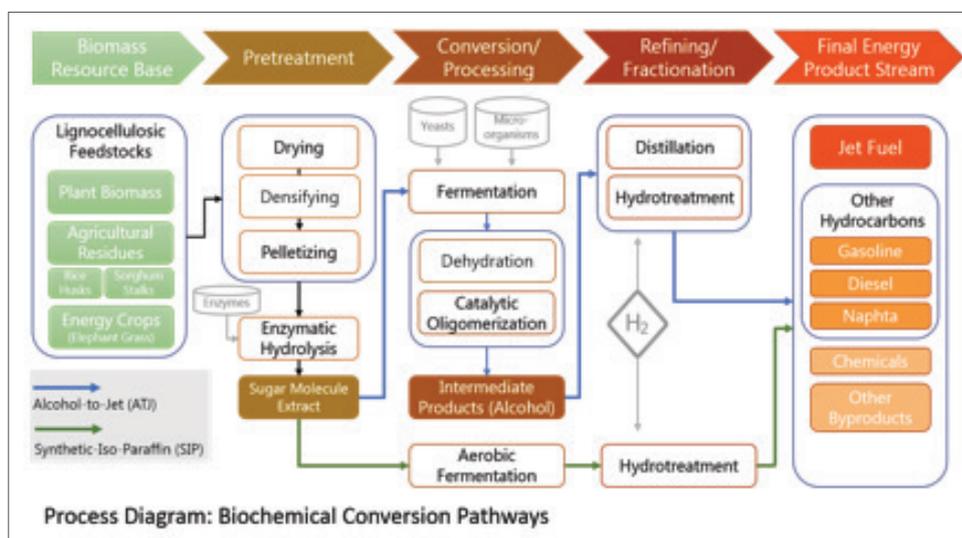


FIGURE 20
Procédés de conversion biochimique

La **Figure 20** représente une séquence de procédés simplifiés pour la production d'éthanol à partir de matières premières lignocellulosiques. Les principales étapes comprennent la préparation (réduction de taille) de la biomasse, le prétraitement afin d'assouplir et de perturber la structure de la cellulose, l'hydrolyse pour décomposer la cellulose en sucres et ensuite la fermentation des molécules de sucre. La transformation finale en carburant d'aviation fait la différence entre les procédés AtJ et SIP.

En ce qui concerne les filières de conversion biochimique, plusieurs compagnies travaillent à la commercialisation du carburéacteur provenant de la fermentation de la biomasse. Toutefois, pour l'instant, les solutions technologiques qui peuvent convertir et transformer les matières premières lignocellulosiques en carburants alternatifs en sont encore à la phase pilote ou de démonstration et ne sont pas encore commercialement disponibles.

En ce qui concerne la filière thermo-chimique, les premières installations commerciales de gazéification de la biomasse sont en construction aux États Unis et en Finlande. Toutefois, les technologies de gazéification impliquent des coûts élevés en capital pour à la fois gazéifier la biomasse et convertir le gaz synthétique qui en résulte en liquides FT. Les coûts de production de SAF à partir de filières lignocellulosiques sont estimés à 1 000 à 8 000 des États Unis /tonne, alors que les coûts du carburéacteur actuels sont d'environ 470 à 860 \$ É.-U./tonne. Les coûts d'achat actuels des SAF produits à partir de résidus agricoles pour le Ministère américain de la défense vont de 3 091 à 8 983 \$ É.-U./tonne²⁰.

Il a été démontré que le Burkina Faso offre un énorme potentiel de matière première cellulosique à bas coûts. Néanmoins la complexité inhérente et les coûts de la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement sans faille de la base de ressources en matières premières jusqu'à un SAF certifié posent encore de grands défis. Une nouvelle technologie de conversion généralement suit un parcours de développement conscient des risques et des coûts depuis l'échelle initiale de laboratoire en passant par les petites installations pilotes et de démonstration jusqu'à une usine de traitement à l'échelle commerciale. Les grands risques associés à l'augmentation de la production de carburants pour passer de la phase de l'usine de démonstration à des usines de carburant synthétique à l'échelle commerciale et exigeantes en capitaux exigent des politiques

²⁰ Voir: Conseil international pour les transports propres (ICCT), Sammy El Takriti et al., Atténuer les émissions de l'aviation internationale – Risques et possibilités en matière de carburants d'aviation alternatifs, mars 2017 ; Erik C. Wormslev et al., Conseil des ministres des pays nordiques, Carburéacteurs durables pour l'aviation, Perspectives nordiques sur l'utilisation de carburéacteurs durables avancées pour l'aviation, 2016.

gouvernementales coordonnées, prévisibles et à long terme pour garantir la confiance des investisseurs. Selon le soutien financier et politique, les partenaires stratégiques de l'industrie et les développements du marché, ce processus peut prendre des années. La matière première disponible n'étant pas le facteur limitatif, il y a de grandes chances qu'une initiative commune et bien coordonnée entre les États de la CÉDEAO améliore le délai de mise sur le marché et ait une incidence positive sur la viabilité commerciale.

3.3 DÉCHETS

3.3.1 Déchets solides urbains (DSU)

3.3.1.1 Qualification de la matière première

Les DSU, comprenant les déchets alimentaires, les ordures résidentielles et les déchets commerciaux, sont depuis longtemps reconnus comme une matière première potentielle pour conversion en carburants alternatifs. Les matières organiques que l'on trouve dans les ordures ménagères sont riches en hydrogène et en carbone, qui sont les éléments de base du carburant d'aviation et du diesel. Contrairement aux matières premières basées sur des cultures traditionnelles, les matières premières provenant de déchets n'ont pas d'utilisations concurrentielles, n'exigent pas de terres supplémentaires et résolvent les problèmes d'élimination des déchets. La conversion de DSU en carburant pourrait non seulement remplacer les carburants tirés du pétrole et ainsi atténuer les émissions de GES provenant des transports, mais pourrait également éviter le méthane et les autres émissions de GES conventionnellement associés à la gestion des DSU et aux décharges.

Les déchets d'origine biogène présents dans les décharges libèrent généralement du CO₂ biogène, ainsi que du méthane anthropique, qui autrement n'auraient pas été libérés. Toutefois, selon la matière prise en compte, entre 12 et 95 % du carbone dans les déchets mis dans les décharges sont séquestrés dans le sol, option que l'on perd si les DSU sont utilisés pour la production de carburants alternatifs. En évitant les émissions de GES associées aux stratégies actuelles de gestion des déchets, les DSU pourraient offrir un avantage environnemental significatif. Ainsi, la récupération d'énergie à partir des déchets peut jouer un rôle dans la réduction de l'impact des DSU sur l'environnement, avec l'avantage supplémentaire d'offrir une source d'énergie locale.

Les décharges recevant les DSU sont l'option dominante d'élimination des déchets dans de nombreuses parties du monde. En général, les coûts relativement élevés des autres méthodes de traitement et d'élimination sont une raison majeure de cette dépendance vis-à-vis des décharges pour DSU, en particulier dans les pays en développement. La plupart du temps, les problèmes de déchets dans les zones urbaines des pays en développement résultent de l'absence, du caractère limité ou de l'échec de système de ramassage et d'élimination de DSU. En conséquence, les déchets solides et liquides sont jetés dans les rues et dans des espaces ouverts. Le déversement aveugle et répréhensible de DSU dans les

pays en développement est en augmentation. En conséquence les gouvernements et les municipalités dans plusieurs États subsahariens sont régulièrement confrontés au problème de savoir comment gérer correctement des quantités sans cesse croissantes de flux de déchets municipaux et industriels. Au Burkina Faso, seules Ouagadougou et Bobo-Dioulasso ont des sites de décharge contrôlés. Selon le maire de Ouagadougou et le chef du département du développement durable de la municipalité de Ouagadougou, la ville ramasse 1 600 tonnes de DSU par jour, soit 580 000 tonnes d'ordures ménagères par an. Alors que ce volume a doublé entre 2000 et 2017, à peine 3 % de cette quantité sont valorisés ou recyclés.



PHOTO 8

La collecte et le tri des déchets engendrent des défis logistiques

Le pouvoir calorifique sous jacent de la production de gaz des déchets urbains et des décharges dépend largement de la composition des déchets et va de 6 à 20 MJ/kg. À la date de juin 2017, 6 % des déchets urbains ramassés à Ouagadougou consistaient en du papier et du carton, alors que les plastiques et les matières organiques biodégradables comptaient pour 15 % et 36 % respectivement, ce qui représentait 87 000 tonnes de plastiques et 210 000 tonnes de déchets organiques annuellement. Il s'agit là d'une source potentielle d'énergie qui vaut la peine d'être envisagée pour la production de combustibles alternatifs, en particulier parce que la matière première est gratuite et que la quantité disponible est appelée à croître rapidement, parallèlement à la forte croissance projetée de la population. Toutes les fractions de déchets organiques peuvent théoriquement être utilisées pour la production de SAF.

3.3.1.2 Conversion des déchets solides urbains en carburant d'aviation durable

Selon le type de DSU utilisé comme matière première, il existe diverses technologies qui peuvent convertir les DSU en combustibles liquides. Les systèmes de transformation déchets-énergie ont recours généralement à une combinaison de procédés mécaniques, biologiques ou thermo-chimiques pour récupérer l'énergie emmagasinée dans les déchets. Ces technologies comprennent la gazéification, la gazéification par gaz plasma, la gazéification par plasma-arc, la torréfaction, la pyrolyse, la dépolymérisation thermique, la digestion anaérobie le traitement biologique mécanique et la fermentation²¹.

²¹ Voir: Maura Farver et Christopher Frantz, Garbage to Gasoline: Converting Municipal Solid Waste to Liquid Fuels Technologies, Commercialization, and Policy, (Des déchets à l'essence: conversion des déchets solides urbains en carburants liquides, technologies, commercialisation et politique) Duke University, April 2013; Laboratoire de l'aviation et de l'environnement (LAE), Institut de technologie du Massachusetts (MIT), Pooja Suresh, Évaluation environnementale et économique des carburants pour le transport fabriqué à partir de déchets solides urbains, June 2016 and LAE, Gonca Seber, Robert Malina et al., Évaluation environnementale et économique de la production de carburant et de diesel hydrotraités à partir d'huiles usées et de suif, biomasse et bioénergie Vol. 67, 108-118, Aug. 2014.

Plusieurs types de technologies commercialement viables qui convertissent les DSU en carburants renouvelables à faible teneur en carbone pour les transports en sont actuellement à divers stades d'essais et de phases pilotes, mais une technologie de conversion relativement éprouvée comprend la gazéification de la biomasse ou des DSU pour obtenir un gaz synthétique, suivie par la conversion FT du gaz synthétique en carburéacteur (voir **figure 22**). L'un des procédés les plus avancés a été développé par Fulcrum BioEnergy, un développeur de carburants durables basé aux États Unis ; ce procédé thermochimique breveté s'articule autour de la gazéification à températures élevées (750°C à 1 500°C) des matières organiques récupérées dans la matière première DSU et comprend trois étapes successives :

1. l'installation de transformation de la matière prépare les DSU pour la transformation du combustible ; (Cette étape comprend l'extraction de matières commercialement recyclables et de déchets inorganiques avant la livraison la bioraffinerie d'une matière première DSU triée et traitée) ;
2. un système de reformage à la vapeur par gazéification convertit les DSU en gaz synthétique ("syngas") ;
3. le procédé FT convertit le gaz synthétique en pétrole brut synthétique, qui est alors transformé en carburant d'aviation ou en diesel.

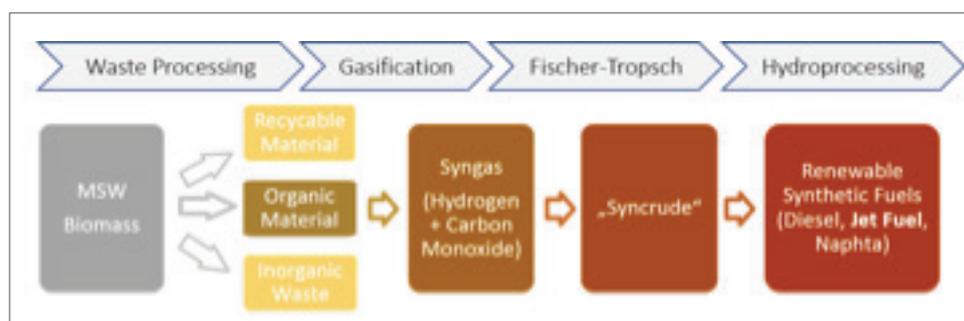


FIGURE 21

Schéma de procédé de la conversion des déchets solides urbains en carburant d'aviation alternatif

L'usine Sierra Biofuels, située en dehors de Reno (Nevada), devrait être l'une des premières usines pleinement opérationnelles des États Unis produisant à l'échelle commerciale des carburants renouvelables par transformation de DSU. Les spécifications concrètes de l'usine constituent une bonne référence pour l'analyse de la situation comparable au Burkina Faso, car dans les deux cas on suppose l'utilisation de matières premières similaires. Une comparaison directe avec la disponibilité de déchets organiques municipaux à Ouagadougou est facilitée par le fait que la bioraffinerie Sierra a été conçue pour produire environ 40 000 tonnes par an de pétrole brut synthétique FT renouvelable à partir d'environ 200 000 tonnes de matières premières DSU préparées, soit environ le même montant qui est disponible à Ouagadougou.

Toutefois, comme seuls les déchets organiques sont retenus pour la conversion en SAF, une installation de traitement de matière première devra d'abord calibrer, trier, broyer et traiter les DSU mélangés et potentiellement contaminés, pour en faire une matière première DSU préparée en vue de son utilisation à la bioraffinerie. Le tri est une étape clé dans la récupération de l'énergie à partir des déchets municipaux. Selon l'homogénéité des déchets, des coûts substantiels de tri pourraient être ainsi encourus. À Ouagadougou, tous les types de déchets ménagers sont généralement mélangés.

3.3.1.3 Problématiques et contraintes

Pour les DSU, les principaux défis sont associés à la logistique (manutention des matières) et non à l'approvisionnement en matières premières spécifiquement. Pour abaisser les coûts de préparation des déchets et faciliter le fonctionnement des technologies des gazéificateurs au voisinage des décharges municipales, la séparation à la source par les résidents est idéalement requise. Il semble que le tri des déchets en amont est la clé permettant de garantir la qualité requise de la matière première pour un fonctionnement optimal des gazéificateurs et un impact environnemental minime de ces installations. Toutefois, afin d'encourager les résidents à commencer le tri à la source, c'est à dire à la maison, la municipalité de Ouagadougou doit d'abord mettre en place l'infrastructure appropriée et des installations modifiées pour la gestion des déchets au Burkina Faso. Cela comprendra, entre autres, la mise en place de systèmes distincts d'élimination, de collecte et de tri des déchets pour différents courants de déchets, ainsi que les mesures d'accompagnement pour l'éducation environnementale des résidents.

Toutefois, indépendamment du niveau de maturité des matières premières et de la technologie, des défis importants en termes de financement demeurent. Étant donné les exigences attendues en termes de dépenses en capital et les coûts élevés de maintenance et d'exploitation, l'application à grande échelle de la gazéification des déchets organiques ne semble pas encore être une option attrayante pour le Burkina Faso. Des données précises sur la structure du projet et du financement de l'usine Sierra Biofuels aux États Unis seront peut être révélatrices à cet égard. La disponibilité de matière première et la technologie éprouvée étaient loin d'être suffisantes pour lancer le projet de 270 millions \$ É.-U. Il a fallu des engagements importants de la part du Gouvernement (l'armée) et de l'industrie, aussi bien financièrement que stratégiquement, pour avancer. Cela a inclus des incitations fédérales en matière de bioénergie provenant de multiples agences (DOE, FAA, USDA, DoD) ainsi que des engagements d'enlèvement de carburant à long terme de la part de compagnies aériennes internationales.

INTERVENTION DU GOUVERNEMENT ET DE L'ADMINISTRATION MILITAIRE

En juin 2011, le Ministère de l'agriculture (DOA), le Département de l'énergie (DOE) et la marine américaine (United States Navy) ont signé un mémorandum d'entente qui lançait un effort coopératif :

- 1) créer un fort signal de demandes ;
- 2) apport par chaque agence d'un financement significatif, à part égale ;
- 3) aider à l'élaboration de remplaçant de biocarburants interchangeables durables pour le diesel et le carburéacteur.

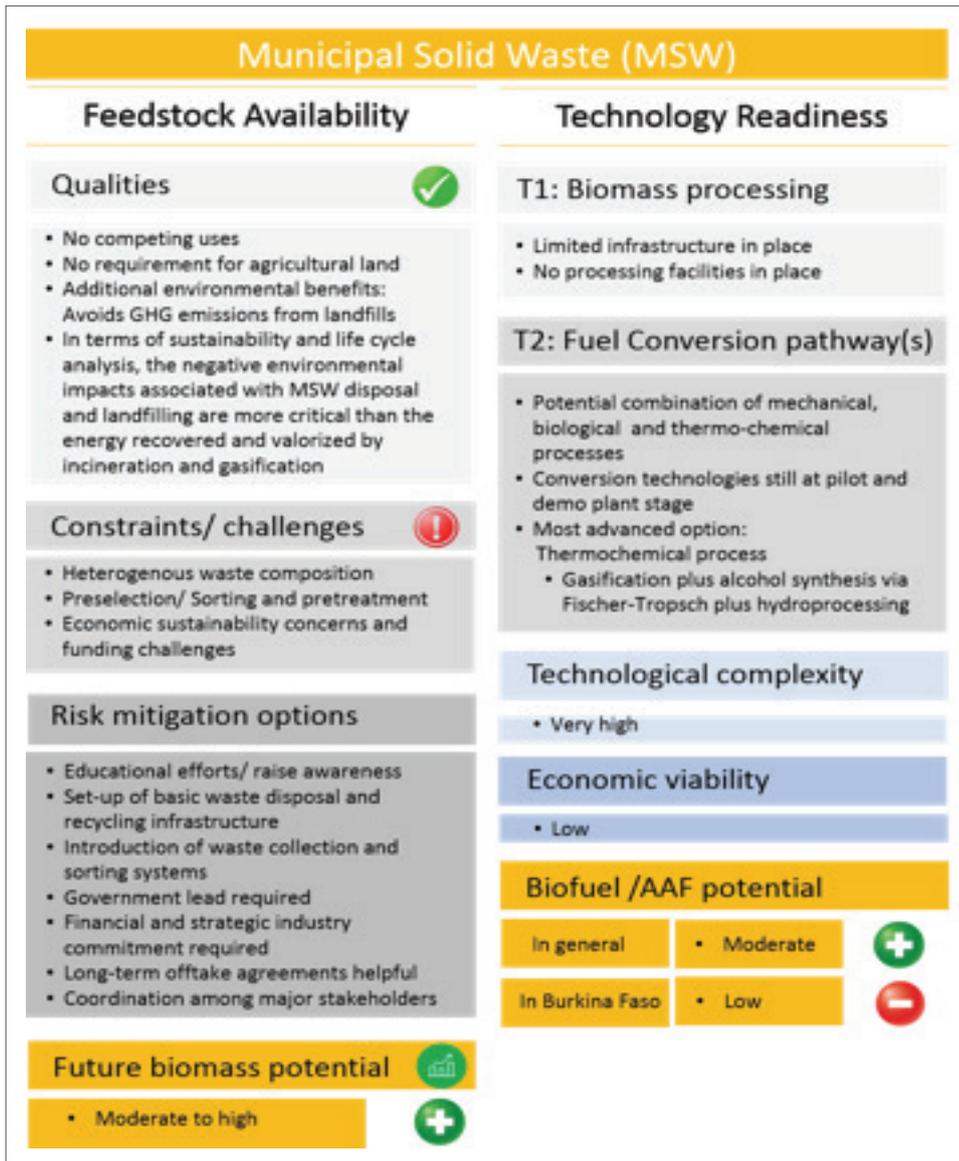
En janvier 2017, le Secrétaire américain à la défense a annoncé une possibilité de financement de 55 millions \$ É.-U. pour une bioraffinerie de 10 millions de gallons capable de produire des carburants bioéquivalents interchangeables avancés pour utilisation militaire. Le projet dénommé "Advanced Drop-In Biofuel Production" (production de biocarburants interchangeables avancés) vise à mettre en place une chaîne de valeur nationale complète, y compris la production de matière première, la conversion chimique et le traitement (bioraffineries intégrées), le mélange de carburant, les transports et la logistique.

Au cours des 10 dernières années, le Ministère américain de la défense (DOD) a utilisé à maintes reprises des incitations financières pour aider à faciliter le développement d'usines viables commercialement pour la production de biocarburants pour les secteurs militaires et commerciaux. La part du coût pour le Gouvernement fédéral consacrée à des investissements ciblés dans la capacité de production de carburants alternatifs (y compris le projet en cours "Bio-Synthetic Paraffinic Kerosene" (kérosène paraffinique biosynthétique) et le projet "Advanced Drop-In Biofuels Production") était d'environ 234,1 millions \$ É.-U.

Aussi prometteuse que puisse être la matière première individuelle candidate, l'ampleur et la complexité du projet exigent un soutien sans équivoque, le partage des risques et une coordination étroite entre une multitude de parties prenantes. L'évolution récente aux États Unis confirme que les incitations financières publiques, les garanties de prêt et le financement d'installations de production commerciale peuvent faire la différence entre un projet viable et un projet ayant échoué. La maintenance et la croissance de ces programmes fédéraux se sont révélées critiques pour le développement d'installations de production de SAF. Prouvant son engagement envers la mise au point de carburants d'aviation alternatifs, le Gouvernement britannique a annoncé en août 2017 qu'il fournirait jusqu'à 28 millions \$ É.-U. de fonds correspondants pour les projets axés sur la commercialisation de carburants d'aviation avancés à base de déchets et à faible émission de carbone.

Le Ministère britannique des transports (DFT) appuie la démonstration et la production de carburants à faible émission de carbone en général et de SAF en particulier, par le biais d'une compétition de démonstration de biocarburants avancés (ABDC), afin d'encourager des investissements importants du secteur privé dans le développement de ces installations de traitement et de conversion des déchets au Royaume Uni.

3.3.1.4 Matrice de faisabilité



3.3.2 GRAISSES PROVENANT DE DÉCHETS ANIMAUX

3.3.2.1 Qualification de la matière première

Non seulement les carburants alternatifs peuvent être raffinés à partir de nombreux types de plantes à fleurs, de résidus agricoles et de sucres, mais également à partir de matières premières comme les déchets de graisses animales et les huiles. Les matières premières de carburants dites à base de lipides comme les graisses animales (le suif de bœuf, la graisse de poulet, le gras d'agneau, le lard des porcs, la graisse jaune et les coproduits gras de la production d'acides gras oméga-3) peuvent jouer un rôle important dans l'expansion du portefeuille de matières premières pour les SAF. En fait, la majorité des carburants alternatifs disponibles aujourd'hui sont dérivés de matières premières oléochimiques comme les huiles végétales, les graisses animales et l'huile de cuisson usagée.

Si elles ne sont pas gérées correctement, les carcasses animales peuvent présenter un grave danger sanitaire et environnemental pour le bétail et les humains. L'équarrissage des coproduits animaux provenant des abattoirs en fait une matière sûre et appropriée à réutiliser dans plusieurs applications. L'équarrissage est un procédé thermique appliqué aux déchets de l'industrie de la viande qui convertit les corps gras des déchets animaux en plus-value, graisses purifiées, connues sous le nom de suif et de lard. Les solides sont généralement passés dans une presse à vis pour achever l'extraction des corps gras des résidus solides. Le processus d'équarrissage sépare également les corps gras de l'eau. L'eau extraite est le produit le plus important obtenu à l'issue de ce procédé, jusqu'à 65 % en poids.



FIGURE 22

Utilisation potentielle de graisses de déchets animaux selon l'Association européenne des industries de traitement des graisses et des fondoirs (EFPRA)

En Europe, aux États-Unis et en Amérique du Sud, les industries de transformation de la viande et d'équarrissage produisent annuellement une grande quantité de graisses animales avec des degrés divers de qualité. Selon la classification spécifique des risques, les graisses de déchets peuvent être utilisées comme nourriture animale ou pour la production de savon, d'engrais, de produits oléochimiques, de produits pharmaceutiques et de carburants. Actuellement, le suif de bœuf constitue 17 % des matières premières utilisées dans la production de biodiesel brésilien.

En comparaison, les carcasses animales et déchets de graisses dans l'industrie de la transformation de viande au Burkina Faso n'ont pas d'usage postérieur, et encore moins d'usage compétitif, et on s'en débarrasse généralement, ce qui entraîne des risques potentiellement graves pour la santé et autres conséquences négatives sur l'environnement. L'équarrissage et la transformation correctement effectués peuvent non seulement réduire les risques potentiels pour la santé mais également fournir une possibilité intéressante de récupération d'énergie. Le suif a une valeur énergétique élevée. Ses propriétés physiques et ses propriétés de combustion sont très proches de celles des carburants oléagineux, comme le diesel, le mazout léger ou le fioul lourd. La valeur calorifique moyenne équivaut 36 à 40 MJ/kg. Selon l'EPA des États-Unis, le contenu énergétique du suif ou de la graisse a été calculé à 16 200 Btu/lb. C'est comparable à 17 000 Btu/lb pour l'huile végétale.

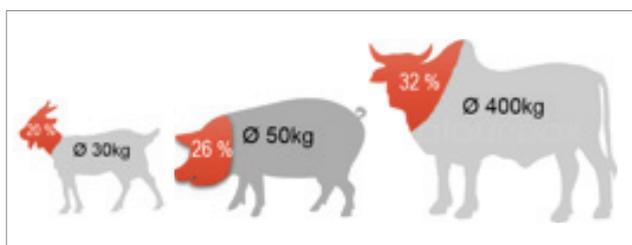


FIGURE 23

Proportion de graisse animale fondue

Depuis juin 2017, le Burkina Faso a deux abattoirs majeurs, situés à Ouagadougou et Bobo-Dioulasso. Comme annoncé par le Ministère de l'aquaculture et du bétail, et conformément aux objectifs stratégiques du PNDES, cinq abattoirs modernes de plus sont planifiés ou déjà en cours de construction.

La quantité de suif produite par une usine dépend du type d'animaux transformés et de l'étendue de la transformation. En multipliant la proportion moyenne de l'animal transformé par les données réelles de consommation de viande pour la ville de Bobo-Dioulasso, on peut déduire des valeurs approximatives pour le calcul de la matière première potentiellement disponible.

En ce qui concerne les paramètres sous-jacents tels qu'identifiés dans le **tableau 6** ci-dessous, la matière première totale pour l'année provenant des graisses de déchets animaux représente environ 7 500 tonnes. Le Gouvernement Burkinabè a l'intention de construire un autre abattoir moderne à Banfora. Avec une population représentant un cinquième de Bobo Dioulasso, il est sans doute raisonnable de penser que cet abattoir apportera 1 500 tonnes de graisses animales disponibles de plus, faisant un volume total annuel de matières premières de 9 000 tonnes avec une valeur calorifique agrégée de 360 000 GJ ou 61 400 bep.

	Vache/ Zébu	Porc	Chèvre/ Mouton
Poids moyen	400 kg	50 kg	30 kg
Proportion de l'animal transformée	32 % (≈ 128 kg)	26 % (≈ 13 kg)	20 % (≈ 6 kg)
Eau extraite, en poids	60 % (≈ 77 kg)	60 % (≈ 7,8 kg)	60 % (≈ 3,6 kg)
Graisses animales (suif, corps gras, lard) disponible pour transformation en biocarburants	51 kg	5,2 kg	2,4 kg
Nombre d'animaux abattus /jour	300	1 000	1 000
Matière première disponible/jour	15 300 kg (= 15,3 tonnes)	5 200 kg (= 5,2 tonnes)	2 400 kg (= 2,4 tonnes)
Matière première disponible /an (330 jours)	5 049 tonnes	1 716 tonnes	792 tonnes

TABLEAU 6

Statistiques des abattoirs pour Bobo-Dioulasso (paramètres clés à la date de juin 2017)

Vu la taille de la population de Ouagadougou (≈ 2,5 millions), soit au moins trois fois la taille de Bobo-Dioulasso, et en supposant le même taux de consommation de bétail, les volumes de matières premières pour Bobo Dioulasso pourraient tripler, ce qui donnerait pour la ville de Ouagadougou un total de 22 700 tonnes de graisses animales fondues par an. Les graisses issues de déchets animaux provenant de futurs abattoirs installés dans des endroits comme Pouytenga, Kaya et Fada N'Gourma pourraient potentiellement être ajoutées pour augmenter la production de matières premières utilisables et ainsi améliorer les économies d'échelle. En se basant sur les paramètres de conversion ci-dessus, la valeur énergétique spécifique de 22 700 tonnes de suif équivaut à 908 000 GJ ou 155 000 bep.

3.3.2.2 Procédé de conversion du combustible

Les matières premières à base de lipides provenant des déchets animaux sont acceptables pour la production de diesel renouvelable et de carburants alternatifs (HVO/HEFA) hydrotraités, ainsi que pour la production de biodiesel (FAME), pouvant être utilisé pour les véhicules aéroportuaires.



PHOTO 9

Installations de conversion et de raffinage de carburants alternatifs

De nombreux procédés de production et de conversion de carburants alternatifs sont en cours de développement, à diverses échelles (pilote, démonstration, et pré-commercial) pour convertir des matières premières de biomasse en CAA.

3.3.2.2.1 HEFA/HVO

La filière de réaction oléochimique, l'hydrotraitement des matières premières lipidiques utilise la chaleur et la pression sur un catalyseur à l'état solide afin de fragmenter les longues chaînes carbonées (liens C=C) dans les molécules adipeuses de la matière première, remplaçant les liaisons oxygène-hydrogène pour convertir les molécules de triglycéride non saturées qui composent les déchets gras et les acides gras (tels que l'huile végétale) en hydrocarbures paraffiniques de synthèse pleinement saturés (Alcanes) avec un poids moléculaire plus faible. Les impuretés sont initialement enlevées par des procédés catalytiques. Les acides gras sont alors hydrotraités et craqués afin d'obtenir la longueur désirée d'hydrocarbure de 9-16 atomes de carbone, selon le profil des acides gras de la matière première. Les biohuiles hydrotransformées peuvent être envoyées au craquage, un procédé qui sépare les différentes fractions d'hydrocarbures en se basant sur leurs différences en termes de températures du point d'ébullition, ce qui inclut le carburéacteur, le diesel, le kérosène, la gazoline et le naphta (voir **figure 24**).

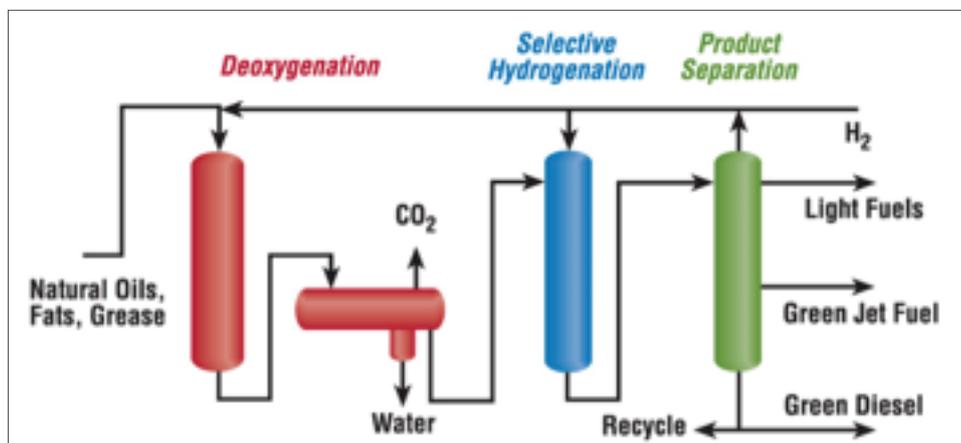


FIGURE 24

Schéma de procédé du carburéacteur vert UOP

Les carburants à base de graisses ("fat-derived") ou "dérivés oléochimiques" sont souvent connus sous la dénomination de HEFA, mais sont également appelés carburants à huile végétale hydrotraitée (HVO). Le diesel-HEFA est également connu comme diesel vert ou diesel hydrotraité renouvelable. Le procédé, qui peut être appliqué avec les infrastructures existantes de raffinage, a été certifié ASTM en 2011. La technologie de conversion est mûre et est actuellement utilisée à l'échelle commerciale. Les deux principales technologies utilisées pour produire des HEFA sont le procédé NEXBTL de Neste, et le procédé EcofiningTM de Honeywell UOP and Eni.

La technologie Ecofining est sous licence auprès de plusieurs sociétés et est utilisée dans plusieurs installations. Profitant du puissant soutien financier de l'armée américaine, de longue date, notamment des subventions de l'Agence pour les projets de recherche avancée de défense militaire (DARPA) et une commande de 77 millions-gallons de la Marine des États-Unis pour son

projet “Grande flotte verte” (Great Green Fleet), le raffineur AltAir, basé en Californie est une des compagnies pionnières utilisant les graisses de déchets animaux pour la production de SAF. La source primaire de matière première d’Altair consiste en huiles et graisses usées non comestibles, principalement des graisses animales telles que le suif et le lard. Ces déchets sont moins chers que les huiles végétales vierges et possèdent pourtant des propriétés physiques similaires pour la conversion en carburant d’aviation. Plutôt que de supporter les dépenses d’investissement pour la construction d’une nouvelle raffinerie, la compagnie a reconverti une usine existante mais inutilisée d’asphalte avec de la technologie de transformation à base d’HEFA développée par UOP Honeywell. L’accord de 2014 de la société avec United Airlines a été le premier contrat pluriannuel d’approvisionnement de carburant avec un transporteur commercial. Depuis octobre 2017, United est la seule compagnie aérienne d’Amérique du Nord à acheter du SAF pour ses opérations quotidiennes, et AltAir est le premier et l’unique producteur de SAF en activité à une échelle commerciale. Bien qu’ayant le plus important accord d’achat de SAF, United ne couvre que 0,16 % de sa consommation totale de carburants avec du SAF d’AltAir.

Bien que la technologie HEFA ait atteint la maturité commerciale, les coûts demeureront un défi significatif. Même si les graisses de déchets animaux étaient disponibles gratuitement, une usine de transformation de HEFA autonome demeure irréaliste, pour l’instant. Sans une infrastructure pétrochimique ou de raffinage de base déjà en place, il n’existe pas de possibilité d’économies grâce à la coimplantation, au cotraitement ou à l’usage d’infrastructures existantes. Il en résulte qu’une usine HEFA n’est ni techniquement faisable ni viable commercialement au Burkina Faso. Le coût estimatif élevé de l’investissement et de l’exploitation et, en particulier, le besoin d’hydrogène coûteux, rendent la filière HEFA non compétitive.

En conséquence, les matières premières à base de déchets gras sont plus susceptibles d’être converties en biodiesel FAME conventionnel. Le biodiesel FAME est notablement distinct du carburant d’aviation HEFA ; vu qu’il conserve un ester d’oxygène, le biodiesel FAME est trop oxygéné pour être utilisé en tant que biocarburant interchangeable Selon les spécifications ASTM-D1655 12 et ASTM D7566 14a, une contamination FAME de seulement 5 ppm pourra déjà rendre le carburant pour avion hors-normes.

3.3.2.2 Le Biodiesel FAME

En général, le biodiesel est un carburant alternatif pour les moteurs diesel, à utiliser soit pur à 100 %, ou dans n’importe quel mélange avec du diesel d’origine fossile. Alors que le biodiesel ne peut remplacer le carburant d’aviation, il peut être utilisé par n’importe quel parc automobile aéroportuaire roulant au diesel, comme les tracteurs d’aéronefs, les bus et les véhicules de lutte anti-incendie. Par exemple, l’aéroport de Hambourg est un des premiers grands aéroports internationaux du monde à avoir remplacé tous ses carburants fossiles par des carburants renouvelables pour la totalité de son parc automobile diesel.

Pour ce qui concerne les besoins en carburant alternatif pour le parc diesel de servitude au sol à l’aéroport de Ouagadougou, se référer à la Section 3.4.6.2.

Le processus chimique utilisé pour convertir les déchets gras en biodiesel est appelé transestérification. C’est un processus chimique qui convertit les acides gras à longue chaîne (triglycérides) des matériaux bruts (huiles et graisses) en esters méthyliques et en glycérine. Au cours du processus de transestérification, le noyau de glycérine de la molécule grasseuse est remplacé par un alcool plus faible (par exemple le méthanol). Le biodiesel qui en résulte correspond généralement aux standards de qualité EN14214. Il peut être utilisé directement dans des moteurs diesel ou en mélange avec du pétrodiesel. La composition des acides gras du suif est assez similaire à celle de l’huile de palme et est bien saturée. Le B100 (biodiesel pur) fabriqué à partir de graisses animales devrait donc être utilisé de préférence dans des climats très chauds. Un des attributs importants du biodiesel est qu’il abaisse les niveaux de polluants nocifs dans les échappements de moteurs diesel. Dans le cas des déchets gras d’origine animale, cela inclue également les émissions d’oxyde nitreux (NOx). La première raison à cela est probablement que le biodiesel de graisse animale a un indice de cétane élevé (> 60) en comparaison avec le biodiesel d’huile végétale (48 à 55). Il est connu que l’indice de cétane plus élevé réduit les émissions de NOx en abaissant les températures pendant la phase critique du début du processus de combustion.

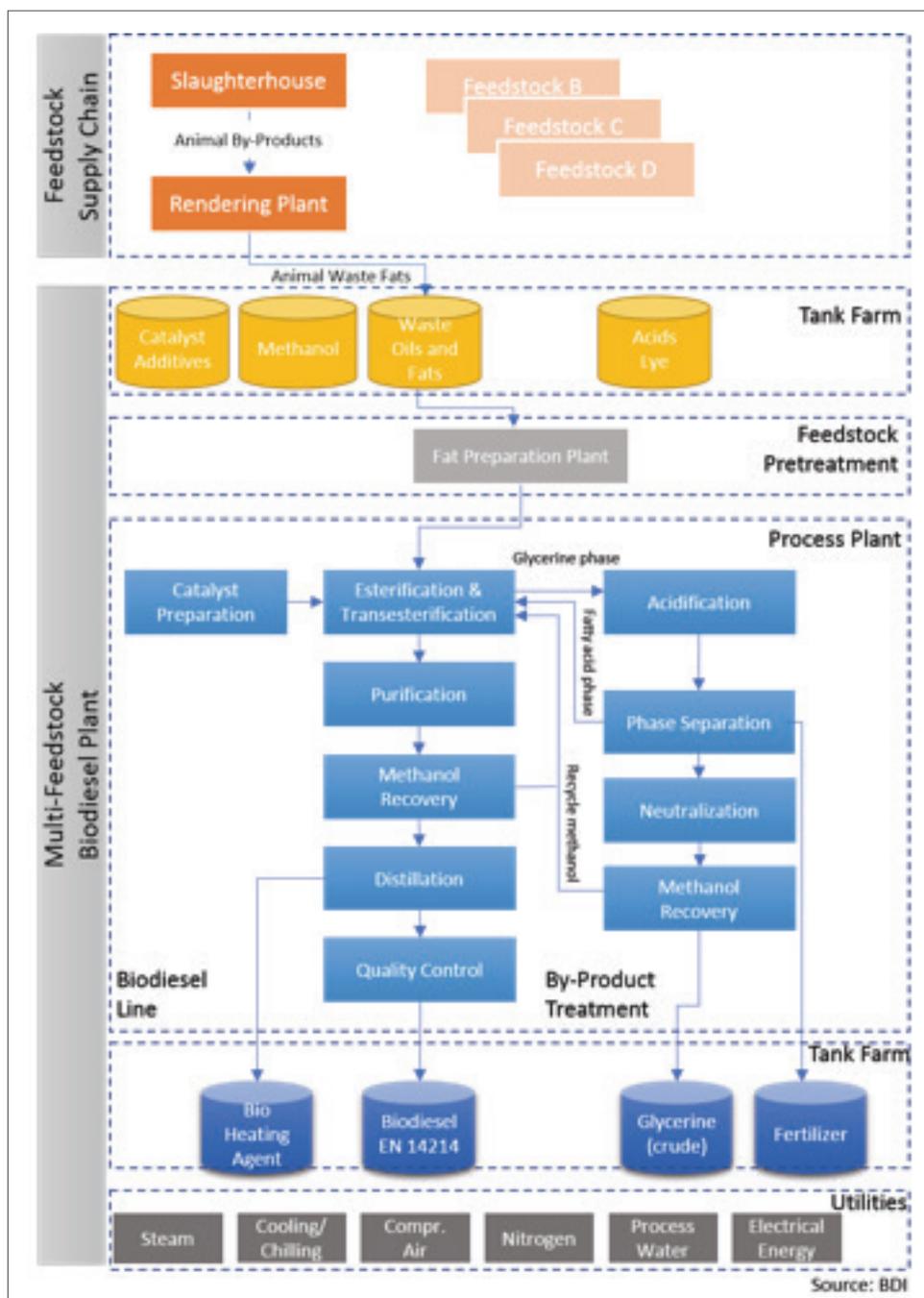


FIGURE 25
Schéma de principe pour une usine de biodiesel à multiples matières premières

En supposant un taux de conversion des lipides en biodiesel de 1:1 (mesuré par le rapport de masse biodiesel/gras), le suif entier et les déchets lipidiques peuvent donner environ de 7 500 à 9 000 tonnes de biodiesel à Bobo Dioulasso et environ 23 000 tonnes à Ouagadougou. Le volume de matière première pourrait justifier une installation commerciale sous la forme d'une usine de Biodiesel à matières premières multiples, comme illustré par la **figure 25**.

Les processus économiques peuvent être améliorés en récupérant le méthanol et la glycérine. Afin d'élargir la base de l'approvisionnement en matières premières en passant des huiles et graisses usées aux "déchets organiques" en général, et de faciliter une parfaite combinaison de flux de masse et d'énergie, l'usine de biodiesel à matières premières multiples pourrait être combinée à une usine de biogaz. Compte tenu de la proximité géographique de la déchetterie municipale pour DSU et des abattoirs à Ouagadougou dans le même district, le potentiel de production de biogaz (méthane) et de génération d'électricité à partir des DSU à Ouagadougou pourrait être l'occasion d'abaisser les coûts de production et de faire des économies d'échelle.

3.3.2.3 Matrice de faisabilité

Animal Waste Fats													
Feedstock Availability	Technology Readiness												
<p>Qualities </p> <ul style="list-style-type: none"> • No requirement for agricultural land • High energy value • Proven combustion properties • Proper rendering and processing reduces potential health hazards 	<p>T1: Biomass processing</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limited infrastructure in place • Additional slaughterhouses planned or under construction • No rendering facilities in place 												
<p>Constraints/ challenges </p> <ul style="list-style-type: none"> • Pretreatment (Rendering) necessary • Biodiesel sustainability evaluation: <ul style="list-style-type: none"> • For residual fats farming is not considered as an energy consumption step since its purpose is meat production for human food and not for biofuel. Thus, there is only energy consumption for rendering the animal wastes and for the transesterification steps. • However, biofuel plants are advantageous over animal fat biodiesel because of their additional CO₂ sequestration potential. 	<p>T2: Fuel Conversion pathway(s)</p> <p>A) <u>Green Diesel/ AAF</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Hydroprocessing of lipid feedstocks (HEFA/ HVO) • Most advanced conversion technology today (NEXTBTL, Ecofining™) • Conversion technology has reached commercial stage production • Requires petrochemical infrastructure <p>B) <u>Catalytic Cracking</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Potential modular set up, mini refinery solution <p>C) <u>Biodiesel</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Alternatively, fatty acid methyl ester (FAME) biodiesel production feasible • Transesterification 												
<p>Risk mitigation options</p> <ul style="list-style-type: none"> • Financial and strategic industry commitment required • Government incentives necessary • Long-term offtake agreements helpful • Coordination among major stakeholders 	<p>Technological complexity</p> <table border="1"> <tr> <td>A) Green Diesel/ AAF</td> <td>• High</td> </tr> <tr> <td>B) Catalytic Cracking</td> <td>• Moderate</td> </tr> <tr> <td>C) Biodiesel</td> <td>• Low</td> </tr> </table>	A) Green Diesel/ AAF	• High	B) Catalytic Cracking	• Moderate	C) Biodiesel	• Low						
A) Green Diesel/ AAF	• High												
B) Catalytic Cracking	• Moderate												
C) Biodiesel	• Low												
<p>Future biomass potential </p> <ul style="list-style-type: none"> • Moderate to high 	<p>Economic viability</p> <table border="1"> <tr> <td>A) Green Diesel/</td> <td>• Low</td> </tr> <tr> <td>C) Catalytic Cracking</td> <td>• Moderate</td> </tr> <tr> <td>C) Biodiesel</td> <td>• High</td> </tr> </table>	A) Green Diesel/	• Low	C) Catalytic Cracking	• Moderate	C) Biodiesel	• High						
A) Green Diesel/	• Low												
C) Catalytic Cracking	• Moderate												
C) Biodiesel	• High												
	<p>A) Green Diesel/ AAF potential</p> <table border="1"> <tr> <td>In general</td> <td>• Very high</td> <td></td> </tr> <tr> <td>In Burkina Faso</td> <td>• Low</td> <td></td> </tr> </table> <p>B) Biodiesel potential</p> <table border="1"> <tr> <td>In general</td> <td>• Very high</td> <td></td> </tr> <tr> <td>In Burkina Faso</td> <td>• Moderate</td> <td></td> </tr> </table>	In general	• Very high		In Burkina Faso	• Low		In general	• Very high		In Burkina Faso	• Moderate	
In general	• Very high												
In Burkina Faso	• Low												
In general	• Very high												
In Burkina Faso	• Moderate												

3.4 JATROPHA

3.4.1 PHYSIOLOGIE ET PHYTOÉCOLOGIE DE LA PLANTE

Le jatropha est une culture pérenne qui est cultivée pour son huile végétale de grande qualité et pour la conversion de sa biomasse en de multiples applications pour l'énergie renouvelable. Cette plante pousse presque partout à travers le Burkina Faso et dans les États voisins d'Afrique de l'Ouest.

L'huile brute de jatropha (CJO) est un biocarburant de type non-alimentaire produit à partir des noix de jatropha. Les dérivés multiples de la CJO et des tourteaux peuvent être utilisés pour beaucoup de produits non-alimentaires, tels que les produits pharmaceutiques, les lubrifiants industriels, les produits cosmétiques, l'alimentation animale, la bioélectricité et les biocarburants, biodiesel et SAF inclus.

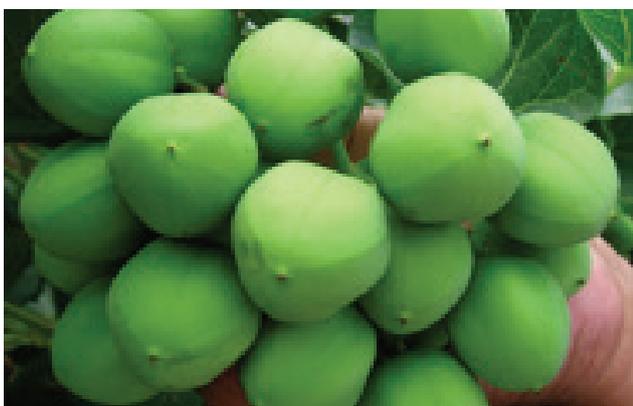


PHOTO 10

Grappe de jatropha

Le jatropha a longtemps été considéré comme matière première de choix pour la production de SAF. Les raisons principales étant ses propriétés de carburant et d'écoulement à froid. Il n'est pas non plus un concurrent au sein de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, en raison de sa légère toxicité qui rend l'huile impropre à la consommation humaine.

De même que pour la culture de la plupart des matières premières pour biocarburants, la culture du jatropha a soulevé des inquiétudes concernant le risque qu'il supprime des cultures alimentaires. Contrairement à certains biocarburants tels que le maïs ou les graines de soja, la plupart des variétés de jatropha ne sont pas comestibles et ne créent donc pas de conflit direct entre nourriture et carburant. Au contraire, un schéma bien équilibré de culture intercalaire pourrait même renforcer une relation symbiotique entre plantes au bénéfice des deux types de cultures, vivrières et énergétiques.

Plus important, la plante de jatropha peut survivre sur des terres marginales non productives, réduisant ainsi le risque de conflits d'utilisation des terres. Le jatropha s'adapte à des conditions de

sol pauvre et est connu pour sa résistance à la sécheresse. Il peut pousser dans des zones ayant aussi peu que 750 mm de pluie par an et il survit dans des zones où les périodes sèches durent plus de 6 mois.

Les zones où le jatropha est répandu sont parmi les régions où l'insécurité est la plus forte en termes de production. À cause de sa capacité prouvée d'adaptation de la plante à une grande variété de sols et de conditions climatiques, il semble qu'elle soit idéale sur des terres autrement inutilisables. Si le sol est pénétrable, les racines pivotantes du jatropha créent de profondes voies d'entrée pour l'eau d'infiltration et les nutriments provenant de couches que les cultures annuelles ou les mauvaises herbes n'atteignent pas. En plus de sa structure racinaire intensive, il forme une barrière efficace contre les eaux de ruissellement après de fortes pluies. L'érosion du sol pourrait être effectivement réduite ou entièrement éliminée, et la capacité de rétention d'eau du sol peut être utilisée dans une plus grande mesure. Il s'agit là d'un avantage primordial, particulièrement vers la fin de la saison sèche. L'augmentation de la fertilité du sol se traduirait rapidement par une bien meilleure croissance de la végétation sur des sols anciennement stériles.

Les besoins en éléments nutritifs potassium, azote et calcium sont à peu près les mêmes que pour la croissance d'autres cultures, mais lorsque ces éléments nutritifs sont en offre limitée, la croissance est moins réduite que dans le cas de la plupart des autres cultures. En conséquence, le jatropha convient généralement bien pour croître dans les régions arides du Burkina Faso. Typiquement, le semis, l'élagage et la récolte du jatropha ne perturbent pas le cycle de croissance des cultures alimentaires telles que le riz, le maïs et le sorgho.

La culture à long-terme a en général comme conséquence une augmentation de la fertilité des sols, particulièrement si les tiges et feuilles provenant de l'élagage sont transformées en paillis et réincorporées dans le sol. Cela est également vrai pour une grande part du tourteau après l'extraction d'huile.

Selon la topographie, le profil pédologique et les conditions agro-climatiques de la région, le jatropha peut être combiné avec d'autres espèces compatibles comprenant des plantes d'agriculture, d'horticulture, des plantes médicinales, la couverture végétale pastorale et/ou des plantes de sylviculture afin de produire un système agroforestier écologiquement viable et socialement acceptable.

Le développement, la promotion et l'adoption de systèmes de cultures intercalaires à base de jatropha permettront d'améliorer les conditions socio-économiques dans des zones rurales pauvres et de transformer le paysage énergétique rural ainsi que le paysage écologique.

De plus, les plantations de jatropha peuvent jouer un rôle important dans la réhabilitation de terres dégradées et le soutien aux efforts de reboisement.

3.4.2 L'HUILE BRUTE DE JATROPHA (CJO)

Le jatropha est prêt pour la récolte lorsque les fruits prennent une coloration jaune et atteignent une taille de 5 à 8 centimètres de long. Dans une huilerie centralisée, les fruits récoltés sont décortiqués puis les graines sont séchées et écrasées. Le processus basique d'extraction d'huile de jatropha comprend plusieurs étapes. Afin de faciliter le moulinage de l'huile à échelle industrielle, les graines sont généralement prétraitées en commençant par un décortiquage consistant en l'enlèvement mécanique de la coque externe ; elles peuvent alors être craquées, moulues et bouillies afin de favoriser la récupération d'huile.



PHOTO 11

Graines de jatropha à haute teneur énergétique

L'amande (partie blanche après enlèvement de l'enveloppe) contient environ 50 à 60 % d'huile, qui peut être utilisée comme matière première énergétique ou convertie en biodiesel et SAF. La CJO constitue entre 28 et 30 % du poids total de la graine ou 46 % du poids de l'amande de la graine décortiquée. La technologie d'extraction actuellement en place peut récupérer environ 78 % de l'huile contenue dans les graines de jatropha ce qui équivaut à un taux d'extraction de 28 % du poids total. Les technologies de conversion de nouvelle génération feront passer ce taux de 28 à 36 %, ce qui se traduira par une augmentation substantielle du volume de CJO récupérable (jusqu'à 95 % de récupération d'huile).

La CJO contient moins de 5 % de la teneur en soufre des biocarburants alternatifs, ce qui contribue à de nettes réductions des émissions de dioxyde de soufre, un contributeur majeur aux impacts sur l'environnement liés aux pluies acides.

Du biocarburant et du carburant d'aviation à base de jatropha ont été testés par des sociétés internationales pour toutes les applications moteur majeures y compris les réacteurs d'avions. Le jatropha comme matière première a été utilisé, entre autres, pour 1 200 vols avec biocarburant par la Lufthansa de 2011 à 2012. Aucun des composants de l'avion (A 321) tels que les réservoirs, les conduites de carburant ou moteurs n'ont montré de signes inhabituels de tension. Depuis, une multitude de compagnies internationales a testé avec succès du carburant à base de CJO sur des vols commerciaux réguliers.

Le kérosène dit kérosène paraffinique biosynthétique (SPK) à base de jatropha donne régulièrement des performances aussi bonnes ou meilleures que celles du JP 8 ou du carburéacteur Jet A1. En tant que biocarburant de remplacement, il est totalement compatible

avec les carburants d'aviation actuels et peut être utilisé dans les systèmes d'alimentation en carburant des réacteurs d'avions ou dans les circuits de distribution du carburant sans aucune adaptation.

Le carburant alternatif à base de jatropha a été certifié conformément aux normes internationales ASTM (ASTM D 7566) et aux normes militaires britanniques (DStan), auxquelles il faut obligatoirement satisfaire pour l'utilisation d'un carburant dans le secteur de l'aviation civile internationale. Le Bio-SPK peut être mélangé jusqu'à 50 % avec le carburant d'aviation actuel.

Le carburant alternatif à base de jatropha a fait la démonstration sur de nombreux vols que le carburéacteur renouvelable hydrotraité réduit les émissions de carbone (CO₂) de jusqu'à 85 % par comparaison avec le carburant d'aviation actuel. La diminution des émissions de CO₂ pour le biokérosène à base de jatropha est attribuée à l'indice élevé de cétane et à la présence d'oxygène dans la structure moléculaire du carburant.

3.4.3 LE CONTEXTE BURKINABÈ : PRINCIPAUX ACTEURS ET INITIATIVES

Au moment même où les activités ont débuté en Tanzanie, au Kenya, au Mozambique, en Éthiopie et au Mali, le jatropha est arrivé au Burkina Faso, au début de 2007. Le Burkina Faso a rapidement pris les devants comme producteur de la plante bioénergétique nouvellement populaire qu'était le jatropha. Le Burkina Faso n'a pas eu de difficultés majeures en termes de droits d'utilisation des sols et de plantations à grande échelle, car la plupart des projets nationaux favorisaient des modèles agricoles avec plantations satellites et visaient à mettre sous contrat des petits fermiers. Initialement, les activités agricoles étaient dominées par trois entités qui poursuivaient chacune une approche distincte : 1) Faso Biocarburant ; 2) Agritech Faso et 3) Belwet.

3.4.3.1 Faso Biocarburant

Contrairement à la situation en Zambie, à Madagascar, au Ghana, en Tanzanie et au Mozambique, le modèle initial de contrat agricole ne dépendait pas de plantations à grande échelle et d'accords complexes sur les terres, mais reposait plutôt sur les efforts de mobilisation de promoteurs recrutés pour contacter le plus grand nombre possible d'agriculteurs et de petits planteurs. Au lieu d'acquérir des terres et d'investir dans des opérations de plantation à grande échelle lui appartenant, Faso Biocarburant a opté pour une solution à faible coût en faisant appel uniquement aux compétences des promoteurs pour surmonter les difficultés logistiques et établir un réseau de petits producteurs individuels. En plus de la compensation des promoteurs et des coûts de rachat de semences, les dépenses autrement significatives liées à l'achat-bail de terres, l'aménagement et la fertilisation du terrain n'ont joué aucun rôle.

Quoi qu'il en soit, un marché opérationnel avec fixation des prix par le marché n'a jamais abouti. Les prix de rachat des semences n'ont pas été négociés, mais ont été fixés arbitrairement.

À son apogée en 2014, 3 000 fermiers participaient au Programme d'aide aux petits planteurs de jatropha de Faso Biocarburant dans la province de Sissili. Plus de 10 millions de pieds de jatropha

ont été plantés dans le centre-sud du Burkina Faso. Cependant, les rendements de cette culture étaient inférieurs aux attentes et l'exploitation a dû cesser. La totalité de la chaîne de valeur s'est effondrée. Depuis juin 2017, le site de l'usine de broyage demeure désaffecté. Pendant ce temps, le syndicat des fermiers a été dissous et remplacé par l'organisation non gouvernementale FNZ (Fédération Nian Zwé), ce qui signifie dans la langue locale "la famine est terminée".

3.4.3.2 Agritech Faso

Agritech Faso, l'une des premières sociétés de jatropha au Burkina Faso, a encouragé la culture intercalaire avec des cultures légumières et vivrières sélectionnées afin de renforcer la sécurité alimentaire pour la population locale. Les producteurs ont été informés qu'il fallait utiliser le jatropha pour les haies, les clôtures et le reboisement des terres dégradées, sans entrer ainsi en concurrence avec les utilisations agricoles. Contrairement à Faso Biocarburant, la société ne comptait pas exclusivement sur les petits planteurs associés indépendants et les coopératives agricoles, mais a également embauché des centaines de leurs propres employés ruraux et saisonniers pour travailler sur leurs propres terres louées dans les pépinières et plantations de la société. Agritech Faso a combiné des éléments d'un contrat de fermage type avec ceux d'un contrat type de grands domaines agricoles, qui exigent des investissements initiaux plus importants.

En mars 2013, Agritech Faso a signé un Mémoire d'entente avec la JOil basée à Singapour afin d'avoir accès à des semences hybrides de jatropha, à haute productivité et de développer 250 000 ha de plantations de jatropha en culture intercalaire en Afrique de l'Ouest. JOil est une co-entreprise dont les actionnaires sont Temasek Life Sciences Laboratory Limited, Tata Chemicals Asia Pacific Pte Ltd. et Toyota Tsusho Corporation. Temasek Life Sciences est en définitive contrôlée par Temasek Holdings Private Ltd., le Fonds souverain d'investissements qui est propriété du Gouvernement de Singapour. JOil n'a obtenu que 300 ha pour des essais sur le terrain au Burkina Faso, dont seuls 35 ha ont été plantés en jatropha. Plusieurs mois plus tard, la co-entreprise était terminée. JOil a quitté le Burkina Faso, coupant les plantes restantes et détruisant tous les plants. Confrontée à d'importantes contraintes financières, Agritech Faso a cessé toutes opérations à la fin de 2013.

3.4.3.3 Belem Wend Tiga (Belwet)

Créée en 2008 par le chef tribal le mossi le Larlé Naba Tigré, Belwet Biocarburant est la seule entreprise pionnière de jatropha encore existante qui soit toujours active aujourd'hui (novembre 2017) au Burkina Faso. Belwet fait des affaires dans tous les secteurs de l'agroforesterie durable. Alors que l'accent principal est mis sur la culture de jatropha et la production de biocarburant, Belwet a aussi mis en place un modèle qui fonctionne, pour divers sous-produits du jatropha. Cela comprend la commercialisation du savon de jatropha, qui est offert et vendu dans les stations d'essence TOTAL ; des tourteaux de jatropha, qui sont commercialisés et vendus dans tout le pays comme engrais organique, et des coques de jatropha, qui sont vendues comme composte. Outre la production de biocarburants, Belwet fournit également des micro-crédits, l'instruction et l'éducation, ainsi que les soins de santé de base.

En ce qui concerne la culture du jatropha, Belwet applique un modèle équilibré d'agriculture contractuelle au Burkina Faso central, promouvant les cultures intercalaires avec du maïs, des noix de cajou, des manguiers et des haricots velus. Avec le soutien de fonds de donateurs sélectionnés, des installations de broyage utilisant une technologie venant d'Inde ont été installées en 2010 à Kossodo, en dehors de Ouagadougou. La capacité de production quotidienne d'huile brute a atteint 4 200 litres et la capacité de production de biodiesel a été conçue pour 1 440 litres.

Initialement, Belwet a offert de racheter les semences de jatropha pour 70 FCFA (c'est à dire 0,13 \$ É.-U.). Ce prix a été par la suite porté à 100 FCFA (c'est à dire 0,18 \$ É.-U.). Les efforts de mobilisation des agriculteurs dans tout le pays ont été largement couronnés de succès. En 2008, Belwet a réussi à activer et à faire participer des agriculteurs de jatropha à l'échelle du pays dans 71 communautés rurales distinctes et plus de 1 200 villages. À son apogée, plus de 60 000 agriculteurs (la plupart des femmes) étaient organisés au sein de coopératives spéciales de producteurs et participaient au programme de rachat. Les offres d'achat de semences ont été également étendues à des producteurs des pays voisins : Bénin, Mali, Togo et Côte d'Ivoire. Toutefois, à cause des variations considérables des plants de culture intercalaire et de densité des plantes (160 à 1 250 plants/ha) il a été presque impossible d'arriver à des déclarations scientifiquement valables sur le rendement et les performances des plantes, ainsi que sur les taux de survie des plantes dans diverses conditions agro-climatiques.



PHOTO 12

Belwet Biocarburant – Installations de foulage du biocarburant et de traitement du biodiesel, Kossodo

Afin de relever les défis logistiques, des centres d'achat de semences et des installations de stockage ont été installés en 10 endroits partout au Burkina Faso. En 2012, les chiffres indiquent que 114 tonnes de semences de jatropha ont été recueillies. La même année, Belwet a produit 23 360 litres de CJO et 824 litres de biodiesel. Le CJO est consommé à l'échelle nationale pour alimenter les usines de maïs et de grains, ainsi que les pompes à eau.

Alors que finalement plusieurs milliers d'hectares d'arbustes (jatropha) ont été finalement plantés, l'initiative n'a pu obtenir un marché viable ni des engagements d'achat fiables de CJO et de

biodiesel. Même si le rendement moyen est resté largement en deçà des attentes, le rendement relativement faible par hectare et les défis en termes de viabilité commerciale n'ont pas été considérés comme les obstacles insurmontables les plus critiques.

3.4.3.4 Initiatives gouvernementales

Au Burkina Faso, différentes parties soutiennent encore une vigoureuse relance et font visiblement de gros efforts pour la promotion du jatropha en tant que source de SAF. Au Burkina Faso, le terme "jatropha" est utilisé de façon générique comme synonyme de "biocarburants". Résultat, le jatropha demeure au centre de la stratégie biocarburant du pays et est lié à des considérations de politique énergétique. Au lieu de limiter le rôle de la plante à celui d'une simple "culture de rapport", le jatropha est de plus en plus perçu comme un outil agroforestier, de reforestation et de réhabilitation de la terre. De plus, la perspective d'une électrification rurale durable contribue à un regain d'intérêt et de confiance dans la revitalisation envisagée de la chaîne de valeur du jatropha.

Parmi les promoteurs politiques clés on compte la Direction générale des énergies renouvelables au sein du Ministère de l'énergie. Selon un rapport ministériel publié en janvier 2017, il a été jugé nécessaire d'encourager un cadre légal et réglementaire qui puisse créer un environnement favorable à la promotion du secteur du jatropha comme source de biocarburants durables au Burkina Faso. Les mesures concrètes devaient comprendre l'identification et la dissémination de variétés plus productives ; la promotion simultanée des systèmes de production agro-forestiers ; l'introduction de structures de marché de base ; des prix d'achat de semences fiables et stables ; et une utilisation accrue de tourteaux de jatropha comme engrais organique. En parallèle, l'investissement privé sera encouragé et l'accès au crédit et au financement pour les petits porteurs sera facilité. Une institution gouvernementale spéciale, l'Agence nationale des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (ANEREE) a été désignée comme agence principale responsable de la mise en place. L'ANEREE a été mise en place en octobre 2016 pour, entre autres : formuler et mettre en application des politiques d'énergie renouvelable ; ("relancer", fr.), promouvoir la filière jatropha et mobiliser les financements nécessaires. En ce qui concerne la production nationale de biocarburant, toutes les mesures d'application devront garantir la sécurité alimentaire, promouvoir le développement rural et contribuer à la réduction de la pauvreté dans les zones rurales.

Afin de soutenir la relance de la chaîne de valeur du jatropha, le Gouvernement propose :

- prendre en compte les demandes spécifiques et les opportunités liées au marché du carbone et des régimes de tarification du carbone en connexion avec les projets de plantation de jatropha au Burkina Faso ;
- subventionner les facteurs de production (tels que les engrais, semences et pesticides) afin d'accroître le rendement en graines et en huile ;
- offrir des incitations pour la production de graines en fixant un prix plancher pour garantir un revenu minimum pour les petits producteurs et vendeurs ;
- encourager l'investissement par la réduction des taxes douanières pour les équipements de transformation.

3.4.3.5 Initiative du PNUD

En ce qui concerne la relance prévue de la chaîne de valeur et de la production de biocarburants durables le Gouvernement du Burkina Faso/burkinabè est soutenu par le Programme des Nations-Unies pour le développement (PNUD). Depuis juillet 2017, Belwet est devenu le principal point de référence pour le PNUD au Burkina Faso pour ce qui concerne la culture du jatropha. En coopération avec le Ministère de l'énergie, le Ministère du développement [Secrétariat permanent du Conseil national pour l'environnement et le développement durable (SP/CONEDD)] et le Ministère de l'agriculture, le PNUD conduit actuellement une étude à grande échelle sur le jatropha intitulée "Promotion du jatropha curcas comme source d'agrocultures durables au Burkina Faso". Faisant fond sur le soutien financier du Fonds pour l'environnement mondial (FEM), un projet éponyme de cette étude a été officiellement relancé par le Ministère de l'énergie et le PNUD en juin 2017. En consolidant les données disponibles, les expériences de culture et les paramètres agronomiques nationaux courants, l'objectif du projet du PDNU est de promouvoir et de développer un modèle de production de jatropha économiquement viable afin de déployer le jatropha comme matière première pour les biocarburants au niveau national. Le projet a également pour but de contribuer de manière significative au développement rural en encourageant la production décentralisée de CJO comme base pour le biodiesel, sans perturber la production alimentaire. Indépendamment des défis restants, le PDNU estime un potentiel total de culture de 500 000 ha sans mettre en péril la sécurité alimentaire. Ceci représente environ 5 % des terres arables disponibles au Burkina Faso. La mise en œuvre du projet et la commercialisation du jatropha sont principalement basées sur les efforts de mobilisation de Belwet. Il est attendu que Belwet fournisse des millions de semis pour atteindre l'objectif estimatif du projet du PNUD. Cependant, le projet n'a pas encore internalisé les exigences minimales scientifiques, agronomiques et commerciales afin d'atténuer les risques connus et d'optimiser les cultures envisagées de jatropha.

3.4.4 LES ENSEIGNEMENTS TIRÉS

3.4.4.1 Attentes en termes de rendement

Une des caractéristiques clés de l'expérience avec le jatropha a été la promotion à grande échelle du jatropha, sur la base de prétentions non étayées et sur l'usage sélectif des données disponibles. Ceci a mené à une adoption rapide du jatropha, ce qui fut facilité plus avant par un environnement qui était réceptif au concept d'une nouvelle culture pour biocarburants. En acceptant inconditionnellement des rendements surestimés et des affirmations sans fondement, même les autorités locales se sont embarquées dans des initiatives liées au jatropha. Beaucoup de gouvernements étaient pressés de capitaliser sur les coavantages sociaux et environnementaux perçus du jatropha et de récolter les bénéfices promis de développement que le jatropha était censé offrir. À ce sujet, des politiques nationales de biocarburants élaborées à la hâte ont encouragé un peu plus les investissements du secteur privé et la culture généralisée du jatropha.

Cependant les attentes en termes de rendement étaient généralement surestimées et irréalistes. Le jatropha a des rendements médiocres dans les zones de faibles précipitations

ou sur des sols pauvres en nutriments. Le jatropha peut pousser sur des terres dégradées/marginales ou dans un environnement limité en eau, mais cela a des répercussions négatives sur sa capacité de générer des rendements élevés. On doit s'attendre à de grandes variations de performance lorsqu'on utilise une espèce "sauvage". Les prédictions initiales de productivité devraient être basées sur la performance moyenne des espèces dans la zone agroécologique pertinente, et non sur les performances de quelques plantes à performance élevée. La surestimation des rendements de jatropha, des hypothèses fausses et sur de la recherche l'insuffisante des recherches de fond de contexte, associées à une médiocre connaissance générale du jatropha et de son agronomie, ont été les premiers facteurs qui ont contribué à l'effondrement de la plupart des projets de jatropha.

Pour une viabilité financière à long terme, il faudra probablement des rendements supérieurs à ceux que l'on obtient actuellement. On ignore encore si des rendements suffisamment élevés à partir d'arbres mûrs seront obtenus à long terme. Cependant, pour de petits agriculteurs, même un jatropha à faible rendement peut apporter un complément et une diversification des revenus agricoles, même sans devenir en soi une culture commerciale de grande valeur. Selon les rapports d'anciens petits planteurs de jatropha dans la province de Sissili au Burkina Faso, environ un jour de récolte et de préparation de 8 kg de graines de jatropha pouvait engendrer des revenus suffisants pour financer l'achat de 9 kg de maïs permettant de nourrir un foyer moyen pendant 3,4 jours. Compte tenu de cela, le jatropha pouvait ajouter à la diversité générale et à la résilience des stratégies de subsistance des ménages. Des données du Burkina Faso laissent entendre que les salaires des ouvriers agricoles représentaient une augmentation substantielle des revenus monétaires des ménages locaux et constituaient un filet de sécurité en période de sécheresse lorsque les rendements des cultures alimentaires diminuaient.

3.4.4.2 Faiblesses de la recherche-développement

Dans la plupart des cas, le manque de recherches sérieuses avant la promotion à grande échelle du jatropha n'a pas permis une compréhension correcte des contraintes climatiques et agroécologiques locales de la plante. Au moment où les investissements initiaux dans la commercialisation à grande échelle du jatropha étaient en cours, on ne savait pas grand-chose de l'agronomie basique du jatropha. L'échec de beaucoup de projets de jatropha confirme les inquiétudes de ceux qui avaient reconnu les risques économiques de la culture d'une plante non domestiquée. Il est devenu évident que la culture dépassait à la fois la compréhension scientifique du potentiel de l'espèce, aussi bien que la compréhension de la manière dont la plante s'insère dans les économies rurales existantes et de la mesure dans laquelle la plante peut prospérer sur des sols marginaux.

3.4.4.3 Asymétrie de l'information

Idéalement, tous les participants à un marché, qu'ils soient producteurs, acheteurs, vendeurs ou consommateurs, ont besoin d'information adéquate afin de prendre les décisions appropriées et de fonctionner efficacement. En ce qui concerne les fermiers et les agriculteurs sous contrat, la préparation du sol, la gestion de l'eau et des nutriments, les modèles spatiaux, la densité de la plantation

et des pratiques de cultures intercalaires et d'assolement sont des paramètres vitaux pour l'optimisation de la culture du jatropha dans des circonstances données. Cependant, les informations des recherches disponibles à l'international n'avaient pas été extrapolées à temps par les promoteurs, les investisseurs, les autorités gouvernementales et les petits planteurs associés. Sans coordination centralisée, les informations critiques et les meilleures pratiques n'étaient pas transmises. À défaut d'accès aux bases de données nationales ou internationales, la plupart des initiatives de plantations ont été réalisées de manière isolée ce qui au final s'est révélé source d'erreurs et de coûts. En appliquant à la culture de la plante la méthode par tâtonnement, les agriculteurs se sont retrouvés exposés à un maximum de risques. Pire, des informations critiques concernant les performances des plantes, les rendements, la tarification et les possibilités de revenus connexes leur ont été délibérément dissimulés. En raison de l'asymétrie de l'information, les fermiers n'avaient souvent pas de moyens d'évaluer/de valider les paramètres agronomiques sous-jacents par eux-mêmes. L'asymétrie d'information délibérée peut en fin de compte conduire à un échec du marché.

3.4.4.4 Disfonctionnements et fragmentation des marchés

Indépendamment de l'attention mondiale et de l'opportunité d'introduire un nouveau produit répondant à la demande croissante de l'industrie de l'aviation en carburants alternatifs, il n'y avait ni marché organisé ni un mécanisme approprié de fixation des prix. Même si les agriculteurs et les associations d'agriculteurs se sont vu offrir des contrats d'achat de semences, la production et la demande n'étaient pas coordonnées. Les producteurs avaient peu ou pas de certitude que les semences pourraient être vendues sur le marché à un prix suffisamment élevé.

Alors que la formalisation de la relation entre les petits planteurs producteurs et les acheteurs de semences est une condition indispensable pour assurer la durabilité de l'approvisionnement en matières premières tout en préservant l'agriculture familiale, les promoteurs et les intermédiaires commerciaux n'ont pas réussi à mettre en place une chaîne d'approvisionnement cohérente et fiable. Les marchés inefficaces conduisent à des possibilités d'arbitrage, au détriment des producteurs et des acheteurs.

Les initiatives précoces de culture du jatropha au Burkina Faso ont été largement isolées et mises en place au cas par cas, généralement sans tenir compte des connaissances agronomiques et de l'expérience internationale disponibles concernant les échecs de projets de jatropha. En conséquence, l'efficacité du processus était faible, et le volume de travail manuel était proportionnellement élevé. Là où une consolidation d'initiatives parallèles aurait pu créer des économies d'échelle, en particulier dans la logistique, les installations collectives de stockage et d'entreposage, la mécanisation et les installations centralisées de transformation des graines, les promoteurs de jatropha au Burkina Faso et dans les États voisins ont généralement opté pour la mise en place de projets indépendants. La fragmentation du marché qui en a découlé a mené à de faibles volumes de production qui ne permettaient d'avoir que des moulins à huile, installations de broyage de graines et usines de transformation en biodiesel de bas niveau technologique. Alors que de machines

simples et des appareils manuels de base pour l'enlèvement des coques de jatropha (décorticage) existent, les coques de fruit sont séparées de la graine manuellement. Traditionnellement les femmes craquent les fruits à l'aide de briques ou de bois et les coques détachées sont alors enlevées à la main. Cependant, la décorticage manuelle est une opération chronophage et pénible ne permettant pas une augmentation économiquement viable des opérations. Pareillement, l'écossage n'a pas été mécanisé. Même l'usage d'écosseuses semi automatiques pourrait grandement réduire la demande de main d'œuvre et améliorer l'économie des procédés. L'automatisation et la mécanisation des procédés nécessiteront au final une plus grande capacité de production et un débit horaire plus important. Il faudra pour cela une coopération et une coordination entre les producteurs individuels et les coopératives agricoles. Afin d'optimiser le procédé d'extraction d'huile (par exemple grâce à des méthodes innovantes d'extraction de l'huile en milieu aqueux) et d'améliorer les paramètres de performance globale, les unités d'extraction avec un plus important débit de graines promettent généralement de meilleurs taux d'efficacité et de qualité produit.

3.4.4.5 Coûts des transports

Beaucoup de projets de jatropha sont localisés dans des zones reculées ce qui renchérit le transport des matières premières depuis les sites de projets. De plus, le coût (transport et personnel) de la collecte de petites quantités de semences provenant de petits planteurs éparpillés finit par être plus élevé que prévu.

3.4.4.6 Conflits d'intérêts divergents

La complexité de la chaîne de valeur du biocarburant a été grandement sous-estimée par les participants au marché et les efforts collectifs n'ont pas été synchronisés. Cet écart structurel a mené à des demandes concurrentes qui étaient de plus en plus difficiles à équilibrer entre les parties prenantes :

- les gouvernements et promoteurs de jatropha cherchaient à attirer des donateurs et des financements d'investisseurs étrangers ;
- les compagnies aériennes et les acheteurs du produit se concentraient sur la parité des prix avec les carburants conventionnels ;
- les raffineurs tentaient de protéger leurs marges traditionnelles de raffinage et les marges dérivées de raffinage.

De plus, l'accent a été mis, bien trop peu, sur les inquiétudes en termes de durabilité dans la phase critique du début du lancement du projet, semant souvent la confusion quant à l'importance d'autres paramètres clés du lancement, comme la faisabilité technique, la viabilité économique, les économies d'échelle, la logistique, le stockage, la réduction de la pauvreté et d'autres aspects sociaux, économiques et financiers.

3.4.5 CAPITALISER SUR L'EXPÉRIENCE/PRINCIPAUX DÉFIS

En gardant à l'esprit les retombées économiques des initiatives de jatropha à l'échelle mondiale et l'expérience nationale largement décevante, le jatropha pourrait encore se qualifier en tant qu'option viable de culture énergétique, à condition que soient remplies certaines conditions essentielles.

3.4.5.1 Modèle agricole (Plantation)

L'échec des modèles agricoles de grandes plantations ne mène pas nécessairement à l'échec total de la culture du jatropha au Burkina Faso. Les cultures de rapport comme le thé, le café, le tabac et le coton ont également subi un certain nombre de cycles d'expansion et de récession. Les expériences nationale et internationale confirment que d'autres modèles de production de jatropha associant de petits agriculteurs en qualité de planteurs associés ou de producteurs indépendants pourraient en fait réussir. Ce modèle dit d'agriculture contractuelle est un partenariat mutuellement avantageux entre l'agro-industrie et les petits planteurs associés indépendants. L'agriculture contractuelle définit un arrangement réciproque entre de multiples producteurs et un acheteur connu sur la base d'un contrat à terme établissant les conditions pour la production et la fourniture de certains produits agricoles à des prix prédéterminés. Pour déterminer une fixation équitable des prix à terme des produits à livrer, des rendements réalistes devront être calculés afin de prévoir si la production par les planteurs associés peut être profitable, à des prix que l'acheteur central est en mesure de payer.

L'agriculture contractuelle est utilisée comme une stratégie de gouvernance de la chaîne d'approvisionnement en réponse aux échecs du marché et échecs institutionnels qui caractérisent le secteur agricole à divers stades du développement. L'agriculture contractuelle contribue également à la réduction de la pauvreté car elle constitue un outil pour la transformation des agriculteurs de subsistance en agriculteurs commerciaux. Afin d'équilibrer les risques issus des asymétries d'information entre les agriculteurs/petits planteurs associés et sociétés de conditionnement des semences, il est recommandé de ne pas limiter les contrats à des dispositions relatives aux achats de semences mais d'inclure également des clauses concernant la fourniture d'intrants supplémentaire par la société contractante, comme des semences hybrides à rendement élevé, des engrais organiques, des services d'assistance technique et de formation sur les pratiques agronomiques de base. Le possible impact socio-économique positif de ce plan dépend de plusieurs éléments, notamment la qualité des intrants agricoles et services de soutien fournis, la qualité et la performance des plantes elles-mêmes et de l'équité des termes du contrat. Il a été constaté que la majorité des contrats d'association avec les petits planteurs prévoient la fourniture à leurs agriculteurs de plantes gratuitement ou à des prix réduits. Cependant, l'obtention et la distribution d'intrants agricoles pourraient se révéler particulièrement onéreuses là où on a recours à la propagation par culture de tissus pour reproduire des cultivars de jatropha à fort rendement. Les petits agriculteurs de subsistance au Burkina Faso vendent généralement leurs produits juste après la récolte afin de répondre à leurs besoins financiers immédiats (par exemple frais scolaires, frais médicaux). Ils n'ont donc pas les moyens financiers pour investir dans des intrants agricoles pour la saison suivante. Faute de garantie constituée, les fermiers ont également des difficultés à accéder au financement rural. Des modèles existants de micro-crédit ont montré une capacité limitée à augmenter la profitabilité pour ces fermiers. Un système de crédit stockage ou "warrantage", qui permet aux producteurs de stocker une partie de leur récolte dans

un entrepôt pendant plusieurs mois, et d'utiliser les sacs comme garantie pour un prêt s'ils le souhaitent, pourrait donner aux petits planteurs les moyens d'acheter des intrants agricoles essentiels et des cultivars à fort rendement pour la prochaine saison de semis. En plus, le financement nécessaire et le financement d'implantation des cultures devront être obtenus auprès d'autres sources, par exemple le Gouvernement burkinabè, des agro-banques et des banques de développement.



PHOTO 13

Pépinière de jatropha à grande échelle à 30 km de Ouagadougou

La pépinière a une capacité de production de plusieurs centaines de milliers de plants de jatropha.

L'agriculture contractuelle réduit de façon significative les coûts car il grève moins de capital et évite d'importants investissements de départ pour la location de parcelles et la préparation du sol. La même observation s'applique aux coûts de main d'œuvre. Cependant, son fonctionnement à petite échelle par nature (par exemple 1 ha/fermier sous-traitant) pourrait causer des problèmes d'efficacité. À première vue, la pertinence d'échelle semble pencher en faveur d'un contrat agricole qui soit plus économique et plus efficace. Cependant, les rendements et profits par unité de sol pourraient ne pas nécessairement décroître parallèlement à la diminution de la taille de la ferme ou de la plantation. Ceci est largement dû au fait que les petits planteurs indépendants sont généralement plus motivés à maximiser le rendement et les extrants puisque leur paye est directement liée à la récolte et non au temps (heures travaillées) passé dans le champ. Afin de calculer les revenus supplémentaires de cultures bioénergétiques des sous-traitants sous contrat, le prix d'achat de la graine proposé aurait à prendre en compte des prévisions raisonnables de rendement, le schéma de cultures intercalaires et la densité des plantes. Des conceptions minutieuses d'incitatifs, couplées à une juste allocation du risque (particulièrement du risque rendement) aidera à assurer que les contrats de production à long terme soient acceptables et commercialement intéressants pour les fermiers.

L'efficacité globale de la production pourrait être augmentée un peu plus en groupant les agriculteurs participants comme des

satellites autour de pépinières de multiplication centrales et de stations d'élevage pilotes pour le croisement des plantes, dotées de l'équipement pertinent et du soutien technologique de base (par exemple machines à écosser).

3.4.5.2 Culture intercalaire : Alimentation plus carburant

Le jatropha ne remplacera jamais aucune autre culture et, en particulier, aucune autre culture vivrière. Au contraire, cette plante ne convient que comme complément de pratiques agronomiques existantes. L'expérience de monoculture négative a montré que l'on ne peut pas attendre des agriculteurs qu'ils dépendent uniquement du rendement incertain du jatropha. Les taux non satisfaisants de production de semences posent un risque économique important pour les petits planteurs associés. En raison du souci de la disponibilité limitée d'eau, de la demande de nutriments, de la propagation des maladies, de la perte de la biodiversité et du risque de médiocres rendements, tout modèle d'agriculture contractuelle de jatropha devra donc être fondé sur la pratique d'une agriculture intercalaire ou multirécottes, avec des fruits, des légumes, des herbes, des épices ainsi que des essences sélectionnées.



PHOTO 14

Échantillons de cultures intercalaires

La culture intercalaire est la pratique agricole consistant à cultiver deux plantes ou plus simultanément dans le même champ, tout en améliorant l'utilisation de maigres ressources de croissance.

Compte tenu de la concurrence pour obtenir l'espace physique, des nutriments, de l'eau et du soleil, la justification de la culture intercalaire est qu'il faut obtenir un meilleur rendement sur une parcelle donnée en faisant usage des ressources limitées disponibles qui autrement ne seraient pas utilisées par une culture unique. La culture intercalaire, lorsqu'elle est pratiquée dans l'agriculture contractuelle, garantit que les activités agricoles habituelles peuvent se poursuivre comme avant, alors qu'une source de revenus supplémentaire, certes pas importante, est générée sans aucune incidence négative sur l'agriculture de subsistance traditionnelle et la sécurité alimentaire. Tant que les combustibles dérivés du jatropha et les revenus qu'ils procurent s'ajouteront à ceux de la production alimentaire en agriculture intercalaire, qu'ils ne génèrent pas cette agriculture ou n'augmenteront pas la pression en vue de changements de l'affectation des terres, le jatropha ne concurrencera pas la production alimentaire. Si les combustibles sont produits avec soin en faisant appel à des matières premières alternatives qui ne concurrencent pas les cultures vivrières et qu'ils sont intégrés

dans le paysage agricole de manière à ne pas contribuer à des changements de l'affectation des terres, le jatropha peut montrer un potentiel considérable.

Une relation quelque peu symbiotique entre les plants de jatropha et des cultures vivrières alternées soigneusement choisies peut même renforcer le paradigme intégré de l'optimisation de l'utilisation des terres, de la réhabilitation des terres, de la sécurité alimentaire à long terme et de l'écoéquilibre.

Les légumes cultivés en intercalaire, avec leur adaptabilité à divers systèmes de culture et leur aptitude à fixer l'azote, peuvent également offrir des possibilités de maintenir l'augmentation de la productivité. Les légumes sont préconisés en culture intercalaire non seulement pour l'augmentation du rendement, mais aussi pour le maintien de la santé des sols, en particulier dans les zones de sols dégradés. Ainsi, la culture intercalaire du jatropha avec des légumineuses sélectionnées est un moyen approprié d'améliorer la fertilité des sols et de réduire l'érosion des horizons superficiels.

Les légumineuses à grain comprennent à la fois les plantes herbacées comme les haricots, les lentilles, les lupins, les pois, les noix d'anacarde et les arbres comme la caroube, le prosopis et le tamarin. D'autres cultures alternées qu'on pourrait peut-être planter en relation symbiotique avec le jatropha comprennent les haricots verts, le brocoli, l'aubergine, le gombo, la citronnelle, l'herbe à éléphant, les oignons, le maïs sucré et divers types de melons.

Le jatropha intercalé avec du maïs et des haricots verts (haricots velu) sur des terres réhabilitées offre un avantage encore plus grand par comparaison avec la seule culture du maïs ou de haricots. Les rendements du maïs et des haricots seront plus stables et non seulement ils augmenteront mais ils induiront d'autres écoservices comme la stabilité des sols, la capacité de stockage d'eau et la fertilité globale.

Outre les cultures de base comme le maïs et le soja, les plantes les mieux appropriées pour la culture intercalaire comprennent les légumes feuilles, les légumes racines, les fruits (comme les mangues), les noix d'anacarde, les haricots, l'aubergine, la citronnelle, l'herbe à éléphant, le thé, les épices, les herbes et la vanille.

Le choix et la composition idéaux des cultures intercalaires dépendent en fin de compte d'une multitude de paramètres, qui vont du type de sol (caractéristiques physiques et chimiques du sol) et de la composition du sol en nutriments jusqu'à la disponibilité d'eau, aux caractéristiques des plantes (y compris les caractéristiques de croissance physiologique des plantes et l'architecture du couvert forestier), à l'espacement entre les plantes, aux structures sociales, à l'infrastructure de base et à la demande du marché en termes de cultures alimentaires biologiques, localement et internationalement.

3.4.5.3 Commercialisation des sous-produits

Au lieu de commercialiser tous les éléments composants du fruit de jatropha, le modèle type de contrat agricole appliqué au Burkina Faso était principalement limité à un scénario beaucoup trop simpliste de rachat de semences. Le problème intrinsèque d'un modèle agricole de petits planteurs qui ne se concentrent que sur l'achat des semences aux agriculteurs participants est que des composants de valeur importante sont laissés de côté. Toutefois, les graines de jatropha et leur teneur en huile ne représentent qu'un pourcentage de la chaîne de valeur globale.

L'économie de la production de biocarburant peut être nettement influencée si tous les composants de la plante, autres que l'huile qui va pour conversion directe en biodiesel et/ou en carburant d'aviation, peuvent être utilisés et commercialisés de manière appropriée.

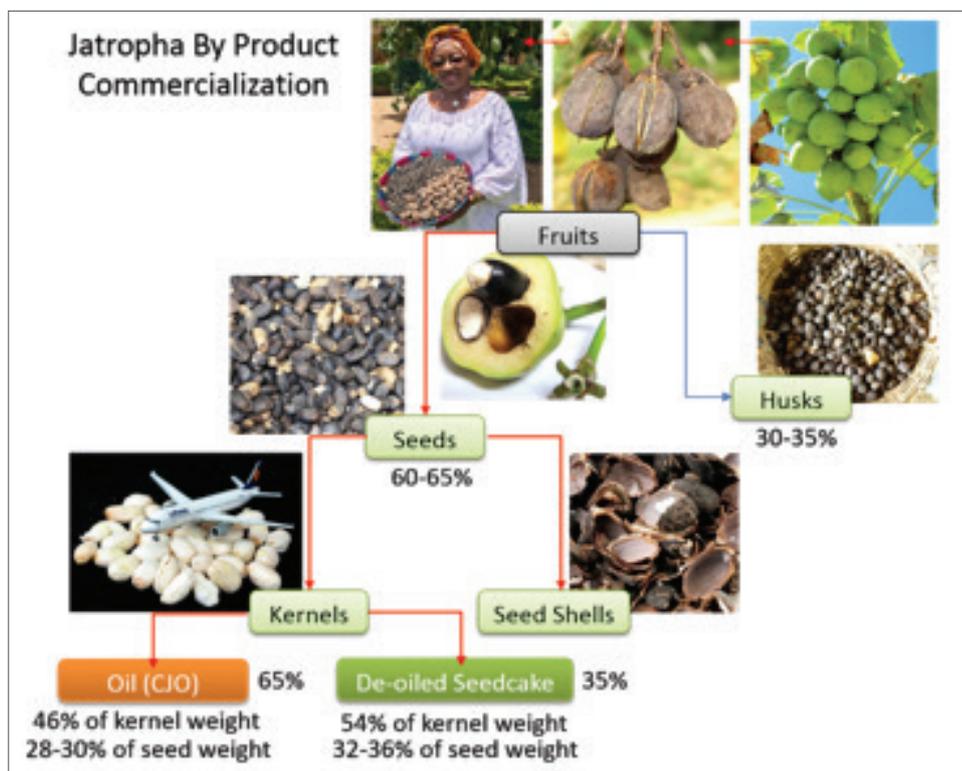


FIGURE 26
Rapports fruits/graines de jatropha en poids et commercialisation des sous-produits

Pendant le processus d'extraction de l'huile des graines de jatropha, seuls 30 % du poids des graines (ce qui équivaut à 46 % des noyaux de graines décortiqués) est transformé en huile de jatropha brute. Le reste des enveloppes de graines et du tourteau contient des minéraux, des protéines, des glucides, des matières fibreuses (lignine), de l'huile et diverses autres molécules. La séparation et/ou l'extraction de ces composants et leur transformation ultérieure par des méthodes thermiques, chimiques, catalytiques, biochimiques (enzymatiques) et autres méthodes donnent des produits à valeur ajoutée hautement désirables.

Afin d'exploiter le plein potentiel et d'augmenter les chances d'obtenir la viabilité économique, tous les sous produits devront être pris en compte et introduits sur le marché à leur propre valeur. Cela comprend les coques de fruits et les enveloppes de graines. Chaque fruit de jatropha comprend 60 à 65 % de graines et 35 à 40 % de coques en masse, alors que les graines généralement comprennent 35 % d'enveloppe (pellicule) et 65 % de noyaux (nucléus) en masse (voir **figure 26**) Même sans tenir compte d'applications sophistiquées médicinales ou nutraceutiques, la valeur combinée des coproduits les plus basiques, à savoir : le tourteau déshuilé ; les coques de fruits ; et les enveloppes de graines, peut facilement constituer 50 % de la valeur de l'huile brute totale.

3.4.5.4 Engrais organique

Le sous produit qui offre la valeur ajoutée la plus prometteuse est les revenus générés par la commercialisation du tourteau de jatropha. Après l'extraction de l'huile des graines, le tourteau de jatropha déshuilé (JSC) est une riche source organique qui peut être appliquée comme bio engrais et conditionneur de sol. En raison de la présence d'azote (N/ 5,0 à 6,5 %), de phosphore (P/ 2,0 à 3,0 %), et de potassium (K/ 1,0 à 1,5 %), les sources d'éléments nutritifs organiques dans le JSC sont même plus élevées que celles du fumier de poulet ou de vache. En outre, le JSC contient encore les compositions d'éléments primaires et secondaires requis pour la croissance des plantes. Ces qualités réduisent nettement la nécessité d'intrants chimiques, qui en retour abaisseront l'empreinte carbone pour les planteurs et réduiront les incidences négatives sur les écosystèmes environnants. L'utilisation du tourteau peut en fait remplacer des engrais chimiques qui ont une valeur beaucoup plus élevée. D'autres avantages du tourteau de jatropha comme engrais organique comprennent une teneur en matière organique supérieure dans le sol et une capacité améliorée de rétention d'eau dans le sol. Il améliore la structure physique du sol, permettant ainsi l'arrivée de plus gros volume d'air vers les racines des plantes. L'activité bactérienne et fongique bénéfique augmente dans le sol ; des champignons mycorhiziens qui rendent d'autres éléments nutritifs plus disponibles pour les plantes s'épanouissent dans le sol où la teneur en

matière organique est élevée. Au lieu d'utiliser le tourteau de jatropha résiduel comme engrais organique (fumier vert), on peut également le faire fermenter dans une usine de biogaz et ensuite l'utiliser pour la production d'énergie électrique et de chaleur. Dans les bonnes conditions de chaleur et d'humidité, la fermentation du tourteau produira un biogaz qui peut alimenter une génératrice à gaz.

En supposant une densité moyenne de plantes de 888 plantes/ha et une performance individuelle de plantes de 2,4 kg de graines, un hectare peut générer environ 750 kg de tourteau de jatropha. Le traitement vraisemblablement aboutira à une perte de poids de 15 %. Cela laisse un potentiel de 640 kg/ha ou juste environ 30 % des graines récoltées.

Alors que les prix internationaux mensuels des engrais NPK en Afrique tournent autour de 250 \$ É.-U./tonne, les engrais chimiques au Burkina Faso sont actuellement vendus au prix de 600 \$ É.-U./tonne (350 000 FCFA). Étant donné ses qualités nutritives validées, on peut considérer comme économiquement justifiable une valeur marchande prudente d'au moins 200 \$ É.-U./tonne d'engrais organique à base de jatropha. Appliqué à l'exemple ci-dessus, ce calcul se traduit par un potentiel de commercialisation de 150 \$ É.-U./ha.

3.4.5.5 Alimentation animale (type non toxique)

À part l'huile, le tourteau de jatropha suscite davantage d'intérêt pour son utilisation dans les formulations d'aliments pour animaux. Toutefois, le tourteau contient des anti-nutriments et plusieurs toxines, comme la curcine, les esters phorboliques, les saponines, les inhibiteurs de protéase et les phytates. Les tourteaux produits par les variétés toxiques communément cultivées devraient donc être traités afin d'en extraire complètement la fraction d'esters phorboliques toxiques avant l'incorporation dans des aliments pour animaux. C'est là que la culture et le traitement de variétés hybrides non toxiques et d'accessions comestibles de jatropha d'Amérique centrale peuvent offrir un avantage attrayant.

La valeur nutritive du tourteau de jatropha est largement déterminée par la teneur en nutriments disponibles, en particulier la teneur en protéines, la qualité des protéines et la composition spécifique des amino-acides essentiels. Parmi les amino-acides essentiels, les plus importants sont la lysine, la méthionine/cystine et la thréonine. D'autres comprennent la glycine, la valine, l'isoleucine, la leucine et la phénylalanine. On a constaté qu'avec sa composition supérieure en amino-acides, le tourteau de jatropha a une teneur en protéine totale supérieure de 40 % au moins à celle du tourteau de soja. Des conclusions clés de la FAO des Nations Unies ont prouvé que la qualité des protéines et la valeur nutritive du tourteau de jatropha non toxique peuvent même être considérées comme l'équivalent de la protéine de farine de poisson et que ces deux sources de protéines donnent une performance de croissance, des dépenses énergétiques et une rétention d'énergie similaires.

En tenant pour acquis que la qualité des protéines du tourteau de jatropha est meilleure ou au moins équivalente à celle des protéines de soja, et que le tourteau de jatropha peut potentiellement remplacer le tourteau de soja, à poids égal, sans compromettre la santé, la performance de croissance et l'utilisation des éléments nutritifs, le tourteau de jatropha pourrait raisonnablement être apprécié et tarifé au même niveau que le tourteau de soja.

Item	Soybean Meal	Jatropha Kernel Meal (JKM)
Crude Protein	≥43.0%	≥60%
Crude Fiber	≤7.0%	9%
Ash Content	≤7.0%	9.6%
Digestible Organic Matter	87.9%	78%
Metabolizable energy (MJ kg ⁻¹ DM)	13.3	10.9
Gross Energy (MJ/Kg)		18

TABLEAU 7

Comparaison des propriétés essentielles du soja et du jatropha

Les contrats à terme sur le tourteau de jatropha se négocient actuellement aux environs de 310 \$ É.-U./tonne (juin 2017). Vu que le tourteau de jatropha non toxique en est encore aux premiers stades de lancement sur le marché, il est probablement raisonnable d'appliquer une réduction/minoration temporaire de 50 %. Cela mettrait la valeur de marché du tourteau de jatropha à environ 155 \$ É.-U./tonne avec une tendance à la hausse à mi-parcours directement proportionnelle à son acceptation croissante sur le marché comme source alternative de fourrage protéine.

Selon l'acceptation/résistance sur le marché, l'évolution des prix individuels, le type de modèle agricole, la densité, la performance de rendement et la tenue du rendement des plantes, entre autres, cette autre forme de commercialisation de bioengrais et d'aliments pour animaux offre une possibilité de revenu supplémentaire qui se situe dans une fourchette d'au moins 150 à 200 \$ É.-U./tonne.

3.4.5.6 Coques des fruits

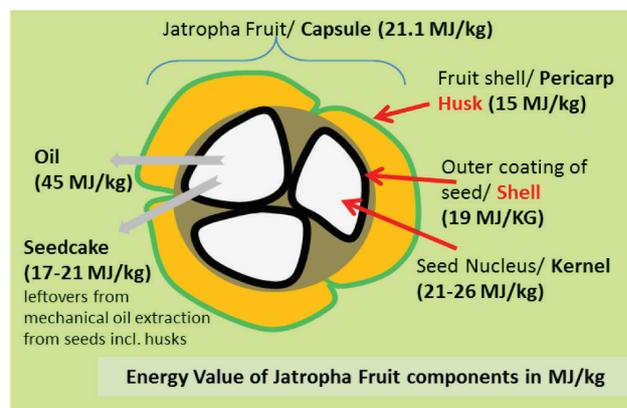


FIGURE 27

Ventilation de la valeur énergétique des composants du jatropha

Afin de déterminer la valeur commerciale approximative des coques du fruit, il faut d'abord convertir la valeur énergétique spécifique en bep/ha. Dans un deuxième temps, le résultat intermédiaire peut alors être multiplié par le prix courant du baril de pétrole. Afin de tenir compte des coûts de traitement (conversion) et de manutention (par exemple transport, entreposage), il est suggéré d'appliquer une réduction d'au moins 40 %.

Exemple de calcul :

En supposant un taux de 1:0,67, pour le rendement coque de fruit grain, une densité de plantation de 888 plants/ha et une performance par plante de 2,4 kg, un rendement en grains de 2 131 kg/hectare donnera également 1 421 kg de coques de fruits/ha de la culture intercalaire du jatropha. La multiplication de ce nombre par la teneur énergétique spécifique de 15 MJ/kg se traduira par un 3,51 bep. Selon le prix actuel du pétrole sur le marché, cela représente une valeur potentielle de 104,70 \$ É.-U./ha. En d'autres termes, le pouvoir calorifique prouvé des coques de jatropha peut justifier une valeur du marché de 70 \$ É.-U./tonne.

Étapes de la conversion :

1. 1 421 kg coques/ha x 15 MJ/kg = 21 315 MJ = 21,31 GJ
2. 21,31 GJ/6,1 bep/GJ = 3,49 bep
3. 3,69 bep x [50] \$ É.-U./ bep = 174,50
4. 174,50 \$ É.-U. - [40] % coût de traitement = 104,70 \$ É.-U.

3.4.5.7 Enveloppe des graines

Les enveloppes des graines de jatropha ont un pouvoir calorifique encore plus élevé (19,5 MJ/kg) et une plus grande masse volumique apparente qui les rend plus précieuses que les coques de fruits comme carburant combustible. Les enveloppes contiennent 45 à 47 % de lignine et leur pouvoir calorifique est comparable à du bois combustible (*Prosopis juliflora*). La composition chimique des enveloppes de jatropha laisse entendre qu'il s'agit d'une bonne matière première pour la conversion en énergie. Plusieurs technologies de conversion ont été étudiées avec les enveloppes de graines de jatropha comme matière première énergétique. Ces technologies comprennent le briquetage et la combustion directe, la pyrolyse et la fermentation méthanique. La combustion des enveloppes de jatropha est possible sans traitement valable (par exemple le pastillage). Toutefois, le briquetage ou le pastillage donneront une réduction de volume et une autre augmentation de la densité énergétique. En outre, les cendres qui restent après la combustion des enveloppes est riche en sodium et en potassium, ce qui les rend utilisables pour l'enrichissement des sols et comme engrais.

Au lieu de la combustion directe ou de la fertilisation, les enveloppes et coques peuvent également être insérées dans un biodigester où les microbes fractionnent la biomasse lors d'un processus de digestion anaérobie. La matière biomasse décharge un gaz biométhane qui est capturé dans une micro turbine et utilisé pour générer de l'électricité dans un moteur à combustion.

En appliquant les mêmes hypothèses de base que dans l'exemple ci dessus, un volume échantillon de production de 2 131 kg de graines donnera 746 kg d'enveloppes. Si l'on multiplie cela par la teneur énergétique spécifique de 19,5 MJ/kg, on obtiendra 2,38 bep, ce qui représente une valeur potentielle de 119 \$ É.-U.. Étant donné que le traitement se fera sur le site de conversion des combustibles, cela facilitera la manutention et réduira les coûts connexes. Compte tenu de cet avantage comparatif par rapport aux coques, il pourrait donc être juste de soustraire une réduction pour la logistique de l'ordre de 30 % au lieu de 40 %. Toutes les autres conditions étant égales, la valeur commerciale des enveloppes de graines par ha peut donc être calculée avec 83 \$ É.-U., ce qui équivaut à 111 \$ É.-U./tonne.

3.4.5.8 Matrice de rendement (à l'hectare)

Pour illustrer le potentiel de création de valeur par hectare en plus de la commercialisation de l'huile brute de jatropha elle même, la matrice de rendement ci après, dans le **tableau 8**, précise certains scénarios de référence en ce qui concerne la densité de semis et la performance de rendement. Tenant compte des conditions locales au Burkina Faso, toutes les variations suivent un modèle de culture intercalaire. Le choix particulier des espèces de plantes cultivées en intercalaires déterminera les espacements requis entre les plans individuels et les rangées de plants. Les possibilités réalistes d'espacement plant/rangée incluent 4 m x 2 m, 5 m x 3 m et 4,50 m x 2,50 m. En conséquence, les hypothèses de base pour la densité des semis par hectare varient entre 660 et 1 250 plants. Pour mieux tenir compte de l'impact de la densité de semis sur la performance globale par hectare, les données sur le rendement des grains sont ventilées en production par plant. Cela facilitera également une meilleure comparaison entre les divers modèles de culture intercalaire. On pose comme hypothèse que les performances de production des plants individuels se situent dans la gamme de 1,6 kg de grains par plant (pour les accessions de jatropha nationales) à 3,2 kg de grains par plant (pour les accessions de jatropha hybride non toxiques de première génération). Tout autre impact sur la performance de rendement par l'utilisation d'engrais ou l'irrigation ne sera pas pris en compte.

TABLEAU 8
Scénarios et composition
de la valeur des cultures
intermédiaires

Scénarios culture intercalaire	Rendement grainier par plant												
	1,6 kg				2,4 kg				3,2 kg				
	Performance de production totale par ha (en kg)												
A 660 plantes/ha	Coques / ha	Graines/ha				Coques / ha	Graines/ha				Coques / ha	Graines/ha	
		1 056					1 584					2 112	
		Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)				Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)				Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)
		370	686				554	1.030				739	1,373
			Tourteau de noyau (54 %)	Huile (46 %)				Tourteau de noyau (54 %)	Huile (46 %)				Tourteau de noyau (54 %)
	704	370	370	315	1,056	554	556	474	1,408	739	741	632	
	Prix/tonne (\$)	70	111	150-200	NN	70	111	150-200	NN	70	111	150-200	NN
	Valeur/ha (\$)	49	41	56-74	NN	74	61	84-111	NN	99	82	111-148	NN
B 888 plantes/ha	Coques / ha	Graines/ha				Coques / ha	Graines/ha				Coques / ha	Graines/ha	
		1 421					2 131					2 841	
		Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)				Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)				Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)
		497	924				746	1,385				994	1,847
			Tourteau de noyau (54 %)	Huile (46 %)				Tourteau de noyau (54 %)	Huile (46 %)				Tourteau de noyau (54 %)
	947	497	499	425	1,421	746	748	637	1,894	994	997	850	
	Prix/tonne (\$)	70	111	150-200	NN	70	111	150-200	NN	70	111	150-200	NN
	Valeur/ha (\$)	66	55	75-100	NN	99	83	112-150	NN	133	110	150-199	NN
C 1 250 plantes/ha	Coques / ha	Graines/ha				Coques / ha	Graines/ha				Coques / ha	Graines/ha	
		2 000					3 000					4 000	
		Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)				Envelo ppes (35 %)	Noyaux (65 %)				Envelo ppes (35 %)	Noyau (65 %)
		700	1,300				1.050	1,950				1.400	2,600
			Tourteau de noyau (54 %)	Huile (46 %)				Tourteau de noyau (54 %)	Huile (46 %)				Tourteau de noyau (54 %)
	1,333	700	702	598	2 000	1 050	1 053	897	2 667	1 400	1 404	1 196	
	Prix/tonne (\$)	70	111	150-200	NN	70	111	150-200	NN	70	111	150-200	NN
	Valeur/ha (\$)	93	78	105-140	NN	140	117	158-211	NN	187	155	211-281	NN

3.4.5.9 Sélection & domestication

En dépit de l'attention portée au jatropha comme source d'huile renouvelable pour la production de biocarburants durables et abordables, le jatropha doit jusqu'ici être considéré comme une espèce sauvage non domestiquée qui n'a pas encore bénéficié de programmes d'amélioration des cultures. Même si des questions essentielles concernant la croissance de la culture du jatropha, la gestion des cultures et la production n'ont pas encore été traitées de manière adéquate, des accessions sauvages du jatropha ont été utilisées pour établir de grandes plantations, qui ne sont souvent pas bien adaptées aux environnements locaux et aux systèmes de production locaux. La mal adaptation des accessions de jatropha à la nouvelle utilisation a souvent mené à des rendements en grains et en huile par hectare inadéquats.

Le défi consiste à mettre au point des variétés de jatropha bien adaptées, robustes et à rendement élevé pour une diversité de climats et d'agrosystèmes, car seuls les rendements élevés en grains et en huile par hectare garantiront la rentabilité et une forte réduction des émissions de GES. Le principal obstacle du passage du jatropha d'une espèce sauvage à une culture au biodiesel profitable est la faible variation génétique et phénotypique que l'on trouve dans diverses régions du monde, ce qui gêne la sélection efficace des plantes pour les caractéristiques de productivité.

Étant donné le faible niveau de domestication du jatropha, la génomique offre de nombreuses technologies pour la collecte des informations génétiques qui pourraient être potentiellement intégrées dans la sélection du jatropha pour aider le développement de cultivars avec des performances excellentes basées sur les données génétiques uniquement.

Toutefois, de vastes variations génétiques sont exigées lors de la sélection à la recherche de grands caractères agronomiquement importants comme le rendement en grains et en huile, la composition des grains et de l'huile, le comportement en floraison, la morphologie des arbres, la résistance aux maladies et l'absence de facteurs antinutritionnels qui actuellement empêchent l'utilisation des tourteaux de jatropha pour l'alimentation animale. Pour les programmes de sélection des plantes, il faut que ces variations génétiques soient en mesure de combiner des caractères positifs diverses plantes parentales pour offrir les variétés de jatropha profitables et durables requises pour l'avenir.

Afin d'augmenter et de stabiliser les performances du rendement en huile, il est donc suggéré que les nouvelles variations génétiques soient identifiées et utilisées dans les programmes de sélection du jatropha. Les cultures vivrières ont été améliorées de cette façon pendant des siècles. Les résultats scientifiques indiquent qu'en dehors de l'Amérique centrale, il n'y a pas de biodiversité génétique importante dans le jatropha curcas. En comparaison des accessions trouvées en Afrique, le bassin des accessions d'Amérique centrale montre une très grande diversité moléculaire qui a été évaluée par la variation des marqueurs ADN. Il en résulte que l'Amérique centrale est une source importante de nouvelles variations génétiques de jatropha qui se révéleront utiles pour élargir le bassin de plasma germinal disponible pour les programmes de sélection du jatropha. Non seulement les accessions diffèrent-elles dans leur constitution génétique, mais elles montrent également une grande disparité des caractères phénotypiques comme le type de floraison, l'architecture de l'arbre, la concentration en huile et la composition des acides gras. Par exemple, la teneur moyenne en huile varie entre 19 et 40 % de la graine entière (le noyau de la graine et la coque de la graine). Selon la provenance, le poids de la graine de jatropha varie de 0,48 g (Rwanda) à 0,57 g (Burkina Faso) et à 0,76 g (Guatemala, Mexique). Les accessions d'Amérique centrale montrent également des taux de croissance nettement plus élevés tout au début, ce qui donne une plus grande surface foliaire totale, poids sec supérieur et des hauteurs de plantes supérieures. Ces caractères qui conduisent à des plantes plus grandes et plus fortes sont importants pour la survie des plantes lors des premières étapes dans le champ après la transplantation, en particulier dans des conditions sèches et arides (faible précipitation < 1 000 mm/an), et pour bénéficier des brèves périodes de précipitations. Une croissance rapide, précoce, est très avantageuse, car c'est l'un des facteurs qui influence positivement le rendement en grains et en huile lors de la première année de fonctionnement. Les accessions d'Amérique centrale devraient donc être considérées comme la plus importante source pour l'amélioration des plantes.

3.4.5.10 Propagation de la culture des tissus

La culture du jatropha ne sera commercialement viable que lorsque des plants de la meilleure qualité provenant de clones ou de variétés sélectionnées seront utilisés et mis à la disposition des agriculteurs en grande quantité dans un bref délai. L'offre de plants d'excellence à grande échelle exige une production massive de cultivars phénotypiquement homogènes qui sont adaptés aux conditions de croissance des zones de plantations sélectionnées. Cela met l'accent sur les pépinières et les centres des sélections dédiés. Traditionnellement, la multiplication des plants se fait généralement en semant des graines ou en plantant des boutures directement dans le champ ou après une première période de croissance dans des pépinières. Toutefois, cette méthode exige du temps et entraîne un désavantage, à savoir produire des plants hétérogènes avec des rendements en grains irréguliers. En comparaison, les techniques de régénération et de micropropagation in vitro peuvent offrir un outil puissant pour la multiplication massive d'hybrides uniformes à rendement élevé. La propagation massive par clonage au moyen de techniques de génie génétique a l'avantage de reproduire des plantes

d'excellence qui sont morphologiquement homogènes, avec une capacité de production élevée et une trajectoire de rendement identique. En plus des techniques de culture de tissus in vitro pour une accumulation rapide de grandes quantités de plantes, l'application complémentaire de régulateurs de croissance des plantes peut convenir pour induire une floraison uniforme, et ainsi faciliter la synchronisation du mûrissement et de la récolte, condition préalable à une augmentation de la production commerciale. Toutefois, les régulateurs de croissance des plantes et le clonage végétal ont un prix. La propagation par culture de tissus des plants d'excellence à grande échelle exigera la mise en place d'un laboratoire de grande technicité. Ces coûts supplémentaires de mise en place d'un laboratoire de culture de tissus doivent être soigneusement compensés par les biens en rendement attendus et les retombées économiques connexes.

3.4.5.11 Irrigation au moyen d'eaux usées épurées

Au Burkina Faso l'eau est une ressource rare et conditionne toutes les activités agricoles. Afin d'optimiser la disponibilité de l'eau et les demandes connexes d'utilisation des terres, les changements et les faits nouveaux à envisager comprennent l'irrigation potentielle de sites de culture du jatropha avec des eaux usées. Au lieu d'intensifier la pression sur les ressources en eau, ce qui conduit à des conflits entre les utilisateurs et à une pression excessive sur la terre et l'environnement, les effluents d'eau usée, après prétraitement, offrent une source alternative d'eau riche en éléments nutritifs pour l'agriculture tolérante à la salinité au voisinage des villes. Les eaux usées épurées contiennent des quantités relativement importantes d'éléments nutritifs qui sont potentiellement disponibles pour la production de plantes, alors que, tout en même temps, les éléments nutritifs seront extraits des effluents, augmentant ainsi la qualité de l'eau résiduelle. L'alimentation en eau provenant d'usines de traitement des eaux usées à Ouagadougou pourrait théoriquement permettre la production de jatropha à l'échelle commerciale ou au moins le fonctionnement efficace de pépinières. L'utilisation de sources d'eau non conventionnelles, comme les eaux usées épurées, représentent une alternative potentielle à l'irrigation, car les eaux usées épurées contiennent des quantités considérables d'éléments nutritifs (N-P-K).

3.4.6 PROCÉDÉS DE CONVERSION DES COMBUSTIBLES

Le carburant alternatif fabriqué à partir de jatropha comme matière première devra répondre à des spécifications de fabrication strictes. Étant donné les exigences en matière de production de carburant d'aviation, les options disponibles pour la transformation de l'huile brute de jatropha non comestible en carburant alternatif, qui répond à toutes les spécifications critiques, sont limitées.

3.4.6.1 Procédé HEFA

Le procédé HEFA est la filière de réaction oléochimique la plus réaliste, qui a atteint la maturité commerciale (voir Section 3.3.2.2 pour une description plus détaillée).

La technologie HEFA est basée sur l'hydrotraitement d'huile et de graisse naturelle (généralement un mélange de triglycérides). Afin

de transformer les biocarburants en carburants de remplacement “interchangeables” qui sont pleinement compatibles avec l’infrastructure existante de carburants et les moteurs d’aéronef, leurs alcools, lipides et molécules doivent être transformés en vrais hydrocarbures par une série complexe de procédés collectivement désignés par “hydrotraitement”. Ces manipulations chimiques augmentent le taux d’hydrogène par rapport au carbone, extrait tout l’oxygène et change la structure et le mélange des molécules constituantes pour donner au carburant ses caractéristiques nécessaires. La biomasse et les huiles végétales qui peuvent être hydrotraitées ne se limitent pas à l’huile brute de jatropha mais incluent également les graisses animales (suif), l’huile de coton, les huiles de cuisson usagées, le baume de cajou ou les coques de karité.

L’hydrogénation offre une alternative écoénergétique pour la production de biocarburants synthétiques. L’hydrogénation extrait l’oxygène et les autres impuretés des matières premières ayant un contenu élevé en huile, comme le jatropha et produit des carburants d’aviation renouvelables hydrotraités (HRJ). Les carburants obtenus sont des combustibles hydrocarbonés purs et ont des propriétés physiques qu’il est impossible de distinguer de celles des carburants à base fossile. Les carburants HRJ tendent à avoir de meilleures performances de combustion et une teneur énergétique plus élevée et, beaucoup plus important, ont une bonne stabilité à basse température, ce qui les rend idéaux comme source renouvelable de SAF.

Actuellement, la majorité des SAF sont obtenus à partir de matières premières oléochimiques et utilisent la filière HEFA. Cette filière restera vraisemblablement le principal procédé de conversion au cours des 10 prochaines années, alors que d’autres technologies de biocarburant ne sont pas encore arrivées à maturité.

L’un des principaux avantages de la filière HEFA est qu’il est possible d’intégrer ce procédé dans une raffinerie de pétrole, en évitant la nécessité créer une installation de production dédiée. Malheureusement, cette option n’existe pas au Burkina Faso.

Indépendamment du potentiel important d’alimentation en matières premières, une usine de traitement HEFA autonome reste peu réaliste pour l’instant. L’absence de capacité de raffinage contrariera inévitablement tous les efforts. Sans même une infrastructure pétrochimique ou de raffinage de base, il y a peu de chance de réaliser des économies par la coimplantation, le cotraitement ou l’utilisation d’une infrastructure existante. Ainsi, une usine HEFA n’est ni techniquement faisable ni commercialement viable, que ce soit au Burkina Faso ou ailleurs en Afrique sub saharienne. Les coûts estimatifs élevés en termes de capitaux et de traitement, et en particulier la nécessité d’hydrogènes coûteux, rendent la filière HEFA peu compétitive.

3.4.6.2 Biodiesel EMAG

À moins que l’huile brute de jatropha produite à l’échelon national soit expédiée outre mer et valorisée par transformation en SAF dans des installations existantes en Europe, la matière première est plus susceptible d’être convertie en biodiesel conventionnel, chimiquement connu sous l’appellation EMAG. Le biodiesel EMAG est notablement distinct du carburant d’aviation

HEFA ; car il retient un ester d’oxygène, le biodiesel EMAG est trop oxygéné pour être utilisé comme SAF interchangeable. Alors que le biodiesel ne peut remplacer le carburéacteur, il peut néanmoins être utilisé par n’importe quelle flotte aéroportuaire à moteur diesel, comme les tracteurs d’aéronef, les autobus et les véhicules de lutte contre l’incendie.



PHOTO 15

Aire de trafic à l’aéroport de Ouagadougou

La flotte de véhicules à moteur diesel du service d’escale est gérée par la Régie administrative chargée de la gestion de l’assistance en escale (RACGAE). Les besoins de consommation mensuels limités pourraient facilement être satisfaits par des carburants alternatifs produits nationalement pour le transport, comme le biodiesel obtenu de graisses animales ou de jatropha.

Selon les données de consommation de carburant fournies par la Régie administrative chargée de la gestion de l’assistance en escale (RACGAE), la flotte de camions et de remorques du matériel de servitude à moteur diesel (y compris les camions ravitailleurs, les remorqueurs de refoulement, les tracteurs, les chargeurs à tapis circulant, les transporteurs, les passerelles d’embarquement) consomme en moyenne 5 000 litres/mois. En supposant une densité spécifique de 885 kg/m³, cela équivaut à 4,4 tonnes/mois ou juste 53 tonnes/années. Tous les fabricants de moteurs de camions ont confirmé que leurs moteurs fonctionnent en toute conformité avec du biodiesel jusqu’à un mélange de 100 % (B100).

La conversion de l’huile brute de jatropha en biodiesel exige le raffinage. En général, la matière première et le méthanol sont combinés dans un réacteur en présence d’un catalyseur (habituellement de l’hydroxyde de potassium ou de sodium) pour former de l’ester méthylique (biodiesel) et de la glycérine (coproduit). Le processus de raffinage transforme les triglycérides (huiles et graisses) en esters, en en séparant la glycérine. La glycérine se dépose au fond et le biodiesel flotte par-dessus et peut être siphonné. Ce procédé, qui remplace la glycérine par de

l'alcool dans une réaction chimique, s'appelle également la transestérification. Ainsi, le biodiesel est formé à partir de triglycérides par transestérification avec des alcools à courte chaîne. La **figure 28** illustre le procédé de raffinage dans une usine de biodiesel à multiples matières premières.

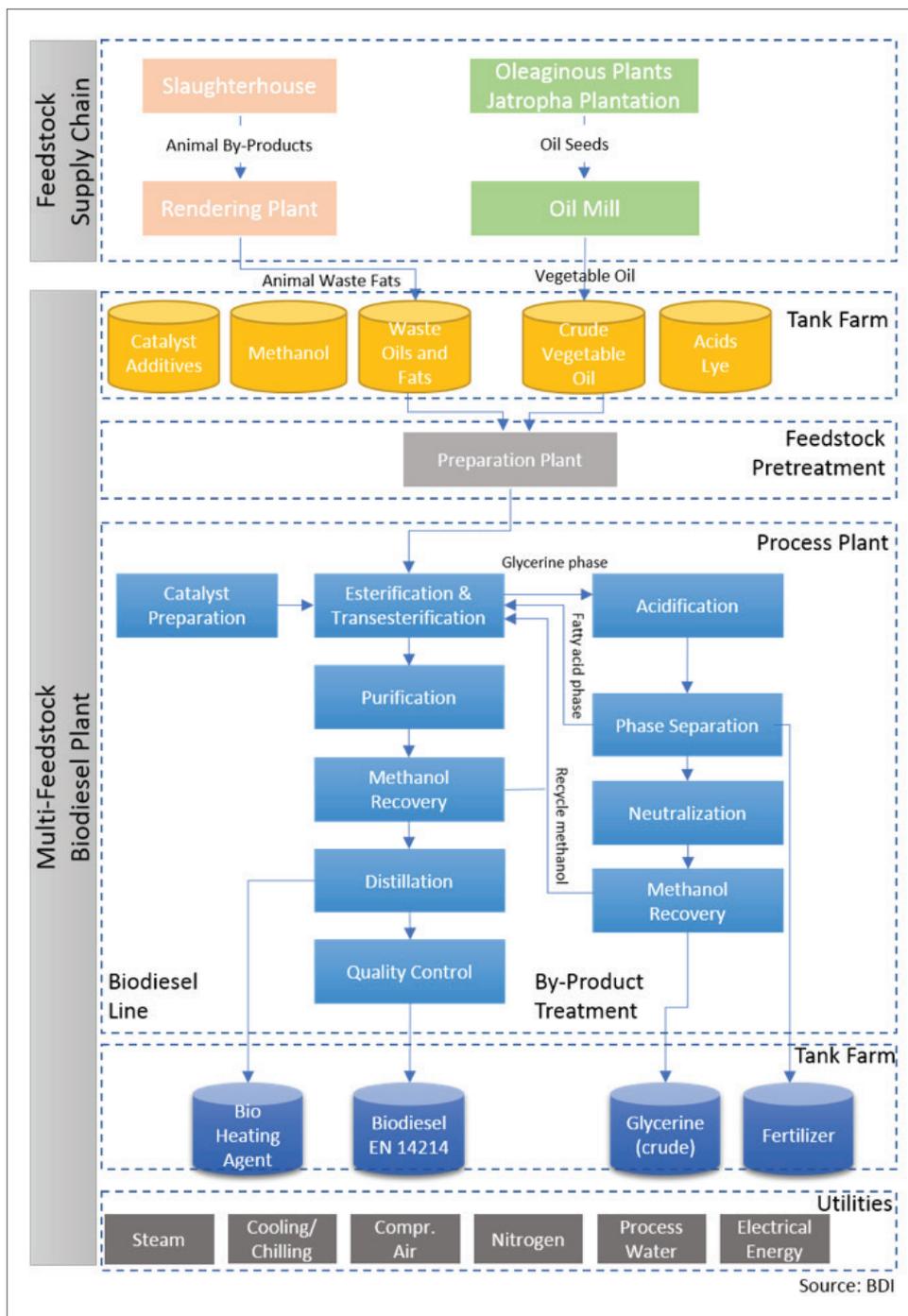


FIGURE 28
Usine de fabrication de biodiesel à partir de multiples matières premières (schéma)

Le biodiesel émet nettement moins de gaz à effet de serre, en particulier l'oxyde d'azote, le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre, que le carburant diesel traditionnel à base d'huile minérale. Le biodiesel à base de jatropha émet environ deux tiers de moins d'hydrocarbure non brûlé et presque moitié moins de monoxyde de carbone et de matières particulaires que le gazole conventionnel. En particulier :

- il réduit les émissions de dioxyde de carbone de 80 % ;
- il réduit les émissions de monoxyde de carbone de 50 % ;
- il réduit les émissions d'hydrocarbure aromatique de 50 % à 70 % ;
- il ne contient presque pas de soufre ;
- il est biodégradable et non toxique.

3.4.6.3 Huile végétale pure (HVP)

Autrement, de l'huile brute de jatropha, filtrée et purifiée peut également être utilisée directement sans avoir été transformée en huile végétale pure (HVP ou B100), dans des usines de microgénération de chaleur et d'énergie et divers types de moteurs à combustion dans les secteurs de la marine, de la construction et de l'agriculture. Dans ce cas, il n'est pratiquement pas nécessaire de modifier les moteurs ou l'infrastructure.

3.4.7 MATRICE DE FAISABILITÉ

Jatropha							
Feedstock Availability	Technology Readiness						
<p>Qualities </p> <ul style="list-style-type: none"> • Proven feedstock suitability • Proven fuel quality and combustion properties • Cultivation on marginal land • High tolerance to drought • Climate compatibility • Intercropping benefits • Proven sustainability record, especially in case of by-product commercialization • No competition with food crops 	<p>T1: Biomass processing</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limited infrastructure in place • Basic milling/ expelling/ extraction facilities in place 						
<p>Constraints/ challenges </p> <ul style="list-style-type: none"> • Low yield • Non-domesticated plant • Further R&D and breeding required • Market inefficiencies • Competing interests • Main source of vegetable oils in BF 	<p>T2: Fuel Conversion pathway(s)</p> <p>A) Green Diesel/ AAF</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hydroprocessing of lipid feedstocks (HEFA/ HVO) • Conversion technology has reached commercial stage production <p>B) Catalytic Cracking</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potential modular set up, mini refinery solution <p>C) Biodiesel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alternatively, fatty acid methyl ester (FAME) biodiesel production feasible • Transesterification 						
<p>Risk mitigation options</p> <ul style="list-style-type: none"> • Seed selection and production • Breeding and domestication • Reforestation (REDD+) • Intercropping (Food + Fuel) • Agronomic trials 	<p>Technological complexity</p> <table border="1"> <tr> <td>A) Green Diesel/ AAF</td> <td>• High</td> </tr> <tr> <td>B) Catalytic Cracking</td> <td>• Moderate</td> </tr> <tr> <td>C) Biodiesel</td> <td>• Low</td> </tr> </table>	A) Green Diesel/ AAF	• High	B) Catalytic Cracking	• Moderate	C) Biodiesel	• Low
A) Green Diesel/ AAF	• High						
B) Catalytic Cracking	• Moderate						
C) Biodiesel	• Low						
<p>Future biomass potential </p> <ul style="list-style-type: none"> • High to very high   	<p>Economic viability</p> <table border="1"> <tr> <td>A) Green Diesel/</td> <td>• Low</td> </tr> <tr> <td>B) Catalytic Cracking</td> <td>• Moderate</td> </tr> <tr> <td>C) Biodiesel</td> <td>• High</td> </tr> </table>	A) Green Diesel/	• Low	B) Catalytic Cracking	• Moderate	C) Biodiesel	• High
A) Green Diesel/	• Low						
B) Catalytic Cracking	• Moderate						
C) Biodiesel	• High						
	<p>A) Green Diesel/ AAF potential</p> <table border="1"> <tr> <td>In general</td> <td>Moderate/ High</td> <td></td> </tr> <tr> <td>In Burkina Faso</td> <td>Low to Moderate</td> <td> </td> </tr> </table>	In general	Moderate/ High		In Burkina Faso	Low to Moderate	 
In general	Moderate/ High						
In Burkina Faso	Low to Moderate	 					
	<p>B) Biodiesel potential</p> <table border="1"> <tr> <td>In general</td> <td>Moderate to high</td> <td></td> </tr> <tr> <td>In Burkina Faso</td> <td>Moderate to high</td> <td></td> </tr> </table>	In general	Moderate to high		In Burkina Faso	Moderate to high	
In general	Moderate to high						
In Burkina Faso	Moderate to high						

3.5 AUTRES MATIÈRES PREMIÈRES OLÉAGINEUSES (OLÉAGINEUX)

3.5.1 HUILE DE COTON

3.5.1.1 Qualification de la matière première

Le Burkina Faso est le plus grand producteur de coton en Afrique. Le coton est d'ailleurs la culture commerciale la plus importante du Burkina Faso et sa production augmente constamment. La production de cette plante représente environ 4 % du PIB du pays et constitue sa plus grande source de revenus après l'or. En 2016, la valeur commerciale des exportations de coton se chiffrait à 420 millions \$ É.-U., représentant environ 20 % de toutes les exportations. Le coton est principalement cultivé pour répondre aux besoins de base quant à la fabrication de tissus en coton, et environ 4 millions de personnes dépendent de la culture du coton comme source de revenus. Toutefois, cette plante ne fournit pas seulement la fibre de coton, utilisée pour la fabrication du textile, mais aussi un sous-produit, soit les graines de coton. Cette plante peut être utilisée de diverses façons : la fibre pour le textile, l'huile de coton comme ingrédient alimentaire et le tourteau et les enveloppes produites en broyant les graines comme moulée pour le bétail et la volaille. Le coton est donc à la fois une fibre et une culture vivrière.

Depuis juin 2017, une tonne de graines de coton est évaluée à 138 \$ É.-U. (FCFA 80 000) et un litre d'huile de coton rapporte 1 \$ É.-U. (FCFA 560). Les graines de coton sont donc un sous-produit précieux puisqu'elles contribuent à la rentabilité globale de la chaîne de production. Une récolte de 100 kg de graines de coton produit de 30 à 45 kg de fibres (ce qui représente environ 85 % de la valeur commerciale de la récolte) et de 55 à 70 kg de graines de coton, lesquelles contiennent de 9 à 12 kg d'huile végétale pure.

La production du coton au Burkina Faso a connu une grande croissance, passant de 200 000 tonnes au début des années 1990 à 895 000 tonnes en 2014. Le pays a produit 683 000 tonnes de graines et 230 000 tonnes de fibres lors de la récolte de 2016-2017. La récolte de 2017-2018 devrait atteindre les 800 000 tonnes à nouveau.

La monoculture du coton s'étend sur 800 000 hectares, principalement dans quatre zones cotonnières, et est pratiquée



FIGURE 29

Principales zones de production de coton

par de nombreux fermiers issus de plus de 8 500 groupements des producteurs de coton (GPC), qui reçoivent l'appui de trois sociétés de coton. Les principales zones de production sont : Kéné Dougou (Hauts-Bassins), Mouhoun (Boucle du Mouhoun), Tuy (Hauts Bassins) et Houet (Hauts-Bassins) (voir figure 29).

La plus grande société de coton, essentiellement publique, est SOFITEX. Elle contrôle plus de 80 % de la production de coton totale du Burkina Faso. Tandis que SOFITEX est responsable de la récolte et de l'égrenage du coton, la plus importante société de transformation de graines est SN-CITEC.

Bien que la plupart des petites et moyennes installations de transformation de graines de coton et huileries à proximité des ateliers d'égrenage utilisent des technologies d'extraction par pression traditionnelles, la SN-CITEC a recours à des technologies plus avancées à base de solvant. L'extraction par solvant permet de récupérer jusqu'à 96 % de l'huile contenue dans les graines de coton. Il s'agit d'un procédé commercial largement utilisé dans le monde pour récupérer l'huile des graines de coton. Actuellement, le n-hexane est le solvant de choix en raison de son efficacité d'extraction et de sa grande disponibilité, mais ce dernier a été classé comme polluant atmosphérique dangereux par la US EPA et figure sur la liste des produits chimiques toxiques.

Étant donné les propriétés et les caractéristiques de combustion particulières du carburant, les esters méthyliques obtenus à partir de l'huile de coton pourraient potentiellement être considérés comme un bon carburant de substitution et une source d'huile possible pour la production de biodiesel (EMAG). Toutefois, l'huile de coton constitue la principale source d'huile végétale au pays.

Comme elles offrent une teneur en huile allant de 14 à 26 %, les graines de coton sont principalement utilisées pour la production d'huile alimentaire. Originellement considérée comme étant un sous-produit inutilisable, l'huile de coton est consommée en tant qu'huile végétale et ingrédient alimentaire au Burkina Faso depuis 1973.

La SN CITEC, la plus grande et la plus ancienne huileuse du pays, a une capacité de production maximale de 15 000 à 20 000 tonnes d'huile de coton par année. Actuellement, la société exploite temporairement une usine de production de biodiesel pilote avec une capacité de 12 000 tonnes où sont transformées les graines de coton impropres à la consommation humaine. Selon le taux de conversion de 5,9 et la teneur en matière grasse de 17 % des graines de coton burkinabè, une tonne de ces graines procure environ 170 kg d'huile végétale pure et 830 kg de tourteau.

Bien que la récolte de graines de 2016-2017 de 683 000 tonnes se soit traduite par un volume de production d'huile potentiel de 116 000 tonnes, les huileuses du Burkina Faso produisent en moyenne seulement 35 000 tonnes d'huile alimentaire par année. De plus, même si la totalité de la production est commercialisée à l'échelle locale, le pays ne parvient pas à satisfaire la demande actuelle en huile alimentaire. Le marché demande environ 75 000 tonnes d'huile végétale par année, ce qui signifie qu'il y a un manque de 40 000 tonnes, principalement comblé par l'importation d'huile de palme depuis la Malaisie et la Côte d'Ivoire. L'écart entre

l'approvisionnement national et la demande augmentera davantage puisque l'on s'attend à ce que la demande passe à 164 000 tonnes d'ici 2030. Les pays avoisinants, comme le Bénin, le Niger, le Togo et le Mali, seront confrontés à des contraintes alimentaires semblables.

3.5.1.2 Problématiques et contraintes

La production de biodiesel à partir de l'huile de coton entraînerait une pénurie d'huile alimentaire et ne devrait donc pas être encouragée. Malgré sa production d'huile relativement faible (c'est-à-dire, de 327 à 420 litres/hectare par année) et indépendamment des préoccupations d'ordre alimentaire, l'huile de coton continuera d'assumer un rôle stratégique en tant que principale source d'approvisionnement en huile végétale pour la consommation locale. En raison de la hausse prévue de la demande d'huile alimentaire au Burkina Faso et dans bien d'autres États ouest-africains, il est peu probable que d'autres cultures, par exemple le soja et le tournesol, puissent remplacer le coton afin que celui-ci soit utilisé comme source de bioénergie.

Par conséquent, des préoccupations justifiées quant à la durabilité empêcheront l'utilisation de l'huile de coton en tant que source énergétique pour les années à venir. Toute utilisation pour du biocarburant, techniquement ou commercialement faisable, devra donc être écartée.

3.5.1.3 Matrice de faisabilité

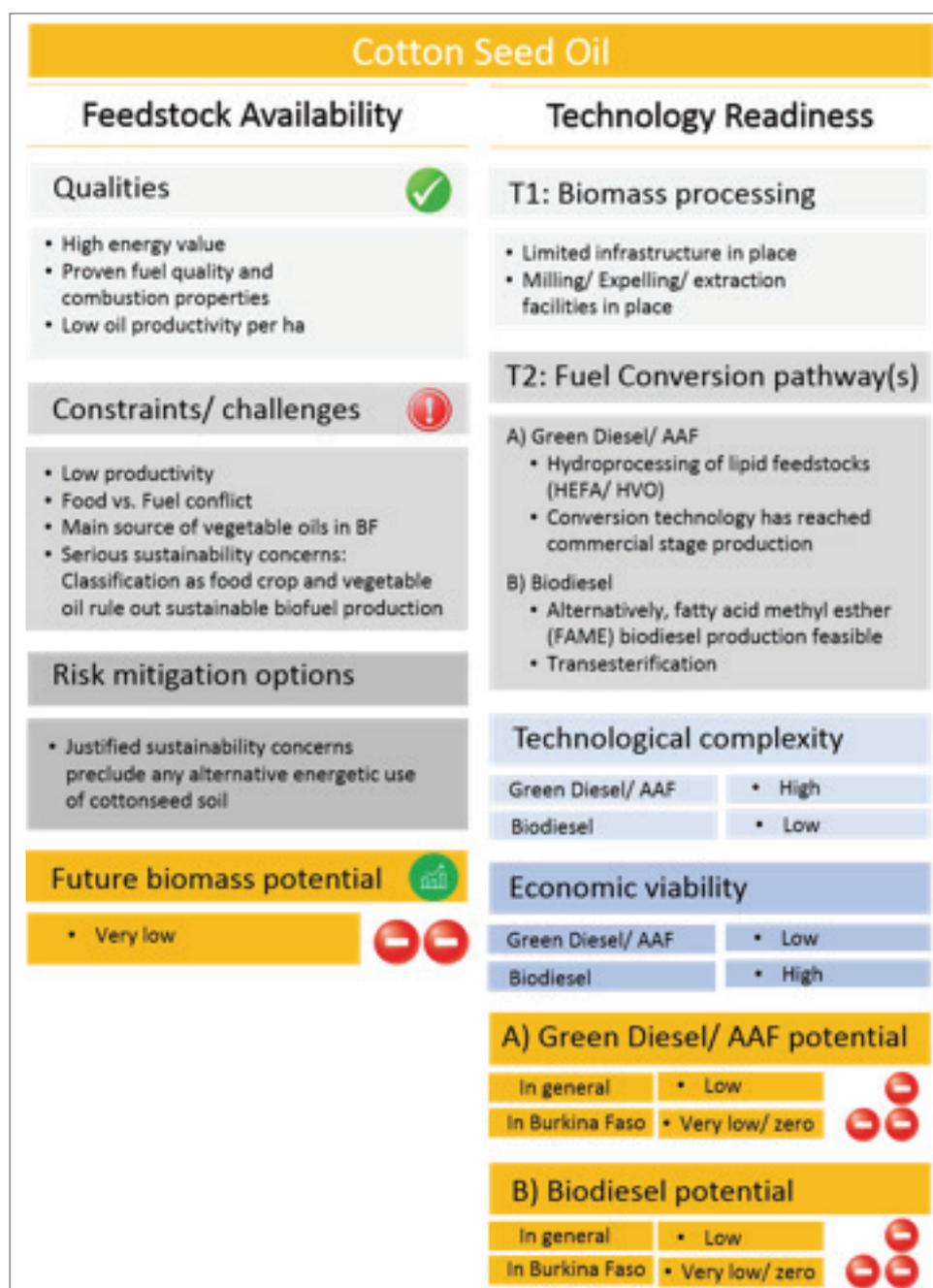




PHOTO 16

Installations de la SN CITEC à Bobo-Dioulasso

3.5.2 NOIX D'ANACARDE (CNSL)

3.5.2.1 Pertinence de la matière première

La noix d'anacarde représente actuellement le troisième produit d'exportation en importance du Burkina Faso, après le coton et le sésame. Bien que cela ne semble pas évident à déceler à première vue, la culture et la transformation des noix d'anacarde représentent un excellent exemple de la poursuite d'objectifs à la fois économiques, énergétiques, environnementaux et sociaux, particulièrement en ce qui a trait à l'optimisation de la production de nourriture et de carburant.

L'anacardier est un arbre tropical sempervirent à croissance rapide. Il s'agit d'une plante à usage multiple robuste et résistante à la sécheresse pouvant être cultivée dans diverses conditions climatiques tropicales.

En plus de la production de noix d'anacarde, l'anacardier est reconnu par la FAO comme étant un arbre de reboisement qui contribue aussi à la préservation de l'environnement et à l'amélioration de la fertilité des sols. Son réseau racinaire étendu lui permet de s'adapter à différents types de sol. Comme cet arbre a la capacité de restaurer les sols détériorés, de préserver la qualité de l'eau et de séquestrer le carbone (séquestration estimée à 0,33 tonne CO₂e/hectare), le développement de la culture de l'anacardier contribue directement à l'atténuation des changements climatiques, tout en offrant des sources de revenus pour les communautés rurales.

L'anacardier a été introduit au Burkina dans les années 1960 par le Centre Technique Forestier Tropical (CTFT). L'objectif premier visait à restaurer les sols dégradés dans la savane et à freiner la désertification. La culture de l'anacarde à grande échelle a été implantée par le Gouvernement seulement en 1980 (projet "Anacarde") dans le but d'améliorer la fertilité des sols et d'augmenter les revenus dans les régions rurales, particulièrement ceux des femmes. Ce n'est que dans les années 1990 que l'anacarde est devenu une culture commerciale aussi importante. À ce jour, l'industrie de l'anacarde revêt une importance économique significative pour le Burkina Faso. Ce fruit représente aujourd'hui le troisième produit d'exportation agricole en importance, après le coton et le sésame. En moins de 10 ans, la valeur commerciale sous-jacente des noix d'anacarde burkinabè exportées est passée de 1,5 million de \$ É.-U. à 120 millions \$ É.-U. en 2017.

Le produit principal de l'anacardier est sa graine (ou amande) recourbée. Ces graines comestibles offrent une importante valeur

nutritive, et leurs coques sont généralement considérées comme un déchet et souvent jetées. La composition de la noix d'anacarde brute est la suivante : environ 25 à 30 % de graines et 70 à 75 % de coque.

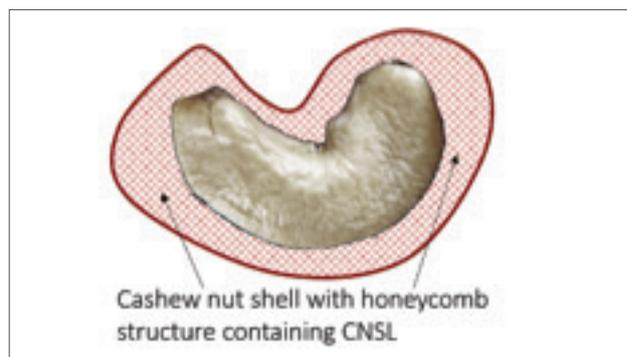


FIGURE 30

Noix d'anacarde dans sa coque

La coque de l'anacarde a une valeur calorifique nette de 19 à 22 MJ/kg, ce qui la place au milieu de l'amplitude des valeurs du pouvoir calorifique des biocombustibles (14 à 21 MJ/kg). Cette coque, d'une épaisseur allant jusqu'à 3 millimètres, contient un liquide brun rougeâtre foncé visqueux appelé baume de cajou ou CNSL, qui se trouve à l'intérieur d'une structure en nid d'abeille molle située entre la coque extérieure et le testa, une fine couche recouvrant l'amande. Le CNSL offre une qualité et un contenu calorifique similaires à ceux du mazout léger, avec un pouvoir calorifique moyen de 39 à 42 MJ/kg. Les principaux composés du CNSL sont l'acide anacardique, le cardanol et le cardol. Les propriétés physiques et chimiques du CNSL se situent dans une gamme acceptable lui permettant d'être admissible comme matière première pour la production de biocarburants. Structurellement, le CNSL diffère des autres huiles végétales en raison de la présence d'un anneau benzénique. Le ratio C:H:O habituel pour les huiles végétales est 78:12:10, tandis que le ratio comparable pour le CNSL est 80:12:08, ce qui pourrait expliquer son pouvoir calorifique relativement élevé. Le CNSL a une densité plus élevée que le diesel, qui peut être réduite par démulcination et transestérification. Pour ce qui est de la commercialisation du CNSL, les prix du marché en Chine se situent à environ 250 \$ É.-U./Mt livrées.

En plus de son amande et du CNSL, l'anacardier produit un autre sous-produit appelé la pomme de cajou. Ces pommes d'environ 10 cm de longueur ont un poids supérieur à la noix extérieurement attachée à leur base et représentent une grande quantité de biomasse, qui pourrait potentiellement aussi servir de matière première pour produire de l'énergie. Les pommes de cajou sont très périssables et sont habituellement laissées dans les vergers, et finissent par pourrir. On estime que de 12 à 14 kg de ces pommes pourraient donner un litre de bioéthanol.

Le CNSL converti en biodiesel propose une source novatrice de production d'énergie. Le rendement des mélanges de biodiesel à base de CNSL a été testé et validé avec succès dans des moteurs à allumage par compression. Ceci confirme la faisabilité de l'utilisation du CNSL comme source de biodiesel, et par conséquent, que des mélanges de CNSL pourraient servir de

solution de remplacement au pétrodiesel, sans devoir apporter de modifications majeures. Selon des tests réalisés en Inde qui utilisaient des mélanges de CNSL dans des moteurs à combustion par compression internes, le rendement optimal des moteurs diesel réguliers avec du CNSL suggère l'utilisation d'un mélange constitué selon un ratio 75 (diesel):25 (CNSL), avec un calage d'allumage et une pression d'injection optimisée de 19° av. PMH et de 22 MPa (220 bars) respectivement.

La quantité de matière première disponible pour une conversion en énergie dépend du volume de production annuel d'anacardes, du rapport massique typique entre la coque et le CNSL ainsi que du volume de noix réel transformé localement.

L'Afrique de l'Ouest s'inscrit parmi les zones de production d'anacardes les plus importantes au monde. En 2016, les États ouest-africains en ont généré une quantité estimée à 1,4 million de tonnes, c'est-à-dire environ 45 % de la production de noix d'anacarde mondiale. Au moins 70 % du volume de production annuel est constitué de coques d'anacarde, présentant une teneur énergétique approximative de 20 GJ par tonne. Ainsi, le potentiel approximatif de production d'énergie de substitution à partir de coques de noix d'anacarde en Afrique est estimé à 19,6 millions GJ, ou 3,3 millions bep. Toutefois, à peine 10 % du potentiel de récupération énergétique des coques d'anacarde est généré à l'échelle nationale, puisque la majeure partie de la production est envoyée en Asie sous forme brute, sans être transformée.

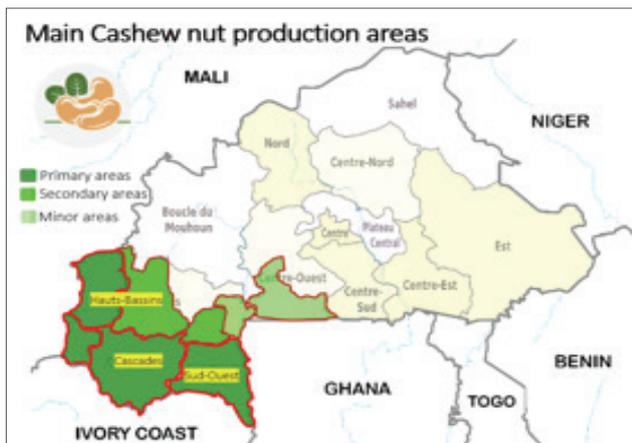


FIGURE 31

Principales zones de production de noix d'anacarde

En comparaison, les plantations d'anacardiers au Burkina Faso s'étendent sur 90 000 hectares, avec un volume de production estimé à 70 000 tonnes de noix d'anacarde brutes en 2017. Plus de 90 % des zones de production sont concentrées dans les régions des Cascades, du Sud-Ouest et des Hauts-Bassins (provinces de la Comoé, de Léraba, de Kéné Dougou, de Poni et de Nounbiel), situées dans le sud-ouest du pays (voir figure 31). Le secteur de la noix d'anacarde emploie plus de 50 000 fermiers, dont 80 % sont des femmes. La plupart des producteurs sont organisés en coopératives. La Wouol Farmers' Association, par exemple, est une organisation régionale qui comprend 69 coopératives de fermiers et plus de 2 500 fermiers, dont plus de 70 % sont des femmes. La Wouol est présente dans 20 communautés dans les régions de plantations limitrophes au Mali, à la Côte d'Ivoire et au Ghana.

Tenant compte du rapport graine-coque de 30:70 de la noix d'anacarde et de sa teneur en CNSL variant de 15 à 30 %, un volume de production de 50 000 de noix d'anacarde brutes devrait produire 35 000 tonnes de coques pour une puissance énergétique de 700 000 GJ, ou 120 000 bep. Si l'on assume une teneur en huile moyenne de 20 %, la quantité de CNSL pouvant théoriquement être récupérée des coques de noix d'anacarde équivaut à 7 000 tonnes, avec une valeur calorifique d'environ 290 000 GJ, ou 49 500 bep. Bien que cette matière première puisse sembler fort intéressante pour la production de biodiesel, seulement 15 % du volume de production total de noix d'anacarde brutes est transformé localement. Selon les rapports indiqués ci-dessus, cette réalité réduit la quantité de CNSL récupérée à un mince volume de 1 050 tonnes.

Certes la Wouol Farmers' Association traite 1 250 tonnes de noix d'anacarde brutes par année dans cinq installations, mais la plus grande société de transformation de l'anacarde au Burkina Faso est Anatrans, située à Bobo-Dioulasso. En 2016, Anatrans a transformé environ 6 000 tonnes de noix d'anacarde brutes, ce qui s'inscrit bien en deçà de la capacité installée de 10 000 tonnes. Toutefois, le volume traité fournit 840 tonnes de CNSL immédiatement accessible.

Anatrans est l'un des plus importants employeurs du pays. De ses 1 500 employés, 85 % sont des femmes. En outre, la société soutient directement plus de 4 000 fermiers organisés en 300 groupements de fermiers qui cultivent et récoltent les noix d'anacarde pour l'usine de transformation. En vue d'assurer un approvisionnement constant en noix d'anacarde brutes, Anatrans a établi un solide partenariat entre des coopératives de fermiers et ses installations de transformation. De plus, en fonction du rendement garanti, bon nombre de fermiers sont admissibles à des microcrédits.



PHOTOS 17 ET 18

Décorticage manuel de noix d'anacarde à l'usine Anatrans située à l'extérieur de Bobo-Dioulasso

ANATRANS, la plus grande usine de transformation d'anacardes au pays, emploie 1 300 femmes et soutient plus de 4 000 fermiers organisés en 300 regroupements de fermiers, qui cultivent et récoltent les noix d'anacarde pour l'usine de transformation à Banfora.

3.5.2.2 Problématiques et contraintes

Malgré ces initiatives réussies, les distorsions et les irrégularités du marché forcent le secteur de l'anacarde burkinabè à renoncer au potentiel énergétique de substitution inhérent de la noix. Le Burkina Faso ne peut donc pas tirer pleinement profit de la chaîne de valeur de la noix d'anacarde. Nonobstant du potentiel et des multiples avantages reconnus du secteur de la noix d'anacarde et en dépit des demandes réitérées concernant l'établissement d'une réglementation de base pour le marché, une importante proportion de la chaîne de valeur est graduellement relocalisée à l'étranger. Certains États étrangers financent activement leur propre industrie de transformation de la noix d'anacarde et mettent en place des mesures incitatives pour encourager à acheter tous les stocks disponibles. Sans égard aux coûts de transport et à la logistique, la stratégie sous-jacente concerne explicitement les noix d'anacarde non décortiquées provenant de l'étranger. La baisse des marges découle directement de la forte demande provenant des installations de transformation en Inde et au Vietnam. Les transformateurs indiens sont avantagés en raison du financement offert par leur Gouvernement, qui leur permet d'offrir des tarifs élevés pour s'approvisionner en noix d'anacarde depuis le Burkina Faso, contournant ainsi l'industrie de transformation locale. Ce phénomène entraîne un transfert de valeur ajoutée et d'emplois du Burkina Faso vers l'Inde. Par conséquent, de nombreuses occasions de revenus sont perdues aux mains des acheteurs et sociétés de transformation étrangères qui dominent le marché burkinabè, tandis que les entreprises de transformation locales ont de la difficulté à accéder à du financement et à poursuivre leurs activités. Le fait que des installations de transformation soient ainsi inutilisées limite inévitablement la possibilité d'exploiter le CNSL en tant que matière première pour la production de biocarburant de grande qualité.

3.5.2.3 Traitement de la biomasse et conversion des combustibles

Il existe plusieurs méthodes pour extraire le CNSL des coques de noix d'anacarde, notamment des procédés mécaniques, thermiques et à base de solvants. Le procédé mécanique nécessite seulement une presse à vis pouvant traiter de petites quantités, de manière efficace. Autrement, l'huile peut aussi être récupérée en chauffant les coques en absence d'oxygène. L'efficacité du processus d'extraction varie légèrement selon la méthode adoptée.

Une fois l'huile expulsée, les résidus, c'est-à-dire le tourteau de coques de noix d'anacarde déhuilées, pourrait être utilisés comme source d'énergie de substitution rentable pour approvisionner une centrale de production combinée de chaleur et d'électricité. Aussi connue sous le nom de centrale mixte électrocalogène, ce type de centrale a recours à des procédés industriels dans lesquels la chaleur perdue découlant de la production d'électricité est récupérée pour servir d'énergie de procédé au sein des installations de production de carburant renouvelable. Non seulement la centrale mixte produit suffisamment d'électricité pour mener toutes les activités des installations (par exemple fonctionnement des machines d'extraction et des décortiqueuses), mais pourrait aussi fournir la vapeur nécessaire pour réaliser diverses étapes du processus industriel. Dans ce cas-ci, la vapeur générée par la chaudière pourrait ramollir les graines et fournir une excellente

source de chaleur pour la phase de séchage des noix.

Les propriétés physiques et chimiques du CNSL encouragent l'utilisation de cette source d'énergie de substitution comme biocarburant. Sa structure chimique particulière devrait assurer une combustion complète et réduire la formation d'hydrocarbures, de monoxyde de carbone et d'oxydes sulfuriques polluants durant la combustion. Selon l'usage ultime prévu, il est possible que le CNSL et particulièrement le cardanol décarboxylé ne requièrent aucun autre procédé de conversion. Les principales propriétés du cardanol sont très semblables à celles du diesel et des biocarburants transestérifiés. L'anneau benzénique et l'absence de triglycérides pourraient potentiellement éliminer le besoin de recourir à des processus de transestérification coûteux. Bien que ce carburant ne remplisse pas à ce jour les normes sur le carburant d'aviation, les mélanges de biodiesel à base de CNSL pourraient répondre ponctuellement aux exigences pour alimenter le parc de véhicules terrestres à l'aéroport d'Ouagadougou ainsi que les autobus publics. Le potentiel d'une manière première nationale peu coûteuse et immédiatement accessible mérite certainement une analyse plus approfondie.

3.5.3 NOIX DE KARITÉ (KARITÉ)

La noix de karité occupe la quatrième place sur la liste des revenus d'exportation découlant de produits agricoles, après le coton, le sésame et la noix d'anacarde. Le karité (*Vitellaria paradoxa*, ou *Butyrospermum parkii*) est un arbre indigène du Burkina Faso, et aussi une plante alimentaire traditionnelle, qui croit sur des terres marginales. La noix de karité est le fruit de cet arbre qui pousse dans la savane boisée et qui peut atteindre une hauteur de 20 mètres et produire des noix pendant 200 ans. Sa capacité de production maximale est atteinte uniquement à l'âge de 45 à 50 ans. Le karité est présent sur l'ensemble du territoire du Burkina Faso. La surface de culture totale s'étend sur 65 000 km², soit 28 % de la superficie du pays. On le retrouve principalement dans le sud-ouest du pays et dans la région du Plateau-Central dans les provinces de Ganzourgou, de Kourwéogo et d'Ouhimbira.



PHOTO 19
Noix de karité

La noix de karité est composée d'une mince pulpe nutritive qui enveloppe une assez grosse graine riche en huile. Ces noix sont broyées manuellement pour en extraire le beurre de karité biologique utilisé dans les produits cosmétiques et de soins de la peau. Le beurre et l'huile de karité sont reconnus pour leurs

propriétés antioxydantes, anti inflammatoires, hydratantes et cicatrisantes. De plus, le karité constitue une riche source d'acides gras essentiels, d'antioxydants et de vitamines A et E. La production annuelle de noix se situe entre 450 000 et 600 000 tonnes. Le Burkina Faso est le deuxième plus important producteur de karité au monde après le Nigeria. En comparaison, le volume total des récoltes de noix de karité excède celui des noix d'anacarde selon un rapport de 10:12.

Le beurre de karité est l'un des plus importants produits d'exportation agricoles, l'Union européenne étant le plus grand marché d'exportation. On estime que le secteur offre des occasions d'emploi importantes pour jusqu'à 3 millions de femmes dans les régions rurales et urbaines. La valeur stratégique de l'industrie pour la création d'emplois, des sources de revenus additionnels et la réduction de la pauvreté ont conféré à la noix de karité le surnom de "l'or des femmes du Burkina Faso".

Afin de tenir compte de l'importance du secteur pour le développement socio-économique du pays, le Gouvernement du Burkina Faso a adopté une stratégie de développement durable nationale relative à l'industrie du karité sur quatre ans, soit de 2015 à 2019. Cette stratégie comprend un plan d'action triennal à horizon mobile visant 129 activités, allant de la protection du karité à la coordination marketing des produits connexes.

L'huile et le beurre de karité constituent les deux principaux sous-produits de la noix de karité, et sont tous deux comestibles. Puisque les graines du karité et ses sous-produits sont catégorisés comme étant des produits alimentaires, l'utilisation de l'huile de karité en tant que source de biocarburant de substitution doit donc automatiquement être exclue.

Toutefois, la coque des noix est considérée comme un déchet agricole et demeure à ce jour une source de biomasse inexploitée qui pourrait peut-être être utilisée comme source d'énergie de substitution, ce qui viendrait compléter les avantages nutritionnels et dermatologiques des noix. En supposant un rapport de poids prudent entre les noix de karité et les coques de karité de 5:2, 500 000 tonnes de noix généreront au moins 200 000 tonnes de déchets de biomasse (coques). Considérant une densité énergétique de 18,7 MJ/kg de coques de noix de karité granulées et une perte de poids découlant de la densification de 25 %, les 150 000 tonnes de granules ont donc une teneur énergétique de 2 800 000 GJ, ou 478 000 bep. La génération de grandes quantités de coques de noix de karité doit d'abord subir un processus de mécanisation de base en vue de réaliser des économies d'échelle. Pour l'instant, les pratiques traditionnelles sont largement fondées sur la main-d'œuvre manuelle. De plus, la disponibilité ultime des coques de noix dépendra des autres usages possibles. À cet égard, on doit tenir compte du fait qu'une part importante des déchets de biomasse des coques pourrait potentiellement être utilisée pour générer une énergie de procédé suffisante, limitant ainsi sa disponibilité pour une utilisation en tant que biocarburant.

3.5.4 MARGOUSIER

Le margousier (*Azadirachta indica* A. Juss.) fait partie de la famille de l'acajou. Il s'agit d'un arbre sempervirent robuste à croissance rapide qui peut atteindre de 12 à 18 mètres de hauteur et une circonférence de tronc de jusqu'à 1,8 à 2,4 mètres. Il pousse le mieux dans des sols pauvres et ses racines sont profondes, ce qui lui permet de résister à de longues périodes de sécheresse. Sa capacité à survivre dans des régions sujettes à la sécheresse en fait un arbre idéal pour les zones arides et semi-arides du Burkina Faso. Les efforts de reboisement dans la région du Sahel ont été grandement appuyés par la plantation de margousiers. Un arbre mature produit jusqu'à 50 kg de fruits et 30 kg de graines. La teneur en huile de ses graines varie de 25 à 40 %, et cette huile est composée de triglycérides et d'une grande quantité de composés triterpéniques. Elle contient aussi quatre acides gras polyinsaturés, dont deux sont des acides palmitiques et deux sont des acides stéariques, ainsi que des acides gras polyinsaturés comme l'acide oléique et l'acide linoléique. Les propriétés physicochimiques de l'huile de margousier remplissent les conditions requises pour servir de matière première de substitution pour la production de biodiesel. Toutefois, bien que l'huile de margousier ne convienne pas à la consommation humaine, ses composés exceptionnels interdisent son usage en tant que source de substitution au diesel. Ses composantes pharmacologiques offrent des qualités thérapeutiques éprouvées. Il a été démontré que l'huile de margousier procure des effets remarquables, notamment des propriétés antibactériennes, antivirales, antimicrobiennes, anti-inflammatoires et anti-allergènes. Le margousier a le pouvoir de renforcer le système immunitaire à

tous les égards. Plus particulièrement, l'huile de margousier est reconnue comme insecticide naturel ; elle serait efficace contre au moins 200 insectes, sans devoir recourir à des équipements d'extraction ou de préparation sophistiqués. Ces avantages médicaux, pharmaceutiques et insecticides ont une incidence inhérente sur la valeur l'huile de margousier, vendue à 20 \$ É.-U. et plus par litre. La Fédération Nationale des Groupements Naam au Burkina Faso, grande coopérative de fermiers présente dans 30 provinces, reconnaît les propriétés remarquables de l'huile de margousier et vend seulement de petites quantités d'huile pressée à froid à l'industrie pharmaceutique en Europe. Ces avantages démontrés pourraient empêcher des usages potentiels concurrentiels de l'huile de margousier, par exemple, en tant que biocarburant de substitution. Cela dit, cette réalité exclut la conduite d'analyses quantitatives approfondies relatives au potentiel théorique du margousier comme source d'énergie et de biocarburant au Burkina Faso.

3.5.5 DATTIER DU DÉSERT

Le dattier du désert (*Balanites aegyptiaca*) s'adapte très bien aux terres tropicales arides et est présent partout au Burkina Faso. Tout comme le margousier, il s'agit d'une plante sempervirente à usage multiple originaire de la région soudano-sahélienne en Afrique. Le dattier du désert est un arbuste épineux ou petit arbre aux racines profondes qui tolère si bien la chaleur, la sécheresse, la lumière du soleil et les sols dégradés qu'il s'épanouit au cœur du Sahel. En raison de sa robustesse, il a été choisi pour le reboisement des écosystèmes sahéliens dans le cadre du projet de reboisement panafricain, la Grande muraille verte pour le Sahara et le Sahel.

L'endocarpe de son fruit comestible renferme une graine, ou noyau (pyrène), fibreuse de 2 à 3 cm de longueur, qui contient de 35 à 55 % d'huile riche en acides gras saturés (acides linoléiques, acides oléiques, acides palmitiques et acides stéariques). À maturité, les arbres produisent jusqu'à 100 kg de noyaux, qui génèrent à leur tour de 30 à 60 litres d'huile. Indépendamment de ses propriétés énergétiques et calorifiques validées et de ses paramètres de combustion testés, l'huile de dattier du désert est une huile végétale alimentaire traditionnellement utilisée pour la cuisson et dans les secteurs pharmaceutique et cosmétique, notamment pour le traitement contre les infections intestinales parasitaires. Par conséquent, elle ne peut être considérée comme source de biodiesel potentielle.



PHOTO 20

Dattier du désert et baobab à usages multiples près de Yako, au Burkina Faso

4. DÉVELOPPEMENT ET MARCHÉ POTENTIEL DES MATIÈRES PREMIÈRES

4.1 CANNE À SUCRE

FIGURE 32
Développement et marché
potentiel de la canne à sucre

Canne à sucre Superficie de production/récolte		Volume de production	Valeurs énergétiques		
			Valeur calorifique (MJ/kg)	Gigajoule (GJ)	Baril équivalent pétrole (bep)
Actuel :	5 000 ha	500 000 tonnes → 35 000 tonnes de sucre → 15 800 tonnes d'éthanol	29,6 (éthanol)	468 000	80 000
Potentiel :	8 000 ha	800 000 tonnes → 25 300 tonnes d'éthanol	29,6 (éthanol)	747 000	127 450

Les besoins en eau de la canne à sucre limitent nécessairement l'expansion potentielle de la superficie de production puisqu'il n'existe aucune autre région qui bénéficie de précipitations suffisantes pour sa culture. Si la superficie de terre consacrée à la culture de la canne à sucre devait être agrandie pour augmenter la quantité de matière première disponible pour la production de biocarburant, cette pratique pourrait entraîner des préoccupations environnementales sérieuses sur le plan de la déforestation, de la dégradation des terres, de la pollution de l'eau (en raison de l'épandage de fertilisants) et de la rareté de l'eau, ainsi qu'une grande compétitivité relativement aux intrants agricoles. Si l'insécurité alimentaire et la sérieuse pénurie de sucre au Burkina Faso ne suffisaient pas pour inciter une expansion importante de la surface de production, il est encore moins probable que la potentielle production de biocarburant et les dividendes environnementaux escomptés associés à des émissions de GES plus faibles changent la donne.

En raison du besoin d'irrigation dans la culture de la canne à sucre, l'expansion potentielle de la superficie de culture de la plante au profit de la production de biocarburant pourrait interférer directement avec la production de nourriture. Puisque l'augmentation de la production de canne à sucre risque de réduire la superficie de terre disponible pour la culture du riz et des céréales, cette pratique irait à l'encontre des principes fondamentaux de la durabilité. Par conséquent, le futur potentiel de la canne à sucre en tant qu'énergie au Burkina Faso se limite presque exclusivement aux zones cultivées actuellement. Les limites et contraintes énoncées éliminent donc l'option d'utiliser la canne à sucre comme source possible pour le développement du secteur de carburant de substitution au Burkina Faso.

En outre, le volume total limité d'éthanol disponible, les infrastructures rudimentaires et la logistique demeurent des obstacles importants. En raison des coûts de production estimés élevés en raison des infrastructures rudimentaires, des technologies désuètes et du besoin d'irriguer, il est peu probable que la production en petite quantité d'éthanol à base de canne à sucre soit profitable pour le Burkina Faso sans modifications majeures aux processus, mesures incitatives et soutien stratégique. Même si les coûts associés à la production de bioéthanol étaient jugés concurrentiels, les mises à niveau nécessaires vers les biojets ne peuvent être déterminées à cette étape précoce, puisque la plupart des initiatives de recherche et développement en sont encore au stade précommercial.

Indépendamment des coûts estimatifs de l'investissement, l'obtention des certifications SIP et ATJ est coûteuse et les produits intermédiaires, comme le butanol et le farnésène, présentent potentiellement une plus grande valeur en tant que matières premières chimiques ou pour des usages cosmétiques et pharmaceutiques.

De plus, il faut aussi tenir compte des coûts liés aux différentes étapes du processus d'obtention du carburant, par exemple la déshydratation, l'oligomérisation et l'hydrogénisation. En comparaison aux huiles et aux graisses, les sucres et la biomasse lignocellulosique nécessitent de grandes quantités

d'hydrogène, un gaz assez coûteux. La majeure partie de l'hydrogène est habituellement produite par le reformage d'un gaz naturel, un processus qui demande une consommation de combustible fossile. Le Burkina Faso ne possédant aucune infrastructure pétrochimique, le manque d'hydrogène élimine la possibilité d'utiliser la canne de sucre comme source de biocarburant à l'échelle du pays.

En dépit du parcours de conversion sous-jacent particulier, aucune voie vers la transformation de la canne à sucre en biocarburant ni vers l'obtention de la certification ATJ n'est commercialement viable à ce jour. Les technologies en sont encore au stade de démonstration ou de commercialisation à petite échelle. La plupart des entreprises qui participent aux efforts de commercialisation continus ont reçu du financement et du soutien stratégique importants. Toutefois, en dépit de cette généreuse aide financière provenant de la Force armée américaine (U.S. Air Force) et du ministère de la Défense des États-Unis (U.S. DoD), les coûts finaux du carburant de substitution ne sont toujours pas concurrentiels.

4.2 SORGO

Sorgo		Volume de production	Valeurs énergétiques		
Superficie de production/récolte			MJ/kg	GJ	bep
Actuel :	1 620 000 ha	→ 1 730 000 tonnes de grains → 3 460 000 tonnes de résidus			
Perte :	<ul style="list-style-type: none"> • Usage concurrentiel comme fourrage (- 30 %) • Contraintes logistiques (- 20 %) 	→ 1 730 000 tonnes de résidus → 347 000 tonnes d'éthanol	29,6 (éthanol)	10 ⁷	1 750 000
Potentiel :	Augmentation du rendement [amélioration des plantes] [sélection des cultivars] (+ 30 %)	→ 2 249 000 tonnes de résidus → 451 100 tonnes d'éthanol	29,6 (éthanol)	1.3 x 10 ⁷	2 350 000

FIGURE 33
Développement et marché potentiel du sorgo

Mis à part les obstacles d'ordre mécanique et logistique, des volumes de production de biomasse fiables sont essentiels pour équilibrer l'offre et la demande et établir les structures de base du marché. Le développement génétique continu par l'amélioration des plantes est un moyen important d'augmenter le rendement de production du sorgo, de renforcer sa tolérance à la sécheresse et sa résistance aux organismes nuisibles et aux maladies et de permettre aux plantes de s'adapter à différents environnements climatiques.

Grâce à l'élaboration de nouvelles méthodes de sélection éprouvées et à l'introduction de variétés de plantes améliorées au cours des 20 dernières années dans les régions du Centre-Nord et de la Boucle du Mouhoun, le rendement du sorgo a connu une nette augmentation, soit de 10 à 30 % comparativement aux variétés traditionnelles. Si cette trajectoire vers l'amélioration génétique du sorgo bioénergétique se poursuit, la disponibilité de la matière première, et du même coup du bioéthanol, devrait augmenter davantage.

De nombreux plants mères hybrides de sorgo ont déjà été développés et de nouvelles plantes hybrides ont été identifiées afin d'exploiter l'hétérosis pour augmenter le rendement en sucre. La sélection des cultivars appropriés et les technologies applicables à la production de cultures pourraient ultimement améliorer le rendement à la ferme de 50 à 140 %.

Un programme d'amélioration des plantes bien coordonné donnant des variétés de sorgo améliorées aurait donc un double effet positif sur le plan de la nourriture et de la production de biocarburant. Cette plante constituerait une source alimentaire vitale, fiable et nutritive pour des millions d'habitants du Burkina Faso, tout en augmentant simultanément les rendements en biocarburant. De plus, l'introduction de variétés de sorgo à haut rendement dans des régions plus marginales du pays serait parfaite en raison de la grande tolérance de la plante aux précipitations irrégulières et insuffisantes, contrairement au coton et au maïs.

4.3 BALLEES ET PAILLE DE RIZ

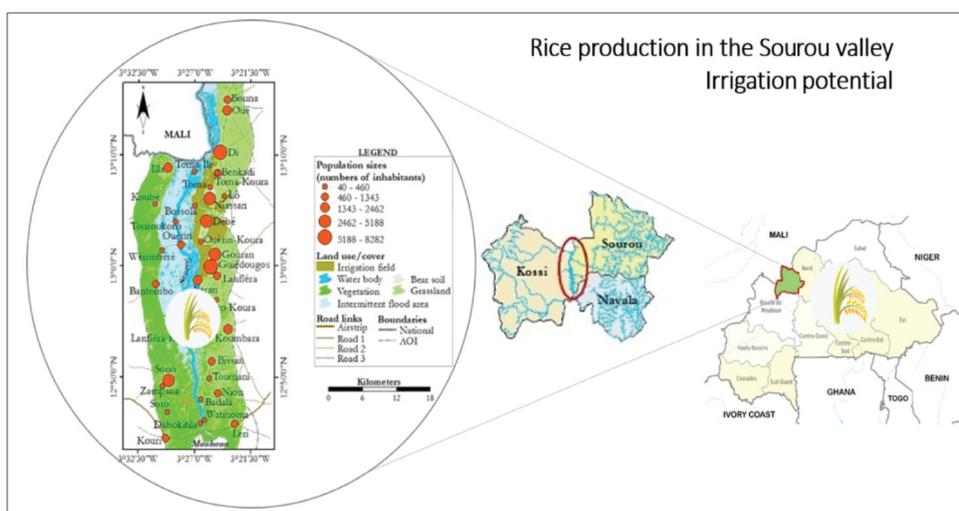
FIGURE 34
Développement et marché
potentiel des résidus de riz

Riz Superficie de production/récolte		Volume de production	Valeurs énergétiques		
			MJ/kg	GJ	bep
Balle de riz					
Actuel :	172 000 ha	68 500 tonnes			
Perte :	Combustion et production de vapeur (- 50 %)	→ 34 250 tonnes	15	514 000	87 650
Potentiel :	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du rendement Expansion de la vallée du Sourou 	+ 10 000 tonnes → 44 250 tonnes	15	664 000	113 300
Paille de riz					
Actuel	172 000 ha	205 500 tonnes			
Perte :	<ul style="list-style-type: none"> Usage concurrentiel comme fourrage (- 25 %) Contraintes logistiques (- 25 %) 	→ 102 250 tonnes	12,5	1 280 000	218 400
Potentiel :	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du rendement Expansion de la vallée du Sourou 	+ 30 000 tonnes → 132 250 tonnes	12,5	1 650 000	281 500

Le Burkina Faso présente un potentiel élevé et inexploité pour la culture du riz. On estime que moins de 15 % des 500 000 hectares qui pourraient être utilisés pour sa production ont été développés. Également, seul un mince pourcentage de la terre qui pourrait convenir à des pratiques d'irrigation est exploité.

Parmi les grandes zones de culture du riz du Burkina Faso, le potentiel d'expansion de la superficie de culture du riz dans la vallée du Sourou semble particulièrement intéressant (voir **figure 35**). En date de juin 2017, on comptait 12 000 fermiers organisés en 25 coopératives qui cultivaient le riz et d'autres céréales sur 6 500 hectares de terre, dont 50 % sont irrigués. Le Sourou fournit une source d'irrigation fiable. Toutefois, si l'eau du fleuve était dirigée et pompée dans des canaux primitifs, la culture rizicole par irrigation pourrait s'étendre sur une superficie totale de plus de 30 000 hectares. Toutefois, le manque d'énergie empêche encore, à ce jour l'installation des pompes nécessaire pour élever l'eau du fleuve d'environ 4 à 5 mètres. Avec une infrastructure et une mécanisation adéquates, le rendement du riz pourrait atteindre au moins 4 tonnes/hectare sur des terres irriguées dans la vallée du Sourou.

FIGURE 35
Production rizicole et
potentiel d'irrigation dans la
vallée du Sourou



Selon les rapports grains-résidus présentés ci-dessus (Section 3.2.1.1), une superficie de culture rizicole de 20 000 hectares pourrait produire 20 000 tonnes de balles de riz (20 000 hectares x 4 tonnes de riz/hectares x ¼) et 60 000 tonnes de paille de riz (20 000 x 4 tonnes de riz/ha x ¾). Si une simple fraction de cette matière première était utilisée pour générer la bioélectricité nécessaire pour alimenter les pompes à eau, la vallée du Sourou pourrait servir d'exemple à l'échelle du pays pour ce qui est d'une utilisation efficace des résidus agricoles.

Les projets de bioélectrification peuvent s'avérer une approche pratique et rentable pour fournir un accès abordable à l'électricité, même dans les régions éloignées du pays, améliorant du coup la production à la fois de nourriture et de carburant grâce à des gains en termes d'intégration et d'efficacité.

4.4 HERBE À ÉLÉPHANT

Herbe à éléphant		Volume de production	Valeurs énergétiques		
Superficie de production/récolte			MJ/kg	GJ	bep
Actuel :	0 ha	0 tonne	14,6	0	0
Potentiel :	≥ 250 000 ha	5 000 000 tonnes	14,6	(7,3 x 10 ⁷)	(12 450 000)
Perte :	- Contraintes liées à la logistique et aux infrastructures (- 25 %) - Inefficacités quant à la conversion (- 25 %)	→ 2 500 000 tonnes	14,6	3,6 x 10 ⁷	6 225 000

FIGURE 36
Développement et marché potentiel de l'herbe à éléphant

Pour que l'herbe à éléphant puisse être théoriquement considérée comme biomasse énergétique potentielle au Burkina Faso, sa teneur énergétique spécifique et la disponibilité des terres convenables à sa culture doivent être évaluées. En l'absence d'une analyse géospatiale plus approfondie et de modèles de simulation détaillés, il est difficile de calculer le potentiel exact de la ressource en tant que culture bioénergétique au pays. Selon l'hypothèse prudente que, en moyenne, 10 % de la superficie agricole totale est disponible, cela se traduirait par une zone de culture totale potentielle de 1 million d'hectares. De plus, supposant une densité d'énergie de 14,6 MJ/kg à une teneur en humidité de 10 % et à un rendement plutôt prudent de 20 tonnes/hectare, et sans tenir compte des inefficacités et des pertes liées à la conversion, 250 000 hectares dédiés à la culture d'herbe à éléphant pourraient générer une valeur calorifique équivalente à 7,3 x 10⁷ GJ, ou 12,5 millions bep. Même avec une perte de 50 %, le potentiel calculé demeurerait énorme en comparaison à toutes les autres sources de bioénergie de substitution. Des évaluations prudentes démontrent que la quantité réaliste de biocarburant lignocellulosique qui pourrait être disponible pour le secteur de l'aviation se situe aux alentours de 3,6 x 10⁷ GJ, ou 6,25 millions bep. Le potentiel énergétique éprouvé de l'herbe à éléphant à lui seul est équivalent au potentiel énergétique global de l'ensemble de toutes les sources de matières premières identifiées. Pour ce qui est de répondre à la quantité et à la qualité cherchées, l'herbe à éléphant représente donc l'une des sources de biomasse les plus prometteuses.

4.5 JATROPHA

Jatropha		Volume de production	Valeurs énergétiques		
Superficie de production/récolte			MJ/kg	GJ	bep
Actuel :	3 000 – 8 000 ha	≤ 5 000 tonnes de graines → 1 200 tonnes d'huile (CJO)	40	48 000	8 450
Potentiel :	- 100 000 ha - Améliorations végétales sélectives - Introduction de plantes hybrides à haut rendement	400 000 tonnes de graines → 120 000 tonnes d'huile (CJO)	40	4 800 000	821 000

FIGURE 37
Développement et marché potentiel du jatropha

Selon les considérations, conclusions, contraintes et recommandations présentées ci-dessus (voir Sections 3.4.4.6, 3.4.5.1, 3.4.5.2, 3.4.5.3, 3.4.5.9 et 3.4.5.10), il faudra déterminer si le jatropha trouvera sa place à titre de culture pour la production de biocarburant au Burkina Faso. Cela dépendra de la rigidité avec laquelle les principes éprouvés des sciences agronomiques sont respectés et de l'application rigoureuse d'une méthodologie qui intégrera tous les éléments essentiels de la chaîne de valeur du biocarburant, de la production de la matière première au moteur à combustion.

Bien que des obstacles majeurs persistent, les conditions agroclimatiques suggèrent de revoir le potentiel économique et énergétique de la matière première. Les hypothèses suivantes, relatives au potentiel de la production du jatropha au Burkina Faso, sont fondées sur des visites dans les champs, des processus de validation et de vérification sur place, des entretiens avec des représentants d'État, des agriculteurs, des agronomes, des experts scientifiques en chef et des entrepreneurs du secteur du jatropha, des données sur le climat et les sols, ainsi que des analyses spatiales.

Selon les données recueillies, la superficie potentiellement disponible pour la culture du jatropha s'étend sur tout le pays, sous une ceinture virtuelle tracée entre les villes de Dédougou, de Ziniaré, de Koupèla et de Fada-Ngourma. À l'exception des zones protégées (parcs nationaux, faune et flore et réserves cynégétiques), des terres cultivées, irriguées et non irriguées, des forêts classées et des réservoirs d'eau, la superficie couvre la majeure partie des zones agroécologiques nord-soudaniennes et sud soudaniennes.

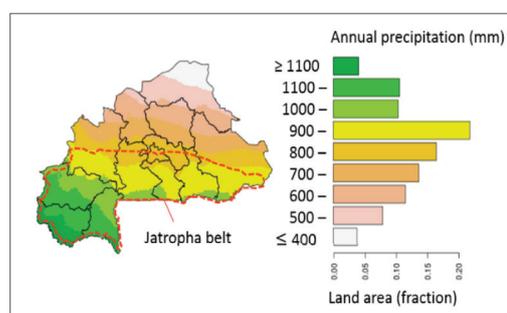


FIGURE 38
Ceinture jatrophiqque



FIGURE 39
Principales zones de culture du jatropha

La frontière indiquée à la figure 39 représente l'isohyète du seuil de précipitations pour le jatropha. La zone de culture déterminée s'inscrit dans les écorégions du sud, de la plaine Kompienga-Singou dans l'est au plateau Bwa et au bassin de la Comoé-Poni dans le sud-ouest, couvrant un vaste gradient bioclimatique (pour une analyse de compatibilité générale de la ceinture jatrophiqque touchant les écorégions spécifiques du Burkina Faso, voir **figure 40**). Avec des précipitations variant de 650 mm à plus de 1 000 mm, les écorégions marquées s'étendent sur les zones soudaniennes les plus humides, où les conditions climatiques favorables sont idéales pour la culture du jatropha, la remise en état des terres et les projets de reboisement. En comparaison, la culture du jatropha à grande échelle est impossible dans le nord du pays, car les précipitations tombant sur cette zone sahélienne aride sont trop faibles pour assurer la culture de la plante sans irrigation ou système de gestion de l'eau.

En théorie, malgré les marges d'erreur et les réserves stipulées ci-dessus, 20 % du territoire du pays, soit 5,5 millions d'hectares, pourraient convenir à la culture du jatropha.

Bien que la disponibilité des terres constitue un critère essentiel, il n'est pas suffisant pour justifier ou permettre l'établissement d'une chaîne logistique régionale pour la matière première. En dépit de la compatibilité des terres en principe, il existe des facteurs limitants liés à l'inadéquation des infrastructures de production, du transport et de la logistique. En plus d'un mécanisme de détermination des tarifs transparents et d'une demande du marché constante et fiable, il est important d'avoir en place des

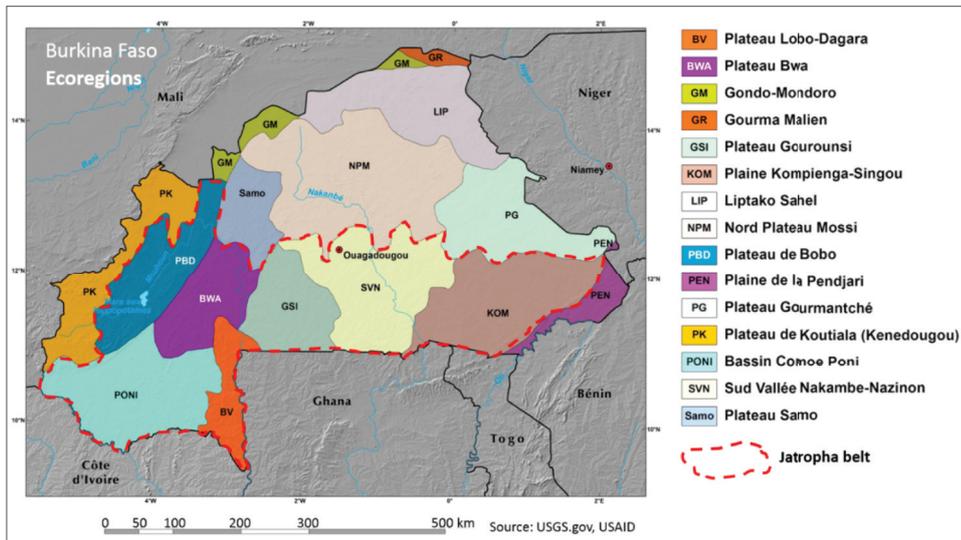


FIGURE 40
Écorégions du Burkina Faso

installations destinées à la récolte, à l'entreposage, au décorticage, à l'extraction et à la transformation, ainsi qu'un accès financé aux intrants essentiels, comme des semences améliorées, des fertilisants et du savoir-faire. Autrement, même s'ils sont bien intentionnés, les efforts de mobilisation pour engager les communautés rurales et augmenter la production du jatropha sur des terres convenables risquent de s'avérer contre-productifs. Afin de prévenir des répercussions socio-économiques négatives non souhaitées, l'établissement de structures de marché favorables est essentiel. Leur mise en place demande toutefois des investissements en capital inenvisageables pour les plus petits propriétaires, ce qui nécessite en retour du soutien public et une intervention gouvernementale. Le défi consiste à assurer un juste équilibre des risques liés aux intérêts économiques, au développement social et rural et à la durabilité environnementale. Sans les éléments de base d'une chaîne de valeur du jatropha potentielle en place, la disponibilité des terres et la durabilité sont à elles seules insuffisantes pour calculer la production potentielle. Ainsi, il est suggéré d'appliquer une perte de 90 %, ce qui procure tout de même une superficie de culture potentielle de 500 000 hectares, l'équivalent de 5,6 % des terres arables du Burkina Faso. Ce chiffre s'aligne avec les récentes estimations faites par le ministère de l'Énergie. Bien que ces chiffres n'aient pas été officiellement reconnus par le Gouvernement du Burkina Faso, ils figurent tout de même dans une série de documents stratégiques récents portant sur le biocarburant et l'énergie renouvelable.

Toutefois, les espèces non domestiquées ne peuvent atteindre des rendements semenciers raisonnables dans de mauvaises conditions agroclimatiques. L'amélioration et la sélection des espèces demandent du temps et de la préparation. Cette réalité transforme l'approvisionnement en matériel végétal élite en un véritable goulot d'étranglement. Par conséquent, l'augmentation de la culture et de la production dépend de l'efficacité du processus de multiplication des plants. La multiplication des plants traditionnelle permet de produire des plantes hétérogènes présentant des rendements semenciers non constants, ce qui représente un désavantage. L'absence de centres de sélection et d'amélioration de pointe et de pépinières spécialisées ayant la capacité de produire des plants hybrides uniformes à haut rendement demande un ajustement à la baisse de la superficie de culture du jatropha potentielle. Compte tenu de ces limites, une superficie estimée à 100 000 hectares semble plus raisonnable, quoique toujours ambitieuse. Supposant une compacité moyenne de 1 250 plantes par hectares, un rendement semencier amélioré de 4 tonnes par hectare (pour les accessions de jatropha hybride non toxique de première génération) et une valeur calorifique spécifique du CJO de 40 MJ/kg, le potentiel de récupération d'énergie serait de 120 000 tonnes de CJO, ce qui équivaut à 4 800 000 GJ ou 821 000 bep. Cette quantité représente environ 60 % des importations en combustible fossile du pays pour 2016.

4.6 NOIX D'ANACARDE

FIGURE 41
Développement et marché
potentiel de l'anacarde

Coques de noix d'anacarde Superficie de production/récolte		Volume de production	Valeurs énergétiques		
			MJ/kg	GJ	bep.
Actuel :	90 000 ha	50 000 tonnes → 35 000 tonnes de coques	19 – 22	700 000	120 000
Potentiel :	<ul style="list-style-type: none"> + 100 % sur 5 ans Optimisation de la chaîne de valeur 	→ 70 000 tonnes de coques → 14 000 tonnes de CNSL	19 – 22 39 - 42	1 400 000 580 000	240 000 99 000

Les principales contraintes de développement du secteur de la noix d'anacarde sont le faible rendement des plantations, la faible capacité des installations de transformation actuelles (environ 10 % de la production), l'accès limité au crédit et la mauvaise organisation des parties prenantes clés. La majeure partie des noix d'anacarde produites proviennent de plantations ou de haies mal gérées, qui utilisent des matériels végétaux n'ayant pas subi de processus de sélection. Par conséquent, les rendements et la qualité des noix sont relativement bas. La production moyenne du Burkina Faso est d'environ 300 à 450 kg/hectare, comparativement à un rendement de 800 à 1 000 kg en Côte d'Ivoire. Une amélioration des pratiques agronomiques pourrait potentiellement doubler le volume de production par hectare actuel. De plus, la production de semis à haut rendement à partir de matériel végétal amélioré et le croisement sélectif avec le sésame, les haricots, les arachides et le jatropha pourraient augmenter les rendements jusqu'à 1 200 kg/hectare.

En vue d'assurer qu'une portion équitable de la chaîne à valeur ajoutée de la production et de la transformation des noix d'anacarde demeure au pays, le Burkina Faso doit prendre des mesures efficaces et fournir un soutien stratégique actif pour faciliter le secteur de la transformation de la noix d'anacarde. Les principaux enjeux consistent à réduire les distorsions du marché et des prix, à renforcer la valeur ajoutée nationale et à augmenter le coefficient de transformation des produits agricoles au pays. Actuellement, 90 % des noix d'anacarde sont transformées à l'étranger. Si les activités de transformation de la noix d'anacarde nationale pouvaient être réactivées et les capacités de transformation globales augmentées, cela libérerait un volume important de coques de noix et de CNSL pour la transestérification et la production de biocarburant destiné au transport. Une seule unité de production de CNSL dans l'ouest du Burkina Faso, travaillant en étroite collaboration avec l'Union Nationale des Producteurs d'Anacarde (UNPA), pourrait aider à résoudre le problème de coques des transformateurs de noix d'anacarde au Burkina Faso.

Le potentiel de croissance pour la culture de l'anacardier et la production du CNSL au Burkina Faso est considérable. À cet égard, des comparaisons sont établies avec le Nigeria et la Côte d'Ivoire. Sur seulement une décennie, les deux États ont réussi à augmenter leur production de noix d'anacarde de plus de 10 fois, ce qui les place aujourd'hui parmi les dix plus grands pays producteurs de noix d'anacarde au monde.

Tout comme pour la production de noix de karité, la culture des anacardes au Burkina Faso s'est mérité une reconnaissance gouvernementale en tant que sous-secteur agricole stratégique. En 2010, le Gouvernement du Burkina Faso a adopté une Stratégie de croissance accélérée et de développement durable (SCADD) qui reconnaît explicitement les avantages de la chaîne de valeur des noix d'anacarde comme moyen de contribuer à la réduction de la pauvreté.

En plus d'un prêt de 4 millions de \$ É.-U. du Fonds d'investissement climatique (FIC), le Burkina Faso a récemment reçu un prêt de 5,4 millions \$ É.-U. de la Banque africaine de développement (BAfD) pour financer un important projet de développement du secteur de la noix d'anacarde dans le bassin de la Comoé. Reposant sur un partenariat public-privé novateur entre les coopératives de l'union nationale des agriculteurs et le Gouvernement du Burkina Faso, le projet est en fait un programme de reboisement (REDD+) visant à revigorer l'industrie nationale de la noix d'anacarde et à atténuer les changements climatiques, tout en réduisant la pauvreté et les émissions de GES. Par conséquent, le Burkina Faso recevra un appui pour l'augmentation de la production de noix

d'anacarde grâce à des plantations de variétés sélectionnées et à la mise en œuvre de pratiques de gestion améliorée dans ces plantations, à l'amélioration des capacités de transformation des noix d'anacarde et au renforcement des capacités de la Wouol Farmers' Association et de ses 2 500 membres. La zone de plantation devrait connaître une croissance de 25 000 hectares.

D'un point de vue environnemental, le projet est conçu pour atténuer les changements climatiques selon les pratiques suivantes : la restauration des sols dégradés, l'inversion de la déforestation et la séquestration du carbone dans les plantations d'anacardiers.

L'Alliance africaine pour le cajou prévoit une augmentation de la production de 34 % entre 2010 et 2020 pour l'Afrique de l'Ouest. La production du Burkina Faso devrait augmenter d'au moins 12 000 tonnes annuellement au cours des cinq prochaines années. Si les noix sont transformées au pays, cette augmentation pourrait fournir 8 400 tonnes de coques ou 1 680 tonnes de CNSL de plus chaque année.

4.7 CONSIDÉRATIONS FINANCIÈRES ET STRATÉGIQUES

Bien qu'un certain nombre de technologies de conversion soient potentiellement accessibles pour produire du carburant d'aviation d'appoint durable, il est plus probable que les considérations relatives à la disponibilité ou d'ordre logistique touchant les matières premières sous-jacentes seront des facteurs clés dans la détermination de la validité de la chaîne de valeur d'un biocarburant donné. De manière semblable aux difficultés rencontrées pour l'établissement d'une chaîne de valeur des matières premières dérivées du sorgho (voir Section 3.1.2.3 pour plus de détails), les grandes quantités de résidus agricoles requis pour soutenir les activités liées au biocarburant à l'échelle commerciale rendent le transport, les infrastructures et la logistique particulièrement difficiles. Les contraintes relatives aux infrastructures, à la mécanisation, à l'entreposage, à l'évolutivité, aux coûts et à la complexité des processus risquent d'empêcher la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement capable d'exploiter localement les résidus agricoles et les sources d'énergie disponibles. Par exemple, diverses herbes tropicales peuvent convenir à la production de bioénergie. Toutefois, malgré le rendement potentiel prometteur de l'herbe à éléphant, les coûts liés à la récolte, au transport et à l'entreposage limitent son utilisation en tant que biocarburant si aucun investissement supplémentaire n'est fait dans la chaîne d'approvisionnement.

Dans plusieurs cas, une faible densité d'énergie nécessite aussi une certaine forme de densification mécanique et de prétraitement en guise de préparation de la biomasse pour une transformation et une conversion en énergie optimales.

Un autre aspect important relatif aux résidus agricoles concerne la détermination de la quantité de biomasses végétales qui doit être laissée au sol. Puisque le repositionnement de la matière organique des sols est essentiel pour préserver la qualité du sol à long terme et assurer le recyclage des nutriments, il est important de ne pas collecter tous les résidus végétaux pour la production de biocarburant.

En résumé, chacune des matières premières analysées présente des caractéristiques qui la rendent unique sur le plan de la logistique, du transport et de l'entreposage. La masse volumique apparente, la saisonnalité des récoltes et la capacité d'entreposage constituent des facteurs fondamentaux affectant non seulement l'approvisionnement de la matière première, mais aussi la taille de l'usine de transformation de la biomasse en carburant de substitution et l'économie globale de la production de biocarburant et sa croissance. De plus, la logistique a des incidences directes sur les émissions de CO₂, l'empreinte de carbone et le rendement de conversion final.

De toutes les options de récupération d'énergie, la production de biocarburant et de carburant d'aviation durable est probablement un des scénarios des plus complexes, qui nécessite des investissements publics et privés additionnels dans les infrastructures et la mécanisation. Les conditions préalables pour un minimum d'investissements sont la mise en place de structures de marché fiables et l'établissement de prix prévisibles pour les résidus agricoles. Autrement, la mobilisation des ressources nécessaires demeurera complexe.

En vue de mieux faire connaître le potentiel énergétique énorme des résidus agricoles et déchets de biomasse, particulièrement parmi les agriculteurs, il est suggéré de procéder selon une démarche progressive et de commencer par un processus de conversion énergétique moins complexe. Cela pourrait nécessiter, par exemple, la mise en place temporaire d'une plateforme de génération d'énergie distribuée à petite échelle qui utilise des quantités limitées de biomasses pour produire de l'électricité et fournir un approvisionnement énergétique thermique. En limitant délibérément le processus de conversion énergétique à de petites usines de biomasse pour des centrales de production combinée de chaleur et d'électricité et des solutions énergétiques décentralisées, les agriculteurs pourraient directement bénéficier de ressources de leurs terres jusqu'ici non exploitées, par exemple, pour alimenter des pompes à eau. Pendant ce temps, les agriculteurs et les parties prenantes se familiariseront graduellement avec les aspects économiques de la logistique et des processus, une condition préalable nécessaire pour l'intégration à grande échelle des sources d'énergie renouvelable à la chaîne de valeur du biocarburant.

5. FACTEURS DÉTERMINANTS DE SUCCÈS

5.1 MOBILISATION DES AGRICULTEURS

L'établissement d'une chaîne de valeur est un processus complexe qui demande la coordination de multiples paramètres interdépendants et la coopération de toutes les parties prenantes. En dépit des défis liés aux matières premières (par exemple les facteurs agronomiques, la durabilité, le rendement et les coûts de production), il est probable que, à un moment donné, la mobilisation et la formation de la population active joueront un rôle important. Dans ce contexte, la notion de "mobilisation" n'est pas limitée à la participation de la population active agricole, mais comprend aussi le perfectionnement et la formation des ressources humaines relativement à la mécanisation, y compris pour les techniciens, les ingénieurs, les agriculteurs commerciaux et les gestionnaires d'entreprises agroalimentaires.

Pour des raisons pratiques, d'évolutivité, de délai de commercialisation et de charge de travail administratif, la réactivation des agriculteurs dépend largement de courtiers-fournisseurs qui sont positionnés, qualifiés et en qui on a confiance pour représenter les intérêts de centaines, voire de milliers d'agriculteurs individuels. Le défi est de trouver le partenaire/courtier-fournisseur adéquat. L'Afrique subsaharienne figure parmi les régions les plus diverses au monde sur les plans linguistique et ethnique, et ces différentes identités influencent grandement le milieu social, économique et politique. Au Burkina Faso, par exemple, les chefs traditionnels exercent une influence importante dans les régions et les sociétés rurales. La forte influence sur les résultats agricoles de la communauté provient d'une combinaison unique de l'ancien système féodal, de l'héritage ethnique et de la monarchie constitutionnelle. Les autorités ethniques locales ont donc un pouvoir considérable dans l'octroi des droits aux terres, particulièrement dans les communautés rurales qui sont souvent influencées par les coutumes, plutôt que par les lois nationales. En effet, les chefs de tribu et les chefs locaux règlent aussi des différends et agissent à titre d'arbitres et de juges ad hoc ou officiels. En outre, ces chefs reçoivent typiquement un appui considérable de la population, qui leur fait souvent plus confiance qu'aux membres élus du parlement, qu'aux membres des cours nationales et qu'aux policiers.

Les Mossis représentent environ 40 % de la population du pays ; il s'agit du plus grand groupe ethnique au Burkina Faso. Au fil des ans, leurs chefs ont non seulement complété l'action gouvernementale, particulièrement dans les régions où la présence gouvernementale est faible, mais ont aussi joué un rôle majeur dans la prestation de services sociaux afin de réduire la pauvreté et de promouvoir le développement durable, agissant ainsi comme intermédiaires entre le Gouvernement central et l'économie locale. Leur rôle indéniable dans le domaine de la gouvernance et leur participation active continue dans la politique et les affaires courantes ont créé une atmosphère fondée sur la confiance et la responsabilisation.

En vue de mobiliser et d'encourager la participation la plus vaste et la plus significative possible de la population agricole nationale, les chefs de tribu et les représentants de la société civile du Burkina Faso devraient être encouragés à acquiescer un rôle de médiateur et à participer à la relance, à l'échelle nationale, de la chaîne de valeur du biocarburant envisagée. L'intégration délibérée de la société civile et des chefs de tribu respectés pourraient aider à susciter une solide mobilisation de la population agricole.

5.2 SÉLECTION DES SEMENCES ET AMÉLIORATION DES PLANTES

Sans égard à la matière première de biocarburant identifiée, les semences sont habituellement la composante de base d'une culture réussie. Durant les premiers mois de culture, la croissance précoce dépend grandement de la qualité des semences. Autrement dit, la qualité des semences et la pureté des génétiques sont des exigences fondamentales pour l'établissement réussi des plants ainsi qu'une composante critique dans la rentabilité des cultures vivaces. L'expérience négative avec le jatropha a démontré que des programmes de sélection des semences et d'amélioration des plantes doivent être mis en place pour maximiser les caractéristiques agronomiques importantes, comme la teneur en huile et en graines, le modèle de floraison, la morphologie des arbres et la résistance aux maladies.

La sélection génomique représente une approche prometteuse pour obtenir des évaluations phénotypiques adéquates permettant de renforcer l'exactitude de la sélection dans le processus d'amélioration des plantes, particulièrement pour les espèces avec de longs cycles de vie, comme le jatropha. La sélection génomique constitue un outil important pour aider à la sélection animale et végétale en raison de son efficacité comme modèle de prédiction en associant les marqueurs moléculaires à des informations phénotypiques, sans devoir mener des essais phénotypiques laborieux et coûteux au début du cycle de reproduction. Puisque la sélection génomique raccourcit considérablement la longueur des cycles d'amélioration, les programmes d'amélioration sont ainsi plus efficaces, ce qui permet aux sélectionneurs de maximiser le rendement en grains et la teneur en huile du jatropha.

Une amélioration appropriée des plantes et une bonne sélection des germoplasmes devraient être entreprises tout au début du processus, de sorte que les cultivateurs de jatropha puissent tirer profit de végétaux génétiquement améliorés. Il est fort probable qu'une amélioration appropriée des plantes pourrait résoudre partiellement les problèmes de rendements insatisfaisants et donner des variétés de jatropha à haut rendement. Les résultats de programmes d'amélioration du jatropha commencent tout juste à sortir et n'ont pas du tout été utilisés dans les premiers projets africains. Toutefois, l'établissement d'un cycle d'amélioration et de développement pour l'introduction d'un nouveau cultivar commercial peut prendre plusieurs années. Seule une longue période de surveillance de la plante peut fournir une pleine compréhension de son profil de rendement et de sa résistance aux pressions biotiques, à la variabilité du climat et à la maladie et aux organismes nuisibles. Néanmoins, il convient également de noter que les principales cultures commerciales dans la région ont subi des centaines d'années d'amélioration génétique, ce qui n'a jamais été le cas pour le jatropha nulle part au monde.

Bien que le processus d'amélioration nécessaire puisse prendre plusieurs années, l'amélioration sélective des plants a déjà produit des cultures énergétiques offrant un rendement bien au-delà des cultivars d'origine. La société allemande JatroSolutions soutient avoir mesuré l'hétérosis dans les hybrides de jatropha.

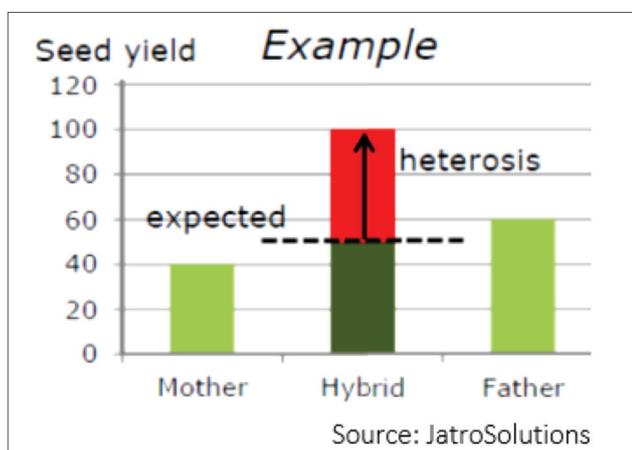


FIGURE 42
L'effet d'hétérosis

L'hétérosis (ou vigueur hybride) réfère au phénomène de descendance de diverses variétés d'espèces ou de croisements d'espèces qui manifestent un gain en biomasse, une rapidité de développement supérieure et une productivité ou supériorité améliorée par rapport à leurs plants parents. Par conséquent, les rendements des hybrides F1 de cultivars jatropha élites non toxiques sont considérablement plus élevés que les rendements comparables des plantes sauvages. En résumé, une plante hybride F1 découle du croisement entre deux lignées pures en vue d'atteindre les résultats souhaités. Les programmes d'améliorations des plantes scientifiques ont rendu possible non seulement de faire ressortir les qualités intéressantes des plants parents, mais dans la plupart des cas, ces qualités ont été améliorées et de nouvelles caractéristiques désirables ont été ajoutées aux plants hybrides résultants. Grâce aux essais d'amélioration systématiques menés au Madagascar, en Inde, au Cameroun et au Paraguay, les premières générations de plantes hybrides de jatropha génèrent 4 tonnes/hectare (avec une compacité de 1 250 plantes/hectare). La deuxième génération de plantes hybrides de jatropha devrait fournir un encore meilleur rendement, pour un rendement en semence allant jusqu'à 6 tonnes/hectare, comparativement aux espaces sauvages qui procurent un mince rendement de 0,5 tonne/hectare. En plus de l'amélioration de la teneur en huile et en graines, la valeur du tourteau d'amande riche en protéine augmente aussi considérablement, puisque les cultivars à haut rendement n'ont pas besoin d'être détoxifiés pour nourrir les animaux.

Quant au sorgo, grâce à l'élaboration de nouvelles méthodes de sélection éprouvées et l'introduction de variétés de plants améliorés au cours des 20 dernières années dans les régions du Centre-Nord et de la Boucle du Mouhoun, le rendement du sorgo a connu une nette amélioration, soit de 10 à 30 % comparativement aux variétés traditionnelles. Si cette trajectoire d'améliorations génétiques du sorgo bioénergétique se poursuit, la disponibilité de la matière première, et du même coup du bioéthanol, devraient augmenter davantage.

5.3 ESSAIS AGRONOMIQUES

Des essais agronomiques devraient être obligatoires avant d'augmenter la production de toute culture énergétique. Des expériences douloureuses ont montré que de soi-disant "cultures miraculeuses" ont été largement promues sans preuves scientifiques solides, la culture du jatropha dans ses premières années ressemblait plus à une "ruée vers l'or" (nouvelle ruée vers le pétrole) qu'à une quête pour une énergie verte et durable. Une fois les droits d'utilisation des terres assurés et des milliers d'agriculteurs mobilisés, les activités de culture et de plantation ont décollé un peu partout, particulièrement au Mexique, au Brésil, en Inde, en Indonésie, au Vietnam, en Thaïlande, en Malaisie et à Madagascar. Le jatropha a été, pendant un certain temps, la cause principale de l'accaparement de terres en Asie et en Afrique. Madagascar, la Tanzanie, le Mozambique et le Rwanda ont en fait connu certaines des plus vastes attributions de terres pour la culture du jatropha en Afrique, du moins sur papier. En vue de prévenir de tels symptômes typiques d'un échec, des essais exhaustifs et rigoureux sur le plan scientifique doivent être menés

dans la zone d'expansion avant de faire une promotion à si grande échelle de la culture. Des essais locaux élargis sur le terrain, réalisés dans les conditions des plantations constitueraient une première étape essentielle du développement d'une solide base de connaissances pour guider l'expansion ultérieure de la culture. Toute affirmation soutenant qu'une culture particulière peut offrir un rendement nettement supérieur dans certaines conditions que les cultures concurrentes doit reposer sur des bases scientifiques solides avant d'être acceptée et déployée à grande échelle.

5.4 INTERVENTION ET PARTICIPATION DU GOUVERNEMENT

Le déséquilibre de structures (conditions) de marché imparfaites mène à la volatilité des prix et à l'incapacité récurrente d'offrir une rémunération stable et suffisante pour les ressources de production à long terme. Afin de fournir aux producteurs agricoles un filet de sécurité et de créer un environnement plus stable et prévisible, le Gouvernement pourrait adopter des mesures d'intervention appropriées dans le secteur agricole pour stimuler la production et favoriser la commercialisation d'une culture en particulier.

Si la culture pour biocarburants est jugée avantageuse, les gouvernements devraient, grâce à des politiques adéquates, réglementer son intégration et appuyer le développement des marchés et de l'infrastructure.

Cependant, les politiques agricoles doivent être bien coordonnées et synchronisées, sans quoi toute erreur à l'étape de conception pourrait freiner l'atteinte des objectifs sous-jacents, compromettre la bonne exécution ou engendrer des coûts imprévus. Par exemple, malgré le soutien apporté à la culture du jatropha en Zambie, le Gouvernement a tout de même continué à subventionner les combustibles fossiles importés et a retardé l'imposition d'un prix standard pour le biodiesel. Ainsi aucune entreprise de jatropha ne pouvait fonctionner de manière rentable.

En plus des politiques de soutien dédiées, le portefeuille des subventions directes et indirectes inclut notamment :

- 1) des paiements directs aux agriculteurs ;
- 2) des politiques de soutien des prix par la prise en charge par le gouvernement des achats et de l'entreposage ;
- 3) des règlements établissant des prix minimaux selon l'emplacement, l'utilisation finale ou toute autre caractéristique ;
- 4) l'assurance récolte ;
- 5) les microcrédits ;
- 6) la distribution gratuite de dotations agricoles essentielles (par exemple engrais, matériaux végétaux de qualité, comme les plants hybrides de jatropha à haut rendement).

Au cours de la dernière décennie, près de 10 % du budget national a généralement été attribué à l'agriculture. Conformément à la Stratégie de développement rural, la production de cultures vivrières de base a été appuyée par des subventions pour les engrais, par la distribution de semences améliorées et par le soutien à l'amélioration des systèmes d'irrigation.

5.4.1 PRIX PLANCHERS ET ACHAT DE SEMENCES

Nous avons récemment vu que les agriculteurs au Burkina Faso participant à des programmes de cultures bioénergétiques se retrouvaient en plan, souvent sans acheteurs, sans marché et sans prix acceptables pour leur produit. Il en a résulté un désenchantement économique et social généralisé, qu'il faut éviter.

Il faudrait peut-être inviter le Gouvernement à intervenir au nom de ses agriculteurs et producteurs, et à offrir des prix planchers si le marché national des semences de jatropha ne trouve pas son propre prix d'équilibre. En établissant un prix plancher, le Gouvernement interdit qu'un prix descende sous le prix cible convenu pour les produits. Pour avoir droit à ces prix planchers, les producteurs pourraient devoir se conformer à certaines pratiques en matière de durabilité et de dispositions types relatives aux plantations.

Le Burkina Faso a déjà acquis beaucoup d'expérience dans le soutien aux prix pour les producteurs de coton afin de maintenir la production et le revenu des agriculteurs. Bien que la culture du coton ait été introduite au début de l'époque coloniale, la production à grande échelle a commencé après la création de la Compagnie française pour le développement des fibres textiles (CFDT) en 1949, qui a créé un fonds de stabilisation garantissant aux agriculteurs des prix rémunérateurs et stables. À l'ère de l'indépendance (1960), la production de coton était l'une des principales sources de revenus pour le financement du développement du pays.

5.4.2 INTERMÉDIAIRE (PUBLIC) DE MARCHÉ- RÔLE DE CHAMBRE DE COMPENSATION

En vue d'atténuer les risques liés aux ententes entre les acheteurs et les vendeurs, le Gouvernement pourrait envisager de jouer le rôle d'un intermédiaire de marché en fournissant des services similaires ou comparables à ceux offerts par une chambre de compensation. La "compensation" est une procédure selon laquelle une entité (dans ce cas-ci une agence gouvernementale autorisée) agit comme intermédiaire et acquitte le rôle d'acheteur et de vendeur dans le cadre d'une transaction en vue de rapprocher les commandes entre les parties engagées dans la transaction.

La compensation garantit des services de gestion des risques. Elle renforce aussi la transparence des prix et assure des marchés plus efficaces et plus homogènes puisque les parties peuvent faire des virements à une contrepartie centrale (la chambre de compensation) plutôt qu'à chaque partie individuelle avec qui elles ont transigé.

Pour améliorer le bon fonctionnement global du marché pour les produits agricoles, le PNDES envisage explicitement plusieurs mesures concrètes qui aideraient à équilibrer et à réduire les risques liés au marché pour les agriculteurs. Ces mesures comprennent :

- l'établissement d'une contrepartie d'achat centrale (Centrale d'achat des intrants et du matériel agricoles, No 186) ;
- la création d'une société de production de semences agricoles (Société de production de semences agricoles, No 197) ;
- un mécanisme de gestion des risques agricoles (No 258) ;
- une banque consacrée au financement agricole (No 250).

5.4.3 ASSURANCE RÉCOLTE

L'Assurance récoltes constitue un instrument important pour aider les agriculteurs à gérer les répercussions financières liées aux risques de production, principalement ceux entraînés par i) les conditions climatiques, ii) les organismes nuisibles et les maladies incontrôlables et iii) les variations de rendement. Les raisons typiques justifiant l'intervention du Gouvernement comprennent les risques associés aux changements climatiques catastrophiques, les mauvais rendements et une défaillance du marché. L'Assurance récolte a des avantages potentiels d'ordre social et développemental et pour la réduction de la pauvreté, en plus d'être un facteur de stabilisation des revenus des agriculteurs et de protection financière contre les risques associés aux conditions climatiques ainsi qu'une forme de garantie pour faciliter l'accès au financement agricole.

Bien que le subventionnement des primes d'assurance agricole soit l'intervention la plus commune, d'autres mesures d'aide sont tout aussi importantes, par exemple de l'assistance technique et administrative.

5.4.4 FACTEURS DE PRODUCTION AGRICOLE

Les subventions aux intrants représentent une grande proportion des dépenses publiques en agriculture. Par exemple, la crise alimentaire de 2007-2008 a poussé le Gouvernement du Burkina Faso à favoriser la stabilité de la production agricole en distribuant des semences améliorées et en subventionnant la moitié des coûts des fertilisants. À ce jour, le Gouvernement continue de fournir des subventions aux producteurs de coton.

Des subventions gouvernementales pour certains intrants agricoles clés comme de l'équipement de plantation de haute qualité, des décortiqueuses mécaniques ou des laboratoires de sélection des végétaux cadreraient également avec les objectifs stratégiques du Plan national de développement économique et social (PNDES). Ainsi, le Gouvernement s'engage à faciliter l'accès aux intrants agricoles, aux équipements et au financement ainsi qu'à offrir des incitatifs commerciaux.

En ce qui a trait au soutien aux intrants agricoles clés, le Gouvernement du Malawi, par exemple, y est parvenu en offrant des subventions aux producteurs de maïs pour les fertilisants, ce qui a permis au pays de devenir un exportateur net de maïs dans la région.

5.5 COOPÉRATION INTRAGOUVERNEMENTALE

L'établissement d'une chaîne de valeur pour les biocarburants dans un pays en développement demande une étroite collaboration entre de nombreux secteurs de l'industrie, mais aussi entre les organes gouvernementaux pertinents.

En raison de la spécificité multisectorielle des biocarburants, la coordination et l'action concertée sont des éléments particulièrement importants lorsque les ministères fédéraux choisissent les entités qui seront responsables du dossier. Lorsque la coordination des ministères et des organismes gouvernementaux est déficiente, ces entités risquent d'interpréter différemment les directives relatives aux politiques nationales, d'établir des priorités,

des stratégies et des objectifs divergents et, par conséquent, de ne pas agir conjointement au profit des objectifs nationaux. La communication et la transparence constituent des éléments cruciaux en matière de gouvernance et de responsabilisation. Une diffusion équitable et rapide de l'information est essentielle au bon fonctionnement des forces du marché et à la répartition des risques. Une bonne communication de l'information entre les ministères faciliterait la formulation d'options viables. Les luttes de pouvoir et les conflits idéologiques entre les ministères entravent ultimement la coordination des actions publiques visant à soutenir le secteur des biocarburants. Le manque de coordination actuel entre les intervenants publics crée un vide institutionnel qui mène à des conflits inutiles entre les parties prenantes, en plus d'empêcher les investissements nécessaires dans le secteur des biocarburants.

Une coordination efficace, l'alignement des objectifs stratégiques, le partage de l'information et le soutien gouvernemental consolidé à long terme sont nécessaires, particulièrement si l'on considère la rareté des ressources et la complexité des enjeux. Un engagement en matière de coopération intragouvernementale pourrait faciliter la coopération dans des secteurs d'intérêt commun, la promotion d'une vision opérationnelle commune et le partage d'information et de ressources vitales. La coopération intragouvernementale est particulièrement importante lorsque divers ministères et organismes gouvernementaux cherchent à atteindre des objectifs similaires et se disputent les mêmes ressources.

La situation actuelle en matière d'énergies alternatives au Burkina Faso est un exemple du manque de cohésion entre les initiatives, du chevauchement des efforts, des multiples canaux hiérarchiques et de la concurrence pour le financement et la souveraineté des projets. Au lieu d'augmenter leurs chances de réussite commune et de tirer parti de la diversité organisationnelle en axant leurs efforts vers un objectif commun, les parties prenantes demeurent restreintes par leurs propres cultures, autorités, philosophies et pratiques, qui s'avèrent parfois incompatibles.

La liste ci-dessous présente les principaux intervenants et promoteurs qui se partagent officiellement la responsabilité et la supervision des enjeux en matière d'énergie renouvelable en général, et plus particulièrement des projets concernant les chaînes d'approvisionnement en biocarburants. Même si un grand nombre d'organismes publics semblent concernés, leurs rôles ne sont pas bien définis, ce qui rend difficiles la mise en œuvre des projets et politiques et la répartition des ressources. En plus du Ministère de l'Énergie (plus spécialement la Direction générale des énergies renouvelables), le Ministère de l'Agriculture et de la Sécurité alimentaire, le Ministère de l'Environnement, de l'Économie verte et du Changement climatique et le Ministère de l'Économie et des Finances, les intervenants suivants sont également impliqués au Burkina Faso :

- ANADEB Agence Nationale pour le Développement des Biocarburants (National Agency for the Promotion of Biofuels)
- ANEREE Agence Nationale des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (National Agency for

- APROJER Renewable Energies and Energy Efficiency Association pour la Promotion du Jatropha et des Énergies Renouvelables (Association for the Promotion of Jatropha and Renewable Energies)
- CICAFIG²² Comité interministériel chargé de la coordination des activités de développement des filières biocarburants (Interministerial Committee for the coordination of the domestic biofuel sector)
- CIRAD Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (Agricultural Research Centre for International Development)
- CNRST Centre national de la recherche scientifique et technologique (National Research Centre for Science and Technology)
- INERA Institut Nationale de l'Environnement et de Recherches Agricoles (Environmental Institute for Agricultural Research)
- IRAM Institut de Recherches et d'Applications des Méthodes de Développement (Research and Development Institute)
- IRSAT Institut de Recherche en Sciences Appliquées et Technologies (Research Institute for Applied Science and Technology)
- ROPPA Réseau des organisations paysannes et des producteurs agricoles (Network of farmers' organizations and agricultural producers)
- SP/CONEDD Secrétariat Permanent du Conseil National pour l'Environnement et le Développement Durable (National Council for Environment and Sustainable Development)
- UEMOA Union Économique et Monétaire Ouest Africaine (West African Economic and Monetary Union)
- UNAPROFIJA Union Nationale pour la Promotion de la filière Jatropha Curcas (National Union for the promotion of the Jatropha value chain)

Toutes les parties prenantes doivent coopérer et coordonner leurs efforts pour atteindre des objectifs communs. Tirer parti des capacités intergouvernementales et transformer les objectifs nationaux en actions unifiées sont des éléments essentiels à l'unification des efforts et, ultimement, à la réussite de la mission. Une planification unifiée qui tient compte des capacités de toutes les parties prenantes est particulièrement importante lorsqu'il est question de défis et de projets dont la réussite est tributaire des ressources disponibles.

Les objectifs communs en matière d'atténuation des changements climatiques, de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de réduction de la pauvreté, du développement rural et de remise en état des terres doivent être intégrés au niveau stratégique et coordonnés au niveau opérationnel, conjointement avec les activités des ministères et organismes gouvernementaux participants, des organismes internationaux concernés, des organismes non gouvernementaux et des représentants du secteur privé.

Au Burkina Faso, les dirigeants démocratiquement élus sont aussi encouragés à collaborer avec les chefs de tribus, puisque les structures tribales historiques conservent une importance actuelle. Les autorités morales traditionnelles peuvent offrir une certaine stabilité aux sociétés en transition. Pour les États où la démocratie a été bafouée, elles peuvent fournir une sage direction pour la rétablir. Au Burkina Faso, la société civile est un agent de promotion de plus en plus important en matière de développement durable et de bonne gouvernance, notamment pour ce qui est de la transparence, de l'efficacité, de l'ouverture, de la réactivité et de la responsabilisation. L'intégration délibérée des dirigeants de tribus et de représentants de la société civile pourrait contribuer à accroître le degré de responsabilisation. Si on lui en donne les moyens et qu'on la surveille de manière adéquate, une société civile dynamique peut devenir un important facteur de réforme et offrir un immense potentiel dans la formation d'une population informée et engagée. Afin d'assurer l'unité des efforts et de réduire le risque de problèmes d'efficacité coûteux, il est vital de permettre à tout partenaire d'un projet qui le souhaite de participer à la planification, et ce, dès que possible, afin de mettre au point un plan de mise en œuvre complet et accessible. L'intégration demandera dès le départ une clarification des rôles, des responsabilités et des objectifs.

Une compréhension commune constitue un préalable essentiel à cet effort intégré et concerté. Celle-ci contribuera à atténuer les conflits inutiles et les malentendus. À cet égard, l'État, le secteur privé et la société civile, dans leurs rôles respectifs, doivent agir en complémentarité plutôt qu'en substitution les uns aux autres. L'État contribuera à l'amélioration du marché en créant les institutions nécessaires, ce qui à son tour contribuera à accroître la confiance des investisseurs et à réduire les coûts de transaction. Cela sera possible grâce à la mise en œuvre de politiques sectorielles cohérentes et efficaces comprenant de bons modes de gouvernance et une attention particulière aux questions d'équité et de responsabilisation pour tous les intervenants participant aux initiatives de développement.

Les principales conclusions peuvent être résumées ainsi :

- i. La coopération intragouvernementale est essentielle et doit être fondée sur un environnement collaboratif dans lequel les participants sont encouragés à trouver des solutions et à partager l'information, les connaissances, les perceptions, les idées et les concepts.
- ii. Étant donné la spécificité multisectorielle des biocarburants, toute plateforme de coordination centralisée doit être dotée d'une autonomie opérationnelle qui garantisse sa neutralité, son indépendance et son autorité.
- iii. Malgré la nature multisectorielle des biocarburants, leur promotion du point de vue énergétique à lui seul n'est pas suffisante. Les politiques concernant les biocarburants qui traitent particulièrement des aspects techniques et économiques de la production de bioénergie sans suffisamment tenir compte des objectifs socioéconomiques et environnementaux liés à la production agricole sont inadéquates pour assurer le niveau

²² Le Comité interministériel responsable de la coordination des activités liées au développement du secteur des biocarburants a été établi en 2008 dans le but de promouvoir la consultation entre les intervenants institutionnels, de définir les politiques sur les biocarburants et d'établir un cadre d'actions concertées impliquant de multiples acteurs publics et privés. Ce groupe n'est toutefois plus actif.

de soutien et d'engagement nécessaire. S'éloigner de la dimension purement énergétique et intégrer l'enjeu dans le contexte plus vaste du développement rural pourraient faciliter la création de liens et la coopération entre de nombreux ministères, notamment ceux de l'Agriculture, de l'Énergie, de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement.

5.6 DEMANDE DU MARCHÉ ET ENGAGEMENTS DE CONSOMMATION DU PRODUIT NATIONAL

Les initiatives en matière d'énergie renouvelable liées au développement de cultures bioénergétiques en amont (qui requièrent la mobilisation de milliers d'agriculteurs pour cultiver de grandes étendues de terre) et la production de biocarburant qui en découle comptent sur les investisseurs pour leur fournir les grandes quantités de ressources financières qui leur sont nécessaires. Devant les capacités financières insuffisantes et les bilans fragiles des développeurs de ces projets, le soutien financier et les fonds fournis par des tiers dépendent en grande partie du financement de projet. Le financement de projet est un exercice d'identification des risques inhérents au projet. Plus la précision dans la quantification et le contrôle des risques existants est grande, mieux les différents intervenants pourront négocier l'allocation de chacun de ces risques aux parties ayant les ressources ou les capacités nécessaires pour y faire face. Le risque lié au marché joue également un rôle crucial dans le processus de financement. Sans marché et sans engagements d'achat fiables à l'égard des produits finis envisagés, il sera difficile d'encourager les investissements dans les intrants agricoles et de mobiliser les ressources nécessaires pour mettre en branle la production à grande échelle.

Une entente à long terme pour un volume défini de carburant, à un prix déterminé et idéalement conclue avec un partenaire solvable (comme une société de commerce de carburéacteur, une compagnie aérienne ou un consortium sur les carburéacteurs) permettrait de garantir la demande. Un tel arrangement aiderait les producteurs de carburant de remplacement à solliciter avec confiance les investisseurs extérieurs pour financer leur production.

Lorsque les compagnies aériennes et autres parties prenantes hésitent à conclure des engagements d'achat de carburant fiables, le risque se retrouve entièrement du côté des producteurs agricoles. Un accord d'achat de carburant bancable à long terme est l'élément crucial qui permettra d'enclencher le processus de financement par des tiers, lui-même essentiel à l'accroissement de la production commerciale pour assurer la disponibilité future de la matière première et des carburants d'aviation durables aux prix préalablement convenus. Le fait de conclure des accords d'achat opportuns avec les compagnies aériennes avant la mise en œuvre d'activités de plantation à grande échelle contribuera à mieux répartir les risques entre les différents intervenants, incitera les tiers à financer les projets et permettra d'accélérer la production de carburants de remplacement.

5.7 OPTIMISATION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE

Avant même de planifier le développement, la production et l'utilisation de carburants d'aviation durables et économiquement viables, il importe de définir une chaîne logistique intérieure fonctionnelle. Une telle chaîne pour la production de carburants d'aviation durables fait naître des possibilités sociales et économiques qui vont bien au-delà des paramètres directement liés à la matière première et aux carburants. La mise en place et l'optimisation de cette chaîne logistique dépendront, entre autres, de la région, de la matière première, du climat, des conditions agroéconomiques et sociales, ainsi que des infrastructures et éléments logistiques disponibles. S'il intégrait les besoins vitaux du pays en matière de nourriture et d'énergie à la chaîne de valeur des carburants de remplacement, le secteur de l'aviation civile deviendrait un réel catalyseur du développement économique et social pour les régions rurales du Burkina Faso en stimulant la croissance verte, en permettant la création d'emplois et en ouvrant de nouveaux marchés pour les agriculteurs et les producteurs. Il progresserait en même temps vers l'atteinte de ses ambitieux objectifs de réduction de son empreinte carbone.

En pratique, tous les éléments de la chaîne logistique des carburants d'aviation durables sont interreliés et exercent une influence les uns sur les autres. Par exemple, on choisira la technologie de conversion en carburant qui convient le mieux à chaque source de biomasse. Les progrès scientifiques et technologiques dans le domaine de la conversion de la matière première ont également un effet direct sur la qualité et la quantité des ressources pouvant être converties en carburant, ainsi que sur la recherche et le développement nécessaires pour aller de l'avant avec la production commerciale.

Bien qu'il existe déjà un certain nombre de technologies de conversion pour produire des carburants de remplacement, il est plus probable que la disponibilité de la matière première et les considérations logistiques afférentes soient les principaux facteurs déterminants de la faisabilité et de la durabilité de la production du carburant (voir figure 43). Les facteurs clés dans le développement d'une chaîne d'approvisionnement pour la production de carburant de remplacement sont des éléments d'ordre logistiques, comme le lieu de culture de la biomasse et la façon dont elle sera ensuite récoltée, stockée et traitée.

Outre les contraintes techniques et logistiques, il existe d'autres obstacles de taille en ce qui concerne le financement de projet et le risque. Les risques élevés associés aux projets de production de carburants durables affectent directement la volonté de participer des investisseurs, la disponibilité du financement et les conditions de celui-ci.

Pour limiter les coûts et, en fin de compte, pouvoir vendre les carburants d'aviation durables à un prix concurrentiel, il faut effectuer une intégration verticale contrôlée de toute la chaîne logistique et veiller à ce que les nombreuses parties prenantes collaborent entre elles – qu'elles représentent des intérêts privés, publics, politiques, techniques ou scientifiques.

Pour créer un équilibre entre tous les types de risques en présence (production, investissement, marché, prix, politique), la coopération et les partenariats intersectoriels s'imposent. Ainsi, le développement et le déploiement à long terme des carburants d'aviation durables exigent une coopération et une interaction étroites entre les organismes gouvernementaux pertinents, le secteur privé, le secteur de l'aviation et les différents intervenants de la chaîne logistique pour les carburants d'aviation durables afin de pouvoir tirer le meilleur parti des progrès technologiques et des procédés opérationnels. Les partenariats entre les intervenants aux différents niveaux de la chaîne de valeur semblent offrir l'avantage de concilier les intérêts de la plupart des parties prenantes.

Pour réduire les coûts de conversion en carburant de remplacement, on pourrait envisager de nouer des partenariats avec des propriétaires et exploitants de raffineries de pétrole et d'élaborer des stratégies visant la cotransformation ou le mélange de matières intermédiaires renouvelables avec du pétrole brut en utilisant les infrastructures existantes. Par exemple, cette stratégie a été validée par la compagnie Delta Airlines qui, en 2012, a acheté la raffinerie de ConocoPhillips située à Trainer, en Pennsylvanie – une installation d'une capacité de 185 000 barils par jour. En effectuant une telle transaction, Delta souhaitait atténuer le risque lié à la "marge de craquage" (la différence entre le prix du pétrole brut et celui du carburant d'aviation), et ainsi réaliser des économies de coûts. Delta espère que la raffinerie de Trainer lui permettra de produire du carburant d'aviation à un coût moindre que ce qu'elle paierait normalement sur le marché. Avec l'acquisition de la raffinerie de Trainer, Delta s'attendait à réduire ses coûts annuels de 300 millions \$ É.-U. En décembre 2016, la compagnie a décidé de commencer à commercialiser l'essence et le carburant diesel produits par la raffinerie plutôt que de faire la transition avant l'échéance des contrats en vigueur.

Pour boucler la boucle entre la culture de la matière première et la pleine intégration sur le marché à des tarifs prévisibles et concurrentiels, il importe tout autant de trouver des solutions de conversion efficaces et rentables que de se préoccuper des infrastructures et des conditions logistiques. À long terme, la pleine intégration des paramètres majeurs de la chaîne logistique s'annonce être la seule façon de surveiller et de contrôler les coûts de production pour pouvoir offrir des carburants d'aviation durables au secteur de l'aviation à des prix concurrentiels.

Sans intégrateur vertical majeur pour stimuler le développement global de toute la chaîne logistique, il sera difficile de gérer à des échelles appropriées la croissance simultanée et indépendante des chaînes d'approvisionnement en matière première et des installations de conversion. Comme le soulignait l'Aeronautics and Space Engineering Board, cette situation pourrait être particulièrement difficile pour les systèmes d'approvisionnement en matière première qui nécessitent plusieurs années pour atteindre la maturité ou une production suffisante et qui n'ont pas d'autres clients viables. Certaines incertitudes se font sentir si la matière

première devient disponible avant qu'on ne la réclame dans les installations de conversion : on se demande alors qui l'achètera, à quel prix, s'il sera possible de l'entreposer sans qu'elle se dégrade et qui paiera pour cet entreposage. Parallèlement, il faut trouver des partenaires prêts à investir dans la construction d'une installation de production sans avoir l'assurance que la matière première sera disponible en temps voulu.

L'intégration ne signifie pas nécessairement que toutes les étapes du processus doivent se dérouler au même endroit. Pour réaliser des économies d'échelle et tirer profit des avantages concurrentiels, il peut être nécessaire d'exécuter chacune des étapes dans différentes installations, localement ou dans d'autres pays. Par exemple, dans le cas du Burkina Faso, il pourrait être souhaitable d'arrêter la chaîne logistique intérieure à l'étape du traitement de base des matières premières (T1) et d'effectuer les opérations plus complexes de raffinage et d'hydrotraitement (T2) dans des emplacements stratégiques à l'étranger. Cette segmentation géographique permettrait au Burkina Faso de profiter des infrastructures existantes de raffinage, de transport, de stockage et de manutention servant à la production de carburants d'aviation durables sans avoir à contracter d'obligations financières additionnelles.

En revanche, une focalisation temporaire et délibérée sur la production de biodiesel permettrait d'envoyer un message fort quant à la volonté de participation du pays, et présenterait parallèlement un avantage potentiel pour la flotte terrestre de l'aéroport, qui fonctionne au diesel. Selon toute vraisemblance, les contraintes liées à l'infrastructure, à la mécanisation, au transport et aux exigences en matière de dépenses en capital risqueraient d'entraver, voire d'empêcher l'établissement d'une chaîne logistique fonctionnelle permettant d'exploiter localement les sources de biomasse disponibles. Au lieu de viser directement une production trop ambitieuse de carburants d'aviation durables, en fonction des contraintes identifiées, il pourrait être souhaitable d'adopter une approche progressive qui permettrait l'implantation graduelle d'une chaîne logistique comprenant aussi initialement des options d'électrification rurale et de production de biodiesel comme étapes préliminaires tangibles vers la production future de carburants d'aviation durables.

Pour minimiser les perturbations potentielles sur la chaîne logistique, réduire les coûts en capital et diminuer les risques d'investissement, les solutions technologiques locales ou régionales pleinement intégrées de conversion de la biomasse (T2) ne pourront être stratégiquement envisagées par le Burkina Faso que lorsque le pays aura atteint le seuil de production minimale de matière première et qu'il aura obtenu des engagements fermes de la part de compagnies aériennes et d'investisseurs sérieux. De plus, pour stimuler et intégrer les efforts des différentes parties prenantes de la chaîne logistique pour les carburants d'aviation durable, il faudra mettre en place des politiques et des initiatives de collaboration adéquates.

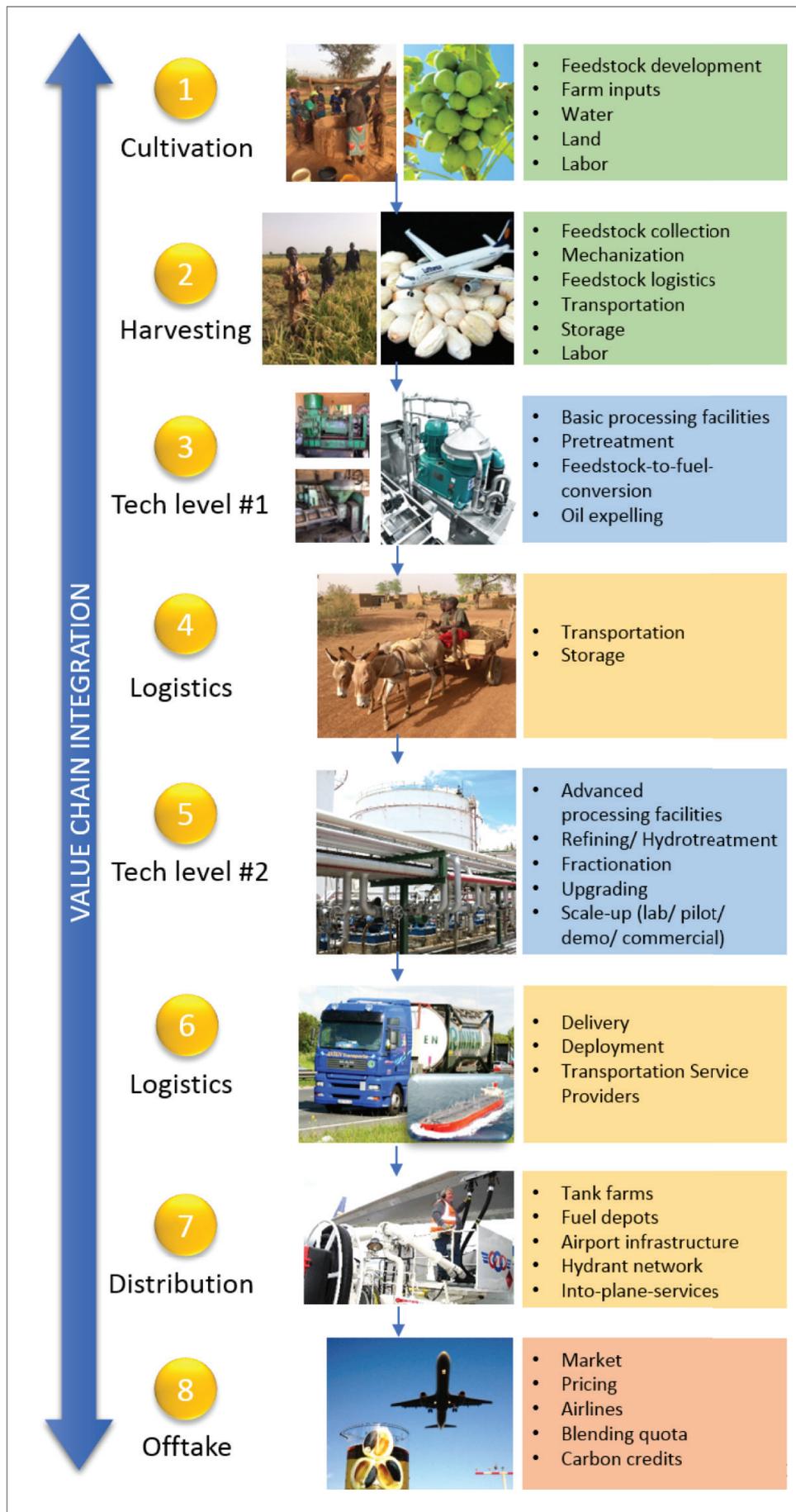


FIGURE 43
Chaîne logistique pour les carburants d'aviation durables

5.8 TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

Il est permis de croire que l'aviation durable dans le contexte du Burkina Faso va au-delà de l'adoption dans le secteur de l'aviation de carburants à faible teneur en carbone ou de pratiques permettant d'en limiter les émissions. L'avenir de l'aviation durable au Burkina Faso est tributaire d'une importante aide financière, du développement des capacités et du transfert de technologie pour pallier plusieurs des lacunes existantes au chapitre de l'infrastructure. Le transfert de technologie, l'étoffement des capacités et l'amélioration des techniques agricoles favoriseront non seulement l'accès à l'énergie pour les communautés rurales du Burkina Faso, mais ils permettront également d'augmenter la production alimentaire, stimuleront la capacité d'entreprendre des activités génératrices de revenus, conféreront aux produits une valeur ajoutée, accroîtront l'autonomie des femmes et protégeront les sols contre l'érosion. Les pays développés ont l'obligation générale de faciliter le transfert de technologies respectueuses de l'environnement vers les pays en développement pour favoriser la réduction des émissions dans les secteurs clés, comme le transport et l'aviation. L'article 4 1) c) de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) demande explicitement aux pays industrialisés de promouvoir et de favoriser le transfert de technologies, de pratiques et de procédés permettant de contrôler, de réduire ou de prévenir les émissions anthropiques de GES dans le secteur des transports. Il stipule également que les pays développés doivent promouvoir, faciliter et financer, selon les besoins, le transfert de technologies respectueuses de l'environnement ou l'accès à celles-ci, ainsi que le savoir-faire nécessaire pour que les pays en développement puissent atteindre leurs objectifs de réduction des émissions. Toutefois, l'assurance d'un niveau de protection adéquat des droits en matière de propriété intellectuelle constitue une condition préalable au transfert des technologies de propagation par culture de tissus et d'expulsion de la biomasse qui sont requises de toute urgence. Les fournisseurs internationaux de technologie doivent s'assurer que leurs innovations et leurs avancées technologiques ne seront pas utilisées à mauvais escient ou déployées sans permission ou sans la protection du régime national de réglementation pertinent. Pour attirer des investissements connexes, le Burkina Faso doit s'assurer que les fournisseurs de technologie ne rencontrent pas d'obstacles institutionnels ou bureaucratiques susceptibles d'inhiber le transfert de technologie.

6. SOURCES DE FINANCEMENT

6.1 PARTENARIATS PUBLIC-PRIVÉ

Les partenariats public-privé (PPP) et la coopération entre le Gouvernement du Burkina Faso et le secteur privé comprenant les entreprises, les organisations non gouvernementales et le milieu universitaire sont essentiels pour permettre au pays de relever ses principaux défis d'ordre scientifique et technique et d'obtenir du financement international. Si l'approche PPP est un outil stratégique misant sur la mobilisation du financement et de l'expertise du secteur privé, elle permet également une meilleure allocation des ressources publiques et accroît généralement le niveau de confiance du secteur privé. L'Assemblée nationale du Burkina Faso a adopté une nouvelle loi sur les partenariats public-privé en juillet 2017. L'un des premiers projets d'énergie renouvelable concerne l'électrification solaire de 150 écoles et de 30 collèges d'enseignement général. Puisque le Burkina Faso a déjà mis en place un cadre législatif et réglementaire propice aux PPP, la conclusion de tels partenariats pour commercialiser la production de biocarburants apparaît faisable. Toutefois, comme le mentionne la présente étude (voir section 6.5), il importe d'améliorer la coordination entre les différents ministères du Gouvernement pour l'approbation des projets. Pour le Gouvernement du Burkina Faso, il serait souhaitable d'envisager la création d'un point d'accès unique qui permettrait le traitement, l'exécution et la surveillance centralisés des projets d'énergie renouvelable.

6.2 REVENUS DE L'EXPLOITATION AURIFÈRE : REDISTRIBUTION DE LA RICHESSE NATURELLE

De 2008 à 2015, les mines d'or du Burkina Faso ont généré pour le Trésor un revenu approximatif de 2 milliards \$ É.-U., pour une production d'environ 144 tonnes d'or. La contribution moyenne au cours des trois dernières années avait été de 311 millions \$ É.-U. par an.

L'exploitation minière pourrait représenter une importante source de financement pour le développement du secteur agricole et la mise en œuvre de projets de production de biocarburants ouvrant droit au crédit. À cet égard, le secteur minier joue un rôle particulièrement ambigu puisqu'il est perçu comme étant à la fois bénéfique et nuisible. Les activités de prospection et de production aurifères sont en croissance : elles génèrent la majeure partie du revenu national brut et représentent environ 70 % des revenus totaux d'exportation. Cependant, les activités minières sont responsables, dans des proportions démesurées, de la détérioration de l'environnement, de la perte de terres agricoles et des inégalités sociales, et les besoins excessifs en énergie font ressortir cette disparité encore davantage. En effet, alors que moins de 3 % de la population rurale a accès à l'électricité, la recrudescence récente de l'exploitation aurifère et la consommation énergétique de ce secteur industriel n'ont fait qu'aggraver la pénurie d'électricité chronique du pays.



PHOTO 21

Exploitation aurifère artisanale au Burkina Faso

Dans les dernières années, la découverte d'or et le début de l'exploitation minière à grande échelle ont détourné l'attention générale du secteur agricole. Le Burkina Faso, quatrième plus grand producteur aurifère en Afrique, enregistre désormais la croissance la plus rapide au monde grâce à ses mines extrêmement productives et à ses gisements à très forte teneur.

L'extraction de l'or est dangereuse pour l'environnement à pratiquement toutes les étapes et rend la terre impropre à l'agriculture. La construction et l'exploitation impliquent généralement le défrichage des terres puisque la plupart des mines d'or modernes du Burkina Faso sont à ciel ouvert. Cette situation a entraîné une hausse importante de la déforestation, du détournement de cours d'eau et de l'érosion. Une fois le minerai extrait, la séparation de l'or des autres matières se fait au moyen de produits chimiques dangereux qui peuvent contaminer le sol et les eaux souterraines. Si la strate superficielle du sol n'a pas été préservée à temps, la fermeture de la mine peut entraîner des dommages environnementaux irréversibles.

En dépit des dommages qu'il cause à l'environnement, le secteur de l'exploitation aurifère est en quelque sorte prédestiné à contribuer au développement socioéconomique, à la croissance et à l'autonomie du pays.

Toutes les mines d'or du Burkina Faso appartiennent majoritairement à des multinationales étrangères. Par conséquent, les avenues principales par lesquelles le pays peut bénéficier des revenus d'exploitation minière sont les recettes fiscales du gouvernement, les 10 % d'actions gratuites conservées par l'État (intérêt passif), et le droit à une redevance variable sur la production aurifère à un taux de 3 à 5 % (cf. art. 13 du permis d'exploitation de la mine d'Essakane). L'efficacité de ce mécanisme dépend quant à elle de l'équité des accords de concessions minières qui ont été négociés.

Le mode de répartition des revenus de l'exploitation minière entre le Gouvernement central et les collectivités locales des zones minières et rurales est un sujet hautement controversé au Burkina Faso. La répartition des recettes additionnelles de l'exploitation minière pour répondre aux besoins locaux plutôt que nationaux est une décision politique qui relève de la compétence du Gouvernement souverain. Peu de pays qui pratiquent l'exploitation minière ont réussi à résoudre cette question de manière satisfaisante.

Toutefois, les recettes provenant des minéraux et de l'exploitation minière sont essentielles pour lutter contre le changement climatique et contribuer à l'atteinte des objectifs en matière de développement durable. Bien des États d'Afrique se demandent depuis longtemps comment faire pour s'assurer que les richesses issues des ressources minières contribuent au développement économique durable. Le problème est d'autant plus pressant lorsque le pays en question possède des ressources en abondance, mais obtient de piètres résultats à l'égard de nombreux indicateurs de développement.

Le préambule de l'accord de concession du projet Yaramoko exploité par Roxgold Sanu S.A. (2015) reconnaît explicitement que les substances minérales du Burkina Faso jouent un rôle important dans le développement économique du pays. De plus, le nouveau code minier adopté en 2015 propose diverses mesures pour assurer l'affectation expresse de ressources financières au "développement local" et à la "réhabilitation des sites". Le code prévoit la création de quatre nouveaux fonds, dont un fonds de développement local et un fonds de réhabilitation. Par conséquent, les titulaires de permis d'exploitation sont tenus de verser au fonds de développement 1 % de leur chiffre d'affaires mensuel brut (ou de la valeur des minéraux extraits). De plus, l'État doit verser 20 % de ses revenus d'exploitation minière (soit les redevances reçues des exploitants de mines) au fonds de développement. De la même façon, les sociétés minières doivent verser au fonds de réhabilitation une cotisation annuelle d'un montant défini par une étude d'impact environnemental. Selon les interprétations des notions de "développement local" et de "réhabilitation des sites", il pourrait actuellement s'avérer possible d'obtenir directement du secteur minier les fonds requis de toute urgence pour financer certains projets agricoles. En ce qui concerne les dispositions liées aux obligations de protection de l'environnement figurant dans les accords existants (cf. art. 11 du permis d'exploitation de la mine d'Essakane ou art. 11 de la convention minière de Roxgold Sanu S.A. pour le projet Yaramoko), on peut se demander si le Gouvernement du Burkina Faso possède l'autorité réglementaire nécessaire pour faire appliquer les normes en vigueur en matière d'environnement, de développement, de réhabilitation, de santé ou autre. En d'autres termes, une partie des revenus de l'exploitation aurifère pourrait être utilisée pour s'attaquer au problème du changement climatique et répondre aux besoins les plus pressants en matière de développement durable, dont voici quelques exemples :

- subventions d'engrais ainsi des intrants essentiels ;
- programmes de soutien des prix et établissement d'un prix plancher des matières premières ;
- infrastructure de marché élémentaire ;
- laboratoires de propagation des semences.

Les objectifs stratégiques principaux du PNDES semblent également appuyer une redistribution partielle de la richesse naturelle. D'ailleurs, d'après l'objectif n° 3.5.1, la gestion durable des ressources naturelles inclut explicitement la lutte contre l'exploitation abusive des ressources minérales.

Parmi les enjeux concrets qui devront être traités, mentionnons l'accroissement de l'impact du secteur minier sur le développement local, l'amélioration du contrôle et de la surveillance des activités minières et l'utilisation appropriée des revenus miniers.

Si le Burkina Faso démontrait sa volonté de rediriger ne serait-ce qu'un petit pourcentage des revenus de l'exploitation aurifère ou des autres activités minières vers les projets de production de bioénergie et de biocarburants durables, ce signe d'engagement responsable et autonome pourrait donner lieu à un investissement proportionnel de la part des gouvernements étrangers, des donateurs et des investisseurs.

6.3 MISER SUR LE REBOISEMENT ET L'AGROFORESTERIE

En plus du jatropa, deux autres espèces de plantes indigènes ont été identifiées comme source potentielle de matière première pour la production de biocarburant, soit l'anacardier et le karité. Pour surmonter les faibles rendements et les contraintes en matière de logistique et d'infrastructure et pouvoir mettre en place des installations de production de base, les besoins en financement sont importants.

Pour alléger la pression découlant du financement public et privé, des modèles novateurs d'évaluation et de fixation des prix pourraient s'avérer nécessaires. D'une part, les avantages socioéconomiques connexes pourraient être quantifiés et utilisés pour payer les coûts de production (voir sections 6.4 et 6.6). D'autre part, l'établissement d'un prix équitable du carbone pourrait favoriser la viabilité commerciale des projets de production de matière première à grande échelle.

Les compensations carbone reconnues comprennent les crédits de réduction d'émissions du mécanisme pour un développement propre de la CCNUCC, qui doivent être achetés par les États aux pays développés ou dans le cadre d'autres programmes officiels de réduction des émissions de carbone, comme le Verified Carbon Standard (VCS) ou le Gold Standard. Un "crédit" de compensation échangeable est émis pour chaque tonne d'équivalent CO₂ qui n'a pas été émise grâce à des activités admissibles de réduction des GES. Ces crédits peuvent ensuite être achetés et retirés par des tiers, comme les compagnies aériennes et les États, pour contrebalancer officiellement leurs émissions et contribuer à l'atteinte de leurs objectifs de réduction des GES.

Les réductions des émissions de GES peuvent être certifiées et vendues en tant que crédits sur le marché du carbone procurant ainsi des recettes supplémentaires qui peuvent faciliter le déploiement de projets de carburants d'aviation durables et réduire le coût d'investissement de ces projets. Il existe deux moyens possibles de générer des crédits de carbone échangeables : la première consiste à produire et à utiliser un carburant d'aviation durable en remplacement du carburant d'aviation traditionnel, et la seconde à exécuter des projets ou des activités qui mèneront à la production et à l'utilisation de carburants de remplacement, comme la séquestration du carbone dans le cadre d'activités de reforestation et de culture bioénergétique (le développement et la production de matière première à partir de la biomasse, par exemple).

Selon un autre scénario, la génération de crédits de carbone ne serait pas directement liée aux réductions des émissions rattachées à l'utilisation de carburants de remplacement, mais à des aspects spécifiques du processus de production de matière première, lequel constitue un jalon important en amont de la chaîne logistique globale. Le fait de relier la production de matière première à la génération de crédits carbone admissibles pourrait inciter les exploitants d'aéronefs à s'engager financièrement dès le début du processus. Les méthodes de définition du portefeuille de programmes de

compensation des émissions de carbone sont encore en cours de développement. Le Conseil de l'OACI déterminera quels types de programmes de compensation, quelles unités d'émissions et quels crédits carbone pourront en fin de compte être utilisés par les exploitants d'aéronefs soucieux de se conformer aux exigences réglementaires en matière de compensation.

En se projetant au-delà de la portée originale de la chaîne de valeur de l'énergie et du biocarburant pour inclure également les retombées positives de la reforestation, de la réhabilitation des terres et de la séquestration du carbone, le Gouvernement du Burkina Faso pourrait tirer parti de nouvelles sources de financement nécessaires.

En plus de la récupération d'énergie et de la production de biocarburant, la reforestation et l'agroforesterie comportent une dimension additionnelle qui a ses propres mérites et avantages. Que la recherche de soutien financier soit motivée par des préoccupations en matière d'énergie renouvelable ou de conservation des forêts, ces enjeux représentent les deux côtés d'une même médaille et sont tous deux liés à la grande cause de la lutte contre le changement climatique. Dans l'idéal, ce lien peut s'avérer mutuellement avantageux. Il peut en effet avoir un effet stabilisant sur la mise en œuvre des projets et assurer leur viabilité générale.

Une combinaison équilibrée de politiques mettant l'accent sur la reforestation peut poursuivre des objectifs parallèles, comme :

- 1) la mobilisation du financement international pour :
 - a. réduire les émissions de GES ;
 - b. faciliter la réduction de la déforestation et de la dégradation des forêts ;
 - c. promouvoir l'aménagement durable des forêts ;
- 2) paver la voie à l'établissement d'une chaîne de valeur du biocarburant distincte et à part entière.

Selon les problèmes de compatibilité d'utilisation des terres rencontrés et les plantes et arbres en cause, les projets de reforestation, d'agroforesterie et de séquestration du carbone au Burkina Faso pourraient également être considérés comme des projets d'énergie renouvelable. Il existe plusieurs exemples de référence en Afrique (comme le projet REDD+ de la Réserve nationale de Gilé, dans la région du Zambézia au Mozambique, ou le Projet de développement de l'infrastructure d'anacarde en Zambie) où la commercialisation connexe de crédits de carbone (accordés pour chaque tonne d'équivalent CO₂ évitée, séquestrée ou réduite) révèle des possibilités de financement intéressantes.

6.3.1 PROJET D'ANACARDE DU BASSIN DE LA COMOÉ

En 2010, le Burkina Faso a été l'un des huit bénéficiaires pilotes du PIF, une initiative du Fonds d'investissement pour le climat de la Banque mondiale. L'objectif du PIF est de réduire la déforestation et la dégradation des forêts, et par le fait même de contribuer à la réduction des émissions de GES, à la protection des stocks de carbone forestier et à la lutte contre la pauvreté. En 2013, l'association de producteurs agricoles burkinabè Wouol a soumis une proposition de projet d'appui au développement de

l'anacarde dans le bassin de la Comoé (qui couvre les régions des Cascades, des Hauts Bassins et du Sud-Ouest). La demande de financement a été acceptée.

Les anacardiens présentent de nombreux avantages :

- 1) ils sont une source de revenus pour les régions rurales ;
- 2) ils aident à restaurer les sols dégradés ;
- 3) ils permettent la séquestration du carbone (~ 0,33 t éq. CO₂/ha) dans les zones où le sol est de plus en plus dégradé.

Il est important de noter que les anacardiens ont d'abord été introduits au Burkina Faso dans ce but, et non pour la production des noix d'anacarde. Ainsi, on s'attend à ce que la plantation prévue de 25 000 ha d'anacardiens en agroforesterie accroisse la capacité de séquestration du carbone et réduise la pauvreté rurale, ce qui bénéficierait directement à des milliers de producteurs et de petits transformateurs. D'autres impacts sociaux positifs sont attendus. En effet, la culture de l'anacardier permettrait notamment de garantir et de diversifier la production agricole, de renforcer la sécurité alimentaire et d'accroître la disponibilité des infrastructures et équipements de production, de transformation et de stockage.

Le projet est officiellement désigné comme une initiative pour pallier les changements climatiques, mais les 25 000 ha de nouvelles plantations d'anacardier qui viendront s'ajouter aux zones de culture existantes permettront également d'accroître la disponibilité de coques d'anacarde et, par conséquent, de baume de cajou. Avec une densité de plantation de 60 anacardiens/ha (permettant aux producteurs de cultiver simultanément d'autres espèces végétales, comme le gingembre, l'hibiscus, le sésame, les pois et les arachides sans créer de pression additionnelle sur la terre) et un rendement amélioré de 800 kg/ha, une capacité de production additionnelle de 20 000 tonnes de noix d'anacarde crues par année fournira environ 14 000 tonnes de coques pour un contenu en huile récupérable de 2 800 tonnes. Cette source de matière première pour la production de biocarburant s'ajoute aux avantages décrits ci-dessus et au potentiel de commercialisation des 3,8 millions de tonnes d'émissions de CO₂ que le projet devrait générer.

Le projet d'anacarde sera mis en œuvre sur une période de cinq ans (2017-2021) par une unité de coordination de projet relevant du ministère de l'Environnement, de l'Économie verte et du Changement climatique. Les principaux indicateurs de rendement à surveiller comprennent, entre autres :

- 1) la productivité des anacardiens ;
- 2) la quantité de noix d'anacarde traitées et certifiées ;
- 3) la superficie des nouvelles plantations agroforestières ;
- 4) la séquestration additionnelle de CO₂ ;
- 5) le nombre d'emplois créés dans le sous-secteur de l'anacarde ;
- 6) le nombre d'agriculteurs ayant reçu une formation sur les bonnes pratiques en matière d'agriculture biologique ;
- 7) le nombre de coopératives recevant un soutien en gestion agricole (y compris les coopératives de femmes) ;
- 8) le nombre d'unités de transformation construites ou modernisées.

6.3.2 PROJETS DE REBOISEMENT DE PLANTATIONS DE KARITÉ (GHANA ET MALI)

Puisque le potentiel de production de matière première des plantations d'anacardiens demeure quelque peu limité, les projets de reforestation avec des plantations de karité semblent être une option particulièrement attrayante pour le Burkina Faso. Le karité est omniprésent dans ce pays. Il devrait être possible d'intensifier la production de noix de karité dans la partie sud-ouest du pays et dans la région du Plateau-Central, et cette intensification devrait à son tour entraîner une augmentation du revenu de la population, tout en permettant la réduction des émissions de GES grâce à l'amélioration des pratiques agricoles et forestières.

La production de noix de karité passera d'un système de récolte exclusive de noix sauvages à un système d'agroforesterie semi-intensif optimisé, et cette transition apportera plusieurs avantages simultanés, dont l'atténuation du changement climatique, l'augmentation de la résistance à celui-ci, la stimulation du développement socioéconomique et l'obtention de matière première pour la production de biocarburant. Les probabilités de réussite sont tributaires de la capacité à relever certains défis liés notamment aux règles, règlements et incitatifs locaux, à l'utilisation de variétés domestiques et au contexte futur du marché, tant pour le carbone que pour le beurre de karité commercialisable. Elles dépendent également de l'accessibilité du financement et de la création subséquente d'installations de transformation des coques de noix.

Le karité sauvage est une espèce à croissance lente, ce qui nuit à la participation des agriculteurs ruraux dans des projets visant à accroître la population d'arbres à karité. Ainsi, il serait crucial de recourir à des variétés domestiques puisqu'elles produiraient des récoltes hâtives, stables et fiables en plus de présenter une bonne tolérance aux maladies.

6.3.3 PROJETS DE PLANTATIONS DE JATROPHA EN AGROFORESTERIE (MALI ET SÉNÉGAL)

Les pratiques d'utilisation des sols qui accroissent les réserves de biocarbone terrestre préviennent les émissions de GES et peuvent donc être considérées comme des éléments clés pour la lutte contre le changement climatique mondial ou l'atténuation de celui-ci. Selon la conception des projets et leurs mécanismes de validation, de surveillance et de vérification, les pratiques de gestion des sols comme l'agroforesterie et le boisement à base de jatropha qui accroissent l'absorption de CO₂ sont susceptibles de générer des crédits de carbone pouvant être commercialisés. Parallèlement, les projets agroforestiers à base de jatropha se trouvent également à fournir de la matière première pour la production de biocarburant. Financer des efforts de commercialisation de crédits de carbone pourrait donc indirectement favoriser la production de biocarburant.

Par exemple, le projet de Jatropha Mali Initiative (JMI) a été validé en 2012 comme l'un des premiers projets d'agroforesterie d'Afrique de l'Ouest respectant le VCS. Le projet, qui se déroule dans la région de Kayes, dans le sud-ouest du Mali, développe

des systèmes agroforestiers basés sur la culture de jatropha sur 15 000 ha de terres dégradées. Le jatropha permet de stabiliser le sol et d'en améliorer la stabilité. De plus, il offre une protection contre le vent. JMI travaille avec des milliers d'agriculteurs individuels regroupés au sein de l'union régionale des sociétés coopératives des producteurs de pourghère du cercle de Kita. Chaque agriculteur a reçu une parcelle de 0,5 à 2 ha pour la plantation de jatropha selon une densité 1 200 arbres/ha.

De la même façon, le projet Jatropha Agroforestry Project Senegal a été validé en vertu du VCS en 2013. Il se déroule dans des régions semi-rurales du Sénégal, près de Fatick, de Kaolack et de Kaffrine. Ce projet voué au stockage du carbone (dans la biomasse végétale et le sol) repose sur des pratiques de gestion durables. Il vise également à créer des possibilités de revenus et de développement pour la population locale. Le promoteur de ce projet est l'African National Oil Corporation (ANOC), qui collabore avec 20 villages et plus de 7 000 agriculteurs.

6.4 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DUES À LA DÉFORESTATION ET À LA DÉGRADATION DES FORÊTS (REDD+)

La dégradation des sols au Burkina Faso progresse à un rythme annuel de 250 000 à 400 000 ha. Quant à la couverture forestière, elle rétrécit de 110 000 ha chaque année.

La communauté internationale est consciente du rôle que jouent les forêts et les arbres dans la régulation du climat. Elle a donc instauré un mécanisme visant à réduire les émissions issues de la déforestation et de la dégradation forestière et à favoriser la conservation et la gestion durable des forêts et des stocks de carbone forestier. Ce mécanisme est généralement désigné par le sigle REDD+. Il se rattache au concept de finance du carbone élaboré en 2008 dans le cadre de la CCNUCC. Le concept encourage la société à établir la valeur financière des forêts en fonction de leur potentiel de séquestration et de stockage du carbone, ainsi que des autres services écosystémiques. Le REDD+ a été reconnu comme une stratégie d'atténuation et une mesure d'incitation financière selon l'article 5 de l'Accord de Paris de 2015.

En vertu du mécanisme REDD+, les pays tropicaux doivent recevoir une compensation financière pour l'atteinte de leurs objectifs en matière de réduction de la déforestation et de la dégradation forestière, de gestion durable des forêts, de conservation des stocks forestiers de carbone et de renforcement de la capacité de séquestration du carbone des forêts. La protection des forêts est considérée comme l'une des mesures d'atténuation les plus prometteuses pour combattre le changement climatique ; cela dit, les paiements compensatoires pour le carbone attendus ne représentent qu'une partie des avantages que la conservation de la forêt et des arbres peut apporter aux pays en développement. Au-delà des avantages liés au carbone, les projets de carbone forestier

offrent également une foule d'avantages environnementaux et sociaux connexes, souvent appelés coavantages dans le cadre du REDD+, comparativement aux initiatives de réduction des émissions de carbone des autres secteurs, comme la gestion des gaz d'enfouissement. Parmi ces avantages, mentionnons l'amélioration des forêts primaires riches en biodiversité, la création de moyens d'existence durables pour les communautés locales appauvries, la protection des bassins hydrographiques, le renforcement de la résilience climatique des cultures produites de façon durable, ainsi qu'une foule d'autres services écosystémiques comme l'atténuation des risques d'inondation, la réduction de l'érosion des sols et la préservation des ressources en eau.

De nombreux programmes ont été conçus pour soutenir les États et les autorités infranationales dans le développement et la mise en œuvre de programmes REDD+ de financement carbone et de paiements basés sur les résultats. En voici des exemples :

- Le Programme de collaboration des Nations Unies sur la réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement (ONU-REDD), un programme de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le PNUD et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE).
- Le Fonds de préparation du Fonds de partenariat pour le carbone forestier géré par la Banque mondiale soutient les efforts des pays en développement des régions tropicales et subtropicales pour l'adoption de stratégies REDD+, la définition de niveaux d'émissions de référence, la conception de systèmes de mesure, de notification et de vérification (MNV), et l'implantation de mécanismes de gestion nationaux pour le REDD+ comprenant des mesures de protection environnementales et sociales.
- Le REDD Early Movers Programme (REM), un programme du ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement (BMZ). Le REM met l'accent sur l'intégration des différents secteurs de l'agriculture et offre des conseils techniques et politiques sur le développement de systèmes fonctionnels pour le financement du carbone, ainsi que des services de consultation sur les programmes de partage des bénéfices sensibles au genre, sur les mesures de protection et la surveillance et sur le développement de registres, de niveaux de référence et de systèmes de MNV conformes aux exigences du REDD.
- L'Initiative pour des paysages forestiers durables du Fonds biocarbone géré par la Banque mondiale au nom de l'Allemagne, de la Norvège, du Royaume-Uni et des États-Unis. Le programme est centré sur le REDD+ et la planification de l'utilisation des sols dans les pays en développement ; il utilise le financement basé sur les résultats pour engendrer des changements au niveau du paysage. Il promeut la réduction des émissions de gaz à effet de serre grâce au contrôle de la déforestation et de la dégradation des forêts dans les pays en développement, à l'agriculture durable, à une meilleure planification de l'utilisation des sols et à l'adoption de politiques et de pratiques plus sensées à cet effet.

- Les programmes pilotes sans but lucratif JNR (Jurisdictional and Nested REDD+) du Verified Carbon Standard (VCS). Ces programmes exécutés conjointement avec des partenaires de la société civile et des gouvernements hôtes visent à relier les différents volets du développement de politiques et de programmes REDD+ à l'échelle nationale et infranationale, et de constituer un bassin informatif pour les décideurs politiques.
- La Governors' Climate and Forests Task Force (GCF). Le GCF, ou groupe de travail sur le climat et les forêts, est un effort de collaboration infranational entre 29 États et provinces du Brésil, de l'Indonésie, de la Côte d'Ivoire, du Mexique, du Nigéria, du Pérou, de l'Espagne et des États-Unis. Le GCF promeut le développement rural à faibles émissions et conforme au REDD+. Il cherche à relier ces activités avec les programmes de conformité et les programmes volontaires afin de réduire les émissions de GES.

Selon les données agrégées d'Ecosystem Marketplace, en 2016, la valeur cumulative des projets de compensation des émissions de carbone mis en œuvre dans le domaine de la conservation forestière s'élevait à 480 millions \$ É.-U., avec un prix moyen de 5,02 \$ É.-U. par tonne d'équivalent CO₂. Par comparaison, le volume transactionnel pour les projets de plantation d'arbres était de 293 millions \$ É.-U. avec un prix moyen de 7,68 \$ É.-U. par tonne d'équivalent CO₂, et les projets de gestion forestière améliorée affichaient une valeur cumulative de 120 millions \$ É.-U. pour un prix moyen de 8,42 \$ É.-U. par tonne d'équivalent CO₂.

Au Burkina Faso, la création de la Direction générale de l'économie verte et du changement climatique intégrant le REDD+ fournit maintenant au ministère de l'Environnement un cadre adéquat pour assurer la mise en œuvre et la supervision de toutes les activités REDD+ liées au financement du carbone.

6.5 GESTION DU SURCÔÛT DES SAF

Le coût des SAF par rapport au carburant d'aviation actuel a diminué nettement depuis leur première introduction en 2008, mais il demeure une importante différence de prix ; la réduction des émissions de GES sur le cycle de vie se fait à un coût de production de trois fois à cinq fois supérieur à celui des carburants provenant du pétrole. Avec un prix moyen du carburéacteur, pour 2017, de 509,20 \$ É.-U./Mt, cela équivaut à un prix moyen du carburant d'aviation alternatif de l'ordre de 1,527 à 2,546 \$ É.-U./tonne. Dans un récent rapport pour le secteur aéronautique norvégien et l'exploitant d'aéroport Avinor, la Société danoise d'ingénierie, de conception et de conseil, Rambøll, estime le coût de la production des biocarburants d'aviation à 0,90 à 3,20 \$ É.-U./litre, comparé au carburant d'aviation actuel à 0,50 \$ É.-U. à 0,64 \$ É.-U./litre²³.

Ces variations et le surcoût des SAF dépendent grandement des hypothèses qui entourent le procédé de production des SAF, de la matière première utilisée, de la technologie de production, de l'échelle de l'usine, de la fraction du biocarburant d'aviation incluse dans le mixte de biobrut, de l'environnement politique spécifique et d'autres facteurs et éléments de coûts. Les principaux facteurs de coûts de production des SAF ont le coût et la composition de la matière première, le coût du capital, l'infrastructure pétrochimique, le rendement global de la conversion, la qualité et la composition des SAF produits, les dépenses d'exploitation, les exigences financières et la logistique. Selon Rambøll, l'extrémité basse du coût de production des SAF peut être réalisée uniquement grâce à des carburants dérivés par le procédé HEFA, qui utilise comme matière première des oléagineux et des graisses animales, de ressources de bioénergie très pertinentes pour la production au Burkina Faso.

Pour le remplacement envisagé à long terme des carburants à base de pétrole par des SAF, les vrais défis vont au delà de la seule science. Les obstacles les plus importants au déploiement commercial des SAF sont économiques plutôt que technologiques. Il y a peu de doute qu'une multitude de technologies innovatrices de conversion de carburant peuvent produire un carburant qui reproduit le carburant d'aviation à partir de matière première brute alternative durable. Toutefois, le gros problème est de réaliser cette opération de manière économique, abordable et à l'échelle qu'exige l'industrie de l'aviation. La production de carburant peut être excessivement coûteuse si le rendement de biomasse est insuffisant, la disponibilité de la biomasse limitée ou la technologie de conversion inefficace ou à forte intensité de capital. À l'exception des compagnies aériennes individuelles qui se sont dites disposées à payer une surcharge "volontaire" de durabilité pour les petites quantités à l'échelle de démonstration des SAF, les compagnies aériennes, de manière générale, ne sont pas prêtes à payer un prix plus élevé pour des SAF par rapport à celui du carburant d'aviation actuel.

Afin de combler l'écart entre les coûts de production actuels de SAF et les prix des carburants d'aviation actuels, et de stimuler le déploiement à l'échelle commerciale des SAF, il faut d'autres modèles de tarification. Dans ce contexte, la quantification et la monétisation des dommages climatiques évités et des avantages accessoires, comme il est illustré dans la **figure 44**, peuvent offrir une solution théorique.

²³ Rambøll, BIOCABURANT D'AVIATION DURABLE – ÉTAT en 2017, Helsinki, mai 2017.

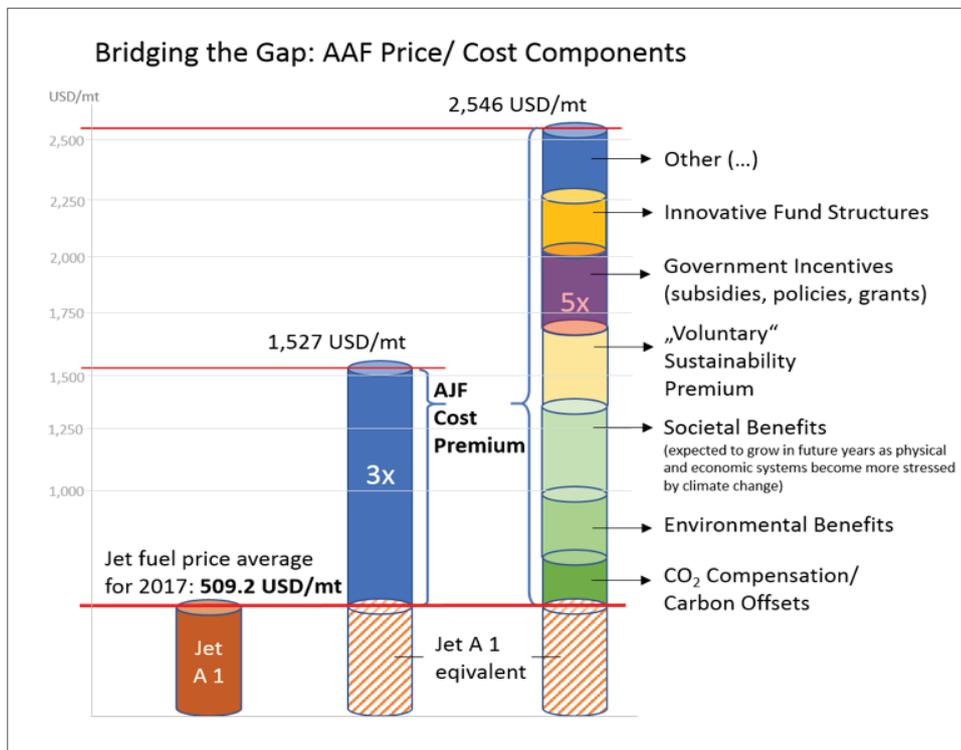


FIGURE 44
Comblent l'écart entre le prix et les éléments de coût des carburants alternatifs

Un élément du prix établi, qui pourrait potentiellement réduire le coût des SAF, est lié à la compensation du CO₂ et des émissions de carbone. Si l'on tient compte de l'arbitrage, le prix maximal pour les carburants d'aviation durables qu'une compagnie aérienne peut être prête à payer et en mesure de le faire est égal au prix du kérosène fossile auquel il faut ajouter le prix des certificats d'émissions de CO₂ économisés (ou de mesures analogues de compensation basées sur le marché). Toutefois, les prix du carbone ne sont pas tous créés de manière égalitaire. Les politiques de tarification du carbone et les mécanismes de compensation sont plutôt hétérogènes. En outre, le coût de l'émission de CO₂ est tombé à moins de 10 \$ É.-U./tonne en 2017. En supposant une compensation à 100 % du CO₂ au moyen des SAF, la combustion de chaque tonne évite la nécessité de certificats pour 3,15 tonnes de CO₂. Vu que les droits d'émissions de carbone s'échangent à moins de 10 \$ É.-U./tonne, il est bien plus économique pour les exploitants d'aéronefs de brûler du carburant ordinaire et de payer la pénalité carbone en achetant des droits d'émissions, que de passer aux CAA. Même en quadruplant le coût du carbone, il est encore nettement meilleur marché d'ajouter la pénalité de compensation de CO₂ au prix du Jet A-1 que de payer le prix de vente projeté de 2 546 \$ É.-U./tonne des SAF. Compte tenu des faibles marges de compétitivité des compagnies aériennes, celles-ci ne sont guère incitées à utiliser les SAF comme c'est le cas aujourd'hui²⁴.

Afin de compenser les effets négatifs du surcoût résiduel des SAF, les impacts supplémentaires au niveau environnemental, économique et sociétal des technologies de bioénergies doivent être pris en compte dans le cadre d'une évaluation holistique de leur faisabilité, notamment leurs incidences sur la qualité de l'air, de l'eau et des sols, les modes d'utilisation des terres, les prix des matières premières, la sécurité énergétique et alimentaire, la réduction de la pauvreté et les moyens de subsistance.

²⁴ Voir: Buse, Market Commercialization of Alternative Aviation Fuels (Lancement commercial des carburants d'aviation alternatifs), dans: Martin Kaltschmitt/Ulf Neuling (ed.), Biokerosene, Status and Prospects (Biokérosène, État et perspectives), p.741 – 759, Hamburg 2018

Toutefois, la quantification et la monétisation des dommages climatiques évités et des avantages accessoires sur le plan environnemental et le plan sociétal (par exemple la réduction de l'érosion, la restauration des terres dégradées, le renforcement de la biodiversité, la création de nouvelles possibilités agricoles dans des zones qui ne se prêtent pas à la production de cultures vivrières) restent un défi. Faute de définitions contraignantes et de pratique au niveau de l'industrie, les valeurs attribuées aux éléments de prix individuels ne peuvent être considérées que comme des approximations. Le Laboratoire de l'aviation et de l'environnement (LAE) à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) a élaboré des modèles techno économiques pour évaluer les coûts de production de carburants alternatifs et des analyses des avantages sociétaux et des coûts de la poursuite de diverses options en matière de carburant. En conséquence, le surcoût carburant des SAF par rapport au récent prix du marché du carburéacteur A 1 est encore supérieur à la valeur nette actuelle monétisée des avantages climatiques agrégés pour tout procédé de production de SAF actuellement à l'étude²⁵. Cependant, le compromis climat coût peut évoluer dans le temps en raison de l'apprentissage, par la pratique, des technologies de production de SAF naissantes et de la valeur sociétale croissante de l'atténuation des émissions de GES. Dans la mesure où l'apprentissage par la pratique contribue à des améliorations de l'efficacité et à une réduction exigeant des exigences en termes d'intrants des procédés, l'impact environnemental de la production de SAF, sur le cycle de vie, peut progressivement s'améliorer. Selon Rambøll, le taux attendu d'apprentissage est supposé avoisiner 8 %, ce qui implique une réduction de 8 % des coûts de production chaque fois que la production est doublée. Tous ces facteurs chronologiques indiquent que les dommages climatiques atténués par le remplacement du Jet A 1 par des SAF peuvent, au bout du compte, compenser et potentiellement même excéder le surcoût supplémentaire de la production de SAF à l'avenir, même si ce n'est pas le cas aujourd'hui.

D'ici là, ni les forces du marché, ni les mesures gouvernementales à elles seules ne suffiront à impulser le processus de changement de carburants et à remplacer les carburants à base de pétrole par des SAF. Indépendamment de la possibilité, au bout du compte, de combler l'écart de prix par la monétisation des avantages connexes du changement de carburants, le surcoût élevé reste un obstacle majeur. Indépendamment du compromis climat coût retenu, une autre question se pose, à savoir comment partager équitablement le fardeau.

Un grand nombre de compagnies aériennes et de secteurs d'avant-garde de l'industrie de l'aviation ont rapidement investi dans les SAF afin d'atteindre leurs propres objectifs volontaires en termes d'émissions de carbone et de stimuler le marché. D'autres participants du marché et parties prenantes de l'aviation seront peut être appelés à aider à réduire l'augmentation des coûts et à faire progresser la mise au point des SAF.

Outre l'industrie des compagnies aériennes elles mêmes, les destinataires potentiels ayant un intérêt direct comprennent également les gouvernements, les banques de développement et les ONG, ainsi que les autorités aéroportuaires, les grandes compagnies pétrolières, les fournisseurs de carburants et autres acteurs établis dans la chaîne de valeur de la production.

Parmi les récents exemples d'un engagement direct, on peut citer les investissements stratégiques dans la chaîne d'approvisionnement de matières premières et de SAF par les compagnies aériennes (par exemple Cathay Pacific, Southwest Airlines, United et autres), des sociétés de logistique (par exemple FedEx) et des grandes compagnies pétrolières (par exemple BP et Shell).

En particulier, l'oligopole international de grandes compagnies aériennes serait peut-être bien inspiré de prendre un risque au niveau du coût de production et d'envisager de modifier leur portefeuille de produits en y intégrant des parties relativement faibles de SAF. Non seulement les grandes sociétés pétrolières connaissent de manière approfondie toutes les étapes de la chaîne de processus, mais elles disposent également d'une chaîne de transport et d'entreposage hautement normalisée et d'un coût optimal qui facilite l'obtention du coût de production le plus faible et la distribution de leurs produits. Étant donné qu'ils contrôlent de fait la logistique, la tarification et la chaîne globale de processus, les grandes compagnies pétrolières et les fournisseurs de carburéacteurs sont des destinataires naturels qui pourraient intervenir et supporter une partie du surcoût. Le transfert de la détermination des prix aux diverses étapes du processus pourrait permettre de compenser les coûts associés aux SAF, tout en optimisant le rendement total.

Aussi faible qu'il soit, l'écart de coût entre les SAF et les carburéacteurs actuels est encore un obstacle que les forces du marché seules ne sont guère susceptibles de surmonter. Désormais, aucune des filières certifiées de production de carburant à partir de matières premières n'est profitable en elle même. Sans une forte intervention publique, l'utilisation à l'échelle commerciale de SAF ne se réalisera sans doute pas. Il est probable que toute une gamme de fortes incitations à la production, de la part du Gouvernement (y compris des subventions, allocations et garanties de prêts) ainsi que des structures de financement innovatrices pour combler l'écart. Seuls des politiques et objectifs stables à long terme, y compris des incitations économiques suffisantes et une reconnaissance appropriée des externalités environnementales positives des SAF peuvent encourager les investissements nécessaires en capital provenant des secteurs publics et privés.

Grâce à des garanties et programmes d'assurance étatiques dédiés, le Gouvernement pourrait, par exemple, établir un prix minimum garanti (c'est à dire un prix plancher) aussi bien pour les producteurs de matières premières que pour les

²⁵ Laboratoire de l'aviation et de l'environnement (LAE), Institut de technologie du Massachusetts (MIT), Mark Douglas Staples, Bioenergy and its use to mitigate the climate impact of aviation (La bioénergie et son utilisation dans l'atténuation de l'impact climatique de l'aviation), Feb. 2017 and Seamus J. Bann, A Stochastic Techno-Economic Comparison of Alternative Jet Fuel Production Pathways (Comparaison techno-économique stochastique des filières de production de carburants d'aviation alternatifs), June 2017

investisseurs dans les carburants à faible émission de carbone, atteignant ainsi les risques du marché et l'incertitude pour les investisseurs. Toutes les fois que des changements de marché ou de politique surviennent qui feraient tomber la valeur d'une matière première ou d'un produit carburant fini en dessous du prix plancher convenu, ladite politique paierait la différence. De même, un prix plafond garanti couvrant le risque des coûts élevés de production de SAF pour un volume fixe pourrait encourager les compagnies aériennes à conclure des accords d'enlèvement à long terme.

Autrement, un fonds de CO₂ pourrait être créé en mettant ensemble les recettes des paiements de droits d'émissions du carbone afin d'acheter, au nom des compagnies aériennes participantes, la matière première nécessaire pour la production de biocarburants et de SAF. Ainsi, le risque du marché serait mis sur le fonds et les redevances environnementales et la compensation de CO₂ payée par les compagnies aériennes et agrégées dans le fonds contribueraient directement à la production de matières premières.

6.6 DÉTERMINATION DES COAVANTAGES DE L'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Bien que la différence ait considérablement diminué, le coût actuel des SAF est encore au moins trois fois supérieur à celui du carburant d'aviation actuel. Cette faiblesse est un important facteur de la lenteur de leur commercialisation et de leur production à grande échelle. Indépendamment de la filière de conversion sous jacente, les coûts de production des carburants alternatifs continueront d'être non compétitifs pour l'avenir prévisible, avec les conséquences négatives prévisibles sur la rentabilité et les taux de rentabilité interne. Pour qu'ils puissent concurrencer les carburants fossiles, les carburants alternatifs doivent bénéficier de formes conventionnelles et innovatrices de soutien des prix.

L'application de la tarification du carbone, de préférence combinée à des coûts croissants du carbone (c'est à dire au dessus de la valeur de marché actuelle), peut aider à combler temporairement l'écart de prix entre les carburants d'aviation actuels et les carburants alternatifs. Toutefois, même les recettes provenant des crédits carbone qui reflètent les coûts sociaux du carbone peuvent ne pas suffire à permettre à davantage de projets de passer du stade de la démonstration à l'échelle commerciale. En conséquence, des courants financiers supplémentaires s'imposent.

En reconnaissant les coavantages d'investissements sobres en carbone, les investisseurs, les donateurs et les entités gouvernementales peuvent aller au delà de la valorisation des réductions des GES par des crédits carbone. Afin de faciliter la collecte de fonds pour les projets, des avantages accessoires qui vont au delà de la réduction originale des émissions de GES et des objectifs de changement de carburant doivent également

être pris en compte. Les avantages associés à la mise au point, à la production et à l'utilisation des SAF peuvent aller au delà des avantages immédiats qu'offre la réduction de l'impact de l'aviation internationale sur le climat mondial ; ils peuvent offrir des possibilités d'une croissance économique supérieure, d'une augmentation de l'emploi, d'un rajeunissement des infrastructures et d'une réduction des inégalités dans toutes les économies des États.

La réduction de l'écart des prix exigera en fin de compte la valorisation et une tarification appropriée des coavantages environnementaux, économiques et sociaux. Ces avantages associés comprennent de nombreuses externalités positives créées par la production et la consommation de biocarburants et de SAF.

La politique climatique et les investissements induits par les changements climatiques se font rarement dans le seul but d'atténuer les changements climatiques ; au contraire, ils servent plus généralement d'autres objectifs principaux, avec comme coavantages l'atténuation des changements climatiques. Cela est particulièrement vrai dans les pays en développement, où les objectifs fondamentaux de développement (comme la sécurité alimentaire, la réduction de la pauvreté, l'amélioration des conditions sanitaires, l'accès à l'énergie, l'optimisation des ressources en eau et une utilisation appropriée des sols) prennent souvent le pas sur les objectifs climatiques dans l'affectation de ressources rares.

Cette corrélation a été explicitement reconnue à la réunion CAAF/2 et figure bien dans le cadre des ODD des Nations Unies. Ainsi, l'ODD 15 des Nations Unies reconnaît explicitement que le développement bien planifié de matières premières pour les SAF peut en même temps préserver et restaurer les écosystèmes terrestres, en veillant à les exploiter de façon durable, gérer durablement les forêts, lutter contre la désertification, enrayer et inverser le processus de dégradation des sols et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité. L'ODD 2 des Nations Unies reconnaît également que la production de carburants durables offre la possibilité d'éliminer la faim, d'assurer la sécurité alimentaire, d'améliorer la nutrition et de promouvoir l'agriculture durable.

Les "retombées" sociales, environnementales et économiques d'une chaîne d'approvisionnement intégrée d'énergie renouvelable en général, et de l'exploitation d'une usine pilote potentielle utilisant de multiples matières premières pour la production de SAF en particulier, peuvent varier considérablement et peuvent en réalité l'emporter sur l'importance et la valeur monétaire des avantages d'atténuation des changements climatiques. Voici un échantillon des coavantages possibles :

- contribution du projet à l'économie nationale, aux alimentations en énergie et au nombre de personnes employées dans le secteur ;
- sécurité énergétique ;
 - amélioration de l'accès à l'énergie ;
 - dépendance réduite par rapport aux importations de

- carburants fossiles ;
- diminution des perturbations de l'alimentation en énergie ;
- électrification rurale ;
- aspects relatifs à la balance commerciale ;
 - économies résultant d'une réduction des importations de carburants fossiles, associées à un recours accru aux richesses nationales en termes d'énergie renouvelable ;
- réduction du cycle de vie des émissions de GES et de l'adaptation aux changements climatiques ;
 - gains en termes de durabilité/impacts environnementaux positifs ;
 - amélioration de la gestion des ressources locales en eau ;
 - reconnaissance internationale et au sein du secteur ;
- Partenariat pour le transfert des technologies et l'énergie propre ;
 - retombées technologiques ;
 - accès à des technologies de classe mondiale à des conditions préférentielles : partager les compétences en technologie et en innovation et en profiter pour s'assurer de nouvelles opportunités commerciales ;
 - la mise en place de technologies sobres en carbone a généralement des impacts systémiques qui vont bien au delà des réductions des émissions de GES ;
 - rôle de modèle technique ;
- faire preuve de leadership en matière de politique et d'affaires ;
- effets positifs sur la sécurité alimentaire ;
- effets sanitaires positifs²⁶ ;
- les biocarburants peuvent servir à relancer les économies rurales ;
 - les retombées économiques pour les régions rurales sont un argument clé derrière les objectifs d'expansion et les politiques et mesures d'incitation en faveur des biocarburants mis en place par les pays producteurs dans le monde ;
 - génération d'emplois et de revenus ;
 - impact sur l'écosystème, amélioration du sol et de l'utilisation des terres (reforestation, réhabilitation des terres) ;
 - amélioration des infrastructures ;
 - réduction de la pauvreté ;
 - reconnaissance des besoins communautaires
 - les incidences positives de la culture de matières premières pour les biocarburants, et notamment les plantations à échelle industrielle, la croissance de petits propriétaires indépendamment de marchés définis, et divers arrangements en vertu desquels des sociétés sous traitent à des petits propriétaires la production de matières premières en leurs noms, auront chacune leur unique ensemble des faits.

S'ils sont correctement valorisés, ces avantages accessoires peuvent au moins compenser partiellement les coûts de la culture et de la production, et ainsi encourager la mise en

œuvre de projets et la fixation des prix par le libre jeu de la concurrence. Divers travaux universitaires ont conclu les coavantages sociaux, environnementaux et économiques peuvent représenter entre 50 et 350 % des avantages directs provenant de l'investissement dans l'efficacité énergétique et les sources d'énergie renouvelable, avec en premier lieu les avantages sanitaires. Selon des recherches faites par le Centre de politique environnementale, du Collège impérial de Londres, en partenariat avec l'Alliance internationale pour la réduction et la compensation des émissions de carbone (ICROAE), la compensation d'une tonne de CO₂ peut générer 664 \$ É.-U. supplémentaires en avantages économiques, sociaux et environnementaux pour les communautés où les projets de réduction des émissions de carbone sont basés. L'estimation de ces coavantages dépend largement du contexte dans lequel se déroule le projet et des modalités de sa mise en œuvre, ce qui empêche qu'on puisse tirer des règles applicables de manière générale sur la taille de ces avantages accessoires.

Afin de réduire les coûts et les obstacles aux investissements pour la culture de matières premières et la production de biocarburant, les coavantages des politiques en matière de changement climatique doivent être intégrés dans l'équation financière dès le départ (c'est à dire le lancement du projet). La monétisation des coavantages du développement pourrait améliorer nettement la viabilité financière, sur la base des valeurs actuelles nettes calculées et des taux internes de rendement.

Outre les avantages de la séquestration de carbone (voir les Sections 6.3 et 6.4), les caractéristiques environnementales et les avantages socio économiques pourraient potentiellement être quantifiés et portés au crédit du coût de production. Cela faciliterait la viabilité commerciale générale et encouragerait l'adoption par le marché, à grande échelle.

La grande difficulté consiste à trouver la façon de traduire des coavantages hétérogènes en des termes économiques et le moyen de valoriser et de monétiser leur incidence sur le taux de rendement financier. Les coavantages sont rarement mesurés, quantifiés ou monétisés et ils rentrent encore moins souvent dans les cadres décisionnels quantitatifs appliqués aux changements climatiques et à la production de biocarburant.

Les méthodes directes d'évaluation du marché monétisent généralement les avantages sur la base des données de production ou de coûts. Par conséquent, elles ne peuvent être appliquées qu'aux marchandises ou aux services (c'est à dire les avantages que l'on monétise) pour lesquels existent des marchés. Toutefois, la difficulté est que l'efficacité des ressources, l'accès à l'énergie, l'amélioration des pratiques agricoles, la durabilité des écosystèmes et la préservation de la biodiversité, pour n'en citer que quelques exemples, n'ont

²⁶ Par exemple, diverses études ont estimé que les avantages sanitaires indirects, soit en moyenne de 58 à 380 \$ É.-U./tonne de CO₂, se sont réduits, avec des avantages supérieurs dans les pays en développement par rapport aux pays développés.

pas une valeur monétaire directe et doivent donc être estimés. Sans une tarification appropriée du marché, l'estimation de la valeur monétaire intrinsèque dépend, au bout du compte, de ce que les investisseurs/donateurs sont volontairement disposés à payer. La motivation pour reconnaître une certaine valeur et donc la volonté de payer pour des coavantages sélectionnés peuvent inclure la réputation en termes de durabilité, l'image de marque, la différenciation des marchés, la philanthropie, les caractéristiques environnementales ou des considérations relatives à la gestion de la chaîne d'approvisionnement.

Les obstacles à l'exécution de projets qui offrent d'importants coavantages sont liés à un défaut de monétisation de la valeur (en termes de volonté de payer) de ces coavantages/actifs sociaux. Pour le succès d'une stratégie de financement et d'incitation, il faut donc prévoir des mécanismes qui :

- évaluent et quantifient les coavantages associés aux mesures d'atténuation retenues ;
- établissent qui est disposé à payer pour la fourniture de ces coavantages/actifs sociaux ;
- déterminent leur volonté de payer "par unité" de coavantage/actif social créé ;
- facilitent une transaction de cette volonté de payer vers le producteur de ces coavantages.

Il est par conséquent recommandé que la viabilité financière et la banquabilité de projets de culture de matières premières et de production de biocarburant ne soient pas analysées selon des bien fondés sectoriels uniquement. La culture de matières premières et la production de biocarburant devraient être considérées comme une chance pour faire avancer d'autres objectifs stratégiques simultanément, pour lesquels un financement distinct peut être disponible. Le déclencheur du lancement d'un projet de carburant alternatif peut finalement être influencé par des aspects liés à l'énergie renouvelable, au biocarburant et aux réductions des émissions de GES, mais les avantages accessoires décrits ci dessus peuvent ouvrir l'accès à des programmes de financement et instruments financiers supplémentaires dédiés officiellement réservés à des projets de développement environnemental ou social. Cette corrélation entre la motivation sous jacente et les avantages accessoires démontre que la promotion stratégique des coavantages peut jouer un rôle important dans la mobilisation ultérieure d'autres sources de financement. En fait, dans certains cas, les politiques peuvent rechercher les coavantages comme cible principale, alors que l'atténuation des changements climatiques et le financement des énergies renouvelables devient un effet collatéral.

7. CONCLUSIONS

7.1 HIÉRARCHISATION DES MATIÈRES PREMIÈRES

Il ressort de l'analyse présentée dans les chapitres précédents que les principales ressources nationales de biomasse qui conviennent à la conversion en carburant d'aviation durable comprennent :

- les herbes tropicales, comme l'herbe à éléphant ;
- les résidus agricoles (sorgo) ;
- les oléagineux à haut rendement, comme l'obtention du jatropha amélioré ;
- les déchets solides urbains (DSU) ;
- l'anacarde et l'huile de noix de karité ;
- les graisses animales fondues (suif).

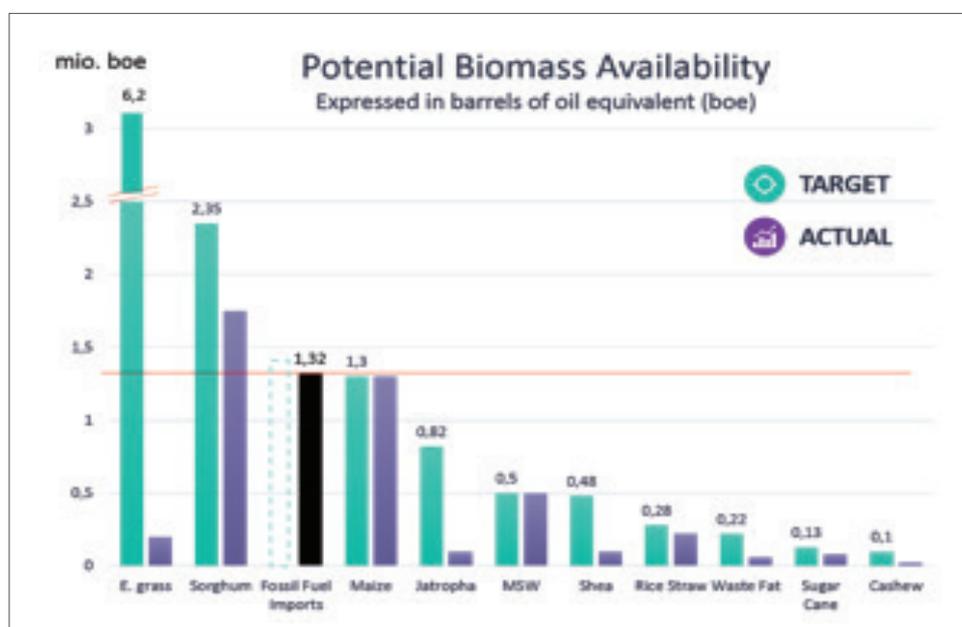
La matière première lignocellulosique offre le potentiel le plus élevé en termes de volume avec des estimations de récupération d'énergie qui dépassent 9 millions de bep, bien que ces estimations varient fortement lorsqu'on tient compte des restrictions logistiques, techniques et économiques constatées, ainsi que de toute utilisation concurrentielle.

En dépit des difficultés qu'elle présente, les autorités et les parties prenantes du Burkina Faso semblent néanmoins en faveur de la culture du jatropha par rapport à des cultures énergétiques alternatives et autres sources nationales de biomasse. Si l'on tient compte des enseignements tirés et des difficultés et pièges liés au projet, la relance de la chaîne de valeur du jatropha est toujours considérée comme l'une des options d'énergie renouvelable les plus réalistes et les plus réalisables en raison des exigences modestes de cette plante en termes de sol, ce qui lui permet d'être cultivée sur des terres marginales ou ne conviennent pas à d'autres utilisations agricoles.

La concentration de petites fractions de déchets en un endroit rend les graisses animales et les déchets solides urbains attrayants pour la production de biocarburant. Toutefois, la fraction organique des déchets solides urbains ne pourra devenir disponible qu'après le déploiement de technologies bon marché et efficace de collecte et de tri des déchets municipaux.

Alors que l'expansion de la canne à sucre semble limitée en raison des besoins en irrigation et des soucis de durabilité, les coques de noix de cajou et de karité constituent une spécialité burkinabè. Il s'agit de sous produits qui n'ont pas de valeur attribuée, de sorte que des quantités décentes de matières premières sont disponibles pour traitement et conversion d'énergie avec effet immédiat. Des projets de plantations en cours promettent de nouvelles augmentations du rendement et du volume de production qui sont propices à tous efforts de commercialisation.

FIGURE 45
Disponibilité potentielle de biomasse



Pour mettre les choses en perspective, il est utile de comparer la valeur énergétique de la disponibilité de biomasse potentielle totale aux importations annuelles de combustible fossile. À la date de 2016, le Burkina Faso importait approximativement 150 000 tonnes de fioul lourd (HFO) et 30 000 tonnes de distillat pour gasoil moteur (DGN). En prenant comme base une valeur calorifique moyenne de 43 MJ/kg ou 7,33 bep/tonne de combustible importé, la valeur énergétique collective de toutes les importations de combustible en 2016 équivalait à 1,3 million de bep. Cela tranche avec plus de 12 millions de bep en termes de disponibilité de biomasse nationale. En d'autres termes, le potentiel énergétique démontré des sources de matières premières alternatives représente au moins neuf fois les importations de pétrole du pays. Même en tenant compte des incohérences méthodologiques et d'une marge élevée d'erreurs, il est juste de conclure que les sources de matières premières nationales théoriquement disponibles pourraient facilement dépasser les importations annuelles de combustible fossile du Burkina Faso. La comparaison montre au moins le potentiel de biocarburant au niveau national. La **figure 45** ci dessus donne une ventilation des sources de matières premières et leur contribution respective à la disponibilité potentielle de biomasse au Burkina Faso.



PHOTO 22

Récolte de cultures destinées à la bioénergie et de cultures vivrières

Des agriculteurs présentent leur récolte de jatropha cultivé en intercalaire avec du maïs et des haricots verts dans la communauté de Toeghin, village de Yimkonka village.

Alors que le marché des carburants alternatifs en est encore à ses balbutiements, la croissance du marché sera impulsée par un vaste nombre de facteurs, notamment la faisabilité économique et technique, ainsi que les signaux fournis par l'OACI en termes des types de matières premières qui sont jugés admissibles au titre du CORSIA. En même temps, les marchés beaucoup plus grands de pétrole et de biocarburant entraîneront également

des changements et feront concurrence au secteur de l'aviation pour les matières premières, la capacité de production et les consommateurs.

Enfin, la question de savoir si les foyers ruraux ou des groupes cibles spécifiques possèdent des terres ou peuvent obtenir les droits d'utiliser la terre pour des cultures énergétiques revêt une importance critique pour le succès et la durabilité des projets de biocarburants, au Burkina Faso, ainsi que dans l'Afrique subsaharienne généralement.

7.2 TECHNOLOGIES DE CONVERSION DES COMBUSTIBLES

De multiples technologies de conversion des combustibles sont en cours d'élaboration à diverses échelles (pilote, essai et précommercial) pour transformer les matières premières à base de biomasse en carburants d'aviation²⁷. La vaste gamme de matières premières potentielles disponibles au Burkina Faso s'accompagne d'une gamme tout aussi diverse de solutions correspondantes pour le traitement du carburant. Il y a de nombreuses combinaisons possibles de matières premières, d'options de prétraitement, de technologies de conversion et de procédés en aval qui peuvent être suivis comme filières potentielles de production de biocarburants pour le transport, de carburants alternatifs et de produits biochimiques. En pratique, alors que la biomasse forestière se compose de fibres fermement liées avec un fort pourcentage de lignine, les cultures énergétiques herbagères ont des fibres moins densément liées et un pourcentage plus faible de lignine. De même, les résidus agricoles et de l'agroindustrie contiennent généralement moins de cellulose (20 à 40 %) que les cultures forestières ou énergétiques (30 à 50 %).

Les technologies de conversion de carburants les plus prometteuses pour le Burkina Faso, qui sont relativement bien maîtrisées, comprennent :

- l'hydrotraitement et valorisation d'huiles usées ou d'huiles végétales – (oléagineux) en les transformant en SAF (HEFA-SPK) ;
- la conversion de la biomasse ou de DSU, par gazéification, en un gaz synthétique, suivie de la conversion du gaz synthétique, par FT, en carburant d'aviation durable (FT-SPK) ;
- Procédé Alcohol-to-jet de production de kérosène paraffinique synthétique (ATJ-SPK) ;
- Isoparaffines synthétiques produites par hydrotraitement de sucres fermentés (SIP-HFS) ;
- Kérosène synthétique avec des aromatiques obtenus par alkylation d'aromatiques légers à partir de sources non pétrolières (SPK/A).

En termes de comparaison, le procédé HEFA-SPK offre la plus faible complexité de production. Son inconvénient est qu'il faut, pour hydrotraiter la biomasse, de l'hydrogène, qui est cher.

²⁷ Pour un aperçu des efforts internationaux de commercialisation en cours, voir l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), BIOCABURANTS POUR L'AVIATION - TECHNOLOGY BRIEF, janvier 2017; Wei-Cheng Wang et al., Examen des technologies de conversion des biocarburants, Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL), juillet 2016; Conseil international des transports propres (ICCT), Anastasia Kharina, Nikita Pavlenko, Carburants alternatifs : Étude de cas d'utilisation à l'échelle commerciale, octobre 2017.

L'hydrogène est un intrant clé nécessaire pour presque tous les procédés de production de SAF, car le ratio d'atomes d'hydrogène atomes de carbone dans les molécules de carburateurs est généralement plus élevé que le ratio hydrogène carbone dans les matières premières. L'hydrogène représente une portion importante des coûts d'exploitation dans la plupart des procédés de conversion, mais il n'est pas facilement accessible, en particulier à un coût raisonnable. Dans bien des cas, l'hydrogène peut être fourni par conversion de gaz naturel, mais l'infrastructure de gaz naturel est également limitée.

Il est possible que le plus important potentiel de biocarburants interchangeables réside dans le procédé FT-SPK qui s'appuie sur la matière première lignocellulosique à faible coût qui peut être dérivée de déchets ou de cultures énergétiques spécifiques. Les avantages de cette filière comprennent la souplesse et la vaste disponibilité des matières premières. Les déchets cellulose et la biomasse sont partout présents au Burkina Faso et comprennent les déchets agricoles et les résidus végétaux. En outre, il existe une vaste gamme de plantes herbacées tropicales et d'arbres à croissance rapide qui résistent au climat et sont parfaits comme cultures cellulose dédiées pour biocarburants. Toutefois, les installations de traitement du fioul synthétique sont associées à des risques économiques élevés car elles sont à forte intensité de capital. En fait, toutes les technologies de conversion ont des coûts élevés en capital et exigent des installations de grande production pour obtenir des économies d'échelle.

La viabilité des projets avec un retour attrayant pour les investisseurs privés ne deviendrait une réalité qu'avec des économies d'échelle et une capacité de production de carburant dépassant 20 000 mt par an. Pour combler l'écart de viabilité et réduire les risques de l'investissement, le soutien gouvernemental et des programmes gouvernementaux de financement du développement seront nécessaires.

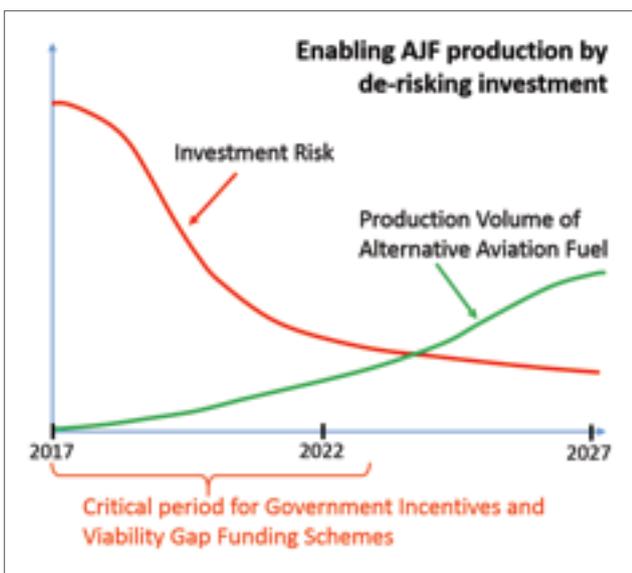


FIGURE 46

Faciliter la production de SAF en éliminant les risques d'investissement

En réalité, l'économie d'un procédé pour la production de SAF dépend de nombreuses variables, par exemple la composition et le coût de la matière première, l'efficacité de la conversion ou le rendement du produit, la notation des coproduits, la dimension de l'usine, la conception du procédé, la conservation d'énergie et le degré de maturité de la technologie.

Sans infrastructure pétrochimique ou de raffinage de base en place, il n'y a aucune chance de réaliser des économies de coûts par la coimplantation potentielle avec des sites industriels désaffectés, le cotraitement ou l'utilisation d'une infrastructure existante. Ceci exclut toute capacité de production de SAF autonome au Burkina Faso pour l'instant. Afin d'améliorer l'efficacité de la production et de réduire les coûts unitaires, d'autres travaux de recherche développement seront nécessaires. En ce qui concerne la filière de gazéification/FT, la recherche développement pourrait potentiellement permettre de développer des réacteurs modulaires à petite échelle qui peuvent convertir du gaz synthétique à base de biomasse en carburant d'aviation.

Pour susciter le désir des investisseurs privés et institutionnels, il faudra un niveau important d'intervention publique. Tant que les marchés en seront au stade du développement et que les volumes de production de carburants d'aviation alternatifs resteront faibles, des programmes de financement de l'écart de viabilité seront peut-être nécessaires pour éliminer les risques associés à des investissements critiques.

Outre les procédés de conversion et les solutions technologiques déjà certifiés et approuvés sous forme d'annexes à la spécification ASTM D7566, cinq autres procédés de conversion sont actuellement en cours d'investigation et soumis au processus d'approbation en vue de leur réclusion sous formes d'annexe de ASTM D7566 (voir l'aperçu dans le **tableau 9**).

Toutefois, s'agissant du niveau de maturité de la technologie, les nouveaux procédés n'ont pas encore fait preuve de leur efficacité à un niveau plus élevé que le stade de projet pilote ou de l'échelle de démonstration. Ils ont donc une maturité technologique bien inférieure et sont associés à des incertitudes et risques plus élevés. Il est largement admis que l'un des aspects clés qui limitent le passage de la phase pilote à l'usine de démonstration et de la démonstration à l'usine commerciale est l'échelle et le risque associés à l'investissement nécessaire. Indépendamment des réalisations technologiques, les risques résiduels et les coûts associés au développement des premières usines de démonstration intégrées d'envergure commerciale, ainsi que l'incertitude quant à l'adoption par le marché et à la valeur des produits énergétiques, restent un obstacle significatif à la réalisation de la production commerciale.

Processing	Description	Complexity	Capex	Opex
Refining	Common refinery technology	-- Very complex	-- Very high	++ Very low
Gasification Fischer-Tropsch	High-temperature gasification plus conversion of syngas to liquid fuel	-- Very complex	-- Very high	++ Very low
Depolymerization	Decomposition of polymers at high temperature under pressure to paraffins, aromatics and polyaromatics	- Complex	- High	- High
Biological conversion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fermentation to terpenes & hydrogenation ▪ Fermentation to alcohol, dehydration, oligomerization & hydrogenation 	- Complex	+ Moderate	-- Very high
Hydrotreating & Isomerization	Hydrogenation of triglycerides from plant oil or animal fats under pressure at high temperature & isomerization	- Complex	- High	O Moderate
Catalytic cracking (greasoline®)	Catalytic cracking, decarboxylation and deoxygenation of triglycerides from plant oil or animal fats at high temperature	O Moderate	O Moderate	+ Low
Transesterification	Transesterification of triglycerides from plant oil or animal fats into mono-alkyl esters of long-chain fatty acids (Bio diesel)	+ Simple	+ Low	++ Very low

FIGURE 47

Le choix des technologies de procédés : aperçu de leur complexité et de leurs coûts

	Procédé de conversion	Abréviation	Matières premières possibles	Propositions de commercialisation	Notes
1	Carburant obtenu par hydrothermalyse catalytique/Point de congélation élevé HEFA	CHJ/ HFP-HEFA	Biohuiles, graisses animales, huiles recyclées	Chevron Lummus Global, Applied Research Associates, Blue Sun Energy	On a fait réagir des biohuiles avec de l'eau dans des conditions de température et de pression élevées. Pourrait être utilisé sans mélange
2	Cotraitement de biohuiles dans des raffineries existantes	Cotraitement	Biohuiles	Chevron, Phillips66, BP2	Le cotraitement est basé sur le traitement de biohuiles avec des distillats moyens conventionnels dans des raffineries existantes.
3	Procédé Alcohol-to-jet de production de kérosène paraffinique synthétique	ATJ-SPK (autre l'isobutanol)	Biomasse utilisée pour la production d'amidon et de sucre et biomasse cellulosique pour la production d'isobutanol	Gevo (butanol), LanzaTech (éthanol)	ASTM revoit actuellement la production de carburéacteur à partir du butanol et de l'éthanol en plus de l'isobutanol, qui a déjà été approuvé comme ATJ-SPK (Annexe 5).
4	Procédé Alcohol-to-jet de production de kérosène synthétique avec des aromatiques	ATJ-SKA	Biomasse utilisée pour la production d'amidon et de sucre et biomasse cellulosique pour la production d'isobutanol	Byogy, Swedish Biofuels	Combustible produit avec des bio-aromatiques pour permettre des pourcentages plus élevés de mélanges.
5	HEFA Plus	Diesel vert	Biohuiles, graisses animales, huiles recyclées	Boeing	Des premiers vols d'essais avec un mélange de 15% de diesel HEFA-diesel ("diesel vert") ont déjà eu lieu.

TABLEAU 9

Procédés de conversion de carburants alternatifs actuellement soumis au processus d'approbation ASTM²⁸

²⁸ Voir CAAF/2-WP/-7 Tableau 2 – disponible pour téléchargement à l'adresse : <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Pages/Documentation.aspx>

Parmi les procédés approuvés, seuls les carburants HEFA sont produits à l'échelle commerciale (par exemple Neste Oil, UOP, ENI, Dynamic Fuels). À la date d'aujourd'hui, la capacité actuelle HEFA produit de manière majoritaire des carburants diesel, avec seulement une petite fraction de carburants d'aviation. La mise au point et l'utilisation de carburants d'aviation HEFA a progressé et est passée de simples vols de démonstration par des compagnies aériennes et des fabricants d'équipement à des initiatives par de multiples parties prenantes au niveau de la chaîne d'approvisionnement, et notamment des exploitants d'aéronefs civils, militaires et gouvernementaux, des producteurs de carburant et des aéroports. Un récent rapport de l'Académie des technologies et de l'Académie de l'air et de l'espace de France a conclu que le biocarburéacteur HEFA à base d'huile végétale restera vraisemblablement la seule option économiquement viable dans le proche avenir.

TABLEAU 10

Installations de fabrication de carburants d'aviation et de diesel vert pour l'aviation opérationnelles ou prévues aux États Unis (2017)

Projet	Lieu d'implantation	Matière première	Technologie	Capacité* (M gallons/an)	Année [prévue] d'exploitation
Fulcrum Sierra BioFuels	Story County, Nevada	Déchets solides urbains (DSU)	Gazéification, FT	10	[2019]
Emerald Biofuels	Gulf Coast	Corps gras, huiles et graisses	HEFA	88	[2017]
Red Rock Biofuels	Lakeview, Oregon	Biomasse forestière	Gazéification, FT avec microcanaux	16	[2017]
AltAir Fuels	Los Angeles, Californie	Corps gras, huiles et graisses	HEFA	40	2016
REG Synthetic Fuels	Geismar, Louisiane	Corps gras, huiles et graisses	HEFA	75	2014
Diamond Green Diesel	Norco, Louisiane	Corps gras, huiles et graisses	HEFA	150	2013
SG Preston	South Point, Ohio	Corps gras, huiles et graisses	HEFA	120	[2020]
SG Preston	Logansport, Indiana	Corps gras, huiles et graisses	HEFA	120	[2020]

* Toutes les quantités de carburant indiquées sont pour l'ensemble carburéacteur et diesel.

Source : Bureau de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables du ministère étatsunien de l'énergie

Une autre possibilité à court terme pourrait être également la production de SAF au moyen d'une mini raffinerie avec craquage catalytique thermique. En ce qui concerne les dépenses en capital, les coûts d'exploitation et la complexité générale du procédé, la technologie allemande de conversion par craquage catalytique mise au point par Fraunhofer bénéficie d'un avantage compétitif sur toutes les autres filières de technologie de carburant actuellement exploitées ou en cours de mise au point aujourd'hui. Cela inclut le procédé HEFA, principale filière de conversion de carburant, et la plus établie et la plus concurrentielle.

Dans le proche avenir, les technologies de conversion thermochimique sont l'option la plus susceptible d'offrir les grands volumes de carburant alternatif que demande l'industrie de l'aviation. Par comparaison, la valeur de marché élevée des intermédiaires produits par des procédés alternatifs de conversion biochimique peut souvent obtenir des prix d'achat beaucoup plus attractifs dans les marchés chimiques, de produits lubrifiants et de cosmétiques que le kérosène et les fractions de carburéacteur dont la valeur est moindre.

Étant donné que le Burkina Faso ne dispose pas actuellement d'infrastructures pétrochimiques, il est peu vraisemblable que du carburant alternatif sera mis au point ou utilisé dans l'avenir proche, à moins que des matières premières produites localement soient exportées, converties dans des complexes et raffineries pétrochimiques outre-mer puis réimportées. D'ici là, le Burkina Faso est bien placé pour se concentrer initialement sur le traitement de la matière première et de la biomasse (par exemple la transestérification) qui exige des installations moins capitalistiques.

Des solutions technologiques (T2) de raffineries nationales et/ou régionales pleinement intégrées ne deviendront une option stratégique pour le Burkina Faso qu'une fois que les seuils minimaux de production de matières premières auront été atteints, qu'une infrastructure pétrochimique de base sera en place ou en construction et que des engagements tangibles des parties prenantes auront été obtenus de la part de compagnies aériennes et d'investisseurs.

7.3 CHANGEMENT D'AFFECTATION DES TERRES ET CYCLE DE VIE DES GES

Les réductions d'émissions découlant de l'utilisation de biocarburants varient selon la filière de production, la matière première et le carburant produit. Il y a un large consensus sur le fait que les réductions d'émissions de GES qui résultent de l'utilisation de carburants alternatifs devraient être calculées sur la base du cycle de vie. Le cycle de vie complet des SAF comprend la production de la matière première, la récolte, la manutention de la matière première et son extraction, la préparation, l'entreposage et le transport des matières premières, la conversion en SAF et le traitement, le transport du produit fini et la combustion. En conséquence, les réductions réelles d'émissions à réaliser dépendent de nombreux facteurs.

L'intensité carbonique d'un carburant donné est estimée en utilisant la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV) et est généralement exprimée en gCO_{2e}/MJ de carburant (c'est à dire son intensité carbonique). L'ACV est un outil opérationnel visant à déterminer les impacts environnementaux potentiels d'un produit, d'un procédé ou d'un service, sur la santé humaine, les écosystèmes et l'épuisement des ressources naturelles. Il est utilisé pour calculer la quantité de CO₂ libérée pendant l'ensemble du processus, depuis l'extraction de la matière première jusqu'au réservoir de l'aéronef.

Les exploitants d'aéronefs qui ont l'intention de réclamer des réductions d'émissions par suite de l'utilisation de SAF devront déterminer la valeur des émissions pendant le cycle de vie de ces carburants. Des travaux sont en cours à l'OACI afin de déterminer les valeurs par défaut de l'ACV pour les carburants admissibles au CORSIA, y compris les SAF²⁹. Au stade actuel des travaux de l'OACI, il sera exigé que les SAF permettent d'obtenir des réductions nettes des émissions de GES d'au moins 10 % par rapport aux carburéacteurs actuels sur la base du cycle de vie. Par conséquent, outre les autres facteurs clés liés à l'environnement et au développement social, l'équilibre des GES d'une filière de biocarburants est une mesure critique pour la détermination de ses caractéristiques générales de durabilité. Une récente étude publiée par le Laboratoire pour l'aviation et l'environnement de l'Institut des technologies du Massachusetts a confirmé qu'il y a un important potentiel de réduction des émissions de GES sur le cycle de vie pour toutes les filières de production de SAF qui sont à l'étude aujourd'hui³⁰.

Les incidences de la production de biocarburant sur l'utilisation des terres sont particulièrement préoccupantes car, dans certains cas, les émissions résultantes du changement d'affectation des terres peuvent totalement annuler les avantages en termes de GES du remplacement du carburéacteur par des biocarburants. Il faut donc prendre en compte les effets des changements d'affectation des terres qui peuvent être associés à la production de SAF. Les émissions attribuables aux changements indirects d'affectation des terres (ILUC) peuvent survenir, par exemple, lorsque l'utilisation de terres cultivées existantes est détournée pour répondre à la demande croissante de matières premières pour la production de biocarburant supplémentaire, ce qui entraîne le déplacement d'autres activités de production agricole vers des terres qui ont des stocks de carbone élevés ou vers d'autres écoservices.

Toutefois, dans le cas du Burkina Faso, aucun des scénarios de culture de matières premières et de production de biocarburant associée qui ont été analysés n'est susceptible de causer des changements d'affectation des terres directes ou indirectes qui autrement auraient dû être pris en compte lors de l'évaluation des incidences en termes de GES du remplacement de carburants classiques par des biocarburants. Le risque associé aux changements indirects de l'affectation des terres sont grandement réduits lorsque la matière première pour les biocarburants est cultivée sur des terres marginales et ne déplace pas d'autres activités aux pratiques culturales.

²⁹ Voir 191. Wei-Cheng Wang et al., Review of Biojet Fuel Conversion Technologies, Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL), juillet 2016; 199. Erik C. Wormslev et al., Conseil des ministres des pays nordiques, Carburants d'aviation durables pour l'aviation, perspectives des pays nordiques sur l'utilisation de carburants durables avancés pour l'aviation, 2016; 81. Conseil international des transports propres (ICCT), Sammy El Takriti et al., Atténuation des émissions de l'aviation internationale – Risques et possibilités pour les carburants alternatifs d'aviation, mars 2017.

³⁰ Laboratoire pour l'aviation et l'environnement (LAE) de l'Institut des technologies du Massachusetts (MIT), Cassandra Vivian Rosen, Scenario based lifecycle analysis of greenhouse gas emissions from petroleum-derived transportation fuels in 2050 [Analyse, basée sur des scénarios, du cycle de vie d'émissions de gaz à effet de serre de carburants pour les transports dérivés de pétrole en 2050], juin 2017.

Sous réserve d'une prise en compte appropriée des effets des changements d'affectation des terres pour la culture des matières premières et la production de biocarburant au Burkina Faso, des réductions des émissions de GES sur le cycle de vie de 60 à 90 % pourraient être réalisées. La contrainte active d'éviter des changements nuisibles de l'affectation des terres encourage l'utilisation des déchets de la biomasse (coques des noix de cajou et de karité, graisses usées), les résidus agricoles (paille de riz, cannes de maïs) et la culture d'oléagineux (jatropha) sur des terres marginales, ainsi que l'intégration équilibrée (culture intercalaire) de production d'aliments et de carburant dans la mesure du possible. La culture cellulosique (herbe à éléphant) entraîne généralement moins de risque d'impacts des changements d'affectation des terres que les oléagineux. Aucune valeur d'intensité de GES réelle pour l'herbe à éléphant n'est disponible auprès d'aucune des usines de démonstration en fonctionnement, mais des données de référence comparables peuvent être tirées de la directive européenne sur les énergies renouvelables. En conséquence, l'éthanol dérivé de la paille de blé a des émissions de GES généralement de l'ordre de 11 gCO₂e/MJ, ce qui conduit à des économies potentielles en termes de GES de 87 %.

En ce qui concerne le carburant d'aviation alternatif obtenu par le procédé HEFA à partir de graisses animales (suif), les émissions de GES du cycle de vie ont été calculées par le Laboratoire pour l'aviation et l'environnement du MIT. En conséquence, le total des émissions de GES équivalent CO₂e des SAF obtenues à partir du suif se sont trouvées dans la fourchette 25,7 à 37,5 gCO₂e/MJ. Cela correspond à des émissions de réduction de GES sur le cycle de vie de 59 à 72 %, par rapport à l'homologue classique³¹.

Toutes les valeurs analysées pour les SAF produits à partir de déchets et de matières premières lignocellulosiques sont inférieures aux intensités de GES du carburant d'aviation actuelle.

L'un des enseignements des projets internationaux de bioraffinerie est qu'il n'est peut-être pas approprié de fixer des seuils élevés d'économies en termes de GES pour les usines de démonstration, car ces usines sont généralement conçues pour démontrer la viabilité technique du concept, mais peuvent ne pas être conçues pour optimiser les performances environnementales de façon à limiter les coûts et la complexité supplémentaire.

Une autre mise en garde qui doit être prise en compte est que des circonstances nationales différentes donneront lieu à des spécifications de durabilité différentes. Certaines préoccupations ont été soulevées, à savoir que la normalisation de la durabilité des SAF sans tenir compte pleinement des intérêts spécifiques des pays en développement pourraient ériger des barrières au développement durable des pays en développement, ce qui serait contraire aux objectifs des ODD des Nations Unies et de l'Initiative de l'OACI *Aucun pays laissé de côté*.

7.4 INDICATEUR DE SUIVI DES CARBURANTS D'AVIATION ALTERNATIFS

La série de matrices de faisabilité spécifiques à chaque matière première exposées dans les chapitres précédents résumait les paramètres importants d'une chaîne nationale d'approvisionnement en matière première et les technologies de conversion de carburant qui peuvent y correspondre.

L'«Indicateur de suivi des carburants d'aviation alternatifs» ci dessous, comme il est indiqué dans la **figure 48**, entend ajouter une perspective chronologique, qui offre un aperçu concis et simplifié.

La segmentation en trois courants parallèles mais néanmoins distincts (c'est à dire : A) État de maturité de la matière première, B) État de maturité de la technologie et C) Finances/Économie) peut servir d'outil d'indication générale aux gouvernements et autorités pour déterminer les mesures appropriées à prendre dans le contexte approprié, à hiérarchiser les mesures de mise en œuvre et à définir un cadre de politique favorable dans un ensemble donné de circonstances agroclimatiques, sociales, économiques et écologiques dans une région spécifique.

³¹ Laboratoire de l'aviation et de l'environnement (LAE), Institut de technologie du Massachusetts (MIT), Gonca Seber, Robert Malina et al., Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow, Biomass and Bioenergy (Évaluation environnementale et économique de la production de carburéacteur et de diesel hydrotraités à partir d'huiles usées et de suif, biomasse et bioénergie), Vol. 67, 108-118, août 2014

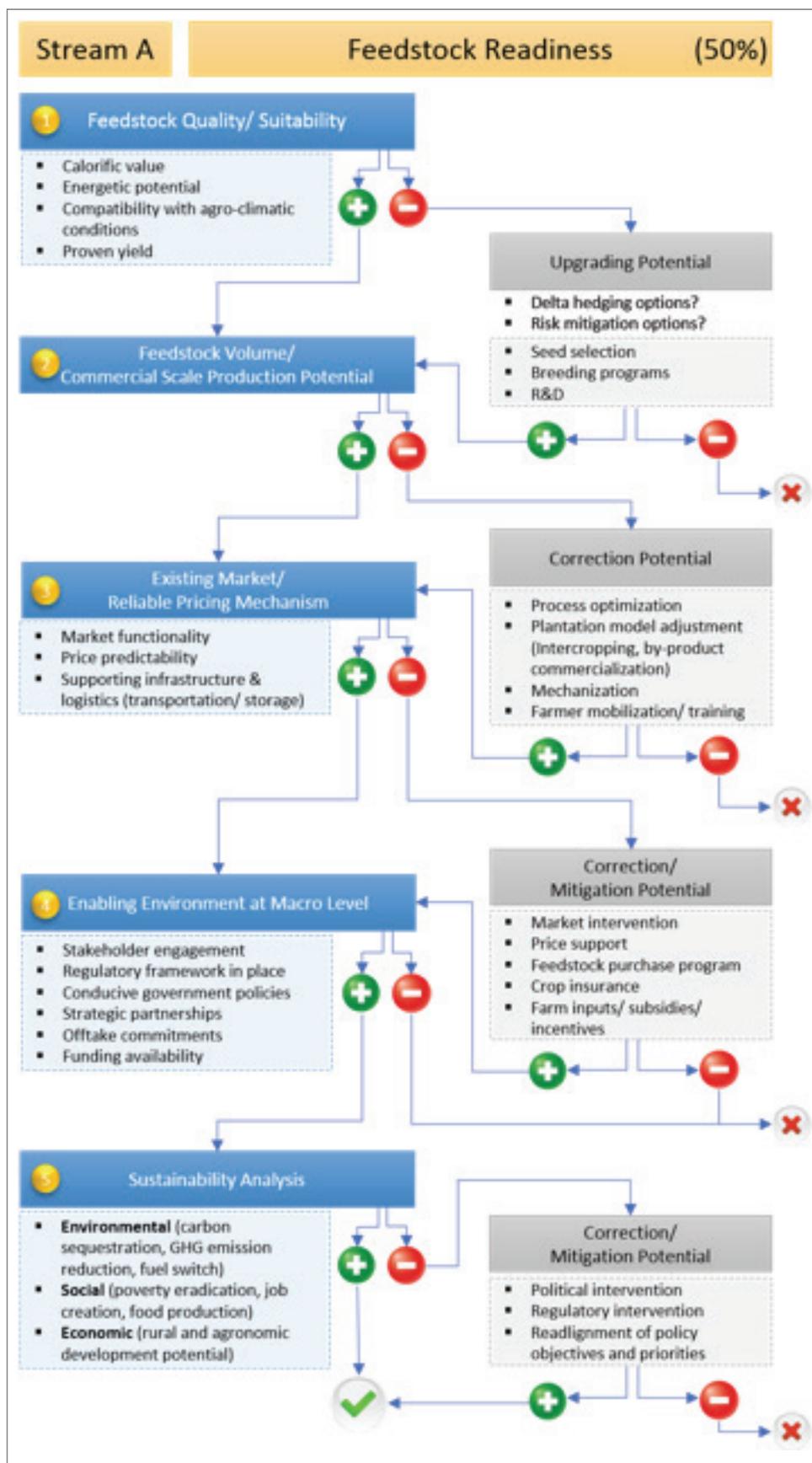
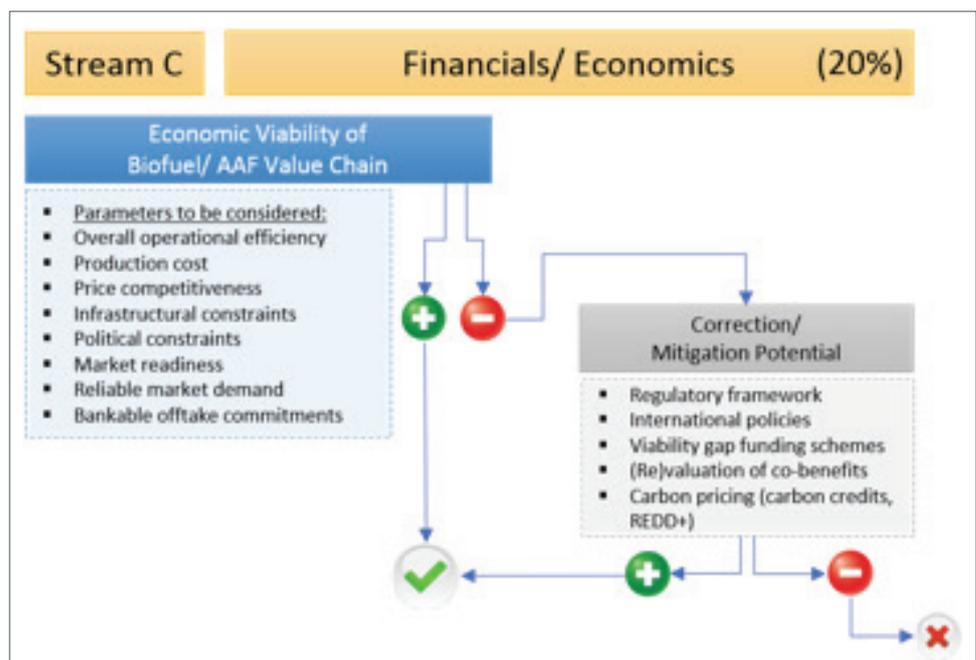
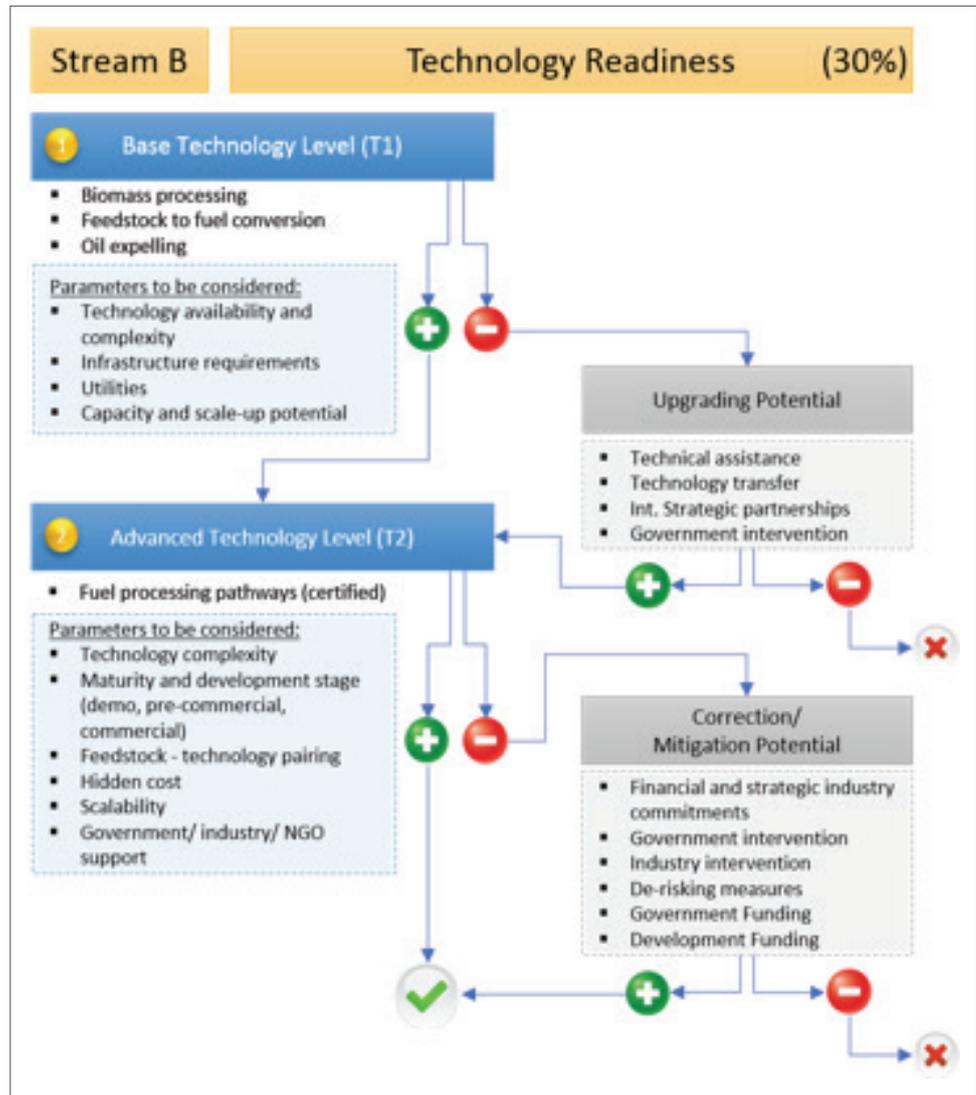


FIGURE 48

Indicateur de suivi des carburants d'aviation alternatifs

FIGURE 48
Indicateur de suivi des carburants d'aviation alternatifs



8. FEUILLE DE ROUTE POUR L'AVENIR

A. ORGANISATION STRUCTURELLE

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>1. COMITÉ DIRECTEUR NATIONAL/BUREAU DU PROGRAMME</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des mesures hardies et transformatives exigent une partie neutre qui associe compétence et autorité, sans dépendre d'aucun service ou ministère gouvernemental particulier. Une bureaucratie potentiellement paralysante, des intérêts sectoriels et des questions internes risquent de ralentir l'élan et de réduire l'engagement des parties prenantes et des investisseurs internationaux. • Il est donc recommandé de mettre en place un Comité directeur national (CDN)/Bureau du Programme, avec une autorité budgétaire ayant un rôle central dans la formulation et la coordination d'instruments politiques sous la présidence (ligne hiérarchique) du Premier Ministre ou du Président. • Étant donné la spécificité multisectorielle des biocarburants, cette plate forme indépendante de coordination centrale doit être dotée de l'autonomie opérationnelle, idéalement sous la supervision technique du Ministère des finances. • Le CDN établira l'orientation stratégique du projet ; approuvera les plans de travail et budgets annuels ; examinera les progrès des projets et les rapports d'évaluation ; suivra la mise en œuvre des recommandations du CDN ; et assurera la synergie avec d'autres projets. <p>Le CDN/Bureau du Programme serait appuyé par deux organes directeurs, un Bureau de la coordination et de la coopération du projet (BCC) et un Bureau de la mise en œuvre et de l'exécution du projet (BME).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le BME est responsable de la supervision de tous les aspects de la mise en œuvre opérationnelle. Il fera le point sur les progrès du projet, la mise en œuvre des plans d'action et la performance financière. • Le BME supervisera également l'exécution des activités qui tombent dans les domaines de responsabilité des ministères pertinents. • À la suite de l'identification et de la priorisation des tâches individuelles, une affectation claire des responsabilités permettra un suivi efficace des performances qui évitera la rupture des mécanismes de responsabilité. • Il est essentiel que les membres d'équipe auxquels aura été attribuée la responsabilité de certaines tâches soient pleinement informés de leurs propres responsabilités et de la façon dont celles ci sont interreliées avec d'autres tâches. • Le BCC coordonnera toutes les activités de projet au niveau central ; il assurera la coordination quotidienne des parties prenantes pertinentes ; et consolidera les informations sur les progrès du projet. • Étant donné son rôle de pionnier dans la protection du climat et la coordination internationale sur ce plan, l'Agence nationale de l'aviation civile (ANAC) pourrait potentiellement devenir le noyau du BCC. • Des partenaires nationaux supplémentaires de haut niveau incluront l'ANEREE et SP CONEDD. <p>La figure 49 donne un aperçu graphique de cette organisation structurelle.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère des finances - Ministère de l'énergie - ANAC - ANEREE - SP/CONEDD - CIRAD - CNRST 	<p>Court terme</p>

Enabling Environment & Structural Organization

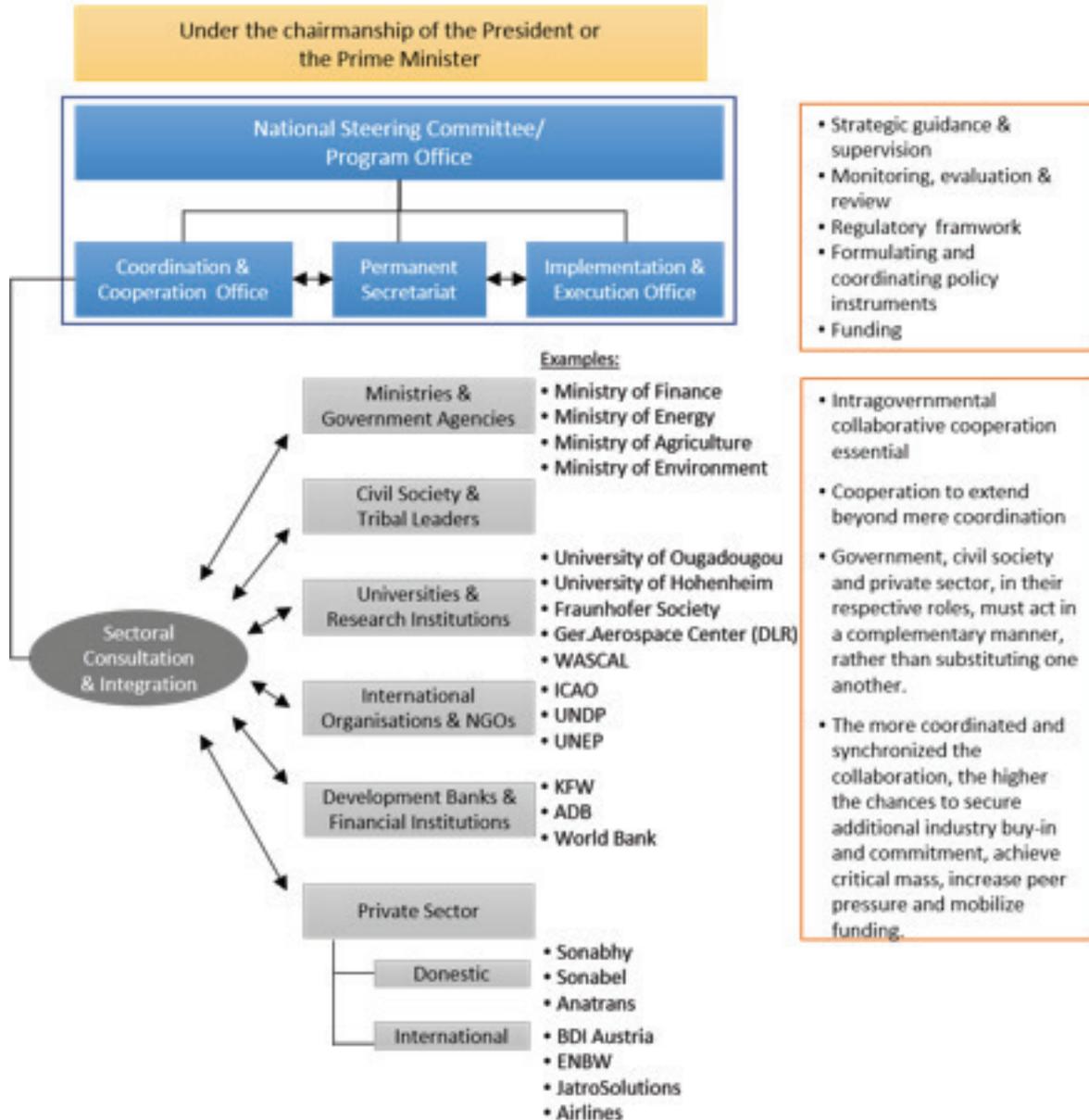


FIGURE 49

Environnement favorable et organisation structurelle

B. PLAN D'ACTIVITÉS ET MISE EN ŒUVRE

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>2. LIVRE BLANC</p> <p>Préparer un plan d'activités qui permet d'obtenir du financement public pour le climat et du financement international pour le développement.</p>	<p>- Fondation Hanns-Seidel</p>	<p>Immédiatement</p>
<p>3. UNITÉ D'ACTION</p> <p>Élaborer un plan d'activités concret pour une chaîne d'approvisionnement nationale de biocarburant, y compris tous les aspects pertinents, recommandations, facteurs interdépendants, séquence de décisions, mise en œuvre du plan général, etc.</p> <p>Afin de garantir l'unité d'action et de réduire/éviter des dysfonctionnements coûteux, il est indispensable d'intégrer tous les partenaires volontaires du projet dans la planification conjointe, aussitôt que possible, afin que puisse être élaboré un plan d'exécution intégré, complet et réalisable.</p>		<p>Court terme</p>
<p>4. Promouvoir le transfert de technologie et forger des partenariats technologiques et énergétiques.</p>		<p>Moyen terme</p>
<p>5. EFFORTS DE DÉVELOPPEMENT DE MARCHÉS CONJOINTS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Afin de réaliser des économies d'échelle pour l'installation envisagée d'équipement de traitement de matière première de haute technologie, il est recommandé d'identifier également le potentiel de biomasse approprié au Ghana, au Togo et en Côte d'Ivoire. • Selon la matière première spécifique, la concentration de la capacité de production en des emplacements stratégiques sélectionnés permettrait potentiellement de mettre en place des usines de traitement plus économiques, avec un flux de production plus élevé. • Les efforts consentis par des États individuels pour des politiques qui touchent la production de matière première, le développement social et l'aviation internationale sont moins efficaces que des options coordonnées à l'échelle régionale. • En outre, l'aviation civile, le transport aérien et les industries énergétiques au niveau national seraient bien plus motivés pour mettre en œuvre des politiques en matière de SAF si un cadre politique à long terme basé sur des programmes stratégiques régionaux était mis en place et ces politiques feraient partie d'efforts coordonnés et harmonisés à l'échelon régional pour s'attaquer à la fois aux objectifs de développement durable et aux émissions de l'aviation internationale. • Il y a de fortes chances que la coordination régionale par la CÉDÉAO puisse être utile. 	<p>- CÉDÉAO - UEMOA</p>	<p>Moyen terme</p>
<p>6. Appuyer le programme de démonstration des carburants d'aviation alternatifs et leur rapide utilisation commerciale (centres locaux d'excellence).</p>	<p>- ANAC</p>	<p>Court terme</p>

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>7. Identifier les mesures à effet rapide afin de promouvoir la connaissance et la compréhension des questions environnementales et questions techniques connexes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'atténuation des changements climatiques a une incidence sur les récoltes et les moyens d'existence. Une aviation qui ne joue pas de rôle dans la vie quotidienne d'agriculteurs appauvris ne sert donc qu'à "ouvrir les portes". À part les objectifs environnementaux spécifiques au secteur (réduction des émissions de GES, croissance neutre en carbone), l'aviation est idéalement utilisée comme moyen très convenable et éclatant d'aider à transmettre les messages clés afin de gagner un soutien publique large pour des efforts de mobilisation nécessaire et les changements recommandés des pratiques agronomiques. • Des applications pratiques au niveau communautaire pourraient accroître la sensibilisation et faciliter la mobilisation nécessaire à grande échelle. • Les recommandations d'exemples pratiques qui permettent une mise en œuvre directe comprennent la production de biodiesel national pour l'équipement de servitude au sol de l'aéroport de Ouagadougou et l'électrification rurale de certains secteurs (pompes à eau). 	<ul style="list-style-type: none"> - RACGAE - ANAC - Ministère des transports 	Court terme
<p>8. PENSER PETIT</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le délai de commercialisation étant critique, il est souhaitable d'envisager d'exporter la matière première d'abord pour conversion outre mer (et de réimporter le produit final valorisé). • Faute de toute infrastructure pétrochimique, il est peu vraisemblable que les SAF joueront un rôle notable dans la réduction des émissions de l'aviation au Burkina Faso dans l'avenir proche. Une option demeure, qui consiste à exporter la matière première produite à l'échelon national vers l'Europe pour conversion en carburant et transformation en SAF dans des complexes et raffineries pétrochimiques existants. • Alors que cela pourrait entraîner d'importants coûts et des défis logistiques majeurs, une autre option plus pragmatique serait de se concentrer initialement sur le traitement technologiquement moins complexe de la matière première et de la biomasse (y compris la transestérification), qui exige une infrastructure moins exigeante en capital. • Alors qu'un biodiesel produit nationalement ne peut remplacer le carburéacteur, il pourrait néanmoins être utilisé par la société de services d'escale de l'aéroport de Ouagadougou (RACGAE) qui exploite une flotte de camions et de remorques à moteur diesel pour les servitudes au sol. 	<ul style="list-style-type: none"> - BDI Autriche - GEA - Fraunhofer - RACGAE - ANAC - Ministère des transports 	Court terme
<p>9. Pour exploiter le potentiel plus important en ce qui concerne la production de SAF, il pourrait être souhaitable de concéder, au moins temporairement, l'utilisation des matières premières pour l'électrification rurale décentralisée, la protection de l'environnement, la reforestation et autres activités socio économiques urgentes et les besoins locaux d'abord. Cette approche stratégique holistique intégrerait des acteurs publics qui autrement se trouveraient marginalisés. Un soutien critique au sein des parties prenantes publiques d'un bout à l'autre de l'échiquier politique et sectoriel, dès le début, aiderait à formuler une vision partagée et également à faciliter la mobilisation nécessaire pour l'augmentation ultérieure de la production.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ANEREE - SP/CONEDD - CIRAD - CNRST 	Moyen terme

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>10. Identifier, hiérarchiser et installer des installations de démonstration pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'utilisation du biocarburant (par exemple camions/matériel de servitude au sol à l'aéroport) ; • production d'énergie électrique décentralisée, rurale (réseau électrique autonome) (par exemple alimentation des pompes à eau) ; • utilisation efficace de la chaleur et de l'énergie électrique (par exemple dans l'industrie de l'anacarde à Bobo-Dioulasso). 	<ul style="list-style-type: none"> - ANEREE - Anatrans 	
<p>11. Afin d'éviter une duplication coûteuse d'activités non coordonnées en matière d'énergie renouvelable, il est fortement recommandé d'aligner la conceptualisation des projets et de convenir de synchroniser les efforts de mise en œuvre. Le pragmatisme, la concentration, la réflexion critique et le délai de commercialisation sont des éléments fondamentaux de succès.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - PNUD 	Court terme
<p>12. Envisager la collaboration avec le Centre ouest africain de service scientifique sur le changement climatique et l'utilisation adaptée des terres (WASCAL), qui est un programme ciblé de recherche à grande échelle lancé pour élaborer des mesures efficaces d'adaptation et d'atténuation face aux changements climatiques. Le WASCAL, financé par le Ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche, est géographiquement concentré sur l'Afrique de l'Ouest en général et le Burkina Faso en particulier. L'Université de Ouagadougou a récemment lancé un programme de Master (octobre 2017) dans ce domaine.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - WASCAL - Université de Ouagadougou 	Moyen terme
C. FINANCEMENT		
<p>13. Mobiliser du financement public et des investissements privés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • encourager et stimuler des investissements stratégiques dans la chaîne d'approvisionnement de la matière première et des SAF ; • les participants et parties prenantes du marché à appeler comme investisseurs devraient comprendre des entités publiques et privées, comme les banques de développement, les ONG, les autorités aéroportuaires, les grandes sociétés pétrolières, les fournisseurs de carburant et autres acteurs établis dans la chaîne de valeur de production de biocarburant ; • il est essentiel d'élargir considérablement les fonds disponibles pour les producteurs nationaux de matière première. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère des finances - Ministère de l'énergie - Ministère de l'agriculture - Ministère des transports 	Court terme
<p>14. L'ensemble des risques et sensibilités identifiés exige que les sources publiques de financement soient un précurseur du financement privé.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser les fonds officiels d'assistance au développement pour mobiliser l'investissement privé et du financement correspondant. <ul style="list-style-type: none"> - L'Allemagne, avec l'Union européenne, a fait de 2017 une année spécialement axée sur l'Afrique. Le Gouvernement allemand a mené campagne en faveur d'un renouvellement des efforts de coopération avec les États africains à divers niveaux politiques, sociaux, économiques et technologiques. Lancé en février 2017, le "Plan Marshall pour l'Afrique" entendait offrir des conditions stables de croissance inclusive et de 	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère allemand des finances - Ministère allemand de la coopération et du développement économiques 	Court terme

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>développement économique durable. L'une des pierres angulaires du Plan concernait la mobilisation d'investissements privés par le biais de garanties gouvernementales. La récente initiative allemande offre l'occasion d'identifier et de mobiliser des sources supplémentaires de financement international public et privé, en particulier pour des investissements portant sur le transfert des technologies, les installations de traitement de la biomasse et la mécanisation du secteur agricole.</p>		
<p>15. Mobiliser des ressources financières au Burkina Faso et renforcer la capacité du pays de générer ses propres recettes (par exemple réaffectation de recettes des opérations minières).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère de l'énergie - Ministère des finances 	Court terme
<p>16. Solliciter du financement de projets auprès de la Banque de développement KfW, sous forme de subventions non remboursables et de financement du développement.</p> <ul style="list-style-type: none"> • KfW est le leader mondial du financement des énergies renouvelables dans les pays en développement. Cet accent stratégique clé correspond parfaitement à la situation au Burkina Faso, c'est à dire qu'il prévoit un moyen de sortir de la pauvreté en combinaison avec la reforestation et la protection environnementale et climatique. • Pour être admissible à du financement KfW, les critères de politique de développement doivent être respectés, notamment l'engagement du pays partenaire ainsi que la capacité de performance du partenaire de projet. 	<ul style="list-style-type: none"> - Banque de développement KfW 	Court terme
<p>17. INTERVENTION SUR LES MARCHÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le Gouvernement devrait envisager une intervention directe sur les marchés et offrir des garanties de prix (prix planchers) pour les producteurs de matière première et agriculteurs nationaux. • Afin d'améliorer le fonctionnement général du marché pour les sources identifiées de matière première et d'équilibrer/réduire les risques de production et les risques sur le marché pour les agriculteurs et les fournisseurs de matière première, des mesures spécifiques devraient comprendre : <ul style="list-style-type: none"> - la mise en place d'une centrale d'achat (Centrale d'approvisionnement en intrants et matériels agricoles, cf. PNDES n° 186) ; - la mise en place d'une société de production de semences agricoles, cf. PNDES n° 197). 	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère des finances - Ministère de l'agriculture 	Moyen terme
<p>18. SUBVENTIONS AUX INTRANTS AGRICOLES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prévoir des subventions aux moyens de production pour les semences/semis à rendement élevé et les engrais (paiements à des cultivateurs de matière première et visant à stimuler la production). • Les subventions au biocarburant pourraient potentiellement prendre la forme d'une subvention équivalente au soutien financier du Gouvernement à SONABEL. • Prévoir des subventions pour l'équipement de base et la mécanisation. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère des finances - Ministère de l'agriculture 	Moyen terme

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>19. COUVERTURE PUBLIQUE-PRIVÉE DES RISQUES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour encourager les investissements dans la production de matière première à grande échelle, il est recommandé de mettre en place un système efficace public-privé de couverture des risques. • L'absence d'une politique pour le financement de l'agriculture — à part des subventions ad hoc pour les engrais — reste l'un des principaux obstacles à l'augmentation de la production. • Les incitations et services financiers nationaux doivent être adaptés afin de mieux tenir compte des risques en matière de production, de marché et de prix, et de correspondre à la diversité du secteur agricole dans son ensemble. • La mise en place d'une banque dédiée pour le financement agricole, qui est explicitement prévu dans le PNDES (point n° 250), est essentiellement une mesure dans la bonne direction. • Étudier le potentiel de partenariats publics-privés et de possibilités de coopération entre le Gouvernement burkinabè et le secteur privé, notamment l'industrie, les ONG et le milieu universitaire. 		Moyen terme
<p>20. MICROFINANCE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les petits exploitants ont besoin d'un accès facile aux services de financement agricoles (par exemple des prêts pour les moyens de production et l'assurance). • Afin de dynamiser l'investissement dans une chaîne de valeur de biocarburant burkinabè, il importe de mobiliser et de solliciter les institutions locales de (micro-)finance qui sont bien informées des conditions du marché local, tout autant que les institutions internationales, comme les donateurs multilatéraux et bilatéraux. • Les partenaires et programmes internationaux potentiels de financement peuvent inclure, entre autres, le Partenariat pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (REEEP), l'Initiative de l'Union européenne pour l'énergie (EUEI). 	<ul style="list-style-type: none"> - KfW - REEEP - EUEI 	Moyen terme
<p>21. LA FINANCE CARBONE</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le rôle du financement carbone devrait être étudié plus avant. • Les réductions d'émissions peuvent être certifiées et échangées sous forme de crédits sur les marchés du carbone, assurant des recettes supplémentaires qui peuvent atténuer le coût de l'investissement et faciliter le déploiement de projets SAF. • Envisager la mise en place au Fonds dédié pour l'agroforesterie pour biocarburants qui fournirait le financement initial aux développeurs de projets pour la mise en œuvre de projets de culture et de production de certaines matières premières au Burkina Faso. Pour compenser le risque assumé, le Fonds recevrait des crédits carbone pour les projets sur une période de [x] année. Les crédits carbone pourraient alors être distribués aux sociétés privées qui ont investi dans le Fonds et les utiliseraient pour compenser certaines des émissions qu'elles ne peuvent éviter. Ce modèle d'investissement est rendu possible par l'engagement à long terme des investisseurs qui comptent sur le Fonds pour produire des crédits carbone d'une valeur élevée pour eux, que ce soit pour des raisons sociales, commerciales ou de conformité aux règlements. Afin de faire des compagnies aériennes des partenaires et des investisseurs potentiels, il faudrait préciser les conditions auxquelles doivent répondre les compensations. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère de l'environnement - Direction de l'économie verte et du changement climatique - UN-REDD - UNEP 	Court terme

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<ul style="list-style-type: none"> • En étroite coordination avec la Direction générale de l'économie verte et des changements climatiques du Ministère de l'environnement, établir un projet REDD+ dédié pour la commercialisation à titre volontaire de crédits carbone auprès des compagnies aériennes internationales. • Appuyer la quantification et la monétisation des dommages climatiques évités et des avantages complémentaires sur les plans environnemental, économique et sociétal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère de l'environnement - DGECC 	Moyen terme
<p>22. INSTITUT MONDIAL POUR LA CROISSANCE VERTE (GGGI) Étudier les possibilités de collaboration et de cofinancement avec l'Institut mondial pour la croissance verte (GGGI) – organisation internationale dédiée au soutien et à la promotion d'une croissance économique durable dans les pays en développement et les économies émergentes. Le GGGI a été créé en 2012, à la Conférence des Nations Unies sur le développement durable Rio+20. Selon le GGGI, et à la différence des modèles de développement classiques qui comptent sur l'épuisement et la destruction non durables des ressources naturelles, la croissance verte est un progrès coordonné de la croissance économique, de la durabilité environnementale, de la réduction de la pauvreté et de l'inclusion sociale, dans une perspective de développement et d'utilisation durables des ressources mondiales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - GGGI 	Long terme
<p>23. FONDS DES ÉNERGIES DURABLES POUR L'AFRIQUE (SEFA) Étudier les possibilités de collaboration et de cofinancement avec l'AfDB qui a pris la tête des efforts visant à mettre en place le Fonds des énergies durables pour l'Afrique (SEFA), pour faciliter l'accès au financement et à des garanties couvrant les risques privés pour la mise en œuvre de projets d'énergies renouvelables.</p> <p>Le SEFA prévoit le financement de la phase initiale pour les petits et moyens projets d'énergies renouvelables ainsi que le développement technique et l'acquisition de compétences pour les entrepreneurs et les développeurs.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - AfDB 	Moyen terme
<p>24. FONDS D'INTERVENTION POUR L'ENVIRONNEMENT (FIE) Envisager la mise en place d'un Fonds d'intervention pour l'environnement (FIE).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les missions de financement devront : <ul style="list-style-type: none"> - mobiliser du financement national et international en faveur de l'environnement au Burkina Faso ; - allouer des fonds (subventions) ou faciliter des incitations financières (bonifications des taux d'intérêt, garanties de prêts) pour les diverses parties prenantes nationales conformément à leurs compétences en gestion et protection de l'environnement ; - assurer le suivi et rendre compte de l'utilisation des fonds reçus et attribués. 	<ul style="list-style-type: none"> - ANEREE - Ministère de l'environnement - Direction de l'économie verte et du changement climatique 	Long terme
<p>25. D'autres formes différentes de financement peuvent inclure les systèmes fiscaux nationaux, l'émission de titres du Gouvernement, des contributions et loteries volontaires, des méthodes de mobilisation de fonds burkinabè venant de l'étranger, des obligations garanties par des pays donateurs vendues sur le marché financier, des allocations provenant de fonds générés par la vente de quotas d'émission, des partenariats publics privés, des prêts subventionnés, du financement participatif et l'actionnariat populaire, entre autres.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère des finances - Ministère allemand de la coopération et du développement économiques 	Long terme

D. MATIÈRE PREMIÈRE

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>26. Promouvoir l'amélioration des rendements agricoles (productivité, utilisation de l'énergie et de l'eau, utilisation d'engrais, changements de l'utilisation des terres).</p> <p>Promouvoir des pratiques agricoles innovatrices afin de permettre la production à grande échelle de matière première et de biocarburant.</p>		Moyen terme
<p>27. Si le jatropha au Burkina Faso a quelque chance que ce soit d'être un succès à l'échelle commerciale, il faudra des plantes hybrides donnant des performances de haute qualité pour empêcher des désillusions inutiles et coûteuses. Des plantes hybrides de jatropha à haut rendement certifié provenant de sites de reproduction spéciaux au Cameroun exploités par des Allemands sont potentiellement disponibles pour des essais de plantations et la propagation de masse au Burkina Faso.</p>		Court terme
<p>28. Développer des moyens de sélection génomique et de sélection à l'aide de marqueurs :</p> <ul style="list-style-type: none"> • mettre en place/exploiter des sites d'essais à l'échelle sous commerciale afin de faire de la recherche développement avec des génotypes/résidus existants ; • former des spécialistes d'extension régionale/transfert de technologies qui assureront l'interface avec les producteurs (agriculteurs/propriétaires fonciers), les sous traitants et les communautés ; • accélérer l'amélioration des rendements des cultures en étendant les services de renforcement des capacités et services d'extension pour promouvoir les techniques agricoles modernes. <p>Les partenaires potentiels en vue d'une collaboration devront inclure ENBW et JatroSolutions.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ENBW JatroSolutions - Université de Hohenheim - Université de Ouagadougou 	Court terme
<p>29. Élargir les essais locaux des nouvelles variétés de biomasse les plus prometteuses.</p>	- PNUD	Moyen terme
<p>30. Établir deux pépinières de jatropha décentralisées pour la production de semis de qualité supérieure et à haut rendement à partir de plantes améliorées.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - ENBW - JatroSolutions 	Moyen terme
<p>31. Appuyer la mise en place d'une plantation de démonstration de jatropha de 1 000 ha, en culture intercalaire avec des mangos, des haricots, des noix de cajou, des maïs, du gingembre, du sésame et des arachides.</p>		Moyen terme
<p>32. Augmenter la production de la matière première de prochaines générations améliorée en vue de son déploiement.</p>	- PNUD	Long terme
<p>33. Afin d'arrêter le processus de dégradation et d'améliorer la productivité agricole par hectare, l'utilisation d'engrais organiques est nécessaire :</p> <ul style="list-style-type: none"> • étant donné ses propriétés prouvées, l'utilisation du tourteau de jatropha disponible devrait être activement encouragée ; • la reconnaissance par le Gouvernement des tourteaux de jatropha comme engrais organique faciliterait la valorisation de ce produit et encouragerait son utilisation à l'échelle nationale. 	- Ministère de l'agriculture	Court terme

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
34. Étant donné l'effet positif sur l'atténuation du changement climatique et la séquestration du carbone, le développement et l'expansion de plantations d'anacardiers doivent être encouragés et stimulés.	- Ministère de l'agriculture - Ministère de l'environnement	Moyen terme
35. Effectuer des recherches approfondies sur les pratiques de la culture d'arbres et de graminées sur des pâturages qui pourraient séquestrer le carbone et renforcer la biodiversité.		Long terme
36. Accélérer le boisement grâce à des incitations pour cultiver des arbres sur des terres dégradées et au moyen du partage des meilleures pratiques pour une gestion durable des forêts.	- Ministère de l'environnement	Long terme
E. TRAITEMENT ET TECHNOLOGIE		
37. Augmenter la vitesse de traitement des produits agricoles dans le pays. Améliorer les capacités de traitement du jatropha, de l'anacarde et du karité.	- Harburg Freuden-berger - GEA	Moyen terme
38. Évaluer les emplacements les plus prometteurs pour la capacité durable de traitement des matières premières.		Moyen terme
39. Pour améliorer les taux d'extraction d'huile et l'économie des procédés, les opérations nationales d'extraction de l'huile et d'usinage doivent être améliorées et intégrer les plus récentes normes technologiques. <ul style="list-style-type: none"> • Cela comprend les méthodes innovatrices d'extraction d'huile en phase aqueuse et l'optimisation du décorticage. • Les partenaires potentiels de l'industrie sont Harburg-Freudenberger Group et GEA Group (Allemagne). 	- Harburg Freuden-berger - GEA	Moyen terme
40. Compte tenu du portefeuille national de sources de matières premières identifiées, il serait, sur le plan économique, logique de choisir une usine de traitement de multiples matières premières. BioEnergy International (BDI) AG (Autriche) a mis au point un concept éprouvé, même pour une usine de fabrication de biocarburant à petite échelle à partir de multiples matières premières.	- BDI Autriche	Long terme
41. Étudier la possibilité d'une solution consistant à une micro raffinerie utilisant le craquage catalytique (zone verte), potentiellement en partenariat avec la German Fraunhofer Society, le Ministère allemand de la coopération et du développement économiques et le Centre aérospatial allemand (DLR).	- Fraunhofer - Ministère allemand de la coopération et du développement économiques - Centre aérospatial allemand (DLR)	Long terme
F. STRUCTURE DU MARCHÉ ET LOGISTIQUE		
42. • Si l'on veut mettre en place au Burkina Faso une production de biocarburant pour l'aviation basée sur des ressources nationales de matières premières identifiées, il est inévitable que soient initiées de fortes initiatives gouvernementales en matière d'infrastructure et de logistique, qui puissent contribuer à faire baisser les coûts des matières premières.	- Ministère des finances - Ministère de l'agriculture	

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>43. Les facteurs clés du développement d'une chaîne d'approvisionnement de carburant d'aviation alternatif sont les aspects logistiques, à savoir des endroits où la biomasse pertinente est cultivée et comment elle est collectée, stockée et traitée. Les aspects logistiques dépendent fortement de l'emplacement de la station.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la compréhension de la logistique pour une récolte efficace des résidus de culture et autres résidus agricoles. • Améliorer la récolte, la collecte, le stockage, la densification, le prétraitement et le transport de la biomasse physique jusqu'à l'installation de conversion. • Augmenter les capacités de stockage (construction d'entrepôts de stockage, en formant les magasiniers, etc.) afin d'éviter les pertes dues aux insectes et autres organismes nuisibles. <p>Les meilleures pratiques en matière de logistiques pour une collecte efficace et durable des résidus devraient être diffusées.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - SONABHY - SEGAS-BF 	Moyen terme
<p>44. Négocier la mise en place d'une co entreprise logistique avec SONABHY.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Même si le traitement des matières premières et la production de biocarburants au Burkina Faso étaient lancés avec succès, le transport et la logistique poseront encore un défi majeur car les installations pétrochimiques "les plus proches" capables de convertir les biocarburants en carburants d'aviation alternatifs sont toutes situées en Europe. Toutefois, la compagnie étatique d'hydrocarbure SONABHY a mis en place une infrastructure logistique qui pourrait offrir une possibilité efficace qui mérite d'être étudiée. L'approvisionnement en carburant à base de pétrole est assuré par une grande flotte de camions citernes qui font continuellement les 1 000 km de route jusqu'aux ports maritimes de Lomé (Togo), Cotonou (Bénin) ou Abidjan (Côte d'Ivoire). Alors que la flotte de SONABHY livre les carburants fossiles au Burkina Faso, les camions repartent à vide. Si la production nationale de biocarburant au Burkina Faso dépassait un certain volume (élevé), la matière première pourrait théoriquement être chargée sur les camions qui font la navette et pourrait être transportée par la route jusqu'à un parc de stockage à l'un des trois ports maritimes, sans dépenses supplémentaires. 	<ul style="list-style-type: none"> - SONABHY - SEGAS-BF - Total 	Moyen terme
<p>45. La Société d'entrepôt, de gestion de garanties et de sûretés du Burkina Faso (SEGAS-BF) est le seul intermédiaire sur le marché travaillant à titre privé et qui offre aux agriculteurs et producteurs une assistance pour l'accès aux marchés et la commercialisation des produits, les installations de stockage et d'entrepôt, et le financement commercial, l'assurance récoltes et des services transparents de fixation des prix. Une mobilisation à grande échelle des agriculteurs et la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement nationale pour les biocarburants aura vraisemblablement besoin des services de SEGAS-BF et fera fond sur leur expérience du secteur agricole. Étant donné les liens étroits entre la société et les participants au marché, les institutions financières et les sociétés d'assurance, elle pourrait potentiellement jouer un rôle crucial en matière de crédits et de micro financement agricoles pour les petits exploitants et les petits planteurs associés.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - SEGAS-BF - Allianz 	Moyen terme

G. CADRE RÉGLEMENTAIRE ET POLITIQUES D'APPUI

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>46. L'appui aux politiques a joué un rôle de premier plan dans le développement et la commercialisation à l'échelle mondiale des biocarburants pour le transport, comme au Brésil, aux États Unis et dans l'UE. Les deux principaux moteurs stratégiques dans ces cas étaient la sécurité énergétique et l'atténuation des changements climatiques. Il existe une grande diversité d'instruments politiques et de mesures pour obtenir l'objectif souhaité de la réduction des émissions de GES et donc pour influencer l'introduction progressive des SAF sur le marché. Ce portefeuille d'instruments politiques comprend, par exemple, une campagne de sensibilisation, l'appui à la recherche développement, la gouvernance et la coordination, des accords volontaires, des mesures basées sur le marché, des régimes de financement privés et publics, des permis d'émissions négociables, des crédits d'impôt, les quotas d'incorporation, les subventions et incitations, et les nouveaux règlements et normes.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alors que la majorité des instruments vise directement ou indirectement les utilisations des carburants alternatifs et des combustibles, il peut sembler souhaitable de se concentrer sur une étape antérieure de la chaîne d'approvisionnement des carburants d'aviation alternatifs, car les économies d'émissions et les avantages économiques des carburants durables ne peuvent être réalisés que si des mesures sont prises pour promouvoir et appuyer activement leur développement. • En considérant comme acquise la demande mondiale de SAF, le principal train de mesures de stimulation pour le Burkina Faso concernera donc, de préférence, toutes les mesures qui encouragent la production de matières premières à grande échelle, en combinaison avec des exclusivités à la reforestation et à l'agroforesterie et conformément aux circonstances nationales. • De telles mesures pourraient favoriser, par exemple, une augmentation durable des rendements agricoles, de l'efficacité de la production de matière première et de l'enlèvement et de l'utilisation des résidus agricoles. • la disponibilité de la matière première de biomasse devrait en fin de compte attirer des investissements en technologie. 	<p>- Fondation Hanns-Seidel</p>	<p>Moyen terme</p>
<p>47. La reprise du secteur des cultures énergétiques appelle la mobilisation des autorités au niveau le plus élevé, car elle ne peut être le résultat d'une politique agricole unique. Pour faire face aux défis agricoles et en matière d'énergie renouvelable, il faut des politiques dans de nombreux domaines (agriculture, énergies de remplacement, commerces, infrastructure, environnement, protection sociale, etc.), qui doivent être menées avec un degré élevé de cohérence.</p>		
<p>48. Les défis étant importants et les ressources disponibles limitées, pour contrer avec succès les incidences négatives du changement climatique, il faudra la participation de tous les acteurs nationaux, depuis le Gouvernement jusqu'aux communautés locales. Il faudra également une assistance adéquate de la part de la communauté internationale, pour appuyer les propres efforts du pays.</p> <p>Pour la protection des réserves naturelles résiduelles, il faut impliquer les communautés locales, afin de les empêcher d'exploiter les forêts résiduelles pour du bois combustible ou l'expansion des zones agricoles.</p>		

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>49. Faciliter la coopération et la coordination internationales dans trois domaines principaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • renforcement des capacités, assistance technique et transfert de technologie ; • travaux scientifiques et techniques de recherche développement menés dans le cadre d'accords multilatéraux et bilatéraux, afin de partager mutuellement les risques, d'éviter les chevauchements et de tirer parti des meilleures pratiques internationales. 	<ul style="list-style-type: none"> - BDI Autriche - Harburg-Freuden -berger - GEA - Fraunhofer 	Moyen terme à long terme
<p>50. S'assurer de l'engagement politique et mettre en place des cadres stratégiques et réglementaires efficaces sont des éléments cruciaux qui peuvent améliorer le climat général d'investissement pour la bioénergie.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le Gouvernement burkinabè a un rôle à jouer à tous les niveaux et auprès de toute une gamme de ministères (tous les secteurs), pour la conception de politiques efficaces. • Pour encourager l'investissement dans les technologies et projets de biocarburants, les politiques d'incitation doivent être claires et porter sur le long terme. • Des politiques pourraient également porter sur les obstacles au développement d'activités de petite échelle, par exemple des pompes à eau fonctionnant au biocarburant. 		Court à moyen terme
<p>51. Un élément clé de la livraison de biocarburant au secteur de l'aviation est la mise en place d'un mécanisme de soutien approprié.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Afin de réaliser des économies d'échelle et une réduction des coûts, un cadre politique stable et à long terme pour susciter la confiance des investisseurs et induire la demande est nécessaire. Cela pourrait être réalisé, par exemple, par l'annonce de cibles ambitieuses, l'attribution de mélanges en exclusivité ou des taxes carbone plus élevées – à condition qu'il y ait un approvisionnement suffisant de matière première. 		Court à moyen terme
<p>52. PNDES</p> <ul style="list-style-type: none"> • En juillet 2016, le Burkina Faso a adopté son plan national de développement économique et social, (PNDES), comme principal instrument pour définir les lignes directrices pour le développement économique et social pendant la période allant de 2016 à 2020. Le PNDES identifie des objectifs stratégiques et des mesures d'application pour soutenir la croissance et la résilience et améliorer, inter alia, l'efficacité de la gouvernance environnementale. • Sur la base des conclusions et constatations présentées ci-dessus, il est recommandé de modifier et d'amender le PNDES en conséquence. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ministère de l'énergie - Ministère des finances - Ministère de l'environnement 	Court terme
<p>53. Amender et modifier le cadre de la Stratégie de développement rural (SDR).</p>	-Fondation Hanns-Seidel	Moyen terme
<p>54. Afin d'alléger les fardeaux de l'investissement et en l'absence de réglementation, les exploitants et producteurs nationaux devraient être assurés que la taxe nationale sur le carburant [taxe sur les produits pétroliers (TPP)] ne s'applique pas au secteur d'agrocaburant du jatropha.</p>		Long terme

Recommandations/Mesures de suivi Ce qui doit être fait	Parties prenantes à impliquer	Priorité et échéance
<p>55. Mettre au point des outils de gestion des risques comme l'assurance récoltes afin de promouvoir la production de cultures bioénergétiques dédiées pour la production de bioénergie. L'assureur convient d'indemniser (c'est à dire de protéger) l'agriculteur assuré contre les pertes qui surviennent pendant la campagne agricole.</p>	<p>- Allianz</p>	<p>Court terme</p>
<p>56. Du fait de sa faiblesse, le cadre juridique du pays ne protège pas les agriculteurs contre l'usurpation ou la destruction de leurs efforts, qui mettraient ainsi en danger les gains agricoles qu'ils ont réalisés jusqu'ici. Par exemple, les agriculteurs du Burkina Faso n'ont pas de droits juridiques quant aux arbres qui poussent sur leur propriété.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des changements de politiques pourraient leur donner ce droit de propriété, permettant ainsi l'extension d'une agriculture adaptée aux changements climatiques. • Renforcer le régime foncier et améliorer la gouvernance foncière pour prévoir des incitations en faveur d'un aménagement plus intensif des terres. • Évaluer les lacunes et les mécanismes pour permettre aux agriculteurs et aux producteurs de légaliser les situations en matière foncière. 		<p>Moyen à long terme</p>

BIBLIOGRAPHIE

1. Dynamique de production du jatropha au Burkina Faso, Mission ARP pour l'**ADECIA** de janvier 2013, Rapport final, Juin 2013.
2. **Aeronautics** and Space Engineering Board, Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research - Reducing Global Carbon Emissions, Washington D.C. 2016.
3. **Aeronautics** Science and Technology Subcommittee, U.S. Committee on Technology of the National Science and Technology Council, FEDERAL ALTERNATIVE JET FUELS RESEARCH AND DEVELOPMENT STRATEGY, June 2016.
4. **Agence** Nationale de la Météorologie, ANAM, Histoire de la Météorologie en Burkina Faso.
5. **Agence** pour le développement de la coopération internationale dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation et des espaces ruraux, Jean-Yves DUPRE et Guillaume VERMEULEN, Rapport sur les politiques publiques en faveur des biocarburants à base de cultures paysannes de jatropha au Mali et au Burkina Faso, PROGRAMME D'APPUI AU DEVELOPPEMENT ET A LA STRUCTURATION DE LA FILIERE PAYSANNE DE JATROPHA / BIOCARBURANT (HUILE & BIODIESEL) EN AFRIQUE DE L'OUEST, 16 Déc. 2012.
6. Md. Hasan **Ali**, Biodiesel from Neem oil as an alternative fuel for Diesel engine, *Procedia Engineering* 56 (2013), p.625 – 630.
7. **African** Development Bank Group, Burkina Faso, CASHEW DEVELOPMENT SUPPORT PROJECT IN COMOÉ BASIN FOR REDD+ (PADA/REDD+), Feb. 2017.
8. **African** Development Bank Group, ZAMBIA, CASHEW INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT PROJECT (CIDP), Oct. 2015.
9. **African** Development Bank Group, GAZETTED FORESTS PARTICIPATORY MANAGEMENT PROJECT FOR REDD+ (PGFC/REDD+), COUNTRY: BURKINA FASO, PROJECT APPRAISAL REPORT, Nov. 2013.
10. **African** Development Fund, BURKINA FASO, ELECTRIFICATION OF SEMI-URBAN AREAS OF OUAGADOUGOU AND BOBO-DIOULASSO, Aug. 2016.
11. **African** Development Fund, ENERGY SECTOR BUDGET SUPPORT PROGRAMME (PASE), Burkina Faso, Appraisal Report, June 2015.
12. **African** Development Fund, BAGRE GROWTH POLE SUPPORT PROJECT (PAPCB), BURKINA FASO APPRAISAL REPORT, Apr. 2015.
13. Grupo **Ageco**, IS GOVERNMENT INTERVENTION IN AGRICULTURE STILL RELEVANT IN THE 21ST CENTURY? Final Report presented to Union des Producteurs Agricoles, Oct. 2015.
14. Duygu **Akkaya** et al., Government Interventions in Promoting Sustainable Practices in Agriculture, Graduate School of Business, Stanford University, 25 Sept. 2016.
15. Md. Tanveer **Ahmad**, Global Civil Aviation Emissions Standards – from Noise to Greener Fuels, McGill Centre for Research in Air and Space Law, Occasional Paper Series No.XI, July 2016.
16. Glen **Anderson** et al., CLIMATE VULNERABILITIES AND DEVELOPMENT IN BURKINA FASO AND NIGER, Background Paper, prepared for USAID, November 2012.
17. Irene **Angeluccetti** et al., Land degradation in a semi-urban catchment in Burkina Faso: monitoring land use change and soil erosion with earth observations and field surveys, *Geophysical Research Abstracts* Vol. 17, EGU2015-12673, 2015.
18. Javier **Arevalo**, Improving woodfuel governance in Burkina Faso: The experts' assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57(2016) 1398–1408
19. **Ahmed** Saad Attaya et al., Progress in jatropha curcas tissue culture, *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 6(1): 6-13, 2012.
20. Rafael Grillo **Avila** et al., REDD+ in ICAO: Ready for Takeoff, *Carbon & Climate Law Review*, Vol. 10/2, 2016, p.134-143.
21. Y **Azoumah** et al., Exergy efficiency applied for the performance optimization of a direct injection compression ignition (CI) engine using biofuels, *Renewable Energy* 34 (2009).
22. John **Baffes**, Markets for Cotton By-Products, Global Trends and Implications for African Cotton Producers, The World Bank Development Prospects Group, June 2010.
23. **Bakhtiari**, F., Valuation of climate change mitigation co-benefits. UNEP DTU Partnership. Copenhagen, Denmark, 2016.
24. Rob **Bailis**, Derik Broekhoff, and Carrie M. Lee, Supply and sustainability of carbon offsets and alternative fuels for international aviation, Stockholm Environment Institute, Working Paper 2016-03.
25. Sébastien **Bainville**, Land rights issues in Africa: the contribution of agrarian systems research in Burkina Faso, *The Journal of Peasant Studies*, Vol. 44, 2017 - Issue 1, p.261-285.
26. Luís Augusto **Barbosa** Cortez (ed.), ROADMAP FOR SUSTAINABLE AVIATION BIOFUELS FOR BRAZIL - A Flightpath to Aviation Biofuels in Brazil, 2014.
27. Ty Jason **Barten**, Evaluation and prediction of corn stover biomass and composition from commercially available corn hybrids, Graduate Theses and Dissertations (2013), Paper 13347.
28. Philippe **Bayen** et al., The use of biomass production and allometric models to estimate carbon sequestration of Jatropha curcas L. plantations in western Burkina Faso, *Environ Dev. Sustain* 2015.
29. **Becken**, S. & Mackey, B., What role for offsetting aviation greenhouse gas emissions in a deep-cut carbon world? *Journal of Air Transport Management*, 63, 71-83 (2017).
30. Hildegard **Bedarff**, Climate Change, Migration, and Displacement - The Underestimated Disaster, Center for Research on the Environment and Development, Hamburg University, May 2017.
31. L.K. **Behera** et al., In vitro mass multiplication of Jatropha (Jatropha curcas L.) through axillary bud culture, *Journal of Applied and Natural Science* 6 (1): 189-192 (2014).
32. Elsayed B. **Belal**, Bioethanol production from rice straw residues, *Braz J Microbiol.* 2013; 44(1): 225–234.
33. **Bern** University of Applied Sciences, School of Agricultural, Forest and Food Sciences HAFL and CSIR-Forestry Research Institute of Ghana, REDD+ in agricultural landscapes: evidence from Ghana's REDD+ process, 2014.

34. Nicolas **Berry** et al., Community Biocarbon Projects in West Africa: Challenges and Lessons learned, Bioclimat and the World Agroforestry Centre (ICRAF), August 2016.
35. Nils **Borchard** et al., Sustainable forest management for land rehabilitation and provision of biomass-energy, CIFOR, Brief No. 41, February 2017.
36. Outtara **Brama**, ETUDE COMPAREE DES CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES DES GRAINES DE jatropha curcas L. PROVENANT DE TROIS ZONES CLIMATIQUES DU BURKINA FASO, DIPLOME D'INGENIEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL, Juin 2010.
37. Joachim **Buse**, Market Commercialization of Alternative Aviation Fuels, in: Martin Kaltschmitt/ Ulf Neuling (ed.), Biokerosene, Status and Prospects, p.741 – 759, Hamburg 2018.
38. Caitlin S. **Byrt** et al., Prospecting for Energy-Rich Renewable Raw Materials: Sorghum Stem Case Study, PLoS One, 2016; 11(5), published online 27 May 2016.
39. Drew **Christiansen**, Traditional Authority and Good Governance in Africa, Georgetown University, Berkeley Center for Religion, Peace and World Affairs, 27 April 2015.
40. Christopher J. **Chuck** (ed.), Biofuels for Aviation, Feedstocks, Technology and Implementation, 2016.
41. **CIFOR**, Sustainable bioenergy systems to restore and valorize degraded land, Brief No. 37, March 2016.
42. **Civil** Air Navigation Services Organisation (CANSO), Air Navigation Service Provider Carbon Footprinting, A Best Practice Guide, 2017.
43. **Climate** Advisers, Linking the ICAO Global Market-Based Mechanism to REDD+ in Peru, March 2017.
44. **COMITE** PERMANENT INTER-ÉTATS DE LUTTE CONTRE LA SECHERESSE DANS LE SAHEL, SECRETARIAT EXECUTIF, BIO-CARBURANTS AU BURKINA, 2007.
45. SP/ **CONEDD**, Troisième sur le rapport de l'état de l'environnement au Burkina Faso, Dec 2010.
46. **Conservation** International et al., LINKING FLIGHT AND FORESTS: THE ESSENTIAL ROLE OF FORESTS IN SUPPORTING GLOBAL AVIATION'S RESPONSE TO CLIMATE CHANGE, Apr. 2016.
47. Tizane **Daho** et al., Influence of engine load and fuel droplet size on performance of a CI engine fueled with cottonseed oil and its blends with diesel fuel, Département de Physique, Université de Ouagadougou, Applied Energy 111 (2013).
48. Tizane **Daho** et al., Optimization of the combustion of blends of domestic fuel oil and cottonseed oil in a non-modified domestic boiler, Fuel 88 (2009).
49. Tizane **Daho** et al, Combustion of vegetable oils under optimized conditions of atomization and granulometry in a modified fuel oil burner, Fuel 118 (2014).
50. Tizane **Daho** et al., Model for predicting evaporation characteristics of vegetable oils droplets based on their fatty acid composition, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012).
51. Tizane **Daho** et al., Study of droplet vaporization of various vegetable oils and blends of domestic fuel oil/cottonseed oil under different ambient temperature conditions, Biomass and Bioenergy 46 (2012).
52. AMY ALBERTA **DENNIS**, CIVIL SOCIETY ORGANIZATIONS IN WEST AFRICA AND GOOD GOVERNANCE: A CASE STUDY OF GHANA, UNIVERSITY OF GHANA, LEGON, July 2014.
53. U.S. **Department** of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Alternative Aviation Fuels: Overview of Challenges, Opportunities, and Next Steps, 2017.
54. William J A **Dick** et al., Government Interventions in Agricultural Insurance, International Conference on Agricultural Risk and Food Security 2010, Agriculture and Agricultural Science Procedia 1 (2010) 4–12.
55. Kangbéni **Dimobe** et al., Identification of driving factors of land degradation and deforestation in the Wildlife Reserve of Bontoli, (Burkina Faso, West Africa), Global Ecology and Conservation 4 (2015) 559–571.
56. **Ecofys**, Roadmap for a Meta-standard for sustainable alternative jet fuels, Final report, 2016.
57. **E4tech** (UK) Ltd, From the Sugar Platform to biofuels and biochemical, Final report for the European Commission Directorate-General Energy N° ENER/C2/423-2012/SI2.673791, April 2015, V2.1.
58. **E4tech** (UK) Ltd and Ricardo Energy & Environment for Department for Transport, Future Fuels for Flight and Freight Competition – Feasibility Study, Final Report, 23 Jan. 2017.
59. **Environment** and Climate Change Canada (ECCC), Clean Fuel standard: Discussion Paper, Feb. 2017.
60. The **Ethiopian** Society for Consumer Protection, and the GAIA Foundation, Biofuels – A Failure for Africa, A briefing by the African Biodiversity Network, Dec. 2010.
61. Daniel **Etongo** et al., Poverty and Environmental Degradation in Southern Burkina Faso: An Assessment Based on Participatory Methods, Land 2016, 5, 20; doi:10.3390/land5030020.
62. **European** Commission, Directorate General for Trade, European Union, Trade in goods with Burkina Faso, 03 May 2017.
63. Maura **Farver** and Christopher Frantz, Garbage to Gasoline: Converting Municipal Solid Waste to Liquid Fuels Technologies, Commercialization, and Policy, Duke University, April 2013.
64. **Federal** Aviation Administration (FAA), FAA Office of Environment and Energy, Aviation Emissions, Impacts & Mitigation - A Primer, Washington D.C. January 2015.
65. Scott **Fields**, Continental Divide: Why Africa's Climate Change Burden Is Greater, Environmental Health Perspectives 2005 Aug; 113(8): A534–A537.
66. **Ibrahim** H. Gado, Salifou K. Ouiminga, Tizane Daho Arsene, H. Yonli Moussa Sougoti, Jean Kouliadiati, Characterization of Briquettes Coming From Compaction of Paper and Cardboard Waste at Low and Medium Pressures, Waste Biomass Valor, 24 Nov. 2013.
67. Ousman **Gajigo** et al., Gold Mining in Africa: Maximizing Economic Returns for Countries, African Development Bank Group, Working Paper No. 147, March 2012.
68. Nasir Anka **Garba**, Rice straw & husk as potential sources for mini-grid rural electricity in Nigeria, Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research, Vol. 4, Issue 4, 2015.
69. Jesus **Gonzalez-Garcia** et al., SUB-SAHARAN AFRICAN MIGRATION Patterns and Spillovers, International Monetary Fund, Oct. 2016.

70. Damodhar J **Garkal** et al., REVIEW ON EXTRACTION AND ISOLATION OF CASHEW NUT SHELL LIQUID, INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIONS IN ENGINEERING RESEARCH AND TECHNOLOGY [IJERT], VOLUME 1, ISSUE 1 NOV-2014.
71. Charly **Gatete** & Marie-Hélène Dabat, From the fuel versus food controversy to the institutional vacuum in biofuel policies: evidence from West African countries, *Energy, Sustainability and Society*, December 2017, 7:12.
72. Ioannis **Gravalos**, An Experimental Determination of Gross Calorific Value of Different Agroforestry Species and Bio-Based Industry Residues, *Natural Resources*, 2016, 7, 57-68.
73. Jeongwoo **Han** et al., Development of Tallow-based Biodiesel Pathway in GREETM, Systems Assessment Group, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, online publication, Oct. 2013.
74. Doug **Hawkins** and Yingheng Chen, Hardman & Co, Future Harvest, 21st Century Jatropha, 03 March 2015.
75. Jorgen **Hinge** et al., Unexploited biomass sources, availability and combustion properties – D5.1, Solutions for biomass fuel market barriers and raw material availability - IEE/07/777/SI2.499477, Aarhus May 2011.
76. Fidèle **HIEN**, Christophe KIEMTORE, EVALUATION A MI-PARCOURS DU SOUS-PROGRAMME BOUCLE DU MOUHOUN DU PROGRAMME NATIONAL DE PARTENARIAT POUR LA GESTION DURABLE DES TERRES, RAPPORT PROVISoire, PNUD, Mars 2016.
77. Carol **Hunsberger**, Explaining bioenergy: representations of jatropha in Kenya before and after disappointing results, published online Nov 22, 2016.
78. **International** Carbon Reduction and Offset Alliance (ICROA), Unlocking the hidden value of carbon offsetting, Sept. 2014.
79. **International** Civil Aviation Organization (ICAO), Onboard a Sustainable Future, ICAO ENVIRONMENTAL REPORT 2016, AVIATION AND CLIMATE CHANGE.
80. **International** Council on Clean Transportation (ICCT), Alternative Jet Fuel Development and Deployment in North America, May 2017.
81. **International** Council on Clean Transportation (ICCT), Sammy El Takriti et al., Mitigating International Aviation Emissions - Risks and Opportunities for Alternative Jet Fuels, March 2017.
82. **International** Council on Clean Transportation (ICCT), Anastasia Kharina, Nikita Pavlenko, Alternative jet fuels: Case study of commercial-scale deployment, Oct. 2017.
83. **International** Council on Clean Transportation (ICCT), Nikita Pavlenko et al., DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A DURABLE LOW-CARBON FUEL INVESTMENT POLICY FOR CALIFORNIA, Oct. 2016
84. **International** Energy Agency (IEA), Executive Committee, Sustainable Production of Woody Biomass for Energy, 2002.
85. **International** Energy Agency (IEA), Mobilizing sustainable bioenergy supply chains: Opportunities for agriculture, Summary and Conclusions from the IEA Bioenergy ExCo77 Workshop, 2016.
86. **International** Renewable Energy Agency (IRENA), BOOSTING BIOFUELS Sustainable Paths to Greater Energy Security, 2016.
87. **International** Renewable Energy Agency (IRENA), INNOVATION OUTLOOK - ADVANCED LIQUID BIOFUELS, 2016.
88. **International** Renewable Energy Agency (IRENA), Production of Liquid Biofuels - Technology Brief, Jan 2013.
89. **International** Renewable Energy Agency (IRENA), BIOFUELS FOR AVIATION - TECHNOLOGY BRIEF, Jan. 2017.
90. **International** Renewable Energy Agency (IRENA), Global Bioenergy SUPPLY AND DEMAND PROJECTIONS, A working paper for REmap 2030, Sept. 2014.
91. Fei **Jia** et al., Efficient extraction method to collect sugar from sweet sorghum, *Journal of Biological Engineering*, 2013; 7: 1.
92. Raphael M. **Jingura** and Reckson Kamusoko, Experiences with Jatropha cultivation in sub-Saharan Africa: Lessons for the next phase of development, Pages 333-337 | Published online: 16 Dec 2014.
93. A. **Kadeba**, Land cover change and plants diversity in the Sahel: A case study from northern Burkina Faso, *Ann. For. Res.* 58(1): 109-123, 2015.
94. Ndèye Mbayang **KEBE**, Etude des opportunités de valorisation des biocarburants en milieu rural et leurs effets socio-économiques: Cas du Jatropha Curcas L., MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE, Senegal, UNIVERSITE DE THIES, 2013.
95. **Kima**, S.A., Okhimamhe, A., Kiema, A. et al., Adapting to the impacts of climate change in the sub-humid zone of Burkina Faso, West Africa: Perceptions of agro-pastoralists, *Pastoralism* (2015) 5: 16. doi:10.1186/s13570-015-0034-9.
96. ALEXANDER **KIYOSHI** MINO, ETHANOL PRODUCTION FROM SUGARCANE IN INDIA: VIABILITY, CONSTRAINTS AND IMPLICATIONS, THESIS, Univ. of Illinois, 2010.
97. **Klauber**, Adam et al., Innovative Funding for Sustainable Aviation Fuel at U.S. Airports: Explored at Seattle-Tacoma International, Rocky Mountain Institute, SkyNRG, July 2017.
98. Kim **Knauer** et al., Monitoring Agricultural Expansion in Burkina Faso over 14 Years with 30 m Resolution Time Series: The Role of Population Growth and Implications for the Environment, *Remote Sens.* 2017, 9, 132; doi:10.3390/rs9020132.
99. Marcel **Kohler**, An Economic Assessment of Bioethanol Production from Sugar Cane: The Case of South Africa, SAEF Working Paper No. 2016/01/08, August 2016.
100. Estelle **KOUSSOUBE**, Augustin LOADA, Gustave NEBIE, Marc RAFFINOT, Political Economy of growth and poverty in Burkina Faso: Power, Institutions and Rents, DOCUMENT DE TRAVAIL DT/2014-01, Dauphine, Université de Paris.
101. **Kumar** S. et al., Production of Biodiesel from Animal Tallow via Enzymatic Transesterification using the Enzyme Catalyst Ns88001 with Methanol in a Solvent-Free System, *Fundamentals of Renewable Energy and Applications*, 2015, Vol.5:2.
102. **Laboratoire** de Physique et de Chimie de l'Environnement, Élaboration et utilisation de biocombustibles alternatifs à base d'huiles végétales dans des applications spécifiques: Production d'électricité et de force motrice en milieu rural-assainissement en milieu périurbain, Projet d'Appui à l'Enseignement Supérieur (PAES) de l'UEMOA, 2013-2016.
103. **Laboratory** for Aviation and the Environment (LAE), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Seamus J. Bann, A Stochastic Techno-Economic Comparison of Alternative Jet Fuel Production Pathways, June 2017.

104. **Laboratory** for Aviation and the Environment (LAE), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cassandra Vivian Rosen, Scenario based lifecycle analysis of greenhouse gas emissions from petroleum-derived transportation fuels in 2050, June 2017.
105. **Laboratory** for Aviation and the Environment (LAE), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Mark Douglas Staples, Bioenergy and its use to mitigate the climate impact of aviation, Feb. 2017.
106. **Laboratory** for Aviation and the Environment (LAE), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Pooja Suresh, Environmental and economic assessment of transportation fuels from municipal solid waste, June 2016.
107. **Laboratory** for Aviation and the Environment (LAE), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Gonca Seber, Robert Malina et al., Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow, Biomass and Bioenergy, Vol. 67, 108-118, Aug. 2014.
108. Frans **Lamers** and Robert van Kessel, Advanced Thermal Treatment Technologies for Waste – Present State of the Art –, 2011.
109. ROGALAMANDE AWORET GUENAEL **LAURENT**, SYNTHÈSE DE BIOCARBURANT PAR TRANSESTERIFICATION DE L'HUILE DE JATROPHA CURCAS EN CATALYSE HOMOGENE BASIQUE, Mémoire de Master, 2012-2013.
110. Steven **Lawry** et al., The Impact of Land Property Rights Interventions on Investment and Agricultural Productivity in Developing Countries: A Systematic Review, Jan 2014.
111. Amanda **Lenhardt**, A greener Burkina - Sustainable farming techniques, land reclamation and improved livelihoods, Sept. 2014.
112. Bo Yuan **Lim** et al., The Performance of a Jatropha Fruit Shelling Machine and the Future Improvement, Universal Journal of Applied Science 2(7): 233-236, 2014.
113. Pierre-Luc **Lizotte** et al., Ash Content and Calorific Energy of Corn Stover Components in Eastern Canada, Energies 2015, 8, 4827-4838, published 26 May 2015.
114. **LMC** International, Feedstocks for Sustainable Aviation Biofuels in Norway, Dec. 2012.
115. A.C. **Lokesh**, Neem Biodiesel - A Sustainability Study, Journal of Biomass to Biofuel, Volume 1, 2015.
116. Harold **Macauley**, Cereal Crops: Rice, Maize, Millet, Sorghum, Wheat, Background Paper, 2015.
117. Teresa M. Mata et al., Properties and Sustainability of Biodiesel from Animal Fats and Fish Oil, CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, VOL. 38, 2014, p.175-180
118. Stefan **Majer** et al., Biomass potentials and competition for biomass utilization, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)/ DBFZ, 17 July 2013.
119. Graham von **Maltitz** et al., The Rise, Fall and Potential Resilience Benefits of Jatropha in Southern Africa, Sustainability 2014, 6, 3615-3643, 05 June 2014.
120. Samson Daudet **Medza** et al., In Vitro Micropropagation of Jatropha curcas L. from Bud Aggregates, Journal of Technology Innovations in Renewable Energy, 2013, 2, 145-154.
121. Stelios **Michalopoulos** and Elias Papaioannou, On the Ethnic Origins of African Development: Chiefs and Precolonial Political Centralization, Acad Manag Perspect. 2015 Feb 1; 29(1): 32–71.
122. **MINISTÈRE** DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ECONOMIE VERTE ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE, Rapport Final, Mars 2016.
123. **MINISTÈRE** DE L'AGRICULTURE ET DE LA SECURITE ALIMENTAIRE, RAPPORT D'ACHEVEMENT DE LA MISE EN ŒUVRE DU PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT RURAL DURABLE (PDRD), Dec. 2013.
124. **MINISTÈRE** DE L'ENERGIE DES MINES ET DES CARRIERES, Garane Amidou and Faugere Garance, EVALUATION PRATIQUE CONCERNANT L'ADAPTATION DU STANDARD RSB POUR LES PETITS AGRICULTEURS ET ANALYSE DE LA SITUATION REGLEMENTAIRE ET POLITIQUE POUR LES BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO, Burkina Faso, Nov 2013.
125. **MINISTÈRE** DE L'ENERGIE DES MINES ET DES CARRIERES, SECRETARIAT GENERAL, DIRECTION GÉNÉRALE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, Rapport diagnostic actualisé de la filière agrocarburant à base de jatropha Curcas L. au Burkina Faso, Rapport Final, May 2016.
126. **MINISTÈRE** DE L'ENERGIE DES MINES ET DES CARRIERES, SECRETARIAT GENERAL, DIRECTION GÉNÉRALE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES, KONATE Salifou, KAFANDO Garance, DAHO Tizane, ELABORATION D'UNE STRATEGIE POUR LE DEVELOPPEMENT DES FILIERES DE PRODUCTION DES AGROCARBURANTS, Rapport des données – version provisoire, Jan. 2017.
127. **MINISTÈRE** DE L'ENERGIE DES MINES ET DES CARRIERES, SECRETARIAT GENERAL, DIRECTION GENERALE DE L'ENERGIE, Georges BAZONGO, Agronome, Dr. Denis OUEDRAOGO, Économiste, ETUDE DE FAISABILITE RELATIVE A LA PRODUCTION DE BIO ENERGIE, RAPPORT PROVISoire, Nov. 2010
128. **MINISTÈRE** DE L'AGRICULTURE ET DE LA SECURITE ALIMENTAIRE, SECRETARIAT GENERAL, RAPPORT D'ACHEVEMENT DE LA MISE EN ŒUVRE DU PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT RURAL DURABLE (PDRD), Déc. 2013.
129. **Ministère** de l'Énergie, Élaboration d'une stratégie pour le développement des filières de production des agrocarburants au Burkina Faso (étude en cours de validation dans le cadre du Projet jatropha Burkina), Financement FEM-PNUD, 2017.
130. **Ministère** de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Opportunités de développement des biocarburants au Burkina Faso, Financement GTZ, 2008.
131. **Ministry** of the Economy, Finance and Development, PNDES 2016-2010, Transformer le Burkina.
132. **Ministry** of the Economy, Finance and Development, National Plan for Economic and Social Development (PNDES) 2016-2020, Overview, Oct. 2016.
133. **Ministry** of Environment and Fishery Resources, BURKINA FASO NATIONAL CLIMATE CHANGE ADAPTATION PLAN (NAP), Final version, May 2015.
134. **Meena** Misra and Amarendra N. Misra, Jatropha: The Biodiesel Plant Biology, Tissue Culture and Genetic Transformation – A Review, Int. J. Pure Appl. Sci. Technol., 1(1) (2010), pp. 11-24.

135. **Mochizuki, J.**, Yanagida, J. F., Kumar, D., Takara, D., & Murthy, G. S. (2014), Life cycle assessment of ethanol production from tropical banagrass (*Pennisetum purpureum*) using green and dry processing technologies in Hawaii, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(4), 043128. doi:10.1063/1.4893673.
136. Darrell **Moellendorf**, Climate change and global justice, *WIREs Clim Change* 2012, 3:131–143. doi: 10.1002/wcc.158.
137. Isah Y. **Mohammed**, Comprehensive Characterization of Napier Grass as a Feedstock for Thermochemical Conversion, *Energies* 2015, 8, p.3403-3417, published 24 April 2015.
138. Kirsi **Mononen** and Sari Pitkänen, Sustainable Fuelwood Management in West Africa, CIFOR, Aug. 2016.
139. Roger CH. H. **Nebie**, Notes de Présentation, Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST).
140. Ibrahim NIENTA, consultant International, Chef de mission et Soungalo TRAORE, ÉVALUATION FINALE DE LA PREMIERE PHASE DU SOUS-PROGRAMME COORDINATION NATIONALE DU PROGRAMME NATIONAL DE PARTENARIAT POUR LA GESTION DURABLE DES TERRES, Rapport Final, MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ECONOMIE VERTE ET DU CHANGE-MENT CLIMATIQUE, SECRETARIAT PERMANENT DU CONSEIL NATIONAL POUR L'ENVIRONNEMENT ET LE DEVELOPPEMENT DURABLE, PROGRAMME NATIONAL DE PARTENARIAT POUR LA GESTION DURABLE DES TERRES, "Sous-programme Coordination Nationale N° 00072385–CPP", Mars 2016.
141. Svitlana **Nitiéma**-Yefanova et al., Ethyl biodiesel production from non-edible oils of *Balanites aegyptiaca*, *Azadirachta indica*, and *Jatropha curcas* seeds, *Renewable Energy*, Oct. 2016, DOI: 10.1016/j.renene.2016.04.100.
142. Jean Fidèle **Nzihou**, Improving Municipal Solid Waste Land Filling Disposal Process: Experiments with a Laboratory Scale Rotary Kiln, *Journal of Environmental Protection*, 2013, 4, 753-759.
143. Jean Fidèle **Nzihou** et al., Potential and Feasibility of Solid Municipal Waste Treatment with Gasifiers in a Developing Country: A Review for Burkina Faso, *British Journal of Applied Science & Technology* 4(3): 450-464, 2014.
144. Lawrence Ikechukwu **Obidike**, BIOFUEL PRODUCTION FROM WASTE ANIMAL FAT USING PYROLYSIS (THERMAL CRACKING), MSc RESEARCH DISSERTATION, University of the Witwatersrand, Johannesburg, June 2016.
145. Damilola S. **Olawuyi**, Sustainable Aviation and the Transfer of Environmentally Sound Technologies to Africa: Paradoxes, Barriers and Prospects, McGill Centre for Research in Air and Space Law, Occasional Paper Series No.XIII, July 2016.
146. T.U. **Onuegbu** et al., COMPARATIVE ANALYSES OF DENSITIES AND CALORIFIC VALUES OF WOOD AND BRIQUETTES SAMPLES PREPARED AT MODERATE PRESSURE AND AMBIENT TEMPERATURE, *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences*, Vol. 2, Issue 1, Jan-Mar 2012, p.40.
147. Montes **Osorio** et al., High level of molecular and phenotypic biodiversity in *Jatropha curcas* from Central America compared to Africa, Asia and South America, *BMC Plant Biology* 2014 14:77.
148. Razacswendé Fanta **OUEDRAOGO**, Étude des paramètres morpho-physiologiques, biochimiques et moléculaires de trois écotypes de *Jatropha curcas* soumis à des contraintes lumineuse et hydrique au Burkina Faso, Docteur de l'Université de Ouagadougou, Option: Sciences Appliquées, Spécialité : Écophysiologie Végétale, 30 juin 2014.
149. Moussa Ouédraogo, Land tenure and rural development in Burkina Faso: Issues and Strategies, Issue Paper No.112.
150. Souleymane **OUEDRAOGO**, Technical and Economic Efficiency of Rice Production on the Irrigated Plain of Bagre (Burkina Faso): A Stochastic Frontier Approach, *Journal of Economics and Sustainable Development*, Vol.6, No.14, 2015.
151. **Parry, I.**, Veungh, C. and Heine, D., How Much Carbon Pricing is Countries' Own Interests? The Critical Role of Co-Benefits, IMF Working Paper WP/14/174 (2014).
152. Fred **Pearce**, *Jatropha: it boomed, it busted, and now it's back*, CGIAR, 2013.
153. Leonardo de Azevedo **Peixoto** et al., Breeding *Jatropha curcas* by genomic selection: A pilot assessment of the accuracy of predictive models, Editor: Rongling Wu, Pennsylvania State University, UNITED STATES, published online March 15, 2017.
154. Raghavendra **Prasada** S.A, A Review on CNSL Biodiesel as an Alternative fuel for Diesel Engine, *International Journal of Science and Research (JSR)*, Volume 3 Issue 7, July 2014, 2028.
155. **Programme** des Nations Unies pour le développement (PNUD), EVALUATION A MI-PARCOURS DU SOUS-PROGRAMME BOUCLE DU MOUHOUN DU PROGRAMME NATIONAL DE PARTENARIAT POUR LA GESTION DURABLE DES TERRES, Rapport Provisoire, Mars 2016.
156. **Programme** des Nations Unies pour le Développement (PNUD), Promotion du *Jatropha Curcas* comme source d'agrocaburants durable au Burkina Faso, 2014 & 2017 (revised edition).
157. **Programme** des Nations Unies pour le Développement (PNUD), PROMOTION DU JATROPHA CURCAS COMME SOURCE DE BIO-CARBURANT DURABLE AU BURKINA FASO, AVRIL 2014.
158. C. **Rabany**, THE AFRICAN CASHEW SECTOR IN 2015, General trends and country profiles.
159. **Rambøll**, SUSTAINABLE AVIATION BIOFUEL - STATUS 2017, Helsinki, May 2017.
160. Kaveh **Rashid**, Martin Stadelmann, Anthony Patta, Valuing co-benefits to make low-carbon investments in cities bankable: The case of waste and transportation projects, *Sustainable Cities and Society*, Volume 34, October 2017, Pages 69-78.
161. Thippa **Reddy**, STUDIES ON CHARACTERIZATIONS OF AGRICULTURE WASTE (RICE HUSK) FOR THE PRODUCTION OF ETHANOL, *Journal of Environmental Research and Development* Vol. 7 No. 2A, October-December 2012.
162. Thibault **Rérolle**, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Réflexion prospective sur l'évolution du cadre réglementaire et fiscal pour le développement durable des agro-carburants au Burkina Faso, Rapport Final, 28 Oct. 2014.
163. **Royal** Institute of Technology, Technical Background Document – Biofuels in Burkina Faso Crop Intensification and the potential of biofuels in Burkina Faso, An Appendix to the study "Climate, Land, Energy and Water (CLEW) interlinkages in Burkina Faso", Stockholm 2012.

164. Jitendra Kumar **Saini** et al., Lignocellulosic agriculture wastes as biomass feedstocks for second-generation bioethanol production: concepts and recent developments, 3 *Biotech.* 2015 Aug; 5(4): 337–353.
165. Sabari Sévérin **SAMA**, ETUDE DU ROLE DU JATROPHA DANS LA PROMOTION DE L'ENTREPRENARIAT AU BURKINA FASO, CAS DE BELWET, RAPPORT DE FIN DE CYCLE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DE LA LICENCE EN AGRO-ECONOMIE, Déc. 2013.
166. Ronald D. **Sands**, United States Department of Agriculture (USDA), Dedicated Energy Crops and Competition for Agricultural Land, Jan 2017.
167. Bassirou **Sanon** et al., Valorisation des tourteaux de jatropha curcas L. sous forme de fertilisant, Programme d'appui au développement et à la structuration de la filière paysanne de jatropha / biocarburant en Afrique de l'Ouest.
168. Estomih **Sawe** and Jensen Shuma, Socio-economic experiences of different jatropha business models in Africa, in Dominik Rutz et al., Socio-economic impacts of bioenergy production, pp. 171-182, 24 Feb. 2014.
169. Devesh K **Saxena** et al., COMPARATIVE EXTRACTION OF COTTONSEED OIL BY n-Hexane and Ethanol, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No.1, Jan. 2011.
170. N. **Scarlat** et al., Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 50, October 2015, Pages 1269-1286.
171. Stefan **Schwietzke**, Ethanol Production from Maize, in: A.L. Kriz, B.A. Larkins (eds.), *Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement, Biotechnology in Agriculture and Forestry*, Vol. 63.
172. Moustapha **SENE**, FAISABILITE DE TRAITEMENT DES EAUX USEES DOMESTIQUES PAR FILTRES PLANTES D'ESPECES UTILITAIRES : CAS DU JATROPHA CURCAS L. AU BURKINA FASO, MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER D'INGENIERIE EN EAU ET ENVIRONNEMENT, 25 Juill. 2009.
173. **SESSION** DE FORMATION DES OPÉRATEURS DE BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO : Du 1er au 3 avril 2014, Guide technique pour le choix des équipements de production de biocarburants à base de jatropha, Avril 2014.
174. **SESSION** DE FORMATION DES OPÉRATEURS DE BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO : SESSION DE FORMATION DES OPÉRATEURS DE BIOCARBURANTS AU BURKINA FASO : "MEILLEURES PRATIQUES EN MATIÈRE DE PRODUCTION DE BIOCARBURANTS À BASE DE JATROPHA", OUAGADOUGOU du 1er au 3 avril 2014.
175. Claude Stéphane **Side**, Stratégie de mécanisation de l'agriculture familiale en Afrique subsaharienne, Mémoire de fin d'étude, Montpellier SupAgro, CIRAD et AFD, 2013.
176. Sivakumar **S**, OPTIMIZATION OF NON TRANSESTERIFIED CANDANOL AS BIOFUEL BASED ON ITS PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, Special Issue 7: 2015, 15.
177. **SORI** Lallé Abdoul Karim, Réponses physiologiques des cultures vivrières en association avec jatropha curcas L : cas du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp) dans la commune rurale de Boni en zone soudano-sahélienne, Diplôme d'Études Approfondies (D.E.A) En Sciences Biologiques Appliquées, Option: Écophysiologie Végétale, 22 Oct. 2011.
178. K. **Stecher**, A. Brosowski, D. Thrän, BIOMASS POTENTIAL IN AFRICA, DBFZ/ IRENA, 2013.
179. Benjamin **Sultan** and Marco Gaetani, Agriculture in West Africa in the Twenty-First Century: Climate Change and Impacts Scenarios, and Potential for Adaptation, *Front Plant Sci.* 2016; 7: 1262, Published online 30 Aug 2016.
180. Pooja **Suresh**, Environmental and economic assessment of transportation fuels from municipal solid waste, MIT, June 2016.
181. Elijah A. **Taiwo**, Cashew Nut Shell Oil — A Renewable and Reliable Petrochemical Feedstock, Department of Chemical Engineering, Obafemi Awolowo University, Ile-Ife, Osun State, Nigeria, <http://dx.doi.org/10.5772/61096>.
182. Abdoul-Rahamane **TAPSOBA**, Réponses physiologiques des plantes vivrières cultivées sous plantation de jatropha curcas L. : cas du maïs, *Zea mays* L., dans la commune de Boni, en zone soudano sahélienne, DIPLOME D'INGENIEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL OPTION : Agronomie, Juin 2011.
183. Patricia **Thornley** et al. Maximizing the greenhouse gas reductions from biomass: The role of life cycle assessment, *Biomass and Bioenergy*, Volume 81, October 2015, Pages 35-43.
184. **TIENDREBEOGO** K. Fidèle, CARACTERISATION MORPHOPHYSIOLOGIQUE D'UN ECHANTILLON DE jatropha curcas L. DU BURKINA FASO AU STADE JUVENILE, Département de Biologie et Physiologie Végétales, Mémoire, 30 Juill. 2009.
185. Diana **Ürge-Vorsatz**, Sergio Tirado Herrero, Navroz K. Dubash, and Franck Lecocq, Measuring the Co-Benefits of Climate Change Mitigation, *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2014. 39:549–82.
186. **Union** Économique et Monétaire de l'Ouest Africain (UEMOA), Étude de Viabilité de la Production de Biocarburants dans l'UEMOA, Appel Public de Prospection BNDES/FEP n° 02/2011.
187. **Union** Économique et Monétaire de l'Ouest Africain (UEMOA), Requête de financement pour la mise en œuvre du Programme Régional Biomasse-Énergie dans les États membres de l'UEMOA, 2004.
188. **Union** Économique et Monétaire de l'Ouest Africain (UEMOA), BIOENERGIES ET DEVELOPPEMENT DURABLE DANS LES ÉTATS MEMBRES DE L'UEMOA, 2008.
189. **United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)**, The co-benefits of climate change mitigation, Sustainable Development Brief No.2, Jan. 2016.
190. **United States Government Accountability Office (GAO)**, DEFENSE ENERGY, Observations on DOD's Investments in Alternative Fuels, July 2015.
191. **USAID**, Country Profile, Property rights and resource governance, Burkina Faso.
192. **Velmurugan**. A, Loganathan. M, Performance and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine Fuelled with Cashew Nut Shell Liquid (CNSL)-Diesel Blends, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol:5, No:10, 2011.
193. **Wei-Cheng Wang** et al., Review of Biojet Fuel Conversion Technologies, National Renewable Energy Laboratory (NREL), July 2016.

194. H. K. **Watson** and R. A. Diaz-Chavez, An assessment of the potential of drylands in eight sub-Saharan African countries to produce bioenergy feedstocks, *Interface Focus*. 2011 Apr 6; 1(2): 263–270, published online 02 Feb 2011.
195. Jae **Woon**, Lee Benoît Mayer, Joseph Wheeler, Aviation and Sustainable Development: Some Perspectives from the Asia-Pacific, McGill Centre for Research in Air and Space Law, Occasional Paper Series No.XVI, Aug. 2016.
196. The **World Bank Group**, Vulnerability, Risk Reduction, and Adaptation to Climate Change, Country Profile Burkina Faso, April 2011.
197. The **World Bank Group**, The International Bank for Reconstruction and Development, Burkina Faso's Infrastructure: A Continental Perspective, May 2011.
198. **World Bank**, Burkina Faso – Disaster Risk Management, Country Note, Report No AAA60-BF, May 17, 2011.
199. **World Bank**, Doing Business 2011: Making a Difference for Entrepreneurs. Washington, DC.
200. **World Bank**, INTERNATIONAL DEVELOPMENT ASSOCIATION, PROJECT APPRAISAL DOCUMENT ON A PROPOSED CREDIT IN THE AMOUNT OF EUR 87.80 MILLION (US\$100 MILLION EQUIVALENT) TO BURKINA FASO FOR A TRANSPORT AND URBAN INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT PROJECT, May 20, 2016
201. Erik C. **Wormslev** et al., Nordic Council of Ministers, Sustainable jet fuel for aviation, Nordic perspectives on the use of advanced sustainable jet fuel for aviation, 2016.
202. **YAMEOGO** Kouilga Fidèle, La valorisation du jatropha curcas en milieu rural aux Burkina Faso : état des lieux et impacts probables du projet jatropha-biodiesel de l'Association Impulsion dans la commune de Barsalogho, Centre d'Études de Promotion, de L'Aménagement et de la Protection de l'Environnement (C.E.P.A.P.E), Mémoire.
203. David W. **Zingg** and Ömer L. Gülder, Technology Developments and Renewable Fuels for Sustainable Aviation, McGill Centre for Research in Air and Space Law, Occasional Paper Series No.XII, July 2016.



ICAO

ICAO-EU-PROJECT@ICAO.INT

WWW.ICAO.INT/ENVIRONMENTAL-PROTECTION/PAGES/ICAO_EU.ASPX

PROJECT FUNDED BY



European Union