



Manuel du sorgho-énergie

Une culture énergétique alternative

Auteur :

Cosette Khawaja

Co-auteurs :

Rainer Janssen, Domink Rutz, Delphine Luquet, Gilles Trouche, Philippe Oriol, Bellum Reddy, Pinnamanini Srinivas Rao, G. Basavaraj, Robert Schaffert, Cynthia Damasceno, Rafael Parella, Arndt Zacharias, Raoul Bushmann, Nils Rettenmaier, Guido Reinhardt, Andrea Monti, Walter Zegada Lizarazu, Stefano Amaducci, Adriano Marocco, Wikus Snijman, Nemera Shargie, Hannelie Terblanche, Francisco Zavala-Garcia, Serge Braconnier

ISBN : 978-3-936338-31-7

Traduction :

La langue d'origine de ce manuel est l'Anglais. Ce manuel est également disponible en Français et Espagnol.

Publication :

© by WIP Renewable Energies,
Sylvensteinstr. 2, 81369 Munich, Germany

Contact :

Cosette Khawaja

WIP Renewable Energies

cosette.khawaja@wip-munich.de

Tel.: +49 89 720 12 740

www.wip-munich.de

Dr Serge Braconnier

CIRAD, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

serge.braconnier@cirad.fr

Tel.: +33 467 61 7539

www.cirad.fr

Site Web : www.sweetfuel-project.eu

Copyright : Tous droits réservés. Aucune partie de ce livre ne peut être reproduite sous quelque forme ou par quelque moyen, afin d'être utilisée à des fins commerciales, sans l'accord écrit de l'éditeur. Les auteurs ne garantissent pas l'exactitude et/ou l'exhaustivité de l'information et des données figurant ou décrites dans ce manuel.

Avertissement : Le contenu de ce manuel n'engage que la responsabilité de ses auteurs. Il ne reflète pas nécessairement l'opinion de l'Union Européenne. La Commission Européenne ne peut être tenue pour responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations qu'il contient.



Table des matières

Remerciements

Le projet SWEETFUEL

Introduction	1
Caractéristiques du sorgho	2
Historique	2
Classification botanique	3
Morphologie	4
Les graines.....	4
Les racines.....	4
La tige et le pédoncule.....	5
Les feuilles.....	5
L'inflorescence.....	5
Les étapes de la croissance	6
Caractéristiques générales	7
Diversité génétique des caractères d'intérêt.....	7
Adaptation agro-écologique.....	9
Tolérance à la sécheresse.....	10
Efficienc e d'utilisation de l'eau (WUE) et du rayonnement (RUE).....	10
Efficienc e d'utilisation de l'azote.....	11
Tolérances aux sols salins et alcalins.....	11
Sensibilité à la photopériode.....	11
Avantages par rapport à la canne à sucre.....	12
Culture	12
Préparation du sol	12
Semis	13
Fertilisation	14
Contrôle des ravageurs	14
Mauvaises herbes.....	14
Maladies bactériennes et fongiques.....	15
Maladies virales.....	16
Les insectes nuisibles.....	16
Les nématodes.....	25
Récolte et logistique	26
Utilisations du sorgho pour l'énergie	29
Production de sirop	30

Production de bioéthanol de première génération	31
Production de bioéthanol de deuxième génération (Ligno-cellulosique)	34
Production de biogaz par digestion anaérobie	35
Combustion de la biomasse de sorgho	37
Co-produits	40
Durabilité du sorgho-énergie	40
Généralités sur les chaînes de valeur du sorgho-énergie	40
Systèmes de production en zones tropicales	42
Systèmes de production en zones tempérées.....	42
Impacts économiques	43
Rentabilité économique et équité	44
Efficacité de l'ensemble du processus	45
Investissements nécessaires au démarrage et au fonctionnement du système.....	45
Impacts sociaux	46
Sécurité alimentaire et énergétique.....	47
Droits des propriétaires terriens	48
Créations d'emplois, santé et conditions de travail	49
Approbation du public et des acteurs impliqués	49
Impacts environnementaux	50
Bilan énergétique.....	51
Emission de gaz à effet de serre et d'autres polluants	52
Changement dans l'utilisation des terres.....	53
Biodiversité	54
Abbreviations.....	56
Copyright des photos	57
Liste des Figures.....	58
Liste des Tableaux	59
Références	60

Remerciements

Ce manuel a été élaboré dans le cadre du projet SWEETFUEL (Accord de subvention N° 227422), cofinancé par la Commission Européenne dans le 7e Programme Cadre (PCRD 7). Les auteurs tiennent à remercier la Commission Européenne pour son soutien financier au projet SWEETFUEL ainsi que les relecteurs et les partenaires de SWEETFUEL pour leur contribution à ce manuel.

Le projet SWEETFUEL

Les objectifs du projet de SWEETFUEL étaient de sélectionner des variétés améliorées et des hybrides de sorgho pour les zones tempérées et les environnements tropicaux à sol acide (à toxicité aluminique) en combinant selon la zone et l'idéotype, des gènes de tolérance au froid, à la sécheresse et à l'acidité (toxicité aluminique); et de production élevée en sucres contenus dans les tiges, en biomasse facile à digérer et en grain. Pendant le projet, la sélection s'est appuyée sur la génétique moléculaire et la physiologie, et des pratiques agro-écologiques et durables ont été développées. L'évaluation des technologies intégrées et des impacts a été réalisée. Les résultats du projet sont du nouveau matériel génétique, des recommandations de pratiques durables et des concepts de filières adaptées à chaque région cible. La recherche dans SWEETFUEL a impliqué une participation structurée de toutes les parties prenantes, y compris des décideurs.

Composition du consortium du projet SWEETFUEL



CIRAD

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

Contact :

Dr Serge BRACONNIER



ICRISAT

International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

Contact :

Dr Pinnamaneni Srinivasa RAO



EMBRAPA

Maize and Sorghum: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Contact :

Dr Robert SCHAFFERT

KWS



KWS

KWS SAAT AG

Contact :

Dr Arndt ZACHARIAS



IFEU

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH



Contact :

Dr Guido REINHARDT

UNIBO

Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Contact : *Dr Andrea MONTI*



UCSC

Università Cattolica del Sacro Cuore

Contact :

Dr Stefano AMADUCCI



ARC-GCI

Agricultural Research Council – Grain Crop Institute

Contact :

Wikus SNIJMAN



UANL

Universidad Autónoma de Nuevo León / Facultad de Agronomía

Contact :

Dr Francisco ZAVALA-GARCIA



WIP

WIP Renewable Energies

Contact :

*Dr Rainer JANSSEN,
Dominik RUTZ*

Introduction

L'augmentation des prix sur le marché mondial des combustibles fossiles, due à des réserves limitées, une demande croissante et l'instabilité dans les régions productrices, rend les carburants renouvelables économiquement intéressants. Ils sont également une voie pour réduire les gaz à effet de serre (GES) et atténuer le changement climatique. Le secteur des transports presque totalement dépendant des carburants fossiles, en particulier pour alimenter les véhicules individuels et les camions, est le secteur le plus concerné. Les biocarburants, définis comme des carburants solides, liquides ou gaz combustibles issus de la biomasse, sont aujourd'hui le seul substitut direct aux carburants fossiles à une échelle significative en particulier dans les transports. Les biocarburants sont considérés comme respectueux de l'environnement car les émissions de CO₂ qu'ils produisent lors de leur combustion sont équilibrées par le CO₂ absorbé par les plantes pendant leur croissance. Pour être un substitut viable aux carburants fossiles, un biocarburant devrait non seulement avoir un impact moindre sur l'environnement, être économiquement compétitif et produit en quantité suffisante pour avoir un impact significatif sur la demande d'énergie, mais également avoir une balance énergétique positive et un effet minime sur la sécurité alimentaire.

Le bioéthanol est un combustible liquide issu de la fermentation de sucres. Que le bioéthanol représente ou non une alternative viable aux carburants fossiles dépend de la matière première et du lieu de production. Si sa production à partir de la canne à sucre au Brésil a un bilan énergétique positif et permet d'importantes réductions de GES, celle produites à partir du maïs aux Etats-Unis a un bilan moins positif, voire parfois négatif.

Le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench) est l'une des cultures les plus efficaces pour convertir le CO₂ atmosphérique en sucres. Selon les conditions de culture, il peut présenter des avantages par rapport à la canne à sucre dans les régions tropicales, ou au maïs en zone tempérées; ce qui fait de lui une culture prometteuse pour produire de l'énergie tout en répondant à des besoins alimentaires ou fourragers. De plus, comparé aux différentes cultures envisagées pour produire de l'éthanol, le sorgho sucré semble avoir un potentiel d'amélioration considérable. C'est une plante multi-usage, capable de produire simultanément (i) des grains pour l'alimentation à partir de la panicule, (ii) du jus sucré à partir de la tige pour produire du sirop ou de l'éthanol et (iii) des bagasses et des feuilles vertes qui peuvent être utilisées comme fourrage pour les animaux, comme substrat pour la gazéification ou la production d'éthanol 2G, comme fertilisant organique, ainsi que pour la production de pâte à papier ou encore pour la co-génération. Le sorgho est en outre une plante en C₄ possédant de nombreux avantages comme une efficacité d'utilisation de l'eau, de l'azote et du rayonnement élevé, une adaptation à une large gamme d'agro-écologies ainsi qu'une riche diversité des caractères d'intérêt. Dans les pays en

développement, le sorgho sucré offre donc la possibilité de produire simultanément de la nourriture et de l'énergie permettant de contribuer à la sécurité alimentaire tout en augmentant l'accès à une source d'énergie abordable et renouvelable. Dans les régions tempérées comme l'Europe, le sorgho est perçu comme une culture prometteuse pour produire de la biomasse pour la production d'éthanol 2G.

Contrairement à la canne à sucre et au maïs, les programmes de sélection du sorgho sont plus récents et laissent penser que le potentiel d'augmentation de la production par amélioration génétique est élevé. Le projet SWEETFUEL (Sweet sorghum: an alternative energy crop) a été initié pour exploiter les avantages du sorgho comme culture énergétique pour produire de l'éthanol. Ce projet a été soutenu par la Commission Européenne dans le cadre du 7^e PCRD. L'objectif principal de SWEETFUEL était d'augmenter les rendements par l'amélioration génétique et d'optimiser les pratiques culturales et la récolte en zone tempérée, tropicale semi-aride et tropicale à sols acides. Le but de ce manuel est de servir de référence pour la culture du sorgho, principalement pour la production de bioénergie.

Caractéristiques du sorgho

Historique

Le sorgho est une des plus anciennes plantes cultivées. On pense qu'il est originaire d'Afrique. De nombreuses variétés dans le genre sorgho ont été observées dans les régions du Nord-Est de l'Afrique comprenant l'Éthiopie et le Soudan en Afrique de l'Est (Doggett, 1988).

Au cours du premier millénaire avant notre ère, le sorgho a probablement été transporté d'Afrique de l'Est vers l'Inde comme aliment par des navires qui ont assuré le transport de denrées alimentaires pendant environ 3000 ans entre ces régions. Cette culture aurait pu également se propager le long de la côte de l'Asie du Sud-Est autour de la Chine dans le début de l'ère chrétienne. Cependant, une possibilité qui ne peut être réfutée, est que le sorgho a pu arriver beaucoup plus tôt en Chine par les routes commerciales de la soie (FAO, 1995). 200 ans après JC ou peut-être plus tôt le sorgho est diffusé en Afrique de l'Est à partir de l'Éthiopie par les tribus locales, qui cultivaient cette plante essentiellement pour ses grains et ses tiges sucrées qui étaient mâchées. Plus tard, la tribu Bantoue a propagé cette culture dans les savanes d'Afrique de l'Ouest et du Sud où elle était principalement utilisée pour produire de la bière. Au premier siècle de notre ère, la tribu Bantoue a diffusé cette culture lors de son expansion à partir de la région sud du Cameroun et du sud de la bande forestière congolaise (FAO, 1995). Le sorgho a été introduit dans les îles des Caraïbes et d'autres pays d'Amérique latine à partir d'Afrique de l'Ouest via le transport des esclaves et des navigateurs qui sillonnaient les routes commerciales Europe-Afrique-Amérique Latine au début du 17^e siècle (Rao et Kumar, 2013).

Le premier cultivar de sorgho sucré introduit en France a été “China Amber”, rapporté de Shangai en 1851 par le Consul de France à Shangai (Henri 1864). En 1853, un pépiniériste, William Price l’a introduit aux États Unis à partir de graines reçues de France (Rao et Kumar, 2013). Aux USA, le sorgho sucré est utilisé depuis longtemps comme une culture sucrière, pour produire du sirop. Plusieurs groupes industriels ont essayé de produire du sucre cristallisé à partir du jus de sorgho sucré, mais ils ont découvert que le fructose et glucose présents dans le jus empêchaient cette cristallisation. La concentration en sirop est donc la seule solution pour obtenir un produit stable pouvant être consommé et commercialisé.

En raison de l’augmentation rapide des cours du pétrole brut dans les années 70, le sorgho sucré a été étudié comme source potentielle de sucres fermentescibles pour produire du bioéthanol, en raison de sa production élevée en sucre et en biomasse, de sa forte adaptabilité géographique et climatique, et de ses besoins en eau et fertilisants relativement faibles. Dans de nombreux pays, les fonds alloués à la recherche d’énergies alternatives “vertes” ont augmenté sous l’effet du risque de plus en plus élevé d’un changement climatique résultant de l’augmentation de la production de CO₂ par combustion des carburants fossiles, et d’une raréfaction de la ressource pétrolière mondiale (Halford et Karp, 2010).

Le sorgho sucré est semblable au sorgho grain mais accumule des quantités élevées de sucre dans ses tiges. Ses usages multiples (nourriture, fourrage, carburant et fibre) lui ont valu le nom de “smart crop” (Kumar *et al.*, 2010).

Le sorgho sucré peut donc être valorisé dans la production d’alcool à boire (qualité industrielle), de sirops (naturels et riches en fructose), et d’autres produits comme le glucose (sous forme liquide ou de poudre), des amidons modifiés, des maltodextrines, des sucres, du sorbitol et de l’acide citrique (sous-produits de l’amidon) (ICRISAT, 2004). De plus, en raison de sa teneur en fibres, le sorgho sucré peut également être utilisé pour constituer des literies, des toitures, des clôtures et dans la fabrication de papier.

Classification botanique

La classification du sorgho est la suivante:

Division : Magnoliophyta
Classe : Liliopsida
Sous-classe : Commelinidae
Ordre : Cypéales
Famille : Poaceae
Sous-famille : Panicoideae
Tribu : Andropogoneae
Sous-tribu : Sorghinae
Genre : *Sorghum bicolor*

Le genre *S. Bicolor* représente l’ensemble des sorghos cultivés, sauvages et adventices ainsi que deux taxons à rhizomes: *S. Halepensis* et *S. Propinquum*. *S. bicolor* a été subdivisé en trois sous-espèces: *bicolor*, *drummondii* et *verticilliflorum*. Les sorghos cultivés

sont classés *S. bicolor* sous-espèce *bicolor* (Harlan et de Wet, 1972). House (1985) a décrit les cinq différentes races majeures: *bicolor*, *caudatum*, *durra*, *guinea* et *kafir*. Le nom correct actuellement utilisé des sorghos cultivés, proposé en 1961 par Clayton est *Sorghum bicolor* L. Moench.

Tous les sorghos identifiés comme *Sorghum bicolor* sous-espèce *bicolor* ont un nombre de chromosomes $2n = 20$. Ils sont classés en sorghos grain, sorghos fourragers, sorghos fibre, sorgho à balai, sorghos sucrés et sorghos biomasse. L'orientation agronomique de ces variétés dépend de leurs caractéristiques phénotypiques:

Sorghos grains : cultivars à forte production de grains utilisés dans l'alimentation humaine ou animale;

Sorghos fibre : cultivars à haute teneur en fibres considérés comme plante à fibres ou comme culture énergétique;

Sorghos à balai : cultivars dont l'inflorescence est constituée de longs rameaux généralement utilisés comme balai;

Sorghos sucrés : cultivars dont les tiges sont juteuses et riches en sucres, qui peuvent être considérés comme des cultures énergétiques et/ou alimentaires;

Sorghos biomasse : cultivars produisant une biomasse ligno-cellulosique élevée, potentiellement utilisable comme culture énergétique (combustion, biogaz ou éthanol 2G).

Dans ce manuel et en référence au projet SWEETFUEL, le terme sorgho-énergie sera utilisé pour se référer à la fois au sorghos sucrés et au sorghos biomasse.

Morphologie

Les différentes parties botaniques d'un plant de sorgho sont présentées à la figure 1.

Les graines

Le sorgho est une plante annuelle qui se développe à partir d'une graine. Une panicule de sorgho peut produire jusqu'à 4000 graines riches en amidon. La graine est composée de trois parties: le péricarpe, l'albumen et l'embryon. Elle est de forme sphérique légèrement aplatie. Il existe une grande variabilité en taille (le poids de 1000 graines varie de 6 à 85 g) et en couleur (du rouge, brun, blanc au noir) (Figure 2).

Les racines

Le système racinaire du sorgho comprend trois types de racines: racines primaires, secondaires ou adventives, et racines nodales ou d'ancrage. Les racines primaires se

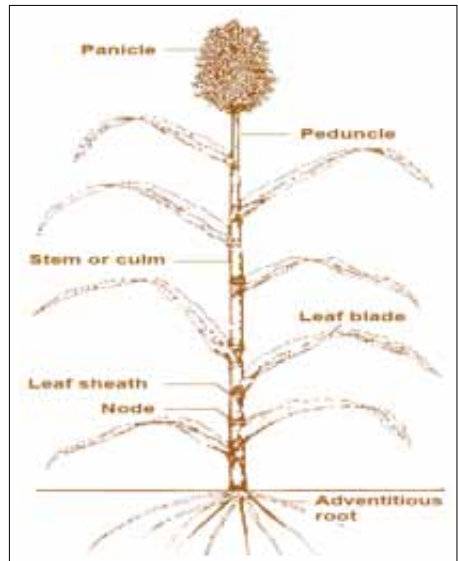


Figure 1 : Schéma d'un plant de sorgho (Murty *et al.*, 1994)

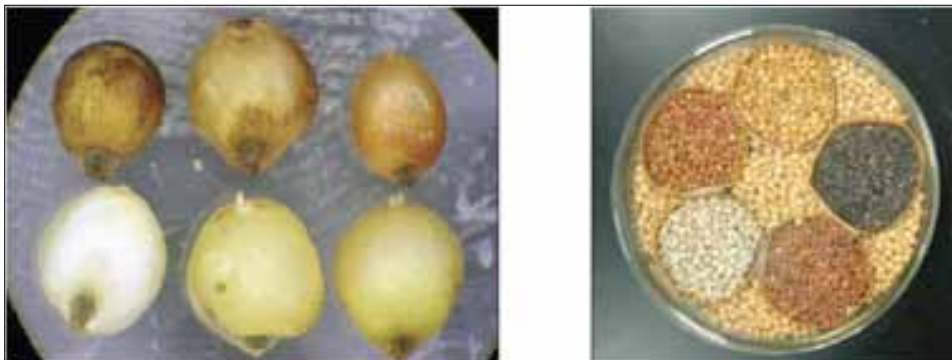


Figure 2 : Différentes variétés de graines de sorgho montrant une grande variabilité de taille et de couleur (Reddy et al. 2008)

développent de la racicule et meurent ensuite. Après leur sénescence, des racines adventives se développent à partir des nœuds souterrains et peuvent atteindre 2 m. Ces racines adventives sont petites et uniformes, et ont pour fonction essentielle d'absorber l'eau et les éléments nutritifs. Les racines nodales qui se développent à partir des nœuds situés au-dessus du sol sont rabougries, épaisses et ont plus une fonction d'ancrage de la plante (Agropedia, 2013) figure 3.

Figure 3 : Racines nodales d'ancrage du sorgho (© Braconnier)



La tige et le pédoncule

Le sorgho produit une tige principale avec des talles secondaires se développant à partir du collier. Leur nombre dépend de la variété et des conditions de culture. La tige de sorgho est composée de nœuds alternant avec des entre-nœuds, chaque nœud portant une feuille. Le diamètre de la tige à la base varie de 0,5 à 5 cm et la hauteur peut atteindre de 0,5 à 5 m en fonction de la variété et des conditions environnementales.

Le pédoncule est l'entre-nœud terminal portant l'inflorescence. Sa croissance est indépendante du reste de la plante. Il est généralement droit sauf chez la race dura dont le pédoncule est croisé. Sa longueur dépend de la variété et des conditions environnementales.

Les feuilles

Selon les cultivars et les conditions de culture, le nombre de feuilles varie de quelques unités à 30. Elles sont composées d'une longue gaine qui entoure la tige et d'un limbe dont la longueur varie de 35 à 135 cm et la largeur de 1,3 à 15 cm.

L'inflorescence

L'inflorescence du sorgho (Figure 4) est appelée panicule. Elle est de type racémique composé (un ensemble ramifié de fleurs dans lequel les branches portent des racèmes). Chaque racème comprend un ou plusieurs épillets. La panicule peut être courte,



Figure 4: Inflorescence de sorgho (© left, Braconnier, right, Rutz)

compacte, lâche ou ouverte, et comprend un axe central qui porte des verticilles de branches primaires sur chaque nœud. Les grappes varient en longueur en fonction du nombre de nœuds et de la longueur des entre-nœuds. Chaque branche primaire porte des branches secondaires qui à leur tour portent des épillets. L'axe central de la panicule, le rachis, peut être complètement caché par les ramifications chez certaines variétés, ou complètement visible chez d'autres. Les épillets sont généralement par paire sur les branches: l'un est sessile et fertile, et l'autre mâle ou stérile est porté par un court pédicel.

Étapes de croissance

La croissance démarre par la germination et se termine par la maturité physiologique des grains. La durée de ces étapes de croissance peut varier en fonction de la date du semis, du génotype et du site (latitude).

La germination : à température (25 à 30°C) et humidité optimales, les graines de sorgho germent en 3 à 4 jours. Quand une graine de sorgho est semée dans un sol humide, elle gonfle par absorption d'eau. Le tégument de la graine se rompt et une pousse (coléoptile) ainsi qu'une racine primaire (radicule) émergent. Si la température est plus froide, l'émergence peut demander 1 à 2 semaines.

Émergence : au départ, les jeunes plantules tirent leurs éléments nutritifs de l'endosperme de la graine. Le coléoptile émerge de la terre et la première feuille apparaît. Le mésocotyle croît durant cette période et un nœud est formé à la base du coléoptile juste en dessous du niveau du sol. Durant cette période la croissance racinaire est très active avec l'émission de la racine séminale puis des racines adventives à croissance rapide.

Stade végétatif: Après émergence, la croissance végétative est intense, avec la production de feuilles, de nœuds, d'entre-nœuds, de racines et pour certains cultivars de talles (après environ 15 jours). La température optimale pour la croissance végétative est de 33-34°C. Durant cette période et jusqu'à floraison, la plante pousse rapidement. Elle produit la plus grande partie de sa surface foliaire, ce qui est très important pour le remplissage ultérieur des grains. A ce stade, la panicule se développe et les tiges ont une croissance rapide. La croissance qui survient après floraison résulte seulement de l'expansion cellulaire. Au moment de la floraison, 60 à 70% du total des besoins nutritifs de la plante ont été absorbés.

Floraison : 2 à 5 jours après son émergence, la fleur s'ouvre. Cette phase correspond à une modification profonde de la physiologie de la plante. La floraison peut être repérée par le pollen jaune apparaissant sur les anthères de la panicule. Environ 6 jours sont nécessaires pour atteindre la floraison complète de la panicule. Le sorgho est considéré comme une plante autogame, même si le taux d'allogamie peut parfois atteindre 30% chez certaines variétés. La viabilité du pollen est courte, de 2 à 4 heures, alors que la réceptivité des stigmates est plus longue et dure quelques jours.

Maturité physiologique : le stade final du cycle, de la floraison à la maturité physiologique est la période importante du remplissage des grains. Elle peut durer 30 à 50 jours selon la variété et les conditions de culture. Durant cette période, la plupart des hydrates de carbone synthétisés par la plante migrent dans les grains. Une partie des réserves stockées dans la tige va être remobilisée par les grains, et la plante va absorber environ le dernier tiers des éléments nutritifs nécessaires. Si une sécheresse survient, l'absorption des éléments nutritifs et le remplissage des grains seront tous les deux limités. La maturité physiologique n'est pas la maturité de récolte. A maturité physiologique, l'humidité du grain est de 25 à 40% et doit considérablement diminuer avant de pouvoir récolter et stocker les grains de façon conventionnelle. Les grains peuvent être récoltés précocement à partir du stade de maturité physiologique, à condition de pouvoir les sécher après récolte (Vanderlip, 1998). La maturité physiologique est déterminée par l'apparition d'un point noir au niveau de l'insertion de la graine. Les sorghos cultivés arrivent à maturité après 100 à 140 jours en fonction de la variété et de la date de semi.

Caractéristiques générales

Le sorgho est une plante en C4 qui a des caractéristiques très intéressantes: (i) son cycle de croissance est relativement court (quelques mois), (ii) la culture est obtenue à partir de graines, (iii) sa production peut être entièrement mécanisée, (iv) les cultivars sucrés accumulent du sucre dans leurs tiges et de l'amidon dans leurs grains, (v) il a une efficacité élevée d'utilisation de l'eau et des éléments nutritifs, (vi) les bagasses produites par le sorgho sucré ont une valeur biologique élevée quand elles sont utilisées comme fourrage ainsi qu'un bon pouvoir calorique lorsqu'on les utilise en co-génération, et (vii) il a une large adaptabilité à l'environnement.

Diversité génétique des caractères d'intérêt

Le genre *Sorghum* comprend une diversité génétique élevée (Assar *et al.*, 2005; Uptmoor *et al.*, 2003). Il existe par conséquent un fort potentiel d'amélioration de la culture et d'augmentation de sa productivité. La diversité de couleur et de forme des panicules de sorgho témoigne d'une variabilité génétique très élevée (Figure 5). Les sorghos cultivés sont divisés en trois catégories principales; les sorghos grain pour l'amidon, les sorghos sucrés pour le sucre et/ou le grain, et les sorghos biomasse pour la production de biomasse. Il n'y a pratiquement pas de barrière/limite biologique ou taxonomique entre des formes cultivées pour l'hybridation. Ils appartiennent tous à la même espèce.

Les premières phases de domestication du sorgho sont associées au passage d'une panicule ouverte à petites graines s'égrenant facilement, à une panicule plus compacte à



Figure 5 : Diversité des couleurs et des formes de panicules montrant la grande variabilité génétique des espèces de sorgho (© Braconnier)

égrenage difficile (Dhillon *et al.*, 2006). Plus récemment, les sélectionneurs se sont concentrés sur l'amélioration du sorgho pour l'alimentation, le fourrage et la production d'énergie (Laopaiboon *et al.*, 2007; Tarpley et Vietor, 2007; Vermerris *et al.*, 2007), en fonction des besoins des pays concernés (Figure 6). Cela demande d'améliorer des caractères comme le niveau de rendement et sa stabilité, la résistance aux ravageurs et agents pathogènes, la qualité du grain et des tiges, ainsi que d'autres critères.

Les sélectionneurs ont travaillé sur des gènes impliqués dans la résistance aux insectes et maladies (Gowda *et al.*, 1995), la tolérance à la sécheresse (Tsago *et al.*, 2013), la sensibilité au photopériodisme pour l'adaptation à certaines conditions climatiques (Obilana, 1985), la durée de cycle, la réponse à de faibles niveaux d'azote (Miri et Rana, 2012), l'accumulation des sucres dans les tiges pour la production de sirop ou d'éthanol (Zheng, 2011), la forte production en grain pour l'alimentation humaine (Qazi *et al.*, 2012) et la production de biomasse utilisée comme fourrage ou pour la production de biocarburant de deuxième génération (Rao *et al.*, 2012).



Figure 6 : Breeding fields of grain sorghum in South Africa (©Rutz)

Pour produire une biomasse de qualité, un autre caractère a été exploité: c'est la disponibilité de la mutation dite "nervure brune" (brown midrib) ou bmr, qui est corrélée à la réduction de la teneur en lignine des tiges. Cette mutation augmente la digestibilité des tiges quand elles sont utilisées comme fourrage (Cherney *et al.*, 1991; Oliver *et al.*, 2005; Rao *et al.*, 2010), et facilite la dégradation de la biomasse lors du processus de production de biocarburant de deuxième génération (Dien *et al.*, 2009).



Figure 7: Nervure centrale brune chez une variété de sorgho bmr (©Braconnier)

La mutation nervure brune (bmr) chez le sorgho est caractérisée par la présence de tissu vasculaire de couleur brune dans le limbe et la gaine des feuilles (Figure 7), ainsi que dans les tiges. La valeur fourragère d'une culture est déterminée en premier lieu par la dégradabilité de ses tissus végétatifs et par la production de biomasse par unité de temps et de surface. La digestibilité et la dégradabilité d'un fourrage sont négativement corrélées à la teneur en lignine (Blümmel et Rao, 2006). De ce fait, la lignine est considérée comme un facteur limitant dans le processus de production de carburants 2G.

Le projet SWEETFUEL avait pour ambition de sélectionner des variétés et hybrides de sorgho améliorés. De ce fait, les idéotypes recherchés dépendaient de l'environnement ciblé et du processus de transformation (Janssen *et al.*, 2010). Les objectifs étaient les suivants:

dans les environnements tempérés (comme l'Europe), l'objectif général était de développer des sorghos hybrides produisant une biomasse élevée, ayant une meilleure adaptation aux températures froides et une bonne digestibilité (faible teneur en lignine, caractère bmr), convenant pour la production de bioéthanol 2G ou de biogaz. Ceci est important pour la mise en place de la politique européenne sur les biocarburants, en faveur des agriculteurs et des agro-industriels, tout en respectant les préoccupations environnementales.

dans les environnements semi-arides tropicaux (comme l'Inde), l'objectif était de développer des lignées ou hybrides de sorgho pour un double usage (grains + sucres) ayant une bonne production de grain pour l'alimentation humaine et/ou animale, une production élevée de biomasse avec des tiges juteuses et sucrées convenant à la production de bioéthanol 1G, et/ou l'alimentation du bétail si la bagasse est utilisée comme fourrage. De plus, ce nouveau matériel devait être plus tolérant à la sécheresse et mieux adapté à la saison pluvieuse et post-pluvieuse d'Inde.

Dans les zones de savanes tropicales (comme au Brésil), à sols acides et faible fertilité, l'objectif général était de développer des nouvelles lignées ou hybrides produisant des tiges juteuses riches en sucres convenant à une production d'éthanol 1G et ayant une meilleure adaptation aux sols marginaux (acides, à toxicité aluminique, à carence en phosphore).

Adaptation agro-écologique

Le sorgho a une large adaptabilité agro-écologique. Il peut être cultivé entre 45°N et 45°S de latitude, à des altitudes allant jusqu'à 1500m. Dans la plupart des pays africains, il est cultivé à des altitudes entre 900 et 1500 m, et des variétés tolérantes au froid sont

cultivées entre 1600 et 2500 au Mexique. Le sorgho peut tolérer des températures allant de 12 à 37°C, avec une température optimale pour la croissance et la photosynthèse de 33-34°C, et une durée du jour allant de 10 à 14h. La gamme de précipitations optimales va de 550 à 800 mm avec une humidité relative comprise entre 15 et 50% (Rao et Kumar, 2013).

Le sorgho peut s'adapter à une large gamme de type et de conditions de sols. Il peut être cultivé sur des alfisols (rouge) ou vertisols (noirs argilo-limoneux) et peut tolérer une gamme de pH de 5.65 à 8.5 (Du Plessis, 2008). Ce large spectre fait du sorgho un bon candidat pour être cultivé sur sols acides généralement associés à des carences en phosphore ou des toxicités aluminiques.

Le sorgho est sensible aux inondations prolongées, mais survivra mieux que le maïs à un engorgement temporaire (Rao et Kumar, 2013). Si le sorgho a été immergé pendant une semaine, il peut régénérer rapidement après l'inondation.

Tolérance à la sécheresse

Le sorgho peut survivre avec une alimentation en eau de moins de 300 mm durant la saison de culture de 100 jours, mais il répond positivement à une pluie ou une irrigation supplémentaire. Typiquement, le sorgho a besoin de 550 à 800 mm d'eau (pluie et/ou irrigation) pour atteindre des productions de l'ordre de 50 à 100t/ha de biomasse aérienne fraîche. Bien que le sorgho soit une céréale de zone sèche, une disponibilité suffisante en eau pour la croissance de la plante est importante pour atteindre des rendements élevés. Le principal avantage du sorgho est qu'il peut entrer en dormance en particulier durant la phase végétative lorsque les conditions sont défavorables, et retrouver sa croissance après une sécheresse relativement sévère. Une sécheresse précoce arrête la croissance avant l'initiation de la panicule et la plante reste au stade végétatif. Elle reprendra la production des feuilles et des inflorescences lorsque les conditions redeviendront favorables. Une sécheresse à mi-saison stoppe le développement des feuilles. Durant les conditions de stress, les sucres solubles maintiennent un niveau de turgescence raisonnable. Chez différents génotypes de sorgho, les teneurs en sucres réducteurs et en protéines sont des indicateurs de tolérance/résistance à la sécheresse (Erdei *et al.*, 2009).

Efficience d'utilisation de l'eau (WUE) et du rayonnement (RUE)

L'efficience de l'utilisation de l'eau est définie comme le nombre de mm d'eau transpirée par kg de biomasse aérienne produit ou comme la biomasse produite par unité d'eau consommée (Dercas et Liakatas, 2007). L'efficience d'utilisation du rayonnement est l'efficience de conversion du rayonnement intercepté pour produire la biomasse sèche, exprimée en g/MJ (Monteith, 1993).

D'après Gosse (1996), le sorgho convertit le rayonnement en biomasse et utilise l'eau de façon plus efficace que le maïs, avec une RUE = 3,7g/m² de matière sèche produite par MJ/m² de radiation photosynthétiquement active absorbée, et une WUE = 193 mm d'eau par kg de matière sèche produite, ou encore 5,2 g de matière sèche produite par kg d'eau consommée.

Le niveau de production de biomasse sèche de plants de sorgho bien alimenté en eau suggère un potentiel de production parmi les plus élevés des plantes en C4 (Curt *et al.*,

1998). Un déficit hydrique entraîne une baisse significative de RUE qui semble linéairement corrélée à la consommation en eau. Les plants stressés (probablement à l'exception de stress sévères) semblent utiliser l'eau de manière plus efficace que les plants non stressés. La pente de la relation liant matière sèche produite et eau évapotranspirée augmente plus vite dès que le stress est ressenti par la plante (Dercas et Liakatas, 2007).

Efficiencia d'utilisaci3n de l'azote (NUE)

Une efficencia d'utilisaci3n de l'azote 3lev3e par les cultures est recherch3e dans le cadre d'une agriculture durable. La NUE peut 3tre d3finie de plusieurs fa3ons, mais de fa3on simple, c'est la quantit3 d'azote pr3lev3 par la plante en fonction de la quantit3 d'azote appliqu3. Ra *et al.*, (2012) ont calcul3 la NUE de diff3rentes cultures 3nerg3tiques incluant le sorgho, la canne 3 sucre et le ma3s avec une fertilisation de base de 72 kg d'azote par ha. Les r3sultats ont montr3 qu'en tenant compte des densit3s conventionnelles de plantation, le sorgho avait la NUE la plus 3lev3e, 3gale 3 120,8 kg/kg, compar3 au ma3s et 3 la canne 3 sucre, dont les valeurs 3taient respectivement de 88,1 et 112 kg/kg.

Tol3rance aux sols salins et alcalins

Le sorgho atteint des productions significatives m3me lorsqu'il subit des stress salins et des alimentations en eau r3duites. Le sorgho sucr3 peut produire des quantit3s int3ressantes de jus, de sucres totaux et d'3thanol sur des sols o3 la salinit3 atteint 3,2 dS/m, m3me si les plants ne re3oivent que 50-70% du r3gime hydrique habituellement appliqu3 au sorgho. Par cons3quent le sorgho sucr3 peut 3tre une composante d'un syst3me de production alternatif dans des conditions de salinit3 3lev3e et d'approvisionnement en eau limit3, en particulier dans les environnements semi-salins et semi-arides ou l'irrigation est limit3e durant le d3veloppement de la culture (Vasilakoglou *et al.*, 2011). Sur des sols salins-alcalins, Xie *et al.* (2012) ont montr3 que l'on pouvait obtenir 3 partir du sorgho sucr3 une teneur en sucre et une production d'3thanol correctes. Par cons3quent, compte tenu de la comp3tition entre culture alimentaire et culture 3nerg3tique, il est pr3f3rable de cultiver le sorgho sucr3 de fa3on permanente sur des sols salin-alcalins, o3 tr3s peu d'autres esp3ces peuvent se d3velopper.

Sensibilit3 3 la photop3riode

Le sorgho est une plante de jour court, ce qui signifie qu'il a besoin de jours courts (nuits longues) pour initier la phase reproductive. La photop3riode optimale, qui induira la formation de l'inflorescence, se situe entre 10 et 11 heures. Les vari3t3s tropicales sont g3n3ralement plus sensibles 3 la photop3riode que les vari3t3s 3 cycle court (Du Plessis, 2008).

La plupart des hybrides de sorgho est relativement peu sensible 3 la photop3riode. Par contre es agriculteurs traditionnels en particulier en Afrique de l'Ouest utilisent g3n3ralement des vari3t3s sensibles. Avec ce type de vari3t3s adapt3es 3 l'environnement, la floraison et la maturit3 des grains surviennent 3 la m3me p3riode calendaire, ind3pendamment de la date de semi. Cela permet aux plantes d'atteindre la maturit3 avant que le sol ne soit trop sec en fin de saison, m3me en cas de semi retard3 (Vaksmann *et al.*, 1996).

Avantages par rapport à la canne à sucre

Le tableau 1 montre la comparaison de deux plantes sucrières, la betterave et la canne à sucre, avec le sorgho sucré par rapport aux caractéristiques de la culture et de la production d'éthanol. On constate que le sorgho sucré est plus avantageux comme culture énergétique, du fait de besoins moins exigeants. De plus, le processus de production d'éthanol à partir du sorgho sucré est plus écologique par rapport à celui produit à partir de la mélasse, et la qualité de l'éthanol produit est supérieure car il présente moins de sulfure et un indice d'octane plus élevé que chez la canne à sucre lors de la combustion.

Tableau 1: Comparaison entre canne à sucre et sorgho sucré (Almodares et Hatamipour, 2011)

	Sugar cane	Sweet sorghum
Durée du cycle de culture	Environ 7 mois	Environ 4 mois
Cycle de culture	Un cycle saison par an	Un cycle en zone tempérée et 2 ou 3 en zones tropicales
Besoins du sol	Pousse bien sur sols drainants	Tous types de sols drainants à l'exception des sols très sableux
Besoins en eau	36 000 m ³ /ha	12 000 m ³ /ha
Conduite de la culture	Demande un bon suivi	Demande peu d'engrais, moins susceptible aux ravageurs, conduite facile
Production par ha	70 - 80 tonnes	54 - 69 tonnes
Teneur en sucre sur la base du poids	10 - 12%	7 - 12%
Production en sucre	7 - 8 tonnes/ha	6 - 8 tonnes/ha
Production d'éthanol directement à partir du jus	3 000 - 5 000 L/ha	3 000 L/ha
Récolte	mécanisée	Très simple: à la fois manuelle et mécanisée

3. Culture

Préparation du sol

Les graines de sorgho demandent un sol humide et relativement chaud, bien aéré et assez fin pour assurer un bon contact sol-semences et obtenir une germination optimale et rapide. Un certain nombre de systèmes de semis et préparations du sol peut convenir. Ils peuvent inclure un travail du sol primaire ou secondaire, ou aucun travail du sol avant semis. Un lit de semence idéal devrait montrer les caractéristiques suivantes:

un bon contrôle des mauvaises herbes,
une conservation de l'humidité du sol,
la préservation ou l'amélioration de la souplesse du sol,
le contrôle de l'érosion éolienne et hydrique et
être adapté au semi et à la culture avec les équipements disponibles.

Un des objectifs de la préparation du lit de semence est de fournir les conditions pour une production agricole rentable tout en minimisant l'érosion des sols causée par le vent et l'eau. Les méthodes de travail du sol et de plantation atteignant cet objectif sont souvent appelés systèmes de labour de conservation (Vanderlip, 1998).

Semis

La densité de semis dépend de la variété, de sa précocité, de sa taille, des conditions de cultures etc..., et varie de 110 000 à plus de 400 000 plants à l'hectare. Les densités sont plus faibles en conditions tropicales. Semer en lignes plus espacées est recommandé pour les zones à faible pluviométrie et sur les sols à faible capacité de rétention en eau. La profondeur de semis est également déterminée par le type de sol. Sur des sols lourds, la profondeur ne doit pas excéder 25 mm, alors que sur des sols légers, elle peut atteindre 50 mm. Il est important que le sol entourant la graine soit ferme pour assurer une absorption rapide de l'eau et la germination (Sweethanol, 2011b).

Compte tenu de la longueur du cycle et du fait que l'accumulation du sucre est affectée par les basses températures, sous climat méditerranéen le semis doit être effectué au début du mois de mai afin que le sorgho puisse être en mesure de compléter son cycle.

Au Brésil, le sorgho sucré est planté au début de saison des pluies dans les zones de la canne à sucre, lors des replantations. Il permettrait d'augmenter la durée de fonctionnement des grandes distilleries jusqu'à 100 jours. Le semis a donc lieu entre novembre et décembre, et la récolte entre mars et avril. La densité de plantation est comprise entre 120 000 à 130 000 plants par ha (Mantovani *et al.*, 2012).

En Inde, le sorgho peut être cultivé pendant ou après la saison des pluies, ainsi qu'en saison d'été en fonction de la disponibilité en eau des sols/de l'irrigation et des régimes de température (Reddy, 2013). La densité de semis varie également selon la saison. Pour la récolte d'été, elle se situe entre 80 000 et 160 000 plants par ha. Elle est moins dense dans en saison des pluies et après la saison des pluies

En saison des pluies (Juin–Octobre): le semi doit être effectué immédiatement après le début de la mousson, de préférence de la première semaine de juin à la première semaine de juillet (en fonction de l'apparition de la mousson)

Après la saison des pluies (octobre–février): le semi devrait être fait à partir de la dernière semaine de septembre jusqu'à fin octobre. La température de nuit doivent être supérieure à 15°C au moment du semis. La culture doit être irriguée s'il ne pleut pas au moment du semi de façon à assurer une bonne germination et un bon établissement de la culture. La méthode des billons/sillons doit être utilisée pour conserver l'eau d'irrigation et avoir une alimentation similaire à la saison des pluies.

Comme culture d'été: le semis se fait à partir de la mi-janvier à fin février à condition d'avoir une irrigation d'appoint. Les températures de nuit devraient être supérieures à 15°C au moment du semis. Le semis sur billons/sillons permet de réaliser un excellent rendement en canne si l'eau d'irrigation est disponible.

En Europe Centrale, il est conseillé de ne pas semer tant que les températures restent inférieures à 12°C et donc habituellement pas avant la mi-mai. La densité de semis dépend de la variété et varie de 240 000 (*Sorghum bicolor*) à 350.000 (*Sorghum bicolor* x *Sorghum sudanese*) plants par ha.

Fertilisation

Le sorgho est considéré comme très efficace dans l'utilisation des éléments nutritifs du sol du fait d'un système racinaire très développé. Cependant, comme d'autres cultures, il a besoin de nutriments pour produire de bons rendements. Des réponses positives à la fertilisation peuvent être espérées sur de nombreux sols. Pour estimer la bonne quantité d'engrais à appliquer pour un rendement optimal, des échantillons de sol doivent être pris et analysés par un laboratoire de sol agréé. Les recommandations d'engrais à appliquer devraient être basées sur ces l'analyses de sol (Du Plessis, 2008).

Dans les endroits où la fertilité du sol varie de faible à modérée, les besoins de fertilisation sont de l'ordre de: 100-150 kg N, 60-100 kg P₂O₅ et K₂O 60-100 kg par hectare. L'application d'azote est recommandée en deux temps: avant le semi et 20-30 jours après l'émergence (Sweethanol, 2011b).

Contrôle des ravageurs

Comme pour les autres cultures, les impacts des maladies sur le sorgho varient d'une année sur l'autre, d'une localité ou un champ à l'autre, en fonction de l'environnement, des organismes responsables et de la résistance de la plante hôte. L'éradication totale d'une maladie chez le sorgho n'est pas économiquement réalisable. Les producteurs doivent donc minimiser les dommages par une gestion intégrée des ravageurs. Planter des hybrides résistants, apporter des conditions de croissance optimale, effectuer des rotations culturales, retirer les débris infestés, semer des semences indemnes de maladies, préparer un lit de semence convenable et appliquer de façon précise les herbicides, insecticides et fongicides sont autant de méthodes qui permettent de minimiser les pertes dues aux nuisibles. Les parasites du sorgho sont similaires à ceux de la canne à sucre et du maïs dans les régions où les deux sont cultivés extensivement.

Mauvaises herbes

Dès les premiers stades de la culture, à savoir du semis, jusqu'à la fermeture du couvert, le sorgho est très sensible à la concurrence des mauvaises herbes. Beaucoup peuvent infester le sorgho. Celle qui cause de gros dégâts dans certaines régions du monde est le parasite des racines, *Striga spp.*, qui survient surtout dans des conditions de faibles apports d'intrants. La plupart des dommages se produit avant émergence du parasite du sol. Les symptômes incluent un flétrissement des feuilles, leur enroulement, l'apparition

de feuilles brûlées même si le sol contient suffisamment d'eau. Les petites graines de *Striga* sont disséminées par le vent, l'eau et les animaux, et restent viables dans le sol pendant 15 à 20 ans. Le contrôle des mauvaises herbes les 6 à 8 premières semaines est crucial car ces mauvaises herbes font une concurrence vive à la culture pour les éléments nutritifs et l'eau durant cette période. Une rotation avec le coton, l'arachide, le niébé et le pois d'Angole permet de réduire l'indidence du *Striga*. Désherber à la main avant floraison du *Striga* peut être utile.

Pour les autres espèces de mauvaises herbes, le contrôle se fait par un désherbage manuel ou mécanique, par le labour pendant l'hiver ou au début du printemps, ainsi que par l'application de produits chimiques sous forme de granulés, liquide ou gazeuse dans le but d'empêcher la germination ou la croissance des mauvaises herbes et des graines. Les champs infestés par johnson grass ou bermuda grass ne doivent pas être plantés avec du sorgho (Du Plessis, 2008).

Maladies bactériennes et fongiques

Quatre grands types de maladies attaquent le sorgho: celles qui pourrissent la graine ou tuent les plantules, celles qui attaquent les feuilles et réduisent la valeur fourragère des plantes, celles qui attaquent uniquement les panicules et empêchent la formation des grains, et celles qui provoquent la pourriture des racines ou des tiges et empêchent le développement normal de la plante.

La maladie la plus connue, qui entraîne des pertes économiques parmi les plus importantes dans le monde est l'anthracnose, causée par le champignon *Colletotrichum graminicola*, (Cardwell, 1989). Ce dernier infecte toutes les parties aériennes de l'hôte (tige, feuille, pédoncule, panicule et grain) et se développe aussi bien sur des tissus vivants que morts. Les symptômes de la maladie dépendent de la virulence du pathogène et de la résistance de l'hôte, ainsi que des modifications physiologiques de l'hôte suite à une infection. La forme la plus commune et sévère de la maladie est l'anthracose des feuilles (Figure 8). L'infection apparaît en premier sur les feuilles, sous forme de petites taches circulaires ou elliptiques qui ensuite grossissent et finissent par concerner une large surface de la feuille. La nervure centrale qui est généralement infectée en même temps que le limbe de la feuille, est souvent décolorée de façon frappante. Le centre des tâches atteint ensuite une couleur gris-beige. L'examen à la loupe révèle alors de nombreuses petites taches noires avec des petits poils raides. Ce sont les organes de fructification du champignon, qui dans des conditions humides, produisent de nombreuses spores rosâtres. Ces spores sont dispersées par le vent et la pluie à d'autres feuilles qu'elles vont infester (Smith et Frederiksen, 2000).



Figure 8 : Symptômes de l'anthracnose des feuilles
(© Viana Cota)

L'anthracnose peut réduire la production de grain et de fourrage des variétés sensibles de 50% et plus (Harris *et al.*, 1964; Harris et Sowell, 1970). Elle cause des pertes significatives en grain par la diminution du poids du grain ou des avortements (Thomas *et al.*, 1996). La

défoliation due à l'antracnose réduit la valeur fourragère des plantes et peut aussi diminuer la teneur en sucre des tiges de variétés très sensibles. Elle peut également réduire le rapport sucrose/glucose-fructose.

Une culture propre et une rotation pour éviter la plantation de sorgho dans des champs précédemment occupés par du soudan grass, du sorgho ou du johnson grass devraient réduire les pertes dues à l'antracnose. La résistance de la plante hôte est l'approche la plus économique pour une gestion efficace de la maladie. La disponibilité de source de résistance est une condition préalable pour la sélection de cultivars de sorgho adaptés, résistants et productifs (Hess *et al.*, 2001). Le tableau 2. liste les autres maladies du sorgho.

Maladies virales




Le virus connu pour causer des blessures au sorgho est le virus de la mosaïque nanisante du maïs (MDMV), mais seulement dans les champs où la johnson grass est présente. Le virus passe l'hiver dans les rhizomes de la johnson grass. Les pousses produites par ces rhizomes au printemps seront infectées, et le virus pourra être transmis par les pucerons (pucerons des feuilles de maïs et pucerons verts) de ces pousses à d'autres plantes sensibles comme le sorgho et le maïs. Les plants infectés par le MDMV présentent une marbrure distinctive sur les feuilles. Par rapport à des feuilles saines, les feuilles malades sont jaunes avec des îlots vert clair. Ces symptômes sont plus évidents sur les jeunes que sur les vieilles feuilles. Les symptômes sont généralement moins visibles sur les plantes au début de la montaison. Les marbrures sont le symptôme le plus courant, mais d'autres peuvent survenir. Quand les températures tombent en dessous de 13°C, les feuilles infectées peuvent virer au rouge, puis des bandes beiges avec des bordures rouges se développent sur les feuilles. Les plants gravement infectés meurent fréquemment, tandis que ceux qui survivent auront un retard de croissance et risqueront de ne pas produire une panicule normale.

Pour contrôler la maladie, il faut utiliser des variétés tolérantes et éliminer les rhizomes de johnson grass dans les champs emblavés. Tuer les pucerons qui propagent la maladie ne réduit pas les infections par le MDMV. Par conséquent l'utilisation d'insecticide dans la gestion du MDMV n'est pas recommandée.

Les insectes nuisibles


Une grande variété d'insectes peut affecter le sorgho tout au long de son cycle. La pression des insectes dépend du lieu, de la météo et du stade de développement de la culture. Les insectes les plus communs attaquant le sorgho se regroupent en quatre catégories: les insectes qui attaquent les graines et les racines, les insectes et les acariens qui attaquent les feuilles, les foreurs des tiges et les insectes attaquant les panicules (Tableau 3).

Tableau 2 : Autres maladies potentielles du sorgho

1. Pathogènes pouvant attaquer les graines et les semis			
Maladie & Pathogène	Symptômes	Contrôle	
Pourriture de la graine <i>espèces de Fusarium, Aspergillus, Rhizopus, Rhizoctonia, Penicillium, et Helminthosporium</i>	Ils envahissent et détruisent l'endosperme, tissu riche en amidon de la graine, privant ainsi l'embryon de la nourriture nécessaire pour produire une plante forte.	Une sélection minutieuse, le traitement des semences et des pratiques culturales appropriées doivent être effectuées. Les graines doivent être bien mûres et sèches. L'enveloppe de la graine doit être aussi libre que possible de fissures et d'entailles. Avant d'être plantées, les graines doivent être traitées avec un bon désinfectant qui va les protéger des champignons portés par les semences et plus généralement des champignons nuisibles du sol.	
<i>Pythium</i>	Il attaque les jeunes pousses au stade précoce et empêchent leur émergence.		
2. Bactéries pathogènes pouvant attaquer les feuilles			
	Maladie et pathogène	Symptômes	Contrôle
 © Cunfer	Bandes bactériennes: <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>Holcicola</i>	Les lésions sont étroites et allongées entre les vaisseaux foliaires, s'étendant souvent sur toute la longueur du vaisseau. Les lésions commencent par une bande rouge mince le long de la veine, puis se développent en des taches rouge foncé à bordure noire dont le centre gris est constitué de tissus morts. Des masses de cellules bactériennes dans les lésions sont exudées à la surface lorsque les feuilles sont mouillées.	Le contrôle de ces bactéries peut être obtenu par rotation culturale, plantation de cultivars résistants, le traitement des semences et l'élimination des vieux débris de plantes infectées et des plantes infectées qui passent l'hiver.
 © Wrather	Stries bactériennes: <i>Pseudomonas andropogonis</i>	Ces bactéries induisent l'apparition de bandes jaunes étroites. Puis des taches rouge-brun apparaissent dans les veines, elles peuvent s'élargir en taches ovales avec le centre beige et des contours étroits rouges.	
 © Howard	Tache bactérienne: <i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>syringae</i>	Elle se caractérise par de petites lésions beiges de forme irrégulière avec un contour sombre.	

3. Champignons pathogènes qui peuvent attaquer les feuilles

	Maladies et pathogènes	Symptômes	Contrôle
	Helminthosporiose <i>Exserohilum turcicum</i>	Apparition de petites taches rougeâtres ou beiges qui peuvent s'agrandir et former des lésions elliptiques longues de couleur rouge pourpre ou beige. La sporulation des lésions leur donne souvent un aspect gris foncé ou vert olive en surface.	Le recours à des cultivars résistants et à la rotation culturale est recommandé. Des variétés et des hybrides performants et résistants sont disponibles pour les agriculteurs.
	Cercosporiose: <i>Cercospora fusimaculans</i>	Apparition de petites taches de couleur rouge ou rouge pourpre, qui ensuite deviennent beige, s'allongent et se couvrent de spores grises	L'utilisation de cultivars résistants est recommandée. On recommande également la rotation culturale et le travail hors période durant lesquelles les plantes sont mouillées.
	Maladie des taches zonées: <i>Gloeocercospora sorghi</i>	Elle est d'importance moyenne ou faible. Apparition de lésions circulaires très larges avec des anneaux alternativement de couleur jaune paille et violet.	La rotation culturale et les itinéraires techniques pour contrôler les mauvaises herbes hôtes sont recommandés. Certains cultivars et hybrides ayant une résistance sont disponibles aux agriculteurs.
	Grain de sable: <i>Ascochyta sorghina</i>	Apparition de taches claires qui tournent au noir lorsque les fructifications noires (pynides) apparaissent.	Le sorgho ne devrait pas être planté sur des parcelles infestées l'année précédente. Le traitement des semences et l'utilisation de variétés résistantes sont souhaitables.
	Bande de suie: <i>Ramulispora sorghi</i>	Les lésions sont de forme elliptique dont le centre est de couleur beige à crème et des bords beige à violet-rouge. Un très large halo jaune caractéristique entoure la lésion qui à maturité devient noir comme la suie.	Presque tous les hybrides de sorgho subissent des dégâts foliaires de bande de suie. La meilleure méthode pour diminuer ces dégâts est la rotation culturale.
	Rouille: <i>Puccinia purpurea</i>	Des petites pustules ou cloques apparaissent sur les faces inférieures et supérieures des feuilles et libèrent de nombreuses spores de couleur brun rougeâtre.	Utiliser des variétés résistantes et retirer les résidus de récolte ainsi que les hôtes secondaires sont recommandés.

 <p>© ICRISAT</p>	<p>Mildiou: <i>Peronosclerospora sorghi</i></p>	<p>Les symptômes sont une chlorose foliaire et des plants rabougris conduisant à leur mort. Les feuilles infectées présentent une chlorose sur la face inférieure du limbe. Dans des conditions fraîches et humides, cette surface chlorosée produit des spores abondantes (conidies) blanches. Pendant la croissance de la plante, de nouvelles feuilles apparaissent et présentent des bandes parallèles de couleur vert et blanc.</p>	<p>Les mesures à prendre pour contrôler la maladie sont d'utiliser des variétés résistantes, d'effectuer une rotation culturale avec le coton, le blé, le soja ou une culture fourragère, et de retirer et évacuer les plants malades pour éviter la propagation de la maladie.</p>
--	---	--	---

4. Pathogène fongiques qui peuvent attaquer les épis et panicules

	Maladie et pathogènes	Symptômes	Contrôle
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Moisissure des grains ou e la panicule : <i>Fusarium moniliforme</i>, et autres spp. <i>Curvularia lunata</i>, <i>Phoma sorghina</i>, <i>Helminthosporium spp.</i> and <i>Alternaria spp.</i></p>	<p>Sur les panicules infectées par le <i>Fusarium</i>, les grains sont roses, orangés ou blancs, et sur celles infectées par <i>Curvularia</i>, <i>Alternaria</i> or <i>Helminthosporium</i>, ils sont noirs.</p>	<p>La moisissure des grains peut être évitée soit en retardant les semis ou en cultivant des variétés à maturité moyenne ou tardive de façon à ce que le remplissage du grain et le stade maturité soient atteints après la fin des pluies. La résistance de la plante hôte reste la méthode préférée pour contrôler les phénomènes de moisissure.</p>
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Ergot: <i>Claviceps Africana</i> <i>Ergot</i></p>	<p>Le champignon n'affecte habituellement que les fleurs non fertiles et conduit à la production d'exsudats sucrés (miellat) . Après maturité, les graines infectées produisent une corne noire allongée. Il peut réduire la production et entraîner des problèmes de toxicité dans l'alimentation du bétail en cas de forte contamination des grains.</p>	<p>La maladie peut être contrôlée par rotation culturale ou par l'utilisation de cultivars ou hybrides résistants à l'infection.</p>
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Charbon couvert: <i>Sporisorium sorghi</i></p>	<p>Dans les épis charbonneux, des galles charbonneuses coniques ou cylindriques se forment à la place des grains. Au début, les galles charbonneuses sont recouvertes d'une membrane gris ou brun clair qui peut plus tard se briser et libérer les spores brun foncé. Les plantes atteintes semblent normales, à l'exception des panicules.</p>	<p>Le traitement des semences, l'utilisation de semences indemnes de charbon et de variétés résistantes sont les mesures de contrôle les plus efficaces pour toutes les maladies charbonneuses.</p>
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Charbon nu: <i>Sporisorium cruenta</i></p>	<p>Les galles formées par le charbon nu sont longues et pointues. La fine membrane extérieure se brise généralement quand la galle atteint sa taille maximale. La plupart des spores brun foncé est emportée par le vent, laissant une structure longue, noire, pointue et courbe appelée columelle, dans la partie centrale de ce qui était la vésicule.</p>	



© ICRISAT

Charbon de la
panicule:
*Sporisorium
reilianae*

Il se distingue du charbon nu car il détruit toute la panicule en la transformant en une masse de chlamydospores poudreuse brun foncé. Le sorgho poussant à partir de graines saines sur un sol infesté peut être attaqué.

4. Pathogène fongiques qui peuvent attaquer les épis ou panicules



© ICRISAT

Charbon allongé :
*Sporisorium
ehrenbergii*

Il se manifeste par l'apparition de sorte de sores allongés, cylindriques, légèrement incurvés ayant une fine membrane qui lorsqu'elle se rompt libère une masse poudreuse de spores facilement emportées par le vent. Les sores sont inégalement répartis sur la panicule, contrairement au cas du charbon couvert.

5. Pathogènes qui peuvent attaquer les racines et les tiges




	Maladie et pathogène	Symptômes	Contrôle
 © ICRISAT	<p><i>Pourriture charbonneuse</i> <i>Macrophomina phaseolina</i> (<i>Sclerotium bataticola</i>)</p>	<p>Elle est la plus destructrice des pourritures de la tige. Elle apparaît de façon imprévisible et sporadique. L'un des symptômes est la verse mais elle se caractérise le mieux par une apparence filandreuse et sèche de la tige à la base de la plante et la présence de sclérotas noirs dans les zones touchées.</p>	<p>Son impact peut être minimisé en maintenant l'humidité dans le sol pendant les phases post-florales. Des niveaux élevés d'azote et de faibles niveaux de potassium sont des conditions à éviter. Les plants stériles sont essentiellement immunes.</p>
 © Wrather	<p>Pourriture du <i>Fusarium</i> de la tige <i>Fusarium thapsinum</i></p>	<p>Cette pourriture provoque un rougissement de la moelle dans la partie inférieure de stiges, alors que l'extérieur de la tige reste vert. Le tissu de la moelle reste généralement intact, contrairement au déchiquetage associé à la pourriture charbonneuse. Les plantes peuvent mourir prématurément ou verser.</p>	<p>Il est recommandé de semer sur des sols fertiles, d'utiliser des variétés à tiges robustes, d'éviter une population trop élevée sauf en cas d'irrigation et d'éviter des conditions de stress hydrique en réduisant le labour ou en irrigant.</p>



Tableau 3 :Les insectes nuisibles du sorgho

1. Insectes attaquant les graines et les racines			
	Nom	Symptômes	Contrôle
	Le taupin: <i>Aeolus, Eleodes, Conoderus spp</i>	Il se nourrit et endommage les graines semées. Il s'attaque moins aux racines des plantules. Les graines creusées par les larves ne germent pas, réduisant ainsi le peuplement. Les preuves de dommages dus aux taupins sont un peuplement hétérogène avec des retards de croissance et des plants chétifs.	Il est recommandé de planter dans des champs dont le précédent cultural n'est pas une herbacée, d'appliquer un insecticide sur les semences et d'acheter de semences pré-traitées avec un insecticide systémique. Lorsque les larves de taupin sont abondantes, un insecticide doit être appliqué en outre sur le sol au moment du semi.
	La fourmi de feu rouge: <i>Solenopsis invicta</i>	Elle se nourrit des graines semées. Elle endommage parfois les racines et les pousses feuillées germant des graines. Les ouvrières mâchent le mince tégument de la graine et retirent l'embryon (germe). Cela conduit à des pertes de germination et la réduction du peuplement.	Il est recommandé de planter du sorgho dans des champs dont le précédent cultural n'est pas une herbacée, d'assurer une germination rapide, de procéder à un labour des champs et d'utiliser des semences pré-traitées avec un insecticide.
	Le ver blanc: <i>Phyllophaga crinita</i>	Ses larves se nourrissent à partir des racines. Après germination, les dégâts sur les racines peuvent conduire des plantules de moins de 15 cm à mourir.	Il est recommandé de planter du sorgho dans des champs dont le précédent cultural n'est
1. Insectes attaquant les graines et les racines			
		Ces dégâts surviennent entre 7 et 10 jours après émergence des plantules. Les plantes infestées qui survivent sont rabougries et ne produisent jamais de graines. Une perte des racines peut également survenir.	pas une herbacée, et d'appliquer un insecticide dans le sillon ou en bande au moment du semis. L'application d'insecticide avant le semis est efficace mais coûteuse car l'insecticide doit être diffusé puis incorporé au sol.
© de Oliveira			



2. Insectes attaquant les semis


	Nom	Symptômes	Contrôle
 <p>©Texas A&M AgriLife Extension</p>	<p>Le ver gris: nombreuses espèces, Famille: <i>Noctuidae</i></p>	<p>Certains vers coupent les sorghos au niveau du sol ou juste en dessous (vers gris de surface), certains se nourrissent des parties aériennes (vers grimpant) et d'autres se nourrissent des parties souterraines de la plante (vers gris souterrains). Les plants dont les tiges sont coupées meurent. Les vers grimpants provoquent des feuilles en lambeaux, alors que les vers souterrains rhizophages peuvent tuer de jeunes plants ou fortement retarder la croissance de plants adultes.</p>	<p>Il est recommandé d'effectuer un travail du sol pour détruire la végétation en fin d'été ou début de l'automne. Les herbicides peuvent être utilisés pour tuer les mauvaises herbes d'hiver. L'insecticide peut être utilisé, mais l'efficacité du contrôle peut varier considérablement. Les vers gris souterrains peuvent être supprimés avec un insecticide appliqué sur le sol au semis.</p>
 <p>© Bradshaw</p>	<p>Chrysomèle des racines du maïs du Sud: <i>Diabrotica undecimpuncta ta howardi</i></p>	<p>Il se nourrit et creuse dans les racines de sorgho ou entre dans la tige juste au-dessus des racines. Il détruit le méristème apical et empêche le développement du brain maître. Les symptômes sont un retard de croissance. Une maturité tardive et non-uniforme peut résulter de la production de talles. La verse des plants peut survenir plus tard dans la saison.</p>	<p>Garder les champs exempts de mauvaises herbes, procéder à un labour et disquage 30 jours avant le semis, alterner avec une culture non herbacée, semer précocement et à une densité légèrement supérieure à la normale sont efficaces pour le contrôle. L'application d'insecticide (sous forme de granule ou liquide) dans le sillon au semis est également efficace.</p>
 <p>©Nuessly</p>	<p>Le puceron jaune de la canne à sucre: <i>Sipha flava</i></p>	<p>Il se nourrit sur la face inférieure des feuilles de sorgho et injectent une toxine. Il provoque des feuilles de couleur pourpre sur les plantules. Les plantes qui ne sont pas tuées restent rabougries et la maturité est retardée. Au moment où les symptômes de décoloration apparaissent, les plantes sont déjà blessées de façon importante. Les dommages causent fréquemment la verse des plantes qui peut être décuplée par l'association avec la pourriture des tiges.</p>	<p>De nombreux prédateurs se nourrissent du puceron jaune de la canne à sucre, mais le puceron est rarement parasité. Une croissance rapide des plantules est importante. Plusieurs insecticides foliaires permettent un contrôle efficace, de même que certains insecticides systémiques appliqués aux semences dans le sillon au moment du semis.</p>

2. Insectes attaquant les semis



	Nom	Symptômes	Contrôle
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Le puceron de la canne à sucre: <i>Melanaphis sacchari</i></p>	<p>Ces pucerons préfèrent se nourrir sur la face inférieure de feuilles âgées. Les dommages se développent des feuilles basses vers les feuilles hautes. Les adultes et les nymphes sont de couleur jaune. Ils sucent la sève sur la face inférieure des feuilles provoquant le jaunissement et le retard des plantes. Les dégâts sont aggravés en cas de sécheresse, avec un dessèchement des feuilles et la mortalité des plantes. La fumagine peut se développer sur le miellat qu'ils secrètent.</p>	<p>La destruction de la plante hôte durant l'hiver est très importante pour réduire la population de pucerons dans les champs de sorgho. Il est conseillé de semer tôt, à forte densité et de couper le sorgho fourrager avant la première semaine d'apparition des pucerons.</p>
 <p>© K-State University</p>	<p>La punaise: <i>Blissus leucopterus</i></p>	<p>Les adultes et les nymphes endommagent les plantes en retirant de grandes quantités de jus des tiges et des parties souterraines de la plante. Les jeunes plantes sont particulièrement sensibles aux dégâts, celles plus âgées résistent mieux, mais prennent une couleur rouge, s'affaiblissent, sont retardées et se couchent fréquemment. Les épidémies de punaises des céréales sont favorisées par temps sec.</p>	<p>Le traitement des semences avec un insecticide systémique contre les insectes ravageurs du sol, ou une application au moment du semi permet de contrôler les punaises. Une rare application d'insecticide par avion est efficace ou recommandée.</p>

3. Insectes et acariens attaquant les feuilles et les spires


	Nom	Symptômes	Contrôle
 <p>© Mendes</p>	<p>Puceron du maïs: <i>Rhopalosiphum maidis</i></p>	<p>On le trouve fréquemment au fond de la spirale d'une feuille moyenne avant la montaison mais aussi sur la face inférieure des feuilles, sur les tiges et sur les panicules. Les adultes et les nymphes se nourrissent de la sève des plantes mais n'injectent pas de toxine. Le symptôme le plus fréquent est une marbrure jaune des feuilles. Des moisissures se développent parfois sur le miellat produit, qui sur la panicule peut compliquer la récolte. Ce puceron transmet également le virus de la mosaïque nanisante du maïs (MDMV).</p>	<p>Des pertes de rendement sont observées quand ces pucerons provoquent des mortalités de plantules. Lorsque leur population devient très importante sur quelques plants dans un champ, l'exertion et le développement des panicules sont empêchés. Bien que ce puceron ne nécessite pas un contrôle, on peut mentionner que des insecticides, en particulier les systémiques sont très efficaces.</p>
 <p>© Araújo</p>	<p>Puceron vert: <i>Schizaphis graminum</i></p>	<p>Il est considéré comme un ravageur clé du sorgho. Ces pucerons sucent la sève des plantes et injectent une toxine. Ils se nourrissent sur la face inférieure des feuilles et produisent beaucoup de miellat. Souvent, ils n'atteignent pas une population suffisante pour être préjudiciable avant le développement de la panicule. Les infestations peuvent être détectées par l'apparition sur les feuilles de taches rougeâtres dues à la toxine injectée. Les feuilles atteintes commencent à mourir, virant au jaune puis au brun à partir des bords. Ils peuvent également transmettre le virus MDMV et prédisposer le sorgho à la pourriture charbonneuse.</p>	<p>Les précipitations et des prédateurs limitent la pullulation du puceron vert en début de saison. Le parasite, <i>Lysiphlebus testaceipes</i>, est généralement responsable du déclin rapide des populations de pucerons en fin de saison. Des hybrides résistants au puceron vert doivent être utilisés. On peut également le contrôler avec des insecticides, même s'il est résistant à certains. Des insecticides systémiques appliqués aux semences ou dans le sillon au moment du semi sont efficaces.</p>

 <p>© ICRISAT</p>	<p><i>Oligonychus pratensis</i></p>	<p>Les tétranyques sucent la sève de la face inférieure des feuilles. Les zones infestées sont jaune pâle sur la face supérieure puis deviennent rougeâtre. Les feuilles peuvent mourir. Toutefois, une perte de rendement peut se produire après le stade grain pâteux-dur si les acariens sont assez abondants pour provoquer la verse.</p>	<p>Il est conseillé de ne pas planter du sorgho à côté du blé. L'application d'insecticide est justifiée dès lors que le tiers des feuilles du peuplement est infesté. Une couverture complète avec le mélange pulvérisé est nécessaire. Les insecticides peuvent parfois ne pas permettre un contrôle efficace car les acariens sont souvent résistants.</p>
---	-------------------------------------	---	---

4. les foreurs des tiges

	Nom	Symptômes	Contrôle
 <p>© Mendes</p>	<p>-foreur de la canne à sucre: <i>Diatraea saccharalis</i> -Foreur néotropical: <i>D. lineolata</i> - Foreur du maïs du sud-ouest: <i>D. grandiosella</i></p>	<p>Les jeunes larves se nourrissent pendant quelques jours sur les feuilles ou l'axe de feuilles. Les larves âgées pénètrent par des tunnels dans la tige et forent dans la moelle vers le haut ou le bas. Les tiges infestées sont de diamètre plus petit et peuvent verser. Les forages des larves causent souvent des cassures de pédoncules et la chute des panicules. Les blessures par les foreurs rendent la plante plus sensible à la pourriture de la tige.</p>	<p>Il est recommandé de semer tôt et de labourer rapidement après la récolte pour casser les chaumes et exposer les larves à des températures froides durant l'hiver. Un contrôle chimique est rarement justifié.</p>
 <p>© Ward</p>	<p>Le charançon des racines de canne à sucre: <i>Anacrinus deplanatus</i></p>	<p>Les charançons adultes se nourrissent de jeunes plants et des réserves racinaires. Leurs dommages sont visibles mais pas aussi graves que ceux causés par les larves. Ces dernières forent un tunnel dans les tiges sous le niveau du sol ou juste au-dessus. Leur développement cause l'apparition de symptômes de sécheresse et la verse de la plante. Les trous de sortie et les tunnels d'alimentation permettent à d'autres agents pathogènes comme la pourriture charbonneuse de pénétrer dans la plante.</p>	<p>Ce charançon infecte le sorgho sporadiquement en particulier pendant les années de sécheresse. De bonnes pratiques culturales favorisant le développement précoce de la plante sont bénéfiques contre cet insecte. Il n'y a ni insecticide, ni technique d'application efficace.</p>

5. Insectes attaquant les panicules

	Nom	Symptômes	Contrôle
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Cécidomyie: <i>Stenodiplosis sorghicola</i></p>	<p>Les larves de cécidomyie se nourrissent de l'ovaire fraîchement fécondé et empêchent le développement du noyau causant ainsi la perte directe de grain. Les glumes d'un épillet de sorgho infesté sont étroitement resserrées car le noyau ne se développe pas. Typiquement, une panicule de sorgho infesté aura, selon l'importance des dégâts, des proportions variables de grains normaux dispersés parmi des épillets ne portant pas de grain.</p>	<p>Planter des hybrides ayant une maturité uniforme et rapide est la méthode de gestion de la culture la plus efficace. Cela évite les floraisons tardives liées aux infestations. L'enfouissement des résidus par un labour profond tue certaines larves ayant passé l'hiver. Plusieurs applications d'insecticides évitent les dommages lorsque le sorgho est planté trop tard pour échapper à des infestations nuisibles.</p>

<p>Chenille paniculaire: <i>Helicoverpa armigera</i></p>  <p>© ICRISAT</p>	<p>Chenille paniculaire: <i>Eublemma silicula</i></p>  <p>© ICRISAT</p>	<p>Ces chenilles se nourrissent à partir des grains en développement. Ils détruisent les grains essentiellement à l'intérieur de la panicule. Certaines espèces tissent des toiles de fils de soie à l'intérieur de la panicule ou font de petits trous dans le grain. Chez les cultivars à panicules compactes, l'intérieur de la panicule peut être complètement endommagé alors qu'elle peut sembler extérieurement saine. Les pertes en grains sont très élevées, et le dommages sont particulièrement lourds dans des conditions humides.</p> <p>Elles peuvent être contrôlées à l'aide de pièges à phéromones sexuelles synthétiques, en détruisant les résidus de culture, en relâchant des ennemis naturels comme le champignon <i>Trichogramma pretiosum</i>, en utilisant des pesticides sélectifs et en utilisant des agents microbiens des baculovirus et <i>Bacillus thuringiensis</i>.</p>
 <p>© Mendes</p>	<p>Chenille légionnaire: <i>Spodoptera frugiperda</i></p>	<p>Elles infestent à la fois la spire et la panicule. Elles se nourrissent à partir des spires jusqu'à ce que les panicules commencent à émerger. Jeunes, les petites larves se nourrissent d'abord à partir de fleurons. Quand elles grandissent, elles se nourrissent à partir des grains en développement. La majorité des dommages des grains est causée par les grosses larves, et 80% des dégâts sont occasionnés par les deux derniers stades larvaires.</p> <p>Plusieurs guêpes et mouches parasitent ces chenilles, elles sont la proie de plusieurs punaises et coléoptères, et des agents pathogènes en particulier des champignons tuent les larves de ces chenilles légionnaires. Un semis précoce est une bonne tactique pour éviter l'infestation, ainsi que l'utilisation d'hybrides à panicules lâches.</p>
 <p>© ICRISAT</p>	<p>Punaises <i>Oebalus pugnax</i> <i>Nezara viridula</i> <i>Chlorochroa ligata</i> <i>Leptoglossus phyllopus</i> <i>Nysius raphanus</i> <i>Calocoris angustatus</i></p>	<p>Ces punaises ont des natures et des symptômes comparables. Elles sucent la sève des grains en développement. En fonction du nombre de punaises par plante, de la durée d'infestation et du stade de développement des grains à ce moment, les dommages peuvent être économiquement importants. Les grains au stade pâteux-dur ne sont généralement pas endommagés. Les nymphes et les adultes sont responsables d'une réduction du poids du grain, de sa taille et de sa qualité. Des champignons surinfectent souvent les panicules.</p> <p>Dans la plupart des cas, un niveau d'infestation de seize individus par panicule au stade grain pâteux-dur justifie l'emploi d'un insecticide. Il est également justifié quand, au stade pâteux-mou, il y a 2 à 6 punaises vertes pointues, conchuela, ou 4 à 11 punaises de feuilles basses par panicule.</p>

Nématodes

Les nématodes s'attaquant au sorgho peuvent causer des pertes importantes (Claflin 1983). *Meloidogyne*, *Tylenchorhynchus*, *Belonolaimus*, *Pratylenchus*, *Xiphinema*, et *Trichodorus* sont des genres importants dans l'évaluation des dégâts potentiels dus aux nématodes. La recherche en nématologie utilisant le sorgho comme plante hôte est très limitée. Les relations possibles entre champignons, bactéries et nématodes liées au complexe responsable de la pourriture des tiges du sorgho n'ont pas été étudiées en profondeur. Le tableau 4 liste les genres cosmopolites et susceptibles d'être responsables de pertes de rendement chez le sorgho.

Tableau 4 : Nématodes parasites pathogènes du sorgho (Claflin 1983)

Nématode	Mode de parasitisme	Symptômes caractéristiques	Autres hôtes que sorgho
<i>Pratylenchus spp</i>	Endoparasite	Baisse de vigueur de la plante, apparition de lésions nécrotiques profondes, association avec des micro-organismes causant l'apparition de complexes pathogènes, faible poids des grains	Graminées, céréales, betterave, chou, tomate, légumineuses, tabac; plus de 400 hôtes
<i>Meloidogyne spp</i>	Endoparasite	Baisse de vigueur de la plante, retard de croissance, apparition de galles racinaires, prolifération des racines latérales, populations réduites, retard de floraison	Graminées, céréales, légumineuses, coton, tabac, tomate, pomme de terre
<i>Tylenchorhynchus spp</i>	Ectoparasite	Retard de croissance, manque de développement des racines, baisse de vigueur des plantules, extrémités des racines courtes et épaisses	Graminées, céréales, légumineuses
<i>Belonolaimus spp</i>	Ectoparasite	Baisse de vigueur de la plante, retard de croissance, développement très limité du système racinaire, le niveau de seuil du maïs est un nématode/100 cm ³ sol, en général seulement détecté sur sols sableux	Coton, céréales, légumineuses, légumes, tabac
<i>Xiphenema spp</i>	Ectoparasite	Baisse de vigueur de la plante, développement racinaire faible, vaste nécrose des tissus racinaires	Citrus, fruits et arbres d'ombrage, céréales, graminées, légumineuses, les légumes

4. Récolte et logistique

La récolte et la logistique du sorgho-énergie diffèrent selon l'usage du produit final. On distingue trois principales méthodes de récolte : (I) lorsque l'objectif est uniquement de produire du bioéthanol 1G (cas du Brésil), (II) quand il est planté à la fois pour le bioéthanol 1G et la production de grains (par exemple en Inde) et (III) quand il est planté pour le bioéthanol 2G ou la production de biogaz (cas de l'Europe).

Récolte des tiges (pour bioéthanol de 1^{ère} génération):

Le moment idéal pour la récolte et la période d'utilisation industrielle sont déterminés par les valeurs de Brix°, les teneurs et pourcentages en sucres totaux et sucres réducteurs, la courbe de maturation de chaque variété, la durée de la période 10j après floraison à maturité physiologique du grain. D'après Schaffert *et al.* (1980), l'accumulation de sucres chez le sorgho sucré commence après le stade floraison et se poursuit jusqu'au stade de maturité physiologique des grains.

Au Brésil, le sorgho sucré est utilisé pour compléter la production de canne à sucre durant la basse saison. Généralement, une parcelle de canne est renouvelée tous les cinq ans, ce qui signifie que chaque année 25 % de la surface sont arrachés et replantés. La figure 9 montre la bonne complémentarité des cycles culturaux des deux plantes. Si lors d'une replantation, un cycle de sorgho sucré est intercalé, on peut espérer augmenter la période de fonctionnement des grosses usines jusqu'à 100 jours. Les nouveaux hybrides développés peuvent être récoltés 100 à 120 jours après semis. Pour déterminer le meilleur

moment de la récolte, la teneur en sucres du jus devrait être mesurée avec un densimètre Brix ou un réfractomètre pendant les périodes mentionnées ci-dessus. La récolte devrait commencer lorsque la teneur en sucres totaux du jus atteint 12.5% (Mantovani *et al.*, 2012) ou lorsque la lecture du Brix° atteint 15.5 à 16.5° (Bitzer et Fox, 2000).

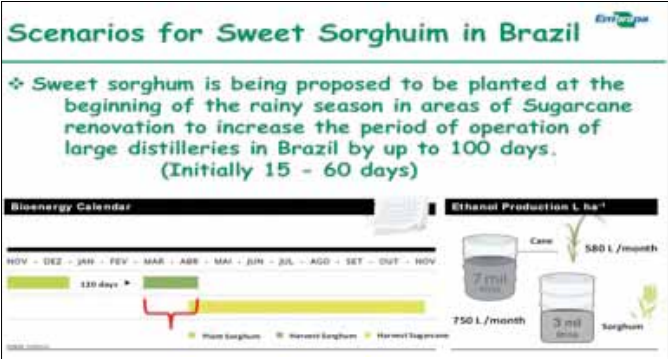


Figure 9 : Industrial calendar in Brazil (© Embrapa, 2014)

dispositif permettant de récolter également les panicules au lieu de les laisser tomber au sol, serait idéale. Le semis est réalisé en tenant compte de la barre de coupe de ces machines, et un espacement de 0.6 / 0.9m semble le plus commun. Avec l’augmentation de la demande du secteur industriel pour utiliser le sorgho sucré pour produire de l’alcool, des ajustements sont en cours afin de tenir compte des exigences des usines de transformation. La recommandation actuelle est de couper les tiges en morceaux de 20 cm, considérant que les champs de production ne sont pas situés loin des usines (Mantovani *et al.*, 2012).

Table 5 : Effets du délai entre récolte et broyage des tiges sur leur teneur en sucre (Reddy *et al.*, 2008)

Broyage (Nbre de jours après récolte)	Jus extrait (L x 103 / ha)	Lecture Brix	Quantité de sucre (Mg/ha)	Perte en sucre par rapport au jour de récolte (%)
0	42.4	18.5	2.62	-
1	40.6	19.2	2.47	5.7
2	35.0	20.9	2.18	16.8
3	37.6	21.4	2.20	16.0

Le sorgho sucré est similaire à la canne à sucre en ce sens que le jus (sucre) de sa tige doit être traité assez rapidement, pour éviter une perte en sucre et une détérioration de la qualité du jus. Reddy *et al.* (2008) ont montré que la teneur en sucre diminue au cours des quatre jours suivant la récolte (Tableau 5). Si on ne peut pas traiter le jus rapidement, des technologies doivent être développées pour stabiliser le jus et maintenir le sucre pour



Figure 10: machine à récolter la canne à sucre utilisée pour le sorgho sucré (© Embrapa)

un traitement ultérieur afin que la saison de transformation du sucre puisse être étendue (Turhollow *et al.*, 2010). Cependant, si les tiges ne sont pas traitées immédiatement, elles devront être manipulées plusieurs fois (chargement, déchargement, stockage, rechargement etc..), ce qui augmentera les coûts de production.

Récolte des grains et tiges (pour l'alimentation et la production de bioéthanol 1G):

Le sorgho grain est généralement récolté de façon comparable aux autres céréales comme le blé. Dans l'agri-

culture moderne, les sorghos grain ont été sélectionnés pour une hauteur relativement petite et uniforme, pouvant être récoltés par une moissonneuse. Les variétés de sorgho sucré ont été sélectionnées à la fois pour leur grain et leur tige, et elles ont donc des tiges plus grandes que celles des sorghos grain. Par conséquent les machines conventionnelles ne peuvent pas être utilisées. En Inde, la récolte est actuellement manuelle. Dans un premier temps la plante entière est coupée, puis les panicules sont séparées et récoltées (Figure 11). De nouvelles méthodes de récolte adaptées au sorgho sucré sont actuellement testées en Australie (Agrifuels, 2009).

La période de récolte du sorgho sucré pour un double usage est très importante et varie selon les variétés. La période appropriée devrait être déterminée sur la base du poids frais des tiges et de leur teneur en jus, de la teneur en sucres du jus et de la production de grain (FAO, 1994).

Récolte de la plante entière (pour une production de bioéthanol 2G ou de biogaz):



Figure 11 : Récolte manuelle du sorgho sucré double usage en Inde (© ICRISAT)

Les sorghos de grande taille peuvent être récoltés avec une ensileuse (Figure 12). Des tonnages élevés nécessitent de grosses machines automotrices dont les coûts d'investissement sont élevés. Cependant, les conditions de champs et l'état des routes peuvent ne pas permettre physiquement ou économiquement l'utilisation de ces équipements, et dans ce cas on utilisera une ensileuse tractée. Pari *et al.* (2008) ont mentionné les efforts européens pour développer une machine à récolter le sorgho dimensionnée aux conditions de culture européennes.



Figure 12 : Sorgho biomasse récolté avec une ensileuse comme substrat pour la bioénergie cellulosique (© Jordan)

Le calendrier de récolte dépend du moment où la biomasse est nécessaire, de la variété, de la durée de la saison, de la date de semi et des paramètres d'humidité souhaités. Dans les zones tempérées, la récolte a lieu habituellement entre septembre et octobre pour la production de biogaz.

Cependant une autre option en zone tempérée est de semer le sorgho au mois de juin, après une culture d'hiver. Dans ce cas, même s'il n'aura pas assez de temps pour accomplir la totalité de son cycle, une récolte en novembre, pourra donner une bonne production de

biomasse qui sera disponible pour produire du bioéthanol 2G, à un moment qui ne correspond pas à la récolte d'autres biomasses.

Les deux méthodes les plus courantes pour récolter le sorgho biomasse sont un andainage suivi d'un pressage en bales, ou d'un ensilage des andains, ou un ensilage direct de la culture. Le choix de la technique dépend essentiellement du taux d'humidité de la biomasse que l'on souhaite atteindre, et de l'éventuel séchage ultérieur nécessaire pour y parvenir. La méthode la plus pratique est sans doute d'ensiler la plante au champ et de la transporter directement à l'usine. Cela a l'avantage également de minimiser la pollution de la biomasse par diverses saletés. Cependant elle nécessite ensuite un traitement rapide car les sucres présents dans la biomasse fraîchement ensilée vont contribuer à sa dégradation. L'utilisation d'une machine pour couper et andainer les tiges qui seront ramassées ultérieurement est une autre méthode pour sécher et récolter le sorgho biomasse. Cette méthode permet de sécher la biomasse au champ lorsqu'une biomasse plus sèche est nécessaire ou lorsque le stockage au champ de la biomasse est préféré (Blade Energy Crops, 2010). Pour la production de biogaz, la matière hachée peut être conservée sous forme d'ensilage et utilisée plus tard. La dégradation est par conséquent évitée.

Utilisation du sorgho pour l'énergie

Le sorgho peut être séparé en trois parties principales (panicules, feuilles et tiges), chacune pouvant servir à produire une variété de produits comme de la nourriture, du fourrage, du sirop, du sucre, des fibres, du compost ou du biocarburant. Le sorgho-énergie peut être converti en vecteurs d'énergie selon soit la voie biochimique, soit la voie thermo-

chimique. Les sucres contenus dans la culture peuvent être convertis en biocarburant (éthanol 1G et 2G, biogaz), par des processus biochimiques. Des processus thermo-chimiques comme la combustion, la pyrolyse et la gazéification peuvent être utilisés pour convertir la bagasse en chaleur et électricité. La figure 13 montre les différentes options d'utilisation des trois parties du sorgho-énergie et les procédés utilisés pour la production des différents produits mentionnés précédemment.

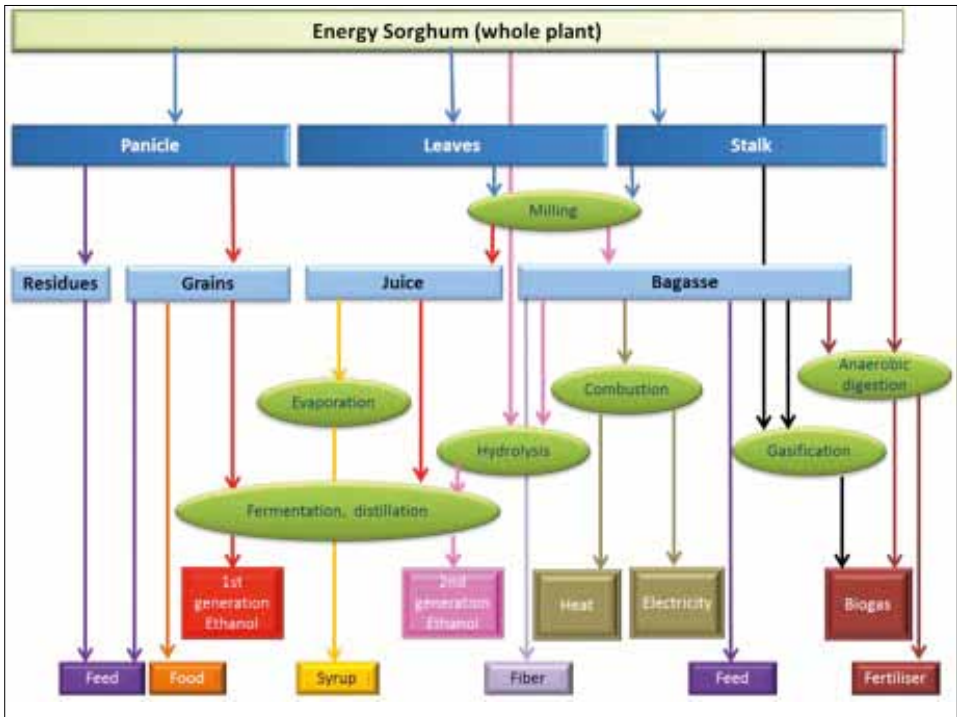


Figure 13: Les différents procédés applicables au sorgho énergie et les produits qui en résultent.

Production de sirop

La production de sirop à partir du sorgho sucré offre aux agriculteurs une excellente occasion d'améliorer leurs revenus et la productivité de leur exploitation agricole. Il est idéal pour le petit propriétaire ayant un capital limité. Ce sirop peut être un produit commercialisable attrayant. Un excellent sirop peut être produit lorsque le Brix° du jus brut est supérieur à 15°. Dans les unités de production à petite échelle, généralement aucun produit chimique n'est ajouté dans la production de sirop. Ceci contraste avec la production industrielle de sirop/jagré à partir de la canne à sucre, où habituellement divers produits chimiques sont ajoutés principalement pour améliorer la couleur du produit.

Le rendement et la qualité du sirop de sorgho sucré sont influencés par les équipements et les procédés utilisés dans la fabrication, ainsi que par les connaissances et les compétences des opérateurs. Les principales raisons expliquant un sirop de mauvaise qualité sont la présence de masses stables ou flottantes dans le sirop, une apparence générale trouble en raison d'une mauvaise élimination de l'écume (impuretés), la gélification du sirop due à une quantité élevée d'amidon dans le jus, la cristallisation due à une forte concentration de saccharose dans le jus, et la viscosité très faible ou trop élevée du sirop produit en raison de mesures erronées du Brix° et/ou de la température (Nimbkar *et al.*, 2006).

En Inde, dans les petites unités de production, les tiges sont stockées à l'ombre pendant un ou deux jours avant d'être broyées et écrasées pour en extraire le jus. Cette étape permet l'inversion du saccharose en sucres réducteurs qui améliorent la qualité du jus. Elle permet également de supprimer l'excès d'eau dans les tiges et d'augmenter le Brix° du jus, permettant ainsi de réduire le temps et l'énergie nécessaires à la concentration du sirop.

Dans les endroits où la récolte est totalement mécanisée, les tiges sont coupées en morceaux lors de la récolte. Dans ce cas, ces morceaux de tiges sont immédiatement usinés pour l'extraction du jus, sinon la qualité du jus va se détériorer en attendant l'usinage.

La pureté du jus de sorgho sucré est faible. En dehors des sucres, il contient des substances solides solubles comme des anthocyanes, de la chlorophylle et des matières solides insolubles telles que des granules d'amidon. Le jus extrait doit être filtré pour enlever les gros morceaux de fibres broyées, puis filtré sur un tamis à mailles fines dans le réservoir de décantation afin d'obtenir un jus propre. Le jus tamisé est ensuite conservé intact pendant 1-2 heures pour la décantation des granules d'amidon.

Le jus surnageant (conserver au moins 3 à 4 cm de jus au fond du réservoir de décantation) est ensuite pompé dans un bac à évaporation. C'est l'aspect le plus critique de la fabrication d'un sirop de haute qualité. Un bon sirop est obtenu après évaporation de l'eau et écrémage en continu des matières coagulées apparues à la surface. Un chauffage lent est nécessaire quand l'écume apparaît, sinon le sirop sera brûlé. Quand la température atteint 105 à 107°C avec un Brix de 74 à 76%, le chauffage doit être immédiatement stoppé. Si un refroidissement rapide n'est pas réalisé, le produit aura un goût de brûlé et la couleur du sirop tournera au brun foncé. Par conséquent, le sirop doit être refroidi à 80°C dans les 10 à 15 minutes suivantes avant d'être mis en bouteilles stérilisées (Nimbkar *et al.*, 2006).

Production de bioéthanol de première génération

De nos jours, 40% de l'énergie totale consommée dans le monde est sous forme de combustibles liquides tels que l'essence et le diesel (Tan *et al.*, 2008). En effet, le secteur des transports est presque entièrement dépendant de ce type de carburant. Par conséquent, une attention particulière a été accordée à l'utilisation potentielle de biocarburants dans les véhicules. Parmi les biocarburants, l'éthanol est l'un des plus attrayants pour l'environnement. Il peut être mélangé à l'essence à 10 (E10) ou 15% (E85) voire plus (jusqu'à 100%) pour les véhicules "flex fuel" (Figure 14) Hahn-Hägerdal *et al.*, 2006).



Figure 14 : Véhicule flex fuel à un salon commercial (© Rutz)

Le bioéthanol est dérivé de la fermentation alcoolique des sucres simples ou de l'amidon (bioéthanol 1G) ou des polysaccharides (bioéthanol 2G) dans des conditions anaérobies. En présence d'eau et de levures (*Saccharomyces cerevisiae*), le glucose est converti en éthanol, du CO₂, ainsi que de petites quantités de produits finis mineurs tels que le glycérol, des huiles de fusel, des aldéhydes et des cétones (Almodares et Hadi, 2009).

Les tiges de sorgho sucré ont jusqu'à 75% de jus, contenant entre 12 et 23% de sucres. L'éthanol dérivé du jus de sorgho sucré est moins cher à produire que l'éthanol de maïs, car la longue fermentation et la cuisson pour produire de l'éthanol à partir des grains de maïs ne sont pas nécessaires dans le cas du jus de sorgho sucré (Dweikat, 2012). Plus la plante est grande et plus les tiges sont épaisses, plus la plante produira de jus. En outre, le sorgho sucré a une grande quantité de saccharose et de sucres réducteurs qui sont facilement convertis en éthanol. *In fine* le coût de production de la culture de sorgho sucré peut être jusqu'à trois fois plus faible que celui de la canne à sucre (Reddy *et al.*, 2005).



Figure 15 : Premier moulin dans le processus d'extraction du jus de sorgho sucré dans une usine au Brésil (© Braconnier)

La méthode d'extraction du jus pour la production d'éthanol est la même que pour la production de sirop. La figure 15. montre le premier moulin dans le processus d'extraction du jus dans une usine industrielle au Brésil. La figure 16 montre la bagasse de sorgho sucré obtenue après extraction.

Pour une production d'éthanol à la ferme, Bele (2007) a mentionné une méthode de récolte et pressage des tiges qui utilise une nouvelle moissonneuse (brevet en instance), équipée d'une presse multi-rouleaux pour extraire le jus. Cette moissonneuse accomplit au champ en un seul passage les deux opérations de récolte et d'extraction du jus. L'unité utilise une ensileuse standard qui alimente un moulin à rouleaux. Après pressage des tiges, les résidus sont expulsés et retournent au sol. Le jus est ensuite pompé de la moissonneuse directement dans de grands réservoirs de stockage en plastic disposés au bord du champ, dans lesquels la fermentation a lieu immédiatement.



Figure 16 : Bagasse obtenue après extraction du jus (© Braconnier)

La fermentation peut se dérouler soit selon un système de fermentation par lot comme dans 75% des distilleries (Figure 17), soit selon un système en continu. Les deux systèmes recyclent des levures. Dans le système en continu le rendement de la fermentation est meilleur que dans le procédé par lot, et le volume total nécessaire est moindre, mais le principal problème de ce système est le risque de contamination par des bactéries (Sweetanol, 2011a). Dans les deux systèmes, en fin de fermentation les levures sont récoltées par centrifugation et réutilisées pour le cycle de fermentation suivant. Jusqu'à 90-95% des levures sont recyclés, ce qui conduit à des densités cellulaires élevées à l'intérieur du fermenteur (10 à 14% base poids humide/v). On estime que la masse de levures augmente de 5 à 10% (par rapport à la masse initiale) durant le cycle de fermentation, ce qui est suffisant pour compenser les pertes de levures survenant durant l'étape de centrifugation. Normalement la température est maintenue à 32–35°C. Quand la fermentation cesse, les levures sont séparées par centrifugation pour aboutir à une suspension concentrée des cellules (la crème de levure) avec 60 à 70% (base poids humide/v) de cellules. Cette crème de levures est diluée avec de l'eau (1:1) puis traitée à l'acide sulfurique (pH 1.8-2.5) pendant deux heures pour réduire les contaminations bactériennes, avant d'être réutilisées comme starter pour un cycle de fermentation suivant. Après centrifugation, la "bière" ou le "vin" est transféré dans l'unité de distillation pour produire l'alcool normalement par une distillation fractionnée classique. Après distillation, un flux de liquide appelé vinasse est produit à raison de 10-15 litres par litre d'éthanol produit. Cette vinasse peut être utilisée dans l'alimentation animale ou comme eau d'irrigation et fertilisant dans les champs de cannes à sucre (apporte au sol du potassium, calcium, magnésium, des micro-éléments et de la matière organique) (Basso *et al.*, 2011).



Figure 17 : Fermenteurs d'une usine produisant du bioéthanol de canne à sucre, Brésil (© Rutz)

Du bioéthanol 1G peut être produit, non seulement à partir de la fermentation du jus extrait de la tige de sorgho à sucre, mais aussi de l'amidon contenu dans ses grains (Figure 17). Le processus de production d'éthanol à partir des grains de sorgho sucré est similaire à celui du maïs (Quintero *et al.*, 2008). Après le lavage, et le broyage des grains, la matière amylacée est gélatinisée, liquéfiée et saccharifiée utilisant les enzymes -amylase et gluco-amylase pour produire du glucose. La fermentation, la distillation et la déshydratation sont ensuite similaires à celles opérées à partir des jus sucrés de la tige. Toutefois, le sous-produit de la fermentation du grain n'est pas semblable à celui de la tige. Il est appelé DDS pour Drêche de Distillerie avec Solubles (DDGS en anglais) (figure 18). La DDS est un co-produit solide de la production d'éthanol à partir de grains, d'une valeur nutritive élevée, et souvent utilisée dans l'élevage (Almodares et Hadi, 2009).



Figure 18 : Usine ABENGOA de production de bioéthanol à partir de graines, Salamanque, Espagne (© Rutz)



Figure 19 : DDS d'une usine de production d'éthanol à partir de grains (© Rutz)

Production de bioéthanol de deuxième génération (Ligno-cellulosique)

Le bioéthanol 2G est produit à partir de biomasse ligno-cellulosique comme des plantes ligneuses, des résidus agricoles ou des déchets (par exemple de la bagasse de sorgho). Souvent, il n'entraîne pas de conflits entre usage alimentaire et usage industriel. Actuellement, l'inconvénient du bioéthanol 2G est qu'il est plus difficile et plus coûteux à produire. Pour une efficacité élevée de la fermentation, il faut surmonter deux problèmes majeurs: la résistance élevée à l'hydrolyse de la structure cristalline de la cellulose, et la liaison lignine-cellulose qui forme une barrière physique et empêche l'accès des enzymes aux fibres cellulose. L'hydrolyse acide de la cellulose nécessite des températures et des pressions élevées pour détruire certaines parties des hydrates de carbone, qui sont transformés principalement en composés furaniques. Par ailleurs des substances très toxiques sont générées par la dégradation partielle de la lignine (Jacobsen et Wyman, 2000).

Pour pouvoir utiliser la biomasse ligno-cellulosique comme substrat pour produire de l'éthanol et d'autres produits chimiques, il est généralement nécessaire de séparer ses composants principaux (lignine, hemicellulose et cellulose). Pour cela, il est essentiel de passer par une étape de prétraitement permettant de désorganiser la matrice ligno-cellulosique. Ce prétraitement peut être réalisé par des procédés physiques, physico-chimiques, chimiques, ou biologiques, qui sont suivis ou associés à l'hydrolyse des polysaccharides (hemicellulose et cellulose) en unités monomères respectives, pentoses et hexoses (Betancur et Pereira, 2010a, b).

L'utilisation de variétés de sorgho à nervures brunes (bmr) présente l'avantage de produire une biomasse moins riche en lignines, ce qui favorise le processus de dégradation. Après hydrolyse, les sucres subissent la fermentation suivant le même procédé que pour l'éthanol 1G.

De nos jours, utiliser la biomasse de sorgho pour produire de l'éthanol 2G n'a pas encore atteint le niveau d'exploitation commerciale. Une bonne vue d'ensemble des installations produisant de du bioéthanol 2G est donnée par le rapport IEA Task 39 (2013) et Janssen *et al.* (2013).

Production de biogaz par digestion anaérobie

La production et l'utilisation du biogaz obtenu par digestion anaérobie (DA) offre des avantages environnementaux et socio-économiques pour la société dans son ensemble ainsi que pour les agriculteurs impliqués. La chaîne de valeur de la production de biogaz améliore les capacités économiques locales, préserve des emplois en zones rurales et augmente le pouvoir d'achat régional. Il améliore le niveau de vie et contribue au développement économique et social (Al Seadi *et al.*, 2008).

La digestion anaérobie est le processus biologique suivant lequel la matière organique est métabolisée par des micro-organismes variés, dans un environnement exempt d'oxygène dissous ou de ses précurseurs (par exemple H_2O_2). Ce procédé biologique produit un gaz, appelé biogaz, principalement composé de méthane (CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2). Le biogaz contient également d'autres gaz tels que H_2 , H_2S et NH_3 . Le procédé de digestion anaérobie est complexe car il implique des micro-organismes variés et une série d'étapes métaboliques interdépendantes.

La figure 20 montre schématiquement les différentes étapes du processus de la digestion anaérobie. L'ensemble du processus se déroule en 4 étapes: (1) des composés organiques complexes tels que les protéines, les glucides et les lipides sont transformés en produits solubles simples tels que des acides aminés, des sucres et des acides gras

à longue chaîne et de la glycérine, par l'action d'enzymes extracellulaires excrétées par un groupe de bactéries appelées les bactéries fermentescibles. Cette première étape est généralement connue sous le nom d'hydrolyse; (2) dans une deuxième étape ou acidogénèse les mêmes bactéries fermentescibles transforment les produits solubles de la première étape en un mélange d'acides organiques, de l'hydrogène et du dioxyde de carbone. L'acidogénèse est la production d'acides gras volatils tels que l'acide propionique et butyrique; (3) ces acides gras volatils ainsi que l'éthanol sont convertis en acide

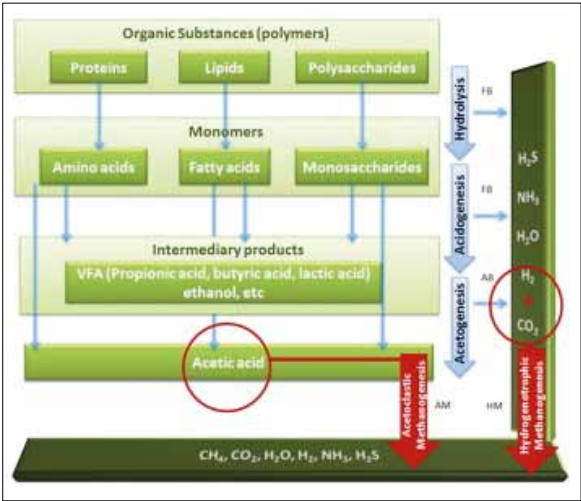


Figure 20 : Etapes de conversion de la matière organique complexe par digestion anaérobie

acétique, hydrogène et dioxyde de carbone par un autre groupe de bactéries appelées bactéries acétogènes productrices d'hydrogène. L'étape de production d'acide acétique est connue sous le nom d'acétogénèse; (4) l'acide acétique, l'hydrogène et le dioxyde de carbone sont les substrats primaires pour la méthanisation, dernière étape du processus. Deux groupes de micro-organismes sont impliqués dans la méthanogénèse. Le premier groupe constitué de méthanogènes acétotrophiques ou acéticlastiques, utilise l'acétate pour produire du méthane alors que le second comprenant des méthanogènes hydrogénotrophiques génère le méthane à partir de H_2 et CO_2 (Khanal, 2008). Sur la base de la demande chimique en oxygène, environ 72% de la production de méthane provient de la décarboxylation de l'acétate, tandis que le reste vient de la réduction de CO_2 (McCarry, 1964).

La quantité de biogaz produit dépend du type de substrat utilisé. Le sorgho est un substrat adapté aux unités de production de biogaz (Figure 21) produisant essentiellement du méthane (Poletti *et al.*, 1996; Röhricht, 2007). Le substrat utilisé provient de l'ensilage de la plante entière, de la bagasse ou des tiges.



Figure 21 : Unité agricole de production de biogaz en Allemagne (©Rutz)

Comme le maïs, le sorgho peut être aisément ensilé et peut servir de substrat pour la production de biogaz. Il est actuellement à l'étude comme culture alternative ou complémentaire du maïs. La culture intensive du maïs pourrait avoir un effet négatif sur les facteurs abiotiques et biotiques de l'environnement tels que la fertilité des sols et la biodiversité. Le sorgho peut notamment réduire les risques de la culture du maïs liés au climat, sur les sols légers et les zones de restauration. Dans ces zones,

l'approvisionnement en matières premières des usines à biogaz peut donc être augmenté en utilisant le sorgho qui peut être facilement inclus dans des systèmes de rotation des cultures (Zeise et Fritz, 2011).

Pour avoir une bonne digestion anaérobie, il est conseillé de récolter la culture quand la teneur en matière sèche est comprise entre 28 et 32%. Des teneurs inférieures à 25% ou supérieures à 35% posent des problèmes de densification appropriée du substrat.

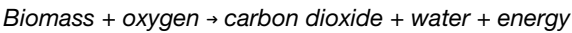
La production de méthane à partir d'ensilage de sorgho est de l'ordre de 80 m³ par tonne de substrat frais, alors que pour un ensilage de maïs (plante entière), elle atteint 106 m³ par tonne de substrat frais (BMU, 2012, Rutz *et al.*, 2012), sachant que cette production de méthane dépend aussi de la variété utilisée. Pour la production de biogaz, la biomasse de sorgho est hachée à la récolte puis ensilée et stockée jusqu'à son utilisation. L'ensilage alimente le digesteur qui génère du biogaz durant la digestion anaérobie. Il peut être utilisé pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Ce biogaz peut également être purifié en biométhane puis injecté dans le réseau comme substitut au gaz naturel, ou être utilisé directement comme carburant et remplacer l'essence conventionnelle ou le gaz naturel.

Dans tous les procédés de digestion anaérobie, un sous-produit est généré, le digestat, qui peut être utilisé comme engrais et substituer les engrais minéraux. En Europe, une unité moyenne de production de méthane a une capacité de 450 kW_{el}. Dans le cas des unités de production agricoles, l'agriculteur est souvent celui qui approvisionne et fait fonctionner l'unité dont il est aussi le propriétaire (Rutz *et al.*, 2013).

En plus du méthane, de grandes quantités d'hydrogène peuvent être produites par la digestion anaérobie. L'hydrogène possède la plus haute teneur énergétique par unité de poids (142 kJg), et ne produit que de l'eau lorsqu'il est brûlé en tant que combustible ou converti en électricité. Il est de ce fait considéré comme une excellente source alternative d'énergie en raison de sa propreté, de son recyclage et de son efficacité (Das, 2009; Gosselink, 2002). Parmi les différents substrats possibles, les hydrates de carbone sont la source principale d'hydrogène au cours de la fermentation. De ce fait les biomasses naturelles riches en hydrates de carbone, comme celles des cultures énergétiques telles le sorgho, sont considérées comme des substrats prometteurs pour la production de biohydrogène (Hallenbeck, 2009; Capdan et Kargi, 2006; Antonopoulou *et al.*, 2008). Shi *et al.* (2010) ont mentionné un rendement cumulé en hydrogène de 127,26 ml/g pour les tiges de sorgho sucré pré-traitées par NaOH à 0,4%.

Combustion de la biomasse de sorgho

La combustion de la biomasse solide comprend une série de procédés chimiques et physiques complexes. Pour simplifier, la biomasse brûle en présence d'oxygène, en produisant du dioxyde de carbone et de l'eau :



L'ensemble du processus de combustion peut être divisé en plusieurs étapes (Tableau 6).

Tableau 6 : Processus de combustion schématique (Hiegl *et al.*, 2011)

Phase	Température	Chaîne de produit
Chauffage du combustible par la flamme, le lit de combustion et les parois du four	< 100°C	Bois séché à l'air
Séchage du combustible par évaporation et élimination de l'eau	> 100°C	Bois séché à la vapeur
Décomposition pyrolytique du combustible sec	> 150°C	Gaz combustible, bois absolument sec
Gazéification du combustible avec oxygène en gaz combustible (CO, hydrocarbure) et carbone solide	> 250°C	Gaz combustible, charbon de bois
Gazéification du carbone solide avec le dioxyde de carbone, la vapeur et l'oxygène en monoxyde de carbone	> 500°C	Gaz combustible, charbon de bois
Oxydation des gaz combustibles avec l'oxygène en dioxyde de carbone et eau	700°C – 1 400°C	Gaz libérés, cendres
Emission de chaleur par la flamme sur les parois environnantes, les échangeurs de chaleur et le combustible fraîchement apporté	< 1 400°C	Gaz libérés, cendres

La combustion contrôlée de la biomasse commence par une phase de chauffage. Dans la phase suivante qui se déroule à une température d'environ 100°C, l'eau adhérent ou contenue dans la biomasse est évaporée. Comme pour les autres étapes de combustion, le processus progresse de l'extérieur vers l'intérieur de la biomasse. Ainsi quand les particules combustibles à l'intérieur continuent de sécher, à l'extérieur la décomposition pyrolytique a déjà commencé. Par le terme de pyrolyse, on entend les procédés qui permettent de décomposer par la chaleur un composé organique en d'autres produits (gaz et matière) qu'il ne contenait pas, sous atmosphère pauvre en oxygène. Le résultat est la rupture des longues chaînes des composés organiques en chaînes plus courtes. Des combustibles gazeux sous forme de monoxyde de carbone et hydrocarbure gazeux ainsi que de l'huile de pyrolyse sont élaborés. Ce processus ne demande pas d'oxygène. Comme de l'oxygène est présent sous forme chimique stockée dans la biomasse (pour le bois, cela représente environ 44% de la masse sèche), ou fourni par l'air apporté, des réactions d'oxydation plus ou moins complètes surviennent lorsque la chaleur est libérée, immédiatement après les ruptures des chaînes organiques.

Afin de contrôler le processus de dégazage dans les systèmes de combustion, de l'oxygène atmosphérique ou air primaire, est introduit dans le système de combustion à l'emplacement de la décomposition pyrolytique (par exemple le lit de combustion). Ce sous-processus est décrit comme le dégazage. La chaleur requise par les réactions incomplètes des produits de pyrolyse est fournie par l'oxygène. Pour la réaction des solides et liquides (charbon, goudron), par rapport à la décomposition pyrolytique, des températures sensiblement plus élevées sont nécessaires, en partie supérieures à 500°C. Avec le sous-processus d'oxydation, les combustibles gazeux ont déjà partiellement diffusé dans la chambre de combustion. Grâce à l'apport ciblé d'oxygène atmosphérique (air secondaire) dans cette phase, une oxydation plus ou moins complète des produits gazeux libérés peut avoir lieu. Il en résulte la production de dioxyde de carbone (CO_2) et d'eau. La dégradation des hydrocarbures a lieu à travers la production de CO intermédiaire qui réagit avec le CO_2 par une oxydation progressive. Dans cette phase des rayonnements lumineux et thermiques sont émis et des flammes sont visibles. En plus de l'oxydation indiquée par la présence de flammes, se produit une combustion sans flamme tout aussi importante des combustibles solides qui a lieu dans la phase finale du processus de combustion. Le produit final de la décomposition pyrolytique est du carbone solide (charbon de bois) dans le lit de combustion, qui est d'abord produit sous forme de gaz (gazéification du charbon) et puis oxydé dans la phase gazeuse suivante. La cendre restante est le résidu de combustion (Hiegl *et al.* 2011).

Le développement de procédés de conversion thermique contrôlée nécessite l'étude de l'influence de la forme, la taille et la densité des particules sur la conversion de la biomasse. Dans une unité de pyrolyse rapide, la biomasse à traiter a généralement une large gamme de tailles et de formes, donc de surfaces et volumes, qui sont des caractéristiques ayant une influence directe sur les phénomènes de transfert de chaleur et de masse, ainsi que sur les taux d'oxydation et de volatilisation. En outre, la forme irrégulière des particules peut entraver le bon approvisionnement des réacteurs à gazéification, combustion ou pyrolyse.

Cardoso *et al.* (2013) ont étudié l'effet de la taille des particules de bagasse de sorgho sucré sur leurs propriétés physiques (densité, taille, rapport d'aspect et variation de la rondeur) en utilisant trois gammes de taille (125-355, 355-500 et 500-850 μm). Les résultats ont montré que les trois échantillons ont des proportions similaires, que les particules de différentes tailles ont des formes semblables, que le rapport entre les dimensions de particules ne change pas de manière significative avec la diminution de la taille, et que plus la taille d'une particule est élevée, plus elle est arrondie.

Les teneurs en oxydes alcalins, halogénures et quantité de cendres peuvent poser un problème quand la biomasse est destinée à la combustion, car ces éléments conduisent à la formation de scories et à l'encrassage des chaudières. Les solutions pour corriger la teneur alcaline d'une biomasse herbacée sont une neutralisation chimique, un mélange de biomasse d'alcalinité différente de façon à obtenir un mélange ayant une température de fusion des cendres acceptable ou une élimination par des méthodes de lavage. Laver la biomasse de sorgho (contenant 50% d'humidité) destinée à la combustion avec de l'eau du robinet, améliore sa qualité pour atteindre des niveaux permettant d'éviter les scories et l'encrassage des chaudières. Une réduction significative des teneurs en potassium et chlore ainsi que les faibles teneurs en soufre de la biomasse de sorgho permettent d'envisager cette méthode de lavage à l'échelle commerciale. Cependant l'addition d'eau à la biomasse au cours de ce prétraitement pose le problème de l'énergie nécessaire pour sécher ensuite cette biomasse avant combustion. Cependant, si elle est mélangée à faible dose à une biomasse déjà sèche, le séchage peut ne pas être nécessaire tant que l'humidité totale du mélange reste dans des limites acceptables pour la combustion. Des recherches complémentaires sont nécessaires pour mener une étude de faisabilité et déterminer la teneur optimale en eau de la biomasse permettant d'obtenir la meilleure qualité tout en minimisant les pertes de matières sèches. L'analyse des lixiviats après le lavage est également nécessaire pour déterminer son utilisation potentielle comme engrais pour une production durable de biomasse de sorgho dans un système fermé (Carillo *et al.*, 2014).

La combustion de la biomasse génère de l'énergie (électricité) et de la chaleur. Le moyen actuel le plus pratique pour utiliser la biomasse de sorgho sucré est de la brûler pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité. La bagasse de sorgho sucré, utilisée comme combustible a un pouvoir calorique de 16 MJ/kg de matière sèche. En fonction de son humidité, le pouvoir calorique réel de la bagasse fraîche de sorgho sucré varie de 6.7 MJ pour une bagasse à 47% de matière sèche, à 10.1 MJ pour une bagasse à 65% de matière sèche. L'utilisation de la bagasse comme combustible solide, permet de gagner 160 GJ/ha, équivalant à 4 400 l de carburant de chauffage (Grassi, 1992).

Gunnerman *et al.* (1986) ont montré que le choix de la variété de sorgho sucré est important afin de produire une biomasse qui brûle proprement et efficacement. La variété doit avoir une teneur en sucres extractibles d'au moins 5% en poids, une teneur en azote inférieure à 0,75% (poids sec), et produire au moins cinq tonnes (poids sec) de biomasse par hectare. La teneur faible en azote de la plante est particulièrement importante afin d'éviter une production excessive de protoxyde d'azote lors de la combustion du produit final. La bagasse peut être stockée d'une manière efficace et rentable en la transformant en granules.

Co-produits

Outre son utilisation à des fins énergétiques, le sorgho sucré est également apprécié pour la production de produits commerciaux tels que alcool (buvable et de qualité industrielle), sirops (naturels et riches en fructose), glucose (sous forme liquide et poudre), amidons modifiés, maltodextrines, jagré, sorbitol et acide citrique (produit en aval à partir d'amidon) (CFC-ICRISAT, 2004). Le sorgho malté peut être utilisé comme une bonne alternative dans les aliments de sevrage du bébé et pour la production de bière et de boissons non alcoolisées. En raison de sa teneur en fibres, le sorgho sucré peut également être utilisé pour la literie, le couvertures, les clôtures, mâcher (comme la canne à sucre), et il s'est avéré être adapté à l'industrie du papier selon Sundara et Marimuthu (2012).

Pour produire du gel combustible, l'éthanol dénaturé est mélangé avec un agent épaississant (cellulose) et de l'eau par un processus technique très simple. Le gelfuel est donc renouvelable et peut être produit localement dans la plupart des pays d'Afrique. Les combustibles liquides gélifiés et/ou solidifiées (kérosène et éthanol) ont été utilisés depuis la seconde guerre mondiale, quand ils servaient aux soldats de combustible pour cuisiner. Plusieurs variantes d'éthanol gélifié ont été produites en petites quantités dans différents pays pour des marchés de loisirs (camping, barbecue feu-éclairage, etc), et comme combustible pour cuisiner (Utria, 2004). L'avantage de gel de carburant est qu'il ne dégage pas de fumée ou de matériaux toxiques.

Durabilité du sorgho-énergie

Ce chapitre traite des impacts sociaux, économiques et environnementaux des filières du sorgho-énergie sélectionnées dans SWEETFUEL. De ce fait l'étude a ciblé la production à différentes échelles d'éthanol 1G en zones tropicales dans les pays en développement ainsi que sur la production de biogaz et d'éthanol 2G en zones tempérées dans les pays développés.

Généralités sur les chaînes de valeur du sorgho-énergie

Le sorgho-énergie est une culture énergétique prometteuse à la fois dans les pays développés et les pays en développement. Il est adapté à des cultures et des chaînes de production de petite et de grande taille. La chaîne de production du sorgho-énergie est comparable à d'autres filières de production de bioénergies/biomasse et comprend les étapes suivantes:

- Conduite de la culture

- Récolte

- Transport

- Usinage (seulement pour la production d'éthanol)

Transformation en carburant
 Usage direct pour le transport
 Usage final

Une vue d'ensemble schématique de la production de sorgho-énergie et des principales voies d'utilisation est représentée à la Figure 22. Le cycle de vie du sorgho-énergie comprend la culture, la transformation, l'utilisation ainsi que le traitement de fin de vie, le recyclage et l'élimination finale (approche du berceau à la tombe). Toutes les entrées et sorties du système sont prises en compte, y compris les différents sous-produits obtenus.

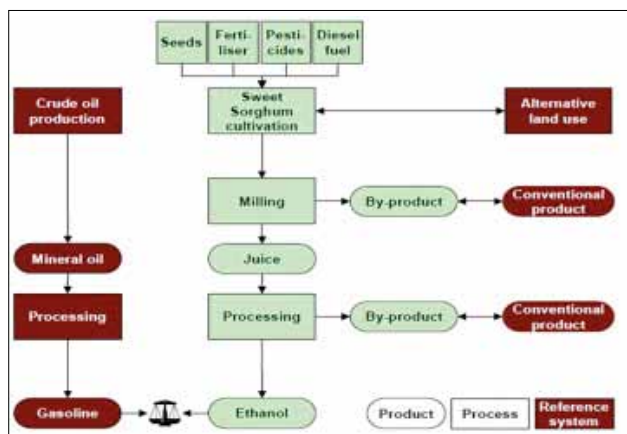


Figure 22 : Principe de base de la comparaison du cycle de vie entre l'éthanol de sorgho sucré et l'essence (Braconnier et Reinhardt, 2013)

La filière est caractérisée par son processus de conversion, ses produits principaux et ses co-produits. La technologie de conversion et les produits désirés influent sur l'échelle du système de production. De ce fait, une distinction entre les étapes de conversion doit être faite, car l'échelle n'est pas nécessairement la même pour différentes étapes de la chaîne de valeur. Toutefois, la frontière entre petite et grande échelle est floue. En général un système de petite taille implique de nombreux

agriculteurs qui approvisionnent une petite usine d'éthanol, exploitée par exemple par une coopérative agricole. Un système de grande taille est caractérisé par la participation de grands investisseurs et la culture de la biomasse à l'échelle agro-industrielle souvent réalisée par la société possédant l'usine. L'éthanol produit par un système de grande taille est généralement vendu sur les marchés internationaux. L'échelle des étapes de la chaîne de valeur et des systèmes de production est importante, car elle influence largement les impacts sociaux, économiques et environnementaux du système (Rutz et Janssen, 2012a). Elle peut avoir, selon le point de vue des acteurs des filières, des impacts positifs et négatifs.

Enfin, l'utilisation des technologies de conversion est influencée par les conditions climatiques dans lesquelles le sorgho est cultivé ainsi que par l'état de développement du pays. Dans les climats tropicaux où la productivité du sorgho sucré est très élevée, des systèmes de production d'éthanol 1G à petite ou grande échelle sont possibles. Dans les régions tempérées, la teneur en sucre est inférieure, mais la productivité en biomasse est élevée. L'orientation se fera donc vers une production de biogaz ou de biocarburant 2G lorsque la technologie sera opérationnelle. Compte tenu des lourds investissements qu'elle nécessite, il est très probable que cette technologie 2G sera majoritairement

déployée en zones tempérées. Les paramètres suivants caractérisant les systèmes agricoles et de conversion de la chaîne de l'éthanol de sorgho-énergie ont un impact important sur la durabilité (Rutz et Janssen, 2012b):

Echelle du système: petit, moyen, grande

Acteurs du système de culture: agriculteurs, agro-industriels

Acteurs du système de production: villageois, usine centralisée

Relation de travail entre les acteurs: modèle de contractualisation avec les agriculteurs, coopératives, personnel sous contrat

Economie du pays: pays émergents, pays en développement

Systèmes de production en zones tropicales

La durabilité de la culture et de la conversion de sorgho sucré en climat sub-tropical et tropical dépend de plusieurs facteurs. A partir du moment où de nombreuses zones potentielles de culture sont situées dans des pays émergents ou en développement, les impacts socio-économiques sont très importants. Bien entendu, "régions tropicales" n'est pas synonyme de "pays en développement", mais ces régions climatiques sont particulièrement sujettes au changement climatique qui peut affecter les plus pauvres, à savoir les petits agriculteurs de subsistance des pays en développement.

Parmi les chaînes de valeur du sorgho sucré pour la production d'énergie dans les pays tropicaux et sub-tropicaux, l'accent est mis sur la production d'éthanol 1G. La liste suivante présente des scénarios de production d'éthanol 1G:

Système centralisé de production d'éthanol : production à petite et grande échelle de biomasse pour alimenter une grande usine à éthanol. La culture et la récolte du sorgho sucré sont réalisées au niveau du village. Après récolte, les cannes sont transportées du village aux installations centralisées de production d'éthanol.

Système décentralisé de production de sirop : production de la biomasse et transformation en sirop pour alimenter une grosse usine à éthanol. En plus de la culture et la récolte du sorgho sucré, la transformation en sirop est également faite au niveau du village. Le sirop est ensuite transporté vers les usines centralisées de production d'éthanol. Ce système présente un avantage si les infrastructures routières pour transporter la biomasse directement vers les usines n'existent pas ou sont insuffisantes, et il permet de créer une valeur ajoutée au niveau villageois. Une vue schématique de ce système est présenté Figure 23 .

Système décentralisé de production d'éthanol (production de biomasse, sirop et éthanol à petite échelle). Dans ce système, toute la chaîne de production est réalisée au niveau du village, à savoir la culture et la récolte de sorgho sucré, le broyage des tiges pour extraire le jus et la transformation du jus en éthanol. Ce système permet de créer la valeur ajoutée maximale au bénéfice du village.

Systèmes de production en zones tempérées

Les systèmes de production en régions tempérées sont différents de ceux en zones tropicales car la teneur en sucre des tiges est plus faible et généralement insuffisante pour

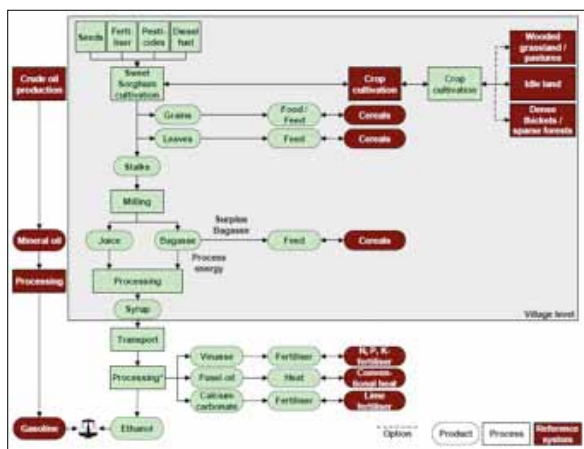


Figure 23 : Système décentralisé de production de sirop (Braconnier et Reinhardt, 2013)

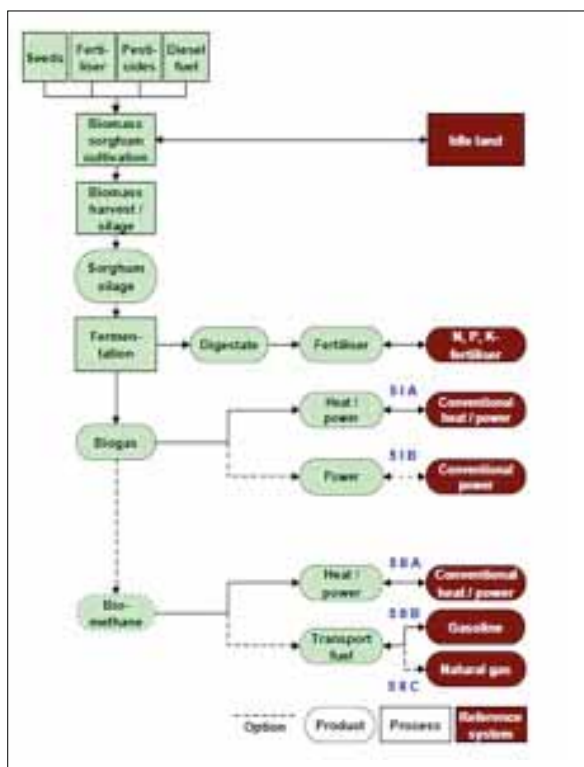


Figure 24 : Système de production de biogaz (Braconnier et Reinhardt, 2013)

extraire les sucres et produire de l'éthanol 1G. Cependant le sorgho biomasse représente un bon substrat pour produire du biogaz car ses teneurs en sucres élevées comparées aux autres cultures, lui confèrent une bonne digestibilité (Rutz *et al.* 2013).

Le sorgho biomasse est écrasé après la récolte pour produire du biogaz. Ce dernier est utilisé pour produire de la chaleur ou de l'électricité ou comme carburant en remplacement de l'essence classique ou du gaz naturel. Dans tous les procédés, le digestat est un sous-produit qui peut être utilisé comme engrais de substitution aux engrais minéraux. Une vue d'ensemble schématique du système de production de biogaz est présentée à la figure 24. Une option pour l'avenir serait d'utiliser le sorgho biomasse pour produire des biocarburants 2G, par conversion biologique ou thermochimique. Cependant, ces procédés de sont pas encore développés au niveau industriel. Il est par conséquent difficile de discuter de leurs impacts, d'autant plus que le coût de production est difficile à prévoir. Une vue d'ensemble schématique du système de production d'éthanol ligno-cellulosique est présentée à la figure 25.

Impacts économiques

Les trois des critères les plus importants pour la viabilité économique sont la rentabilité (le prix du biocarburant doit dépasser



Figure 25 : Production d'éthanol 2G à partir de la biomasse ligno-cellulosique de sorgho sous climat tempéré (Braconnier et Reinhardt, 2013)

les coûts de production), l'équité (distribution équitable des bénéfices ou de la valeur ajoutée entre les acteurs de la filière ou entre les générations) et l'efficacité (le maximum de rendement est obtenu avec une quantité donnée de ressources). L'impératif de durabilité exige que nous considérons clairement ces critères à la fois sur le court et le long terme. En terme de durabilité, le premier objectif est donc d'assurer la viabilité économique à long terme du système de production.

Rentabilité économique et équité

Le premier critère de viabilité à long terme d'un système de production qui utilise des ressources pour fournir une production commercialisable, c'est qu'il assure une rentabilité économique: les producteurs ne seront disposés à poursuivre la production de biocarburants que s'il est économiquement rentable. Les principaux

facteurs qui peuvent affecter cette rentabilité concernent la compétition avec les autres usages de la biomasse et les prix de l'énergie. Les autres usages de la biomasse jouent un rôle déterminant dans la prise de décision des producteurs. Si le prix des biocarburants est inférieur à celui des autres produits finis potentiels (aliments, fourrage, bois, etc), il sera plus rentable de produire ces produits plutôt que de transformer la biomasse en éthanol. En conséquence, leurs prix déterminent le prix plancher des biocarburants. Par ailleurs pour être rentables et compétitifs avec les combustibles fossiles, les biocarburants doivent avoir des coûts de production inférieurs à celui de l'équivalent en pétrole. Par conséquent, le prix du pétrole fixe un plafond pour le prix des biocarburants. Si les coûts dépassent cette valeur, les biocarburants seront éliminés automatiquement du marché (Schmidhuber, 2007). Les coûts de production de biocarburants estimés montrent des différences significatives en fonction de facteurs tels que la taille de l'usine, la complexité de la technologie, les sources d'énergie et des coûts de production de la biomasse (Elbehri *et al.*, 2013).

Actuellement, au Brésil le bioéthanol est considéré comme économiquement compétitif par rapport au pétrole, ce qui n'est pas le cas dans les autres pays du monde.

Les effets de la filière de production sur la rentabilité du sorgho énergie dans les régions tempérées et tropicales sont présentés aux tableau 7et tableau 8.

Tableau 7: Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré, sur les bénéfices en zone tropicale (Rutz et al., 2013)

Culture et transformation à grande échelle	A partir du moment où les petits agriculteurs ne sont pas impliqués, il n'y a pas génération de revenus pour les agriculteurs locaux, sauf si un contrat est établi pour produire la biomasse. Les revenus des opérateurs dans les usines sont généralement augmentés. En raison de la plus grande efficacité et des économies d'échelle, la qualité des produits est meilleure et le coût de production plus faible.
Culture à petite échelle et transformation à grande échelle	Selon les contrats, les petits agriculteurs peuvent avoir la garantie que l'usine qui transforme les tiges leur achètera leur production, générant ainsi un revenu stable. Toutefois, la vente dépend de l'usine centralisée qui achète les tiges. Si n'y a que quelques usines de ce genre, les agriculteurs n'ont pas d'influence sur le prix d'achat des tiges et sont donc vulnérables.
Culture et transformation à petite échelle	Une chaîne de valeur de production d'éthanol plus longue à petite échelle génère localement plus de revenus comparée à la vente seule des tiges ou du sirop. Les petits agriculteurs peuvent décider seuls s'ils vendent l'éthanol sur les marchés extérieurs ou s'ils l'utilisent pour leur consommation personnelle, par exemple comme combustible pour la cuisson. Ils ont alors accès à une énergie moderne renouvelable.

Tableau 8 : Effets du type de filière (production d'éthanol 2G ou biogaz) sur les bénéfices en zones tempérées (Rutz et al., 2013)

Production de biogaz	Les unités produisant du biogaz sont plus petites que celles prévues pour l'éthanol 2G. Ainsi plus d'agriculteurs voient leurs revenus augmenter, surtout que généralement le producteur de la biomasse est également le transformateur. Cependant, les revenus dépendent des politiques publiques de soutien de la filière. L'utilisation du sorgho à la place d'autres cultures n'a pas de réel impact sur les bénéfices.
Biocarburants 2G	Les bénéfices sont assez incertains car aujourd'hui, il n'a pas d'usine d'éthanol 2G opérant réellement à un niveau commercial. L'utilisation de la biomasse de sorgho à la place d'une autre culture n'a pas de réel impact sur les bénéfices.

Efficacité de l'ensemble du processus

L'efficacité de la chaîne de production dépend en particulier de l'échelle à laquelle se fait la production, ainsi que des conditions climatiques et des pratiques agricoles et industrielles. L'efficacité globale est comparable à celle de l'éthanol produit à partir de la canne ou la betterave à sucre, mais elle peut être inférieure (Vecchiet, 2010).

Les effets de la nature et la taille des filières du sorgho-énergie dans les régions tempérées et tropicales, sur l'efficacité du système sont présentés au tableau 9 et tableau 10.

Investissements nécessaires au démarrage et au fonctionnement du système

Le sorgho sucré peut être cultivé moyennant des ressources financières faibles. Les agriculteurs ont besoin de terres agricoles et de semences. La plante peut être facilement reproduite par graines. Cependant, une bonne productivité et efficacité de la culture demandent de la main d'oeuvre, de l'énergie, des engrais et des pesticides, et nécessite donc des ressources financières.

Tableau 9 : Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G sur l'efficacité en zones tropicales (Rutz et al., 2013)

Culture et transformation à grande échelle	<p>Culture et transformation à grande échelle augmentent globalement l'efficacité de la chaîne par des effets d'échelle et du fait d'investissements plus importants. De plus, les agriculteurs ont accès aux variétés améliorées, aux intrants et aux dernières technologies, et la récolte est faite avec des machines performantes.</p> <p>Les procédés de transformation sont généralement très efficaces, particulièrement dans le cas d'usines modernes.</p>
Culture à petite échelle et transformation à grande échelle	<p>Les petits agriculteurs peuvent bénéficier, via la grande usine à éthanol, de technologies récentes comme des semences de qualité, des pesticides, des engrais... Cela augmente l'efficacité globale de la production agricole. Comme la transformation est à grande échelle, l'efficacité est élevée.</p> <p>Cependant, les petits agriculteurs peuvent être vulnérables du fait de leur dépendance pour les semences fournies par l'industriel.</p> <p>L'usine de grande capacité peut également offrir une formation aux agriculteurs.</p>
Culture et transformation à petite échelle	<p>Les petits agriculteurs ne sont souvent pas formés aux meilleures pratiques agricoles pour augmenter les rendements. Par exemple l'absence de formation à l'utilisation des pesticides peut avoir un impact négatif sur la santé humaine, sur l'environnement et peut entraîner une perte d'efficacité. De plus, les petits agriculteurs peuvent avoir un accès limité aux semences améliorées. Quand il y ont accès, ils peuvent aussi être vulnérables et dépendre de ces variétés améliorées (dans le cas d'hybrides ou de variétés OGM).</p> <p>La culture du sorgho sucré et sa transformation à petite échelle sont généralement moins efficaces que les opérations à grande échelle.</p>

Tableau 10 : Effets de la nature du système (production de biogaz ou d'éthanol 2G) sur l'efficacité en régions tempérées (Rutz et al., 2013)(© Braconnier)

Production de biogaz	<p>L'efficacité d'utilisation des terres pour produire du biogaz (biométhane) à partir de biomasse de sorgho est supérieure à celle des autres biocarburants 1G (comme le biodiésel à partir du colza voire l'éthanol de canne à sucre), particulièrement dans le secteur du transport.</p> <p>Si le biogaz est utilisé dans une unité de cogénération pour produire de l'électricité, la chaleur perdue devrait être également valorisée. Ce dernier point est actuellement un problème dans de nombreuses unités en Europe.</p>
Biocarburants 2G	<p>Les données réelles sur l'efficacité des biocarburants 2G sont difficilement disponibles, surtout dans le cas du sorgho.</p>

Même si la production de biomasse peut se faire à un faible coût, des ressources financières considérables sont nécessaires pour les étapes ultérieures comme le transport, le broyage et la conversion en éthanol. En général, on peut dire que plus le système est gros, plus les investissements nécessaires sont élevés. Dans les pays en développement, la disponibilité en ressources financières est souvent un facteur limitant. Le Tableau 11 montre les effets de la taille des systèmes de production en zones tropicales.

Impacts sociaux

La dimension sociale de la durabilité des biocarburants est liée au développement rural, à la réduction de la pauvreté et à la croissance qu'elle apporte. La dimension sociale (ou socio-institutionnelle) de la durabilité des biocarburants peut concerner de nombreux problèmes interdépendants. Cela soulève un certain nombre de difficultés méthodologiques,

Tableau 11 : Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré sur les investissements en zones tropicales (Rutz et al., 2013)

Culture et transformation à grande échelle	Les grandes installations demandent de gros investissements. Mais le nombre d'investisseurs dans les pays en développement qui sont intéressés par la production d'éthanol est limité. Si des investisseurs étrangers veulent investir dans des systèmes de production d'éthanol à grande échelle, ils seront susceptibles d'être accusés de s'accaparer les terres.
Culture à petite échelle et transformation à grande échelle	Il existe des modèles où l'industriel qui convertit l'éthanol procure les ressources aux petits agriculteurs pour produire efficacement la biomasse. Mais ces arrangements peuvent ne pas être équitables car les parties n'ont pas souvent la même vision ni les mêmes informations.
Culture et transformation à petite échelle	L'accès aux intrants agricoles (engrais, pesticides) est coûteux et limité pour les petits agriculteurs. Les équipements nécessaires à la production d'éthanol (presses, distilleries) sont souvent trop chers pour les petits producteurs. Les machines à récolter de sorgho sucré sont trop chères.

y compris la nécessité de distinguer les questions sociales directes et indirectes. Dans ce paragraphe, nous nous concentrons sur les aspects suivants de la durabilité sociale: les droits de propriété foncière, la création d'emplois, la santé et les conditions de travail, la contribution au développement rural et aux revenus nationaux, ainsi que l'acceptation par le public et l'acceptation des parties prenantes concernées. Toutes ces questions ont plus ou moins un objectif commun: la nécessité d'intégrer les petits agriculteurs dans le développement des biocarburants et d'assurer un partage des avantages, la sauvegarde des droits fondamentaux et des moyens locaux de subsistance suite à l'introduction des biocarburants.

Sécurité alimentaire et énergétique

Comparée aux cultures actuelles produisant du bioéthanol à partir du sucre ou de l'ami-don, le sorgho sucré offre des avantages importants en matière de sécurité alimentaire, car c'est une plante multi-usages produisant à la fois nourriture, fourrage et énergie. Ses graines sont des céréales de bonne qualité et ses feuilles ont une bonne valeur fourragère, contribuant ainsi de façon significative à développer la production et améliorer la sécurité alimentaire dans les zones rurales des pays en développement sujettes à l'insécurité alimentaire. En plus des graines utilisées pour l'alimentation humaine ou animale, le sorgho sucré accumule des sucres, avec une compétition faible entre les deux. La bagasse peut également être utilisée pour nourrir le bétail; des travaux ont d'ailleurs montré que sa valeur nutritionnelle était supérieure à celle de la canne à sucre (Almodares et Hadi, 2009).

Utiliser des cultures vivrières traditionnelles pour produire du bio-éthanol peut conduire à une hausse du prix des matières premières agricoles, qui va négativement impacter l'accès à la nourriture en particulier dans les pays en développement importateurs nets de denrées alimentaires pour les populations les plus pauvres. Des hausses significatives ont déjà été observées sur les principaux marchés des matières premières utilisées pour la production d'éthanol comme le maïs et le sucre. Selon l'Organisation des Nations Unies, la sécurité alimentaire dépend de quatre facteurs principaux: la disponibilité de la production, son accès, sa stabilité et son utilisation (FAO, 2007). Ainsi, la disponibilité de la nourriture peut être menacée par la production de bioéthanol du fait de la compétition entre les deux pour les terres, l'eau et les autres ressources. Cette compétition pour les

ressources concerne les cultures sucrières et celles à amidon utilisées actuellement; elle devrait être réduite dans le cas des technologies de deuxième génération utilisant une biomasse ligno-cellulosique. L'accès à la nourriture (la capacité des ménages à acheter de la nourriture) est affecté si les prix alimentaires augmentent plus rapidement que les revenus réels, conduisant ainsi à l'insécurité alimentaire.

Enfin, le sorgho sucré peut être associé à des systèmes cultureux existants (comme dans le cas de la canne à sucre), et augmenter sa productivité (énergie, nourriture et fourrage). Cela conduit ainsi à une redynamisation de la production agricole qui souffre actuellement d'un manque d'investissement et d'une productivité faible, particulièrement dans les zones rurales des pays en développement (Janssen *et al.*, 2009).

Les effets des systèmes de production d'éthanol 1G à parti du sorgho sucré sur la sécurité alimentaire et énergétique en régions tropicales sont présentés au tableau 12.

Tableau 12 : Effets des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré sur la sécurité énergétique et alimentaire en zones tropicales (Rutz *et al.*, 2013)

Culture et transformation à grande échelle	Les systèmes à grande échelle peuvent contribuer au développement régional qui va toucher les plus pauvres de la région et pourrait ainsi améliorer l'accès à la nourriture. D'un autre côté, si la population locale ne bénéficie pas du système de production à grande échelle, il y a la risque que l'accès à la nourriture de même que sa disponibilité soient réduits dans la région.
Culture à petite échelle et transformation à grande échelle	Généralement, les agriculteurs aussi pourraient bénéficier de l'augmentation des prix alimentaires car leurs revenus tirés à partir de la culture du sorgho sucré seraient plus élevés. Mais ceci s'applique uniquement dans le cas où l'usine à éthanol répercute les augmentations sur le prix d'achat de la biomasse aux agriculteurs.
Culture et transformation à petite échelle	La culture du sorgho sucré peut améliorer le revenu des paysans, et ainsi augmenter l'accès aux denrées alimentaires. Les paysans pourraient aussi bénéficier de l'augmentation des prix alimentaires, car leurs revenus tirés de la culture du sorgho sucré sont supérieurs. Le sorgho sucré enrichit la diversité des produits agricoles des petits agriculteurs et réduit ainsi les risques liés à une production basée sur un nombre limité de cultures. Le sorgho sucré peut être utilisé comme une plante à usages multiples pour sa propre consommation, ce qui n'est pas le cas pour d'autres plantes qui sont toxiques comme le Jatropha.

Droits des propriétaires terriens

Le changement climatique et l'expansion de la production de biocarburants sont susceptibles de conduire à une plus grande concurrence pour l'accès à la terre. Cette concurrence accrue constitue une menace pour les moyens de subsistance de millions d'agriculteurs, des éleveurs et les habitants des forêts vivant dans des zones sans droits formels de propriété foncière. Les politiques foncières et leur planification sont essentielles. Étant donné que la terre est une ressource limitée, l'utilisation appropriée des terres dépend de la valeur qu'elle peut fournir à ceux qui détiennent des droits sur elle. Cette valeur peut être mesurée de plusieurs façons comme la création de richesses, leur conservation ou basée sur d'autres services écosystémiques. Les biocarburants sont censés offrir des débouchés commerciaux pour augmenter les revenus de la terre aux particuliers, aux

groupes et aux gouvernements. L'accès à la terre (son utilisation ou sa propriété) dépend des décisions de ceux qui détiennent des droits de propriété. Ces derniers peuvent porter sur la propriété ou l'usage (par exemple le pâturage, l'accès à l'eau) et peuvent être basés sur la législation nationale, le droit coutumier ou une combinaison des deux. En réalité les droits fonciers et les processus pour obtenir l'accès à la terre sont souvent peu clairs. De nombreux gouvernements ont espéré que le développement des cultures énergétiques pourrait ouvrir la possibilité d'utiliser des terres improductives. Toutefois, même l'acquisition de terres non cultivées peut poser des problèmes si les communautés rurales qui ont des revendications historiques sur ces terres pour la collecte de bois de feu ou pour le pâturage, sont incapables de protéger leurs revendications fondées sur des lois locales et des systèmes informels. En conséquence, il existe un risque que l'expansion des cultures énergétiques puisse conduire à l'éviction des groupes vulnérables ou des propriétaires n'ayant pas de documents officiels antérieurs. Cela est d'autant plus probable dans le cas des décrets gouvernementaux ou lorsque le prix (location ou vente) augmente et conduit généralement à l'éviction des pauvres du marché. Il y a aussi l'effet négatif potentiel de la spéculation foncière, par la simple acquisition de terres pour produire des biocarburants. Une telle spéculation, si elle n'est pas contrôlée et régulée, peut créer des difficultés pour les petits agriculteurs et l'agriculture en général. Ces effets indirects peuvent se produire sur le plan local, national ou même mondial (Elbehri *et al.*, 2013).

Créations d'emplois, santé et conditions de travail

En général, la production de biocarburants génère plus d'emplois que la production de combustibles fossiles, car la transformation a lieu à plus petite échelle et implique de nombreux intervenants. Cela s'applique également à l'utilisation du sorgho sucré pour la production de bioénergie. L'exemple d'une usine d'éthanol à partir de sorgho sucré en Ouganda montre qu'environ 250 emplois devaient être créés dans le district de Kayunga pour l'exploitation d'une usine d'éthanol produisant 20 millions de litres d'éthanol par an (Muzaale, 2011; Forum sur l'investissement en Ouganda, 2013). Cependant, il faut reconnaître que ces chiffres sont des valeurs estimées; les données réelles ne sont pas disponibles. En plus des travailleurs impliqués dans les installations de transformation, 6000 agriculteurs ont reçu des semences pour planter du sorgho sucré (Muzaale, 2011).

Outre la possibilité de création d'emplois, les problèmes de santé et les conditions de travail doivent être prises en compte, en particulier dans les pays en développement. Cela s'applique à toute entreprise, indépendamment du secteur des biocarburants ou d'autres secteurs. De façon générale, il est admis que la culture et la transformation du sorgho sucré n'ont pas plus d'impacts négatifs sur la santé et les conditions de travail que dans le cas d'autres cultures. Les effets de la chaîne de valeur du sorgho sucré sur la création d'emplois, la santé et les conditions de travail en zone tempérées et tropicales sont reportés aux tableau 13 et tableau 14.

Approbation du public et des acteurs impliqués

L'acceptation du public est une condition préalable indispensable pour le développement des biocarburants. La perception du public dépend en grande partie des aspects culturels, de l'histoire et l'économie des pays producteurs, des objectifs des pays importateurs, des objectifs environnementaux et sociaux, ainsi que des impacts positifs ou négatifs sur les

Tableau 13 : Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sur la création d'emplois, la santé et les conditions de travail en zones tropicales (Rutz et al., 2013)

Culture et transformation à grande échelle	Dans les systèmes centralisés (avec des technologies de récolte mécanique) moins de travailleurs peuvent être nécessaires, il y a donc moins de possibilités de création d'emplois. La récolte mécanique évite un travail dur et dangereux. Les grandes entreprises doivent se conformer à des règles plus strictes en matière de santé et sur les conditions de travail, mais elles ne sont toutefois pas souvent mises en œuvre, en particulier dans les pays en développement.
Culture à petite échelle et transformation à grande échelle	La culture demande plus de travailleurs que dans le système à grande échelle. Dans l'étape de conversion on estime que plus de travailleurs sont nécessaires pour faire face à l'administration de nombreux petits exploitants.
Culture et transformation à petite échelle	En raison d'un faible niveau de mécanisation des procédés de transformation, la production d'un litre d'éthanol demande plus de personnel que dans un système centralisé. La production d'éthanol à petite échelle crée non seulement des emplois directs dans la chaîne de valeur, mais aussi des emplois indirects à travers des micro-entreprises liées. Les petits agriculteurs peuvent influencer leurs conditions de travail.

Tableau 14 : Effets de la production de biogaz et d'éthanol 2G à partir de sorgho sur la création d'emplois, la santé et les conditions de travail en régions tempérées (Rutz et al., 2013)

Production de biogaz	La culture de la biomasse sorgho pour la production de biogaz n'a pas en soi des répercussions sur la création d'emplois par rapport à d'autres cultures. Toutefois, en raison de la petite taille des systèmes de production de biogaz, par rapport aux systèmes de production de biocarburants 2G, la production de biogaz génère généralement plus de possibilités d'emplois. Les règlements sur la sécurité, la santé et les conditions de travail sont généralement mis en œuvre dans les pays les plus développés.
Biocarburants 2G	Comme l'ensemble de la chaîne de production s'effectue à très grande échelle, le nombre d'emplois générés est faible. Les règlements sur la sécurité, la santé et les conditions de travail sont généralement mis en œuvre dans les pays les plus développés.

individus et les communautés. L'utilisation du sorgho-énergie est pour le moment discuté dans le débat public, et son utilisation pour produire de la bioénergie est actuellement encore faible. Par ailleurs, outre l'acceptation par le public, l'acceptation de la culture par les acteurs du marché des biocarburants est également nécessaire. L'utilisation du sorgho pour produire de l'énergie est encore récente et peu développée comparée au soja, maïs et canne à sucre. Ainsi, certains agriculteurs qui n'ont jusqu'ici aucune expérience avec le sorgho-énergie peuvent hésiter à le cultiver.

Les impacts de la nature de la chaîne de valeur du sorgho sucré sur l'acceptation par le public et les parties prenantes sont reportés aux tableau 15 et tableau 16.

Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux les plus importants à prendre en considération pour la production de bioéthanol à partir du sorgho énergie sont le bilan énergétique, les émissions de GES et d'autres polluants, l'utilisation directe et indirecte des terres, la biodiversité, l'utilisation de l'eau pour l'agriculture (bioénergie), ainsi que son empreinte sur l'eau et la préservation de la capacité de production des sols.

Tableau 15 : Acceptation par le public et les parties prenantes des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré, en zones tropicales (Rutz et al., 2013)

Culture et transformation à grande échelle	<p>Au niveau local, l'acceptation par le public des systèmes de production à grande échelle dépend en grande partie des avantages dont bénéficie la population locale. Si le projet est accompagné par des investissements durables dans les infrastructures, l'acceptation est plus élevée.</p> <p>Au niveau international, l'éthanol à partir du sorgho sucré n'a pas encore été largement évoqué dans les médias, en raison de la faible utilisation actuelle de cette culture pour produire de l'éthanol 1G.</p>
Culture à petite échelle et transformation à grande échelle	<p>L'acceptation par le public dépend principalement des conditions offertes par les grandes usines d'éthanol aux agriculteurs.</p> <p>La récolte manuelle du sorgho peut provoquer des démangeaisons. Par conséquent, les agriculteurs hésitent souvent à cultiver le sorgho sucré.</p>
Culture et transformation à petite échelle	<p>L'acceptation par le public des petits systèmes est généralement élevée, aussi longtemps que le système est opérationnel et aussi longtemps que toutes les parties concernées en tirent un bénéfice.</p> <p>La culture du sorgho sucré pour la production d'éthanol est relativement nouvelle pour de nombreux agriculteurs; des campagnes de sensibilisation et de formation sont donc nécessaires.</p> <p>La récolte manuelle du sorgho provoque des démangeaisons. Par conséquent, les agriculteurs hésitent souvent à cultiver le sorgho sucré.</p>

Tableau 16 : Acceptation par le public et les parties prenantes des systèmes de production de biogaz et d'éthanol 2G à partir du sorgho biomasse en zones tempérées (Rutz et al., 2013)

Production de biogaz	<p>L'extension de la culture du maïs pour la production de biogaz (par exemple en Allemagne) a conduit à des protestations publiques dans les zones à forte présence du maïs. Comme la biomasse sorgho ressemble au maïs, l'acceptation publique du sorgho dans ces domaines peut être réduite, en raison de la perception négative sur le maïs.</p> <p>L'acceptation de la biomasse sorgho comme culture énergétique par les agriculteurs dépend de leurs expériences avec la culture. Dans les régions tempérées, le sorgho est une culture relativement nouvelle pour la production de biogaz</p>
Biocarburants 2G	<p>Si la deuxième génération arrive au stade commercial, on peut se demander pourquoi utiliser la biomasse de sorgho, une culture annuelle, pour la production de biocarburants 2G au lieu des plantes ligneuses et des résidus.</p> <p>L'utilisation de la bagasse de sorgho biomasse serait bonne, mais sera difficilement disponible dans les régions tempérées dans un proche avenir.</p> <p>Il n'est pas clair si la biomasse sorgho sera acceptée par les exploitants d'unités de production de carburant 2G, car il y a peu de données. Pour les usines d'éthanol 2G il est particulièrement difficile de passer d'une biomasse à une autre car les conditions de fermentation biologiques doivent être modifiées.</p>

Bilan énergétique

La contribution de tout biocarburant à l'approvisionnement en énergie dépend à la fois de la teneur énergétique du biocarburant et de l'énergie fossile utilisée pour sa production. Cela prend en compte l'énergie nécessaire pour la culture (engrais, pesticides, irrigation, travail du sol), la récolte, le transport et la transformation de la biomasse, ainsi que le biocarburant restant après les différentes étapes de transformation et distribution. Le bilan énergétique fossile, défini comme le rapport entre l'énergie renouvelable produite et

l'énergie fossile nécessaire à sa production, est un facteur crucial pour juger de l'opportunité de produire du biocarburant à partir de la biomasse. Ce rapport indique dans quelle mesure un biocarburant peut remplacer les carburants fossiles. Un bilan égal à 1 indique que l'énergie nécessaire pour produire le biocarburant est égale à l'énergie qu'il contient (Armstrong *et al.*, 2002). Un bilan énergétique égal à 2 signifie qu'un litre de biocarburant contient deux fois la quantité d'énergie nécessaire à sa production (Elbehri *et al.*, 2013).

L'estimation des bilans énergétiques fossiles du sorgho-énergie et des carburants varie considérablement en fonction des scénarios et des conditions locales. En général, les résultats dépendent de facteurs tels que la productivité de la matière première, le lieu de production, les pratiques agricoles, l'utilisation des sols, l'utilisation de sous-produits (par exemple, la bagasse), le type et l'efficacité des technologies de conversion ainsi que les types de vecteurs énergétiques fossiles qui sont remplacés (Elbehri *et al.*, 2013).

Diverses études ont porté sur le bilan énergétique de la production d'éthanol à partir du sorgho sucré, selon différents scénarios et différentes conditions. Worley *et al.* (1992) ont indiqué que d'un point de vue énergétique il était rentable de produire du bioéthanol à partir du sorgho sucré. Un bilan énergétique moyen de 2,83 pour le sorgho sucré a été rapporté sur sept sites durant sept années dans le Nebraska (USA) par Reed *et al.* (1986). Le bilan énergétique calculé par Wortmann *et al.* (2008) a été de 3,63 comparé au sorgho grain (1,50) et au maïs (1,53).

Rao Dayakar *et al.* (2004) ont également mentionné un bilan énergétique élevé pour le sorgho sucré. Même si la production d'éthanol par unité de biomasse est moindre que dans le cas de la canne à sucre, les coûts de culture et les besoins en eau beaucoup plus faibles font plus que compenser cela et confèrent au sorgho sucré un coût de production avantageux et concurrentiel en Inde.

Les études mentionnées précédemment montrent que sous des conditions différentes, la production de bioéthanol à partir de sorgho sucré a un bilan énergétique net positif, et peut donc contribuer de manière significative à la conservation des ressources fossiles et à la diminution de l'impact des gaz à effet de serre. Si la plante entière est utilisée pour la production d'éthanol (grains et sucre) et d'électricité verte (à partir de surplus de bagasse), 3500 litres d'équivalent pétrole brut peuvent être produits par hectare de culture. Si les grains sont maintenus dans la filière alimentaire et l'éthanol produit à partir du jus, 2 300 litres équivalents de pétrole brut peuvent être produits par hectare. Même si les graines sont utilisées dans l'alimentation, la production de bioéthanol à partir de jus de la tige a encore des avantages significatifs par rapport aux combustibles fossiles. Si le sucre et les graines sont tous deux utilisés dans l'alimentation, on peut espérer que les coûts énergétiques de leur transformation respective pourraient être compensés par la production d'éthanol de deuxième génération à partir de la bagasse (Rao *et al.*, 009).

Emission de gaz à effet de serre et d'autres polluants de l'air

La lutte contre le réchauffement climatique et la possibilité de réduire les émissions de GES sont les principaux moteurs du développement des biocarburants. Les impacts négatifs des émissions de GES sont connus depuis longtemps. Ces GES incluent CO₂, le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et les hydrocarbures halogénés. Ces gaz

sont libérés au cours de l'ensemble du cycle de vie du biocarburant, et dépendent des pratiques agricoles (y compris l'utilisation d'engrais, de pesticides, récolte, etc...), du processus de transformation, de la distribution, de la consommation finale et de l'utilisation des sous-produits. La lutte contre le changement climatique et la nécessité de réduire les émissions de GES sont devenus de plus en plus importants pour poursuivre les politiques de soutien des biocarburants. L'industrie des biocarburants doit donc de plus en plus prouver que l'effet net des biocarburants durant l'ensemble de leur cycle de vie, du champ au réservoir, correspond bien à une baisse des émissions de GES. Bien que les plantes absorbent du CO₂ atmosphérique pendant leur croissance, qui peut compenser le CO₂ émis lors de la combustion du biocarburant, du CO₂ est également émis lors des différentes étapes de production.

Le bioéthanol 1G et 2G produit à partir du sorgho contribue de manière significative à la diminution des émissions de GES: entre 1,4 et 22 kg d'équivalents de dioxyde de carbone peuvent être sauvegardés en fonction du rendement de la culture, de la méthode de production, du type et de l'efficacité de la technologie de transformation, de l'utilisation de sous-produits tels que la bagasse, de la couverture du sol avant la culture du sorgho, et des changements d'utilisation des terres (Elbehri *et al.*, 2013).

La nitrification et la dénitrification sont les principales sources de production et d'émission de protoxyde d'azote (N₂O) par l'agriculture. Ce gaz contribue de façon significative au réchauffement climatique. Bloquer ou ralentir la fonction de bactéries nitrifiantes (exemple: réduire les taux de nitrification), permet de réduire considérablement les pertes d'azote liés à la nitrification et prolonger la persistance de l'azote dans le sol sous forme d'ammonium disponible pour les plantes. Cela peut conduire à une meilleure récupération de l'azote et augmenter son efficacité d'utilisation dans les systèmes de culture. Récemment, il a été montré que certaines espèces de plantes ont la capacité de libérer des inhibiteurs de nitrification à partir de leurs racines, phénomène appelé «inhibition biologique de la nitrification» (IBN) (Subbarao *et al.*, 2006; 2009b). Les études préliminaires au champ ont montré que des espèces de sorgho sauvages comme *S. arundinaceum* pouvaient représenter une bonne source génétique pour un IBN élevé. La fonction IBN pourrait devenir un trait essentiel ciblé pour l'amélioration génétique, dans le cadre d'une stratégie intégrée pour développer des variétés à capacité IBN suffisante pour supprimer la nitrification du sol et augmenter l'utilisation de l'azote sous sa forme NH₄⁺ (Subbarao *et al.*, 2009a). Des études préliminaires indiquent que les sorghos sucrés ont une capacité IBN similaire à celle des sorghos grain, ce qui indique que la fonction IBN peut faire l'objet d'améliorations/manipulations génétiques pour réduire les émissions de N₂O et améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote chez les sorghos sucrés (Rao *et al.*, 2009).

Changement dans l'utilisation des terres

L'utilisation des terres correspond à l'utilisation par l'homme, incluant la gestion et la modification de l'environnement naturel ou sauvage en environnement maîtrisés comme les champs, les pâturages et les aménagements ruraux (Watson *et al.*, 2000). Le changement d'utilisation des terres correspond au passage d'un usage de la terre à un autre. Souvent, le changement d'utilisation des terres fait référence à mise en exploitation de terres non utilisées (terres vierges, abandonnées ou dégradées).

On fait une distinction entre un changement direct et indirect d'utilisation des terres. Le changement direct fait référence à une surface spécifique qui est directement convertie d'un état à un autre. En ce qui concerne les biocarburants, un changement direct fait référence à une biomasse destinée aux biocarburants qui est produite sur des terres ayant précédemment un statut de terres agricoles utilisées pour produire de la matière première (EC, 2010). Si la matière première pour les biocarburants ou bio-produits est produite à la place d'une culture ou sur une terre agricole, elle peut alors déplacer la production d'autres cultures dont certaines peuvent finalement conduire à la conversion de terres en terres agricoles. Dans ce cas, la demande supplémentaire en biocarburants peut indirectement conduire à un changement d'utilisation des terres, d'où le terme de changement indirect d'utilisation des terres (EC, 2010). Cet effet indirect se manifeste par un changement de la demande en produits agricoles et leurs dérivés sur les marchés mondiaux.

Un avantage majeur de la culture du sorgho énergie, c'est qu'il peut pousser dans des conditions drastiques. Il peut aussi bien être cultivé sur des sols marginaux avec une large gamme de pH, sur des sols salins ou sur des sols impropres à la production de nourriture bien que sa productivité sur ce genre de sols soit réduite. Les impacts de la filière du sorgho sucré et du sorgho biomasse sur l'utilisation des sols sont reportés au tableau 17 et tableau 18.

Biodiversité

La biodiversité, définie comme l'abondance des espèces (plantes, animaux et micro-organismes) dans un habitat naturel, est essentielle pour la performance d'un écosystème. La production de biomasse pour la bioénergie peut avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur la biodiversité. Lorsque des terres dégradées sont utilisées, la diversité des espèces pourrait être améliorée. Cependant, les pratiques des grandes monocultures peuvent être préjudiciables à la biodiversité locale, notamment par la perte d'habitats naturels, l'expansion des espèces envahissantes et la contamination par les engrais et les herbicides.

À l'échelle globale, la biodiversité est essentielle pour le fonctionnement des écosystèmes, qui à leur tour assurent des réserves génétiques et des cycles hydrologiques divers essentiels à l'agriculture. Cependant, à l'échelle du champ, les systèmes les plus efficaces ont une grande uniformité et très peu de biodiversité. L'utilisation de la biomasse végétale pour produire des carburants liquides a le potentiel d'accroître l'impact de l'agriculture sur la biodiversité. L'ampleur de la perte d'habitat dépendra du type de changement d'utilisation des terres. Le sorgho sucré, connu pour pousser sur des sols marginaux et dégradés avec une fertilisation réduite aura un impact réduit sur la biodiversité, tant qu'il sera cultivé à petite échelle, et en rotation avec d'autres cultures (Elbehri *et al.*, 2013).

Tableau 17 : Impact des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré sur l'utilisation des terres en zones tropicales (Rutz et al., 2013)

Culture et transformation à grande échelle	<p>Si des usines centralisées s'installent et développent leur propres plantations de sorgho sucré dans des pays en développement, cela peut affecter négativement les populations pauvres (par accaparement des terres). Il y a un risque de déplacement et de marginalisation des communautés locales et des petits agriculteurs.</p> <p>Il y a un risque plus élevé que le sorgho sucré soit cultivé en monoculture avec un impact environnemental (baisse de fertilité des sols, compaction des sols, déforestation) et socio-économique (perte de services écosystémiques).</p> <p>La compétition pour les terres peut être élevée car les grandes usines vont généralement sélectionner les terres agricoles de bonne qualité.</p> <p>La productivité de la terre (t/ha) et l'efficacité du processus global de ses systèmes peuvent être plus élevés.</p>
Culture à petite échelle et transformation à grande échelle	<p>La structure et la taille des fermes agricoles existantes peuvent être maintenues. Comme les structures de ces systèmes sont plus petites, la biodiversité et les services systémiques peuvent être plus grands.</p> <p>La productivité de ces systèmes peut être plus faible que les systèmes de grande taille, mais les grandes usines de transformation peuvent soutenir les agriculteurs, par exemple en leur fournissant des équipements agricoles.</p>
Culture et transformation à petite échelle	<p>La structure et la taille des fermes agricoles existantes peuvent être maintenues. Comme les structures de ces systèmes sont plus petites, la biodiversité et les services systémiques peuvent être plus grands.</p> <p>La productivité des terres est généralement plus faible dû à un manque de ressource et de connaissances, qui peut être en partie compensé par des structures coopératives efficaces.</p> <p>Les systèmes de culture du sorgho sucré peuvent être facilement intégrés dans les structures agricoles existantes à petite échelle, sans affecter négativement les petits agriculteurs et les villageois (pas d'accaparement des terres). Les villageois sont eux-mêmes responsables de l'utilisation appropriée des terres et des bonnes pratiques de production. Ils ne sont pas obligés par les grandes entreprises de s'adapter à leurs règles.</p>

Tableau 18 : Impacts de l'utilisation du sorgho biomasse pour la production de biogaz et d'éthanol 2G sur l'utilisation des terres en zones tempérées (Rutz et al., 2013)

Production de biogaz	<p>Le sorgho est généralement une bonne alternative aux autres cultures pour la production de biogaz, particulièrement le maïs. Cela élargit donc le choix des cultures et des possibilités de rotations. Cependant, l'augmentation de la production de cultures énergétiques pour produire du biogaz a conduit dans certaines régions à une augmentation des prix de location des terres.</p>
Production d'éthanol 2G	<p>Le sorgho biomasse est une plante annuelle, et pour produire des biocarburants 2G, des cultures ligneuses (ou des résidus) sont peut-être préférables car elles ont des impacts sur l'utilisation des terres généralement plus faibles.</p>

Abréviations

% : Pourcent

°C : Degré centigrade

°N : Degré nord

°S : Degré sud

1G : bioéthanol de première génération

2G : bioéthanol de deuxième génération

Al : Aluminium

cm : Centimètre

CH₄ : Méthane

CO₂ : Dioxyde de carbone

CO : Monoxyde de carbone

Cu : Cuivre

dS : Deci Siemens

Fe : Fer

g : Gramme

GES : Gaz à effet de serre

GJ : Gigajoule

H, h : Heure

H₂ : Hydrogène

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

H₂S : Sulfure d'hydrogène

ha : Hectares

HM : Hydrogenotrophic methanogens

J : Joule

K₂O : Oxyde de potassium

kg : Kilogramme

kJ : Kilojoule

kWel : Kilowatt Electric

l : Litre

m : Mètre

m² : Mètre carré

m³ : Mètre cube

Mg : Mégagram

MJ : Mégajoule

ml : Millilitre

mm : Millimètre

Mn : Manganèse

N : Azote

NaCl : Chlorure de sodium

NaOH : Hydroxyde de sodium

NaSO₄ : Sulfate de sodium

NH₃ : Ammoniac

P : Phosphore

P₂O₅ : Pentoxyde de Phosphore

RUE : Efficience d'utilisation
du rayonnement

t : Tonne

v : Volume

WUE : Efficience d'utilisation de l'eau

Zn : Zinc

Copyright des photos

- © Araújo Octavio G. Araújo, Embrapa, Brazil
- © Braconnier Serge Braconnier, CIRAD, Montpellier, France
- © Bradshaw J. Bradshaw, ACES, Alabama cooperative extension system
- © Cunfer Barry M. Cunfer, UGA, CAES
- © de Oliveira Charles M. de Oliveira, Embrapa, Brazil
- © Embrapa Embrapa, Caixa Postal 151 Rodovia MG-424,
..... Km 45 34701-970 Sete Lagoas, MG BRAZIL
- © Howard RU Howard
- © ICRISAT ICRISAT, Patancheru 502324 Andhra Pradesh India
- © Jordan Dave Jordan, MacDon Industries LLC
- © K-State University Kansas State University, Department of Entomology
- © Mendes Simone Mendes, Embrapa, Brazil
- © Miller Fred Miller, US Department of Agriculture -
..... Agricultural Research Service
- © Nuessly Gregg S. Nuessly, University of Florida
- © Rutz Dominik Rutz, WIP Renewable Energies,
..... Munich, Germany
- © Texas A&M AgriLife Extension
- © Viana Cota Luciano Viana Cota, Embrapa, Brazil
- © Viana Paulo Viana, Embrapa, Brazil
- © Ward C. Ward, Kansas State University, Department of Entomology
- © Wild Alex Wild, the University of Texas at Austin
- © Wrather Allen Wrather, University of Missouri

Liste des Figures

Figure 1 : Schéma d'un plant de sorgho (Murty et al., 1994)	4
Figure 2 : Différentes variétés de graines de sorgho montrant une grande variabilité de taille et de couleur (Reddy et al. 2008)	5
Figure 3 : Racines nodales d'ancrage du sorgho (© Braconnier)	5
Figure 4 : Inflorescence de sorgho (© left, Braconnier, right, Rutz)	6
Figure 5 : Diversité des couleurs et des formes de panicules montrant la grande variabilité génétique des espèces de sorgho (© Braconnier)	8
Figure 6 : Breeding fields of grain sorghum in South Africa (©Rutz)	8
Figure 7 : Nervure centrale brune chez une variété de sorgho bmr (©Braconnier)	9
Figure 8 : Symptômes de l'anthracnose des feuilles (©Viana Cota)	15
Figure 9 : Industrial calendar in Brazil (Embrapa, 2014)	27
Figure 10 : machine à récolter la canne à sucre utilisée pour le sorgho sucré (© Embrapa)	28
Figure 11 : Récolte manuelle du sorgho sucré double usage en Inde (© ICRISAT)	28
Figure 12 : Sorgho biomasse récolté avec une ensileuse comme substrat pour la bioénergie cellulosique (© Jordan)	29
Figure 13 : Les différents procédés applicables au sorgho énergie et les produits qui en résultent.	30
Figure 14 : Véhicule flex fuel à un salon commercial (© Rutz)	32
Figure 15 : Premier moulin dans le processus d'extraction du jus de sorgho sucré dans une usine au Brésil (© Braconnier)	32
Figure 16 : Bagasse obtenue après extraction du jus (© Braconnier)	32
Figure 17 : Fermenteurs d'une usine produisant du bioéthanol de canne à sucre, Brésil (© Rutz)	33
Figure 18 : Usine ABENGOA de production de bioéthanol à partir de graines, Salamanque, Espagne (© Rutz)	34
Figure 19 : DDS d'une usine de production d'éthanol à partir de grains (© Rutz)	34
Figure 20 : Etapes de conversion de la matière organique complexe par digestion anaérobique	35
Figure 21 : Unité agricole de production de biogaz en Allemagne (©Rutz)	36
Figure 22 : Principe de base de la comparaison du cycle de vie entre l'éthanol de sorgho sucré et l'essence (Braconnier et Reinhardt, 2013)	41
Figure 23 : Système décentralisé de production de sirop (Braconnier et Reinhardt, 2013)	43
Figure 24: Système de production de biogaz (Braconnier et Reinhardt, 2013)	43
Figure 25: Production d'éthanol 2G à partir de la biomasse ligno-cellulosique de sorgho sous climat tempéré (Braconnier et Reinhardt, 2013)	44

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre canne à sucre et sorgho sucré (Almodares et Hatamipour, 2011)	12
Tableau 2 : Autres maladies potentielles du sorgho	17
Tableau 3 : Les insectes nuisibles du sorgho	21
Tableau 4 : Nématodes parasites pathogènes du sorgho (Claflin 1983)	26
Table 5 : Effets du temps d'attente entre récolte et broyage des tiges sur leur teneur en sucre (Reddy et al., 2008)	27
Tableau 6 : Processus de combustion schématique (Hiegl et al., 2011)	37
Tableau 7 : Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré, sur les bénéfices en zone tropicale (Rutz et al., 2013)	45
Tableau 8 : Effets du type de filière (production d'éthanol 2G ou biogaz) sur les bénéfices en zones tempérées (Rutz et al., 2013)	45
Tableau 9 : Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G sur l'efficacité en zones tropicales (Rutz et al., 2013)	46
Tableau 10 : Effets de la nature du système (production de biogaz ou d'éthanol 2G) sur l'efficacité en régions tempérées (Rutz et al., 2013)	46
Tableau 11 : Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré sur les investissements en zones tropicales.	47
Tableau 12 : Effets des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré sur la sécurité énergétique et alimentaire en zones tropicales (Rutz et al., 2013)	48
Tableau 13 : Effets de la taille des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sur la création d'emplois, la santé et les conditions de travail en zones tropicales (Rutz et al., 2013)	50
Tableau 14 : Effets de la production de biogaz et d'éthanol 2G à partir de sorgho sur la création d'emplois, la santé et les conditions de travail en régions tempérées (Rutz et al., 2013)	50
Tableau 15 : Acceptation par le public et les parties prenantes des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré, en zones tropicales (Rutz et al., 2013)	51
Tableau 16 : Acceptation par le public et les parties prenantes des systèmes de production de biogaz et d'éthanol 2G à partir du sorgho biomasse en zones tempérées (Rutz et al., 2013)	51
Tableau 17 : Impact des systèmes de production d'éthanol 1G à partir du sorgho sucré sur l'utilisation des terres en zones tropicales (Rutz et al., 2013)	55
Tableau 18 : Impacts de l'utilisation du sorgho biomasse pour la production de biogaz et d'éthanol 2G sur l'utilisation des terres en zones tempérées (Rutz et al., 2013)	55

Références

- Agrifuels (2009) Sweet Investment in Fuel and Food - <http://www.agrifuels.com.au/documents/SweetInvestmentinFuelandFood.pdf> (accessed: 05 October 2013)
- Agropedia (2013) Botanical description of Sorghum: Root System - <http://agropedia.iitk.ac.in/content/botanical-description-sorghumroot-system> (accessed: 05 March 2013)
- Almodares A, Hadi MR (2009) Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research* 4(9):772-780
- Almodares A, Hatamipour MS (2011) Planting sweet sorghum under hot and dry climatic condition for bioethanol production. *World Renewable Energy Congress 2011*, Sweden
- Al Seadi T, Rutz R, Prassl H, Köttner M, Finsterwalder T, Volk S, Janssen R (2008) *Biogas handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, Esbjerg, Denmark. ISBN 978-87-992962-0-0
- Antonopoulou G, Gavala HN, Skiadas IV, Angelopoulos K, Lyberatos G (2008) Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass. *Bioresource Technology* 99(1):110-119. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.048
- Armstrong A, Baro J, Dartoy J, Groves A, Nikkonen J, Rickeard D, Thompson N, Larivé J (2002) Energy and greenhouse gas balance of biofuels for Europe - an update. concawe, report no 2/02, Brussels
- Assar AHA, Uptmoor R, Abdelmula AA, Salih M, Ordon F, Friedt W (2005) Genetic Variation in Sorghum Germplasm from Sudan, ICRISAT and USA Assessed by Simple Sequence Repeats (SSRs). *Crop Science* 45(4):1636. DOI: 10.2135/cropsci2003.0383
- Basavaraj G, Parthasarathy Rao P, Basu K, Reddy R, Kumar AA, Srinivasa Rao P, Reddy BVS (2012) Assessing Viability of Bio-ethanol Production from Sweet Sorghum. Working Paper Series no. 30, RP – Markets, Institutions and Policies, International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India
- Basso LC, Basso TO, Rocha SN (2011) Ethanol production in Brazil: the industrial process and its impact on yeast fermentation - biofuel production-recent developments and prospects, Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes (Ed.). www.intechopen.com (accessed: 05 March 2013)
- Bele PV (2007) Economics of on- farm Ethanol Production using Sweet Sorghum, Master Thesis - <http://digital.library.okstate.edu/etd/umi-okstate-2165.pdf> (accessed: 05 March 2013)
- Betancur GJV, Pereira Jr.N (2010a). Sugar cane bagasse as feedstock for second generation ethanol production. Part I: Diluted acid pretreatment optimisation. *Electronic Journal of Biotechnology* 13(3). DOI:10.2225/vol13-issue3-fulltext-3
- Betancur GJV, Pereira Jr.N (2010b). Sugar cane bagasse as feedstock for second generation ethanol production. Part II: Hemicellulose hydrolysate fermentability. *Electronic Journal of Biotechnology* 13(5). DOI: 10.2225/vol13-issue5-fulltext-8
- Bitzer MJ, Fox JD (2000) AGR-123: Processing Sweet Sorghum for Syrup - <http://www.uky.edu/Ag/CDBREC/introsheets/swsorghumintro.pdf> (accessed: 05 March 2013)
- Blade Energy Crops (2010) Managing high biomass sorghum as a dedicated energy crop - http://www.bladeenergy.com/Bladepdf/Blade_SorghumMgmtGuide2010.pdf (accessed: 05 March 2013)

- Blümmel M, Rao PP (2006) Economic value of sorghum stover traded as fodder for urban and peri-urban dairy production in Hyderabad, India. *International Sorghum and Millets Newsletter* 47:97-100
- BMU (2012) Biomass Ordinance (Biomasse V) (as amended as of 1 January 2012), Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany - http://www.bmu.de/english/renewable_energy/downloads/doc/5433.php (accessed: 10 July 2013)
- Braconnier S, Reinhardt G (2013) Sweet sorghum as Energy Crop: Report on technological assessment, Report of the Sweetfuel project – www.sweetfuel-project.eu
- Cardoso CR, Oliveira TJP, Santana Junior JA, Ataíde CH (2103) Physical characterization of sweet sorghum bagasse, tobacco residue, soy hull and fiber sorghum bagasse particles: Density, particle size and shape distributions. *Powder Technology* 245:105-114. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.04.029>
- Cardwell KF (1989) Pathotypes of *Colletotrichum graminicola* and seed transmission of sorghum anthracnose. *Plant Disease* 73(3):255-257. DOI: 10.1094/PD-73-0255
- Carillo MA, Staggenborg SA, Pineda JA (2014) Washing sorghum biomass with water to improve its quality for combustion. *Fuel* 116:427-431. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.028>
- CFC-ICRISAT (2004) Alternative uses of sorghum and pearl millet in Asia: Proceedings of the expert meeting in ICRISAT, 1-4 July 2003, Andhra Pradesh, India. Common fund for commodities, Amsterdam
- Cherney J, Cherney D, Akin D, Axtell J (1991) Potential of brown-midrib, low-lignin mutants for improving forage quality. *Advances in Agronomy* 46:157-198
- Claflin LE (1984) Sorghum root and stalk rots, a critical review: Proceedings of the consultative group discussion on research needs and strategies for control of sorghum root and stalk rot diseases, 27 Nov - 2 Dec 1983, Bellagio, Italy
- Clayton WD (1961) Proposal to conserve the generic name *Sorghum* Moench (Gramineae) versus *Sorghum* Adans (Gramineae). *Taxon* 10:242-243
- Curt M, Fernandez J, Martinez M (1998) Productivity and radiation use efficiency of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cv. Keller in central Spain. *Biomass and Bioenergy* 14(2):169-178. DOI: 10.1016/S0961-9534(97)10025-3
- Das D (2009) Advances in biohydrogen production processes: An approach towards commercialisation. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(17):7349-7357. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.013
- Dercas N, Liakatas A (2007) Water and radiation effect on sweet sorghum productivity. *Water Resource Management* 21(9):1585-1600. DOI: 10.1007/s11269-006-9115-2
- Dhillon MK, Sharma HC, Reddy BVS, Singh R, Naresh JS (2006) Inheritance of resistance to sorghum shoot fly. *Crop Science* 46(3):1377-1383. DOI: 10.2135/cropsci2005.06-0123
- Dien BS, Sarath G, Pedersen JF, Sattler SE, Chen H, Funnell-Harris DL, Nichols NN, Cotta MA (2009) Improved sugar conversion and ethanol yield for forage sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) lines with reduced lignin contents. *Bioenergy Research* 2(3):153-164. DOI: 10.1007/s12155-009-9041-2
- Doggett H (1988) *Sorghum*, 2nd Ed, Longman Scientific and Technical, Harlow, UK
- Du Plessis J (2008) Sorghum production. Department of Agriculture, Republic of South Africa - http://www.daff.gov.za/docs/Infopaks/FieldCrops_Sorghum.pdf (accessed: 19 February 2013)

- Dweikat I (2012) Sweet sorghum is a drought-tolerant feedstock with the potential to produce more ethanol/acre than corn, University of Nebraska - <http://agronomy.unl.edu/sweetsorghum> (accessed: 05 March 2013)
- EC (2010) Report from the Commission on indirect land-use change related to biofuels and bioliquids - <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:0811:FIN:EN:PDF> (accessed: 05 April 2013)
- Elbehri A, Segerstedt A, Liu P (2013) Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks. FAO, Rome, Italy
- Erdei É, Pepó P, Boros N, Tóth S, Szabó B (2009) Morphological and biochemical indicators of drought tolerance in sweet sorghum (*Sorghum dochna* L.) Cereal Research Communications 37:157-160
- FAO (1994) Breeding and cultivation of sweet sorghum - <http://www.fao.org/docrep/t4470e/t4470e05.htm> (accessed: 05 October 2013)
- FAO (1995) Sorghum and millets in human nutrition. Food and Agriculture Organisation of the United Nations UNIPUB (distributor), Rome, Lanham, MD
- FAO (2007) Proceedings of the First FAO technical consultation on bioenergy and food security, 16-18 April 2007, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome, Italy.
- Gosse G (1996) Sweet sorghum, a crop for industry and energy supply. AIR1 CT 92-0041. European Commission (DG XII), Brussels, Belgium
- Gosselink J (2002) Pathways to a more sustainable production of energy: sustainable hydrogen? A research objective for Shell. International Journal of Hydrogen Energy 27(11-12):1125-1129. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00092-7
- Gowda PSB, XU GW, Frederiksen RA, Magill CW (1995) DNA markers for downy mildew resistance genes in sorghum. Genome – 38(4):823-826. DOI:10.1139/g95-106
- Grassi G (1992) Biomass for energy, industry and environment: Proceedings of the International Conference on Biomass for Energy, Industry and Environment, April 1991, Athens, Greece, pp. 22-26. Elsevier Applied Science, London
- Gunnerman R, Farone W (1986) Process for preparing and using sweet sorghum in a fuel product. United States Patent, Patent number 4 613 339
- Hahn-Hägerdal B, Galbe M, Gorwa-Grauslund M, Lidén G, Zacchi G (2006) Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. Trends in Biotechnology 24(12):549-556. DOI: 10.1016/j.tibtech.2006.10.004
- Halford NG, Karp A (2011) Energy crops. Cambridge: Royal Society of Chemistry
- Hallenbeck PC (2009) Fermentative hydrogen production: Principles, progress, and prognosis. International Journal of Hydrogen Energy 34(17):7379-7389. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.080
- Harlan JR, de Wet MJM (1972) A simplified classification of cultivated sorghum. Crop Science 12:172-176.
- Harris HB and Sowell G (1970) Incidence of *Colletotrichum graminicola* on Sorghum bicolor introductions. Plant Disease Reporter 54:60-62
- Harris HB, Johnson BJ, Dobson JW and Luttrell ES (1964) Evaluation of anthracnose on grain sorghum. Crop Science 4:460-462
- Henri J (1864) Études et expériences sur le sorgho à sucre considéré aux points de vue botanique, agricole, chimique, physiologique et industriel. Paris Etienne Giraud, Libraire-editeur 20, rue saint-suplice

- Hess DE, Bandyopadhyay R, Sissoko I (2001) Reactions of sorghum genotypes to leaf, panicle and grain anthracnose (*Colletotrichum graminicola*) under field conditions in Mali - In: Akintayo I, Sedgo J (eds) Towards sustainable sorghum production, utilisation, and commercialisation in West and Central Africa: Proceedings of a technical workshop of the West and Central Africa Sorghum Research Network. WCASRN/ROCARS, West and Central Africa Sorghum Research Network, Bamako, Mali
- Hiegl W, Rutz D, Janssen R (2011) European Project "Install+RES": Training Courses for Trainers and Installers of Biomass Systems in Buildings, Information material: Module Biomass - <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode> (accessed: 10 July 2013)
- House LR (1985) A guide to sorghum breeding, second edition. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India
- IEA Task 39 (2013) International Energy agency - <http://demoplants.bioenergy2020.eu/> (accessed: 30 September 2013)
- Jacobsen SE, Wyman CE (2000) Cellulose and hemicellulose hydrolysis models for application to current and novel pretreatment processes. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 84-86 (1-9):81-96. DOI: 10.1385/ABAB:84-86:1-9:81
- Janssen R, Rutz D, Braconnier S, Reddy B, Srinivas Rao P, Schaffert R, Parella R, Zaccharias A, Rettenmaier N, Reinhardt G, Monti A, Amaducci S, Marocco A, Snijman W, Terblanche H, Zavala-Garcia F (2010) Sweet Sorghum - an Alternative Energy Crop: Proceedings of the 18th European Biomass Conference and Exhibition, 3 - 7 May 2010, Lyon, France. DOI: 10.5071/18thEUBCE2010-OD4.2
- Janssen R, Rutz D, Helm P, Woods J, Diaz-Chavez R (2009) Bioenergy for Sustainable Development in Africa – Environmental and Social Aspects: Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition, 29 June - 3 July 2009, Hamburg, Germany, pp. 2422-2430
- Janssen R, Turhollow AF, Rutz D, Mergner R (2013) Production facilities for 2G biofuels in the US and the EU – current status and future perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*
- Kapdan IK, Kargi F (2006) Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology* 38(5):569-582. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2005.09.015
- Khanal SK (2008) Anaerobic biotechnology for bioenergy production: Principles and applications. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa
- Kumar AA, Reddy BVS, Ravinder RC, Blümmel M, Srinivasa Rao P, Ramaiah B, Sanjana RP (2010) Enhancing the harvest window for supply chain management of sweet sorghum for ethanol production. *Journal of SAT Agricultural Research* 8
- Laopaiboon L, Thanonkeo P, Jaisil P, Laopaiboon P (2007) Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by *Saccharomyces cerevisiae*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 23(10):1497-1501. DOI: 10.1007/s11274-007-9383-x
- Mantovani EC, Ribas PM, Guimaraes JB (2012) Mecanizacao – In: May A, Duares FOM, Filho IAP, Schaffert RE, Parrella (eds) Sistema Embrapa de producao agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG
- McCarry PL (1964) Anaerobic waste treatment fundamentals, public works - <http://seas.ucla.edu/stenstro/Anaerobic%20assignment.pdf> (accessed: 12 February 2013)
- Miri K, Rana DS (2012) Evaluation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes for biomass, sugar and ethanol production under different levels of nitrogen. *The Indian Journal of Agricultural Sciences* 82(3):195-200

- Monteith JL (1993) Using tube solarimeters to measure radiation intercepted by crop canopies and to analyse stand growth. Delta-T Devices, Application Note: TSL-AN-4-1
- Murty DS, Tabo R, Ajayi O (1994) Sorghum hybrid seed production and management. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India
- Muzaale F (2011) Uganda: Planned sweet sorghum project to create 250 jobs - The monitor - <http://allafrica.com/stories/201109130296.html> (accessed: 11 April 2011)
- Nimbkar N, Kolekar AJH, Rajvanshi A (2006) Syrup production technology from sweet sorghum - <http://www.nariphaltan.org/syrup.pdf> (accessed: 06 March 2013)
- Obilana AT (1985) Recurrent selection schemes in photosensitive sorghum sorghum-bicolor populations. *Zeitschrift Fuer Pflanzenzuechtung* 95(3):221-229. ISSN: 00443298
- Oliver AL, Pedersen JF, Grant RJ, Klopfenstein TJ (2005) Comparative effects of the sorghum - 6 and -12 genes. *Crop Science* 45(6):2234-2239. DOI: 10.2135/cropsci2004.0644
- Pari L, Grassi G, Capaccioli S (2008) State of the art: Harvesting, storage and logistic of the sweet sorghum: Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition 2-6 June 2008, Valencia, Spain, pp. 174-177
- Poletti A, Poletti L, Berna F (1996) Bioconversion of sorghum - biogas: Proceedings of the First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry April 1-3, Toulouse, France, pp. 111
- Qazi HA, Paranjpe S, Bhargava S (2012) Stem sugar accumulation in sweet sorghum – Activity and expression of sucrose metabolizing enzymes and sucrose transporters. *Journal of Plant Physiology* 169(6):605-613. DOI: 10.1016/j.jplph.2012.01.005
- Quintero J, Montoya M, Sánchez O, Giraldo O, Cardona C (2008) Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case. *Energy* 33(3):385-399. DOI: 10.1016/j.energy.2007.10.001
- Ra K, Shiotsu F, Abe J, Morita S (2012) Biomass yield and nitrogen use efficiency of cellulosic energy crops for ethanol production. *Biomass and Bioenergy* 37:330-334. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.12.047
- Rao Dayakar B, Ratnavathi CV, Karthikeyan K, Biswas PK, Rao SS, Vijay Kumar BS, Seetharama N (2004) Sweet sorghum cane for biofuel production: A SWOT analysis in Indian context. National Research Centre for Sorghum, Rajendranagar, Andhra Pradesh, India, pp. 20
- Srinivasa Rao P, Deshpande S, Blümmel M, Reddy BVS, Hash T (2012) Characterisation of brown midrib mutants of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench): ICRISAT-ILRI. *The European Journal of Plant Science and Biotechnology* 6(1):71-75
- Rao SP, Deshpande S, Prakasham RS and Reddy BVS (2010) Composition and characterisation of bmr sorghums - In: Srinivasa Rao, Prakasham RS and Deshpande S (eds) *Brown midrib sorghum - current status and potential as novel ligno-cellulosic feedstock of bioenergy*, pp. 9-36, Lap Lambert academic publishing GmbH and Co KG, Germany
- Rao P, Kumar C (2013) *Characterisation of improved sweet sorghum cultivars*. Springer, New Delhi, New York
- Srinivasa Rao P, Reddy BVS, Blümmel M, Chandraraj K, Subbarao GV, Sanjana Reddy P, Parthasarathy Rao P (2009) Sweet sorghum as a Biofuel feedstock: Can there be Food-Feed-Fuel Tradeoffs: 60th International Executive Council Meeting and 5th Asian Regional Conference of International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 6-11 December 2009, New Delhi, India

- Reddy BVS, Ramesh S, Ashok Kumar A, Gowda CLL (2008) Sorghum improvement in the new millennium. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Andhra Pradesh, India
- Reddy BVS, Ramesh S, Reddy PS (2005) Sweet Sorghum – A potential alternate raw material for bio-ethanol and bioenergy <http://agropedia.iitk.ac.in/openaccess/sites/default/files/v1i1sweet.pdf> (accessed: 06 March 2013)
- Reddy R (2013) Sowing time and method for sweet sorghum, ICRISAT agropedia <http://icrisat.agropedia.in/node/3060> (accessed: 05 March 2013)
- Reed W, Geng S, Hills F J (1986) Energy input and output analysis of four field crops in California. *Journal of Agronomy and Crop Science* 157(2):99-104. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1986.tb00054.x
- Röhrich C (2007) Zuckerhirse und Sudangras – Rohstoffpflanzen für Biogasanlagen - <http://media.repro-mayr.de/15/76815.pdf> (accessed: 06 March 2013)
- Rutz D, Janssen R (2012a) Socio-economic impacts of different scales of biofuel production in Africa – In: Janssen R, Rutz D (eds.) *Bioenergy for sustainable development in Africa*. – Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht Heidelberg London New York, ISBN 978-94-007-2180-7. DOI 10.1007/978-94-007-2181-4_25;
- Rutz D, Janssen R (2012b) Sweet sorghum as Energy Crop: A SWOT Analysis, Report of the Sweet-fuel project, WIP Renewable Energies, Munich, Germany - http://www.sweetfuel-project.eu/publications/swot_analysis_deliverable_6_5 (accessed: 07 March 2012)
- Rutz D, Janssen R, Khawaja C (2013) Socio-economic impacts of sweet sorghum in temperate and tropical regions – in: Rutz D, Janssen R (eds) *Socio-economic Impacts of Bioenergy Production* – Springer Science+Business Media B.V., Dordrecht Heidelberg London New York
- Rutz D, Mergner R, Janssen R (2012) *Sustainable Heat Use of Biogas Plants – A Handbook*. WIP Renewable Energies, Munich, Germany; Handbook elaborated in the framework of the BiogasHeat Project; ISBN 978-3-936338-29-4
- Schaffert RE, Santos FG, Borgonovi RA, Silva JB (1980) Aprenda a plantar sorgo sacarino. *Agroquímica*, Sao Paulo 13:10-14
- Schmidhuber J (2007) Biofuels: An emerging threat to europe's food security? Impact of an increased biomass use on agricultural markets, prices and food security: A longer-term perspective. Policy paper 17/05/2007, Notre Europe
- Shi X, Song H, Wang C, Tang R, Huang Z, Gao T, Xie J (2010) Enhanced bio-hydrogen production from sweet sorghum stalk with alkalisatation pretreatment by mixed anaerobic cultures. *International Journal of Energy Research* 34:662-672. DOI: 10.1002/er.1570
- Smith CW, Frederiksen R (2000) *Sorghum: Origin, history, technology and production*. Wiley, New York
- Subbarao GV, Ito O, Sahrawat KL, Berry WL, Nakahara K, Ishikawa T, Watanabe T, Suenaga K, Rondon M and Rao IM (2006) Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems – Challenges and opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25:303-335
- Subbarao GV, Nakahara K, Hurtado MP, Ono H, Moreta DE, Salcedo AF, Yoshihashi AT, Ishikawa T, Ishitani M, Ohnishi-Kameyama M, Yoshida M, Rondon M, Rao IM, Lascano CE, Berry WL, Ito O (2009b) Evidence for biological nitrification inhibition in *Brachiaria* pastures: Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS) 106(41):17302-17307. DOI:10.1073/pnas.0903694106

Subbarao GV, Zakir HAKM, Nakahara K, Ishikawa T, Yanbuaban M, Yoshihashi T, Ono H, Yoshida M, Hash CT, Upadhyaya H, Srinivasa Rao P, Reddy BVS, Ito O, Sahrawat KL (2009a) Biological nitrification inhibition (BNi) potential in sorghum: The proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI, UC Davis - <http://escholarship.org/uc/item/5tp8s9pj> (accessed: 06 March 2013)

Sundara KD, Marimuthu P (2012) Sweet sorghum stalks – An alternate agro-based raw material for paper making. Seshasayee Paper and Boards Ltd, Erode, 638007

Sweethanol (2011a) Diffusion of a sustainable EU model to produce 1st generation ethanol from sweet sorghum in decentralised plants - Early Manual, CETA, Published by Poligrafiche San Marco S.a.s., Italy - http://www.ceta.ts.it/Joomla/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=121 (accessed: 05 March 2013)

Sweethanol (2011b) Diffusion of a sustainable EU model to produce 1st generation ethanol from sweet sorghum in decentralised plants - Intersectorial Manual, CETA, Published by Poligrafiche San Marco S.a.s., Italy - http://esse-community.eu/wpcontent/uploads/2012/02/Sweethanol_Intersectorial_Manual.pdf; (accessed: 09 April 2013)

Tan KT, Lee KT, Mohamed AR (2008) Role of energy policy in renewable energy accomplishment: The case of second-generation bioethanol. *Energy Policy* 36(9):3360-3365. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.05.016

Tarpley L, Vietor DM (2007) Compartmentation of sucrose during radial transfer in mature sorghum culm. *BMC Plant Biology* 7(1):33. DOI: 10.1186/1471-2229-7-33

Teetes G, Pendleton BB (2013) Insect pests of sorghum - <http://sorghumipm.tamu.edu/pests/iptoc.htm> (accessed: 06 March 2013)

Thomas MD, Sissoko I, Sacko M (1996) Development of leaf anthracnose and its effect on yield and grain weight of sorghum in West Africa. *Plant Disease* 80:151-153

Tsago Y, Andargie M, Takele A (2013) In vitro screening for drought tolerance in different sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) varieties. *Journal of Stress Physiology and Biochemistry* 9(3):72. ISSN 1997-0838

Uganda Investment Forum (2013) Project profile: Kayunga District Biogreen Investments East Africa Ltd. 11-12 April 2013, Kampala, Uganda - http://www.cbcbglobal.org/images/uploads/library/Sorghum_Energy_Plant_-_Kayunga_District.pdf (accessed: 11 April 2013)

Uptmoor R, Wenzel W, Friedt W, Donaldson G, Ayisi K, Ordon F (2003) Comparative analysis on the genetic relatedness of Sorghum bicolor accessions from Southern Africa by RAPDs, AFLPs and SSRs. *Theoretical and Applied Genetics* 106(7):1316-1325. DOI: 10.1007/s00122-003-1202-7

Utria BE (2004) Ethanol and gelfuel: clean renewable cooking fuels for poverty alleviation in Africa. Africa Energy Group (AFTEG), The World Bank, 1818 H Street NW, Washington DC 20433, USA

Vaksmann M, Traore SB, Niangado O (1996) Photoperiodism in African sorghum. *Agriculture et Développement* 9:13-18.

Vanderlip R (1998) Grain sorghum production handbook: Growth and development of the sorghum plant, Kansas State University, Kansas, USA - <http://www.ksre.ksu.edu/bookstore/pubs/c687.pdf> (accessed: 04 March 2013)

Vasilakoglou I, Dhima K, Karagiannidis N, Gatsis T (2011) Sweet sorghum productivity for biofuels under increased soil salinity and reduced irrigation. *Field Crops Research* 120(1):38-46. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.08.011

- Vecchiet A (2010) Advantages of sweet sorghum for bioethanol production – ESSE Community - <http://esse-community.eu/articles/advantages-of-sweet-sorghum-for-bioethanolproduction-2/> (accessed: 11 April 2013)
- Vermerris W, Saballos A , Ejeta G, Mosier N S, Ladisch M R, Carpita N C (2007) Molecular breeding to enhance ethanol production from corn and sorghum stover. *Crop Science* 47(3):143-153. DOI:10.2135/cropsci2007.04.0013IPBS
- Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ (2000) IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change And Forestry - Summary for Policymakers. - Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 20. http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=0 (accessed: 05 April 2013)
- Worley J, Vaughan D, Cundiff J (1992) Energy analysis of ethanol production from sweet sorghum. *Bioresource Technology* 40(3):263-273. DOI: 10.1016/0960-8524(92)90153-O
- Wortmann C, Ferguson R, Lyon D (2008) Sweet sorghum as a biofuel crop in Nebraska. Paper presented at the 2008 Joint Annual Meeting, Celebrating the International Year of Planet Earth, 5–9 October 2008, Houston, Texas - <http://crops.confex.com/crops/2008am/techprogram/P44581.HTM> (accessed: 10 July 2013)
- Xie T, Su P, Shan L, Ma J (2012) Yield, quality and irrigation water use efficiency of sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench] under different land types in arid regions. *Australian Journal of Crop Science* 6(1):10-16
- Zeise K, Fritz M (2011) Sorghum als Biogassubstrat. *Biogas Forum Bayern*. https://www.biogas-forum-bayern.de/publikationen/Sorghum_als_Biogassubstrat_2_Auflage.pdf (accessed 04 April 2014)
- Zheng LY, Guo XS, He B, Sun LJ, Peng Y, Dong SS, Liu TF, Jiang S, Ramachandran S, Liu CM, Jing HC (2011) Genome-wide patterns of genetic variation in sweet and grain sorghum (*Sorghum bicolor*). *Genome biology* 12(11):R114. DOI: 10.1186/gb-2011-12-11-r114.

