



**Recensement des technologies
bioénergie disponibles**

Juillet 2022

Identification et recensement des équipementiers bioénergie et/ou pour la transformation agroalimentaire au Sahel ou en Europe

Table des matières

1.	Les voies de conversion de la biomasse.....	3
1.1.	Les voies de conversion thermochimiques	5
1.1.1.	La pyrolyse.....	5
1.1.2.	La combustion	6
1.1.3.	La gazéification	7
1.2.	Les propriétés pertinentes des biomasses pour les conversions thermochimiques ..	8
2.	Etat des lieux des technologies Bioénergie à partir de biomasse ligno-cellulosique	9
2.1.	Technologies de combustion.....	10
2.2.	Technologies de gazéification	11
3.	Etat des lieux des technologies solaires en agro-industrie voies de conversion de la biomasse.....	13
3.1.	Systèmes solaires photovoltaïques (PV).....	13
3.2.	Systèmes solaires thermiques	15
4.	Le contenu des fiches de recensement des technologies	16
	ANNEXE : Les fiches de recensement.....	17
	Production chaleur	
	Procédés bioénergie	
	Solaire thermique	
	Production électricité	
	Procédés bioénergie	
	Solaire photovoltaïque	

Introduction

L'Action BioStar, vise à améliorer l'approvisionnement énergétique des PME de transformation agroalimentaire (PME AA) en valorisant énergétiquement leurs résidus. Cette valorisation nécessite des technologies adaptées tant aux résidus disponibles qu'aux besoins de l'entreprise en chaleur et en électricité (force motrice). Bien que dans de nombreux cas des développements spécifiques seront nécessaires, il est pertinent de pratiquer un recensement des technologies existantes de conversion énergétique des résidus agroalimentaires. Ce recensement a été réalisé principalement dans les pays sur lesquels se centre l'Action, le Burkina Faso et le Sénégal. Il a été élargi à certaines technologies disponibles ailleurs et qui pourraient être pertinentes pour les PME AA retenues pour l'Action.

Le présent rapport présente les différentes technologies actuellement recensées sachant que la collecte d'information se poursuivra tout au long du projet. Ces technologies sont reprises en annexe sous forme de fiches dont la forme a été définie dans le cadre de la Tâche 2.3.1. Afin de structurer les différentes fiches, les principales voies de conversion énergétique de la biomasse sont présentées en Section 1, et en particulier les voies de conversion thermochimique : pyrolyse, combustion, et gazéification. L'accent est également mis dans cette partie sur les principales propriétés ayant un impact sur le choix et la mise en œuvre d'une conversion particulière. Ensuite, en section 2 nous proposons un état des lieux des technologies bioénergies de petite puissances, compatibles avec la problématique BioStar. L'énergie solaire sera un complément souvent indispensable aux résidus agroalimentaires pour augmenter l'indépendance énergétique des PME AA. Ainsi, la section 3 présente un état des lieux des technologies solaires pour des applications au sein des PME AA. Enfin, les thèmes des différentes fiches sont brièvement présentés dans la Section 4. Les fiches détaillées sont présentées en annexe.

1. Les voies de conversion de la biomasse

Les voies de conversion dépendent des propriétés de la biomasse et des produits attendus. Une classification imparfaite mais utile pour fixer les idées est de considérer que les voies thermochimiques sont réservées aux biomasses riches en lignine et cellulose (bois, résidus agricoles, coques, etc.) et que les voies biochimiques sont adaptées aux biomasses dites humides (résidus alimentaires, lisiers, etc.). Pour compléter ces catégories, on considère également la conversion de biomasses riches en sucres (canne à sucre, maïs, etc.) par fermentation alcoolique et l'extraction d'huile de biomasses oléagineuses (jatropha, palme, etc.). Ces quatre catégories sont les points d'entrée principaux du schéma présentés à la Figure 1.

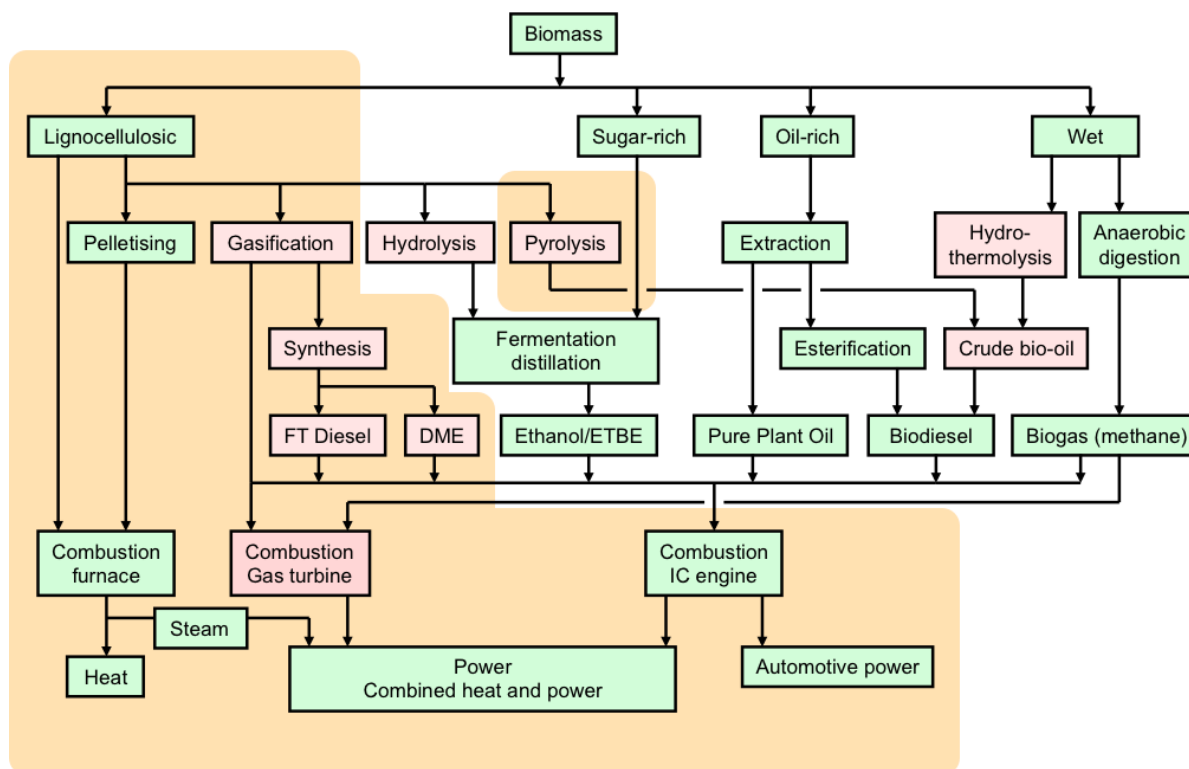


Figure 1 : Parmi toutes les filières de conversion de la biomasse, l’Action BioStar s’axe sur les voies thermo-chimiques mises en évidence par le fond beige.

Dans le cadre du projet BioStar, les voies thermo-chimiques sont privilégiées car elles correspondent aux principaux résidus attendus des filières agro-alimentaires étudiées. Cependant, la valorisation de résidus via la voie humide est pertinente dans certaines de celles-ci. Cette voie est basée sur la digestion anaérobie qui produit un gaz riche en méthane (60%) et dioxyde de carbone (40%), le biogaz. Ce gaz peut ensuite être valorisé directement en chaleur et/ou en électricité. Cette voie de valorisation sera prise en compte dans les stratégies d’optimisation énergétique des filières de conversion sans être spécifiquement étudiée par le consortium dans le cadre de l’Action. Par contre, les deux autres voies de valorisation, fermentation alcoolique et extraction d’huile, ne seront pas prises en compte dans le cadre de la valorisation énergétique des résidus, car les résidus de biomasse étudiés ne sont pas adaptés. A noter que l’extraction d’huile est inhérente à la filière karité mais pour une valorisation produit et non une valorisation énergétique. Elle sort donc du spectre de cette revue de technologie de conversion de la biomasse pour la production d’énergie.

Pourquoi convertissons-nous la biomasse par des procédés thermo-chimiques ? La réponse évidente est la production de chaleur par combustion. C’est certainement l’une des plus anciennes techniques dont disposent les sociétés humaines. Pourtant, les technologies de la combustion sont encore améliorées de nos jours, notamment pour la réduction des émissions polluantes. Mais la biomasse est convertie pour de nombreuses autres applications. La biomasse est convertie pour la production de charbon de bois principalement pour la cuisson. Elle est également convertie pour produire un gaz (appelé gaz de synthèse ou syngas (synthetic gas)). Ce gaz peut ensuite être converti en électricité et/ou en chaleur. Le gaz, principalement composé de CO et de H_2 , est également le point de départ de la production

de biocarburants de deuxième génération. La biomasse peut également être directement convertie pour obtenir un liquide ou des molécules spécifiques utilisées en chimie et dans l'industrie alimentaire.

Ainsi, les principales voies de conversion thermochimique qui seront étudiées dans le cadre de l'Action sont au nombre de trois : pyrolyse, gazéification, et combustion. La combustion dégage de la chaleur qui peut être directement valorisée ou bien exploitée pour produire de la vapeur et ensuite de l'énergie électrique dans une turbine à vapeur ou un moteur à vapeur. La gazéification produit un gaz exploitable dans une chaudière ou, après une épuration plus ou moins complexe, dans un moteur ou une turbine à gaz pour la production d'électricité ou la cogénération. Finalement, la pyrolyse permet de produire un résidu solide, le charbon (non représenté sur la figure bien que très répandu en pratique en Afrique de l'Ouest) qui sera un excellent combustible solide pour produire de la chaleur ou une huile pyrolytique à exploiter dans une chaudière ou un moteur. Dans les deux cas, un gaz valorisable énergétiquement est produit.

1.1. Les voies de conversion thermochimiques

Les principales voies thermochimiques, qui présentent un intérêt ici, sont conceptuellement présentées à la Figure 2 et sont décrites plus en détail dans les sous-sections suivantes. La première étape dans toute conversion thermochimie est la pyrolyse. Les deux autres voies sont une poursuite de la pyrolyse avec la gazéification d'une part et la combustion d'autre part. Ces trois voies se distinguent principalement par l'apport d'oxygène dans le processus de réaction. La pyrolyse se déroule en l'absence d'oxygène. La gazéification nécessite un apport limité d'oxygène. La combustion nécessitera une quantité permettant l'oxydation complète du combustible.

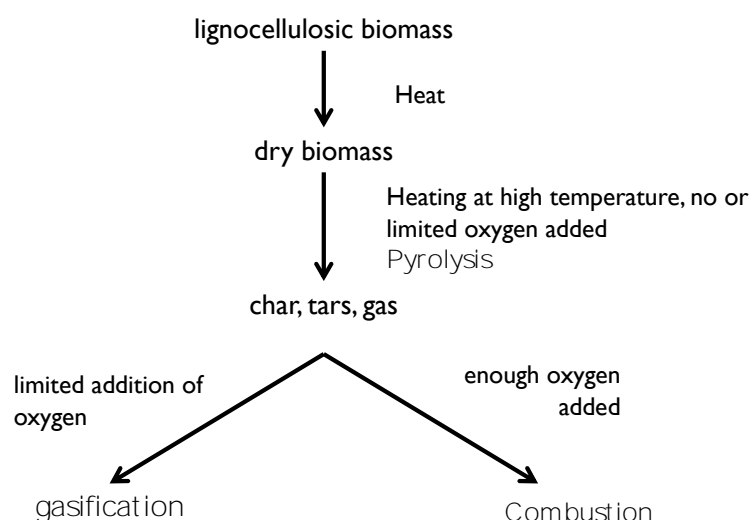
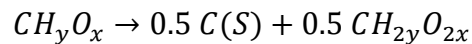


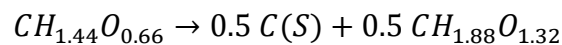
Figure 2 : les trois voies de conversion thermochimiques nécessitent des apports d'air différents.

1.1.1. La pyrolyse

Fondamentalement, la pyrolyse est la transformation d'une substance sous l'effet de la chaleur. Cette transformation est une décomposition en produits multiples. La pyrolyse ne nécessite pas l'ajout d'oxygène et est donc réalisée avec un rapport d'équivalence proche ou égal à zéro. En pratique, de l'oxygène est souvent ajouté pour générer la chaleur nécessaire à la pyrolyse via l'oxydation partielle de la matière première. Sous l'action de la chaleur, les différentes molécules de la structure de la biomasse sont brisées et réorganisées thermiquement, ce qui entraîne la production d'espèces gazeuses qui comprennent des gaz permanents, de l'eau et des composés liquides à température ambiante (les goudrons) et un résidu solide, le charbon de bois. La réaction chimique globale est donc



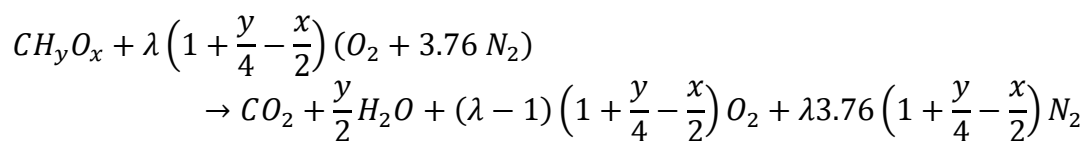
où le charbon de bois est ici considéré comme du carbone pur et tous les autres produits ont été regroupés en un seul composé moyen plus riche en hydrogène et en oxygène. Le coefficient stœchiométrique de 0.5 est ici choisi arbitrairement mais sa valeur est réaliste pour une pyrolyse lente. La fraction exacte de solide dépend des conditions de pyrolyse. En utilisant une formule générique de la biomasse, la réaction devient



Une mole de biomasse (24g) devient 6g de carbone (une demi mole) soit 25% de la masse initiale mais environ 50% de l'énergie initiale. Suivant la manière exacte dont la pyrolyse est conduite (montée en température, temps de séjour, etc.), les produits seront différents. Deux cas sont distingués, la pyrolyse lente dont le produit principal est du charbon de bois et la pyrolyse rapide qui produit une huile pyrolytique. Cette seconde méthode est complexe à maîtriser et à mettre en œuvre. Le résultat, un liquide combustible, est intéressant mais ces propriétés ne sont pas adéquates pour une utilisation directe efficace.

1.1.2. La combustion

Sur la base de la formule chimique générique de la biomasse, l'équation de combustion s'écrit

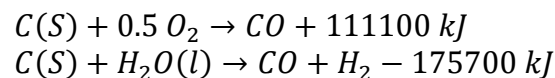


où λ est l'excès d'air et est généralement supérieur mais proche de l'unité dans les applications à grande échelle et plus élevé dans les systèmes à petite échelle comme les foyers domestiques. La maîtrise de l'excès d'air est un enjeu majeur de la combustion de la biomasse dans beaucoup d'applications artisanales. L'absence de contrôle implique des rendements faibles et une pollution excessive. En pratique, la biomasse ne brûle pas comme un mélange gazeux prémélangé et la formule globale cache des phénomènes de combustion complexes. En effet, la première étape clé de la combustion de la biomasse est la pyrolyse qui est alimentée par la chaleur produite par la combustion qui s'ensuit. La pyrolyse produit un résidu solide et des espèces gazeuses qui brûlent séparément.

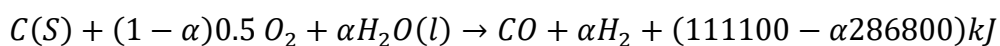
L'air nécessaire à la combustion complète de la biomasse est donc divisé en deux flux distincts. Environ trois quarts sont nécessaires pour oxyder les produits gazeux et un quart pour convertir le charbon en gaz. La combustion de la biomasse en deux étapes a conduit au développement d'entrées d'air primaire et secondaire dans les systèmes de combustion. Elle a commencé dans les années 80 pour les petits appareils et est maintenant commune à tous les systèmes modernes. L'air primaire est admis au niveau de la biomasse solide. Il permet de conduire la pyrolyse par un dégagement de chaleur local et de convertir le solide restant en gaz. Les gaz sont ensuite oxydés grâce à l'air secondaire. Néanmoins, nombreuses PME AA dans les pays en développement continuent de recourir à des foyers de combustion ouverts type foyers à trois pierres qui ont une qualité de la combustion médiocre. En pratique, la gestion de l'air dans les systèmes de combustion de la biomasse est beaucoup plus complexe que ce qui est décrit ici. Mais le concept d'air primaire et secondaire demeure dans toutes les applications.

1.1.3. La gazéification

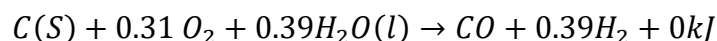
La gazéification est la transformation d'un solide en un gaz grâce à la réaction avec un agent de gazéification (par exemple l'air, l'oxygène, la vapeur et le CO_2). Prenons comme exemple de départ le carbone solide pur. Sa réaction avec l'oxygène conduit à la production de CO et est exothermique, tandis que sa réaction avec l'eau conduit à la production de CO et de H_2 et est endothermique,



Les bilans énergétiques associés aux réactions sont donnés par kmole de carbone. Une addition pondérée des deux réactions conduit à un bilan énergétique neutre

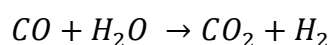


La réaction neutre est obtenue pour $\alpha = 0.39$,



Comme la réaction est neutre thermiquement, tout le pouvoir calorifique du carbone solide est récupéré dans le produit gazeux. L'efficacité théorique de la conversion est donc de 100%. Dans la pratique, l'eau est ajoutée sous forme liquide et le pouvoir calorifique est calculé sur la base de l'eau en phase gazeuse, de sorte que l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est perdue dans la conversion. L'efficacité reste néanmoins très élevée, proche de 96%

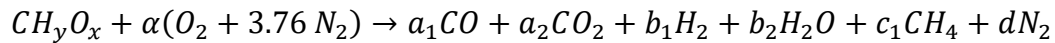
En pratique, les réactions chimiques se produisent à haute température et sont à l'équilibre. Les produits contiennent également de l'eau et du dioxyde de carbone qui sont contraints par la réaction shift :



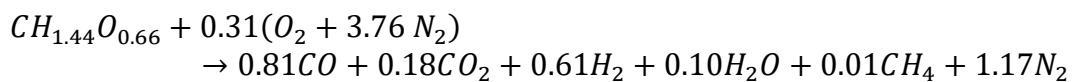
De plus, l'efficacité est plus faible en raison de l'enthalpie sensible des produits.

Le carbone solide ne représente pas bien la biomasse. Il ne contient pas de produits volatils. Il n'y a donc pas d'étape de pyrolyse dans le processus de gazéification. De plus, la biomasse contient des fractions importantes d'hydrogène et d'oxygène. L'ajout d'eau ou de vapeur n'est donc pas nécessaire pour le processus de gazéification, bien au contraire, cela pourrait affecter négativement l'efficacité.

La réaction de gazéification de la biomasse peut s'écrire comme suit



A titre d'illustration pour la biomasse générique, la réaction théorique pourrait être



Dans ce cas, les produits ont une température de 1020 K.

Les réactions globales présentées ci-dessous cache la complexité des processus de gazéification qui sont présentés dans la Partie 2 et détaillés dans les différentes fiches présentant les principaux designs de gazogènes.

1.2. Les propriétés pertinentes des biomasses pour les conversions thermochimiques

Les résidus agroalimentaires disponibles dans les PME AA sont très diversifiés. Ils se distinguent par différentes propriétés que l'on peut synthétiser par la liste principale suivante :

- Le contenu énergétique est caractérisé par le pouvoir calorifique qui s'exprime en kilojoules par kilogramme (kJ/kg). La valeur est souvent proche de 18500 kJ/kg pour une biomasse sèche et sans cendres (matières minérales). Tant la présence d'humidité que la teneur en matière minérale va influencer négativement le contenu énergétique. S'il est difficile de modifier la teneur en matière minérale à l'exemple de la balle de riz, il est possible de modifier le niveau d'humidité par un séchage préalable.
- L'humidité est un élément important comme mentionné ci-avant. Si la voie de conversion retenue est biochimique, cette teneur en eau n'est pas problématique, au contraire. Par contre, l'accent étant mis sur les conversions thermochimiques, l'humidité sera toujours un obstacle. Heureusement de nombreux résidus agroalimentaires sont relativement secs (e.g. coques, tiges et noix) et ne nécessitent pas de prétraitement. Par contre, certains résidus humides nécessiteront un séchage préalable. Dans une vision intégrée de valorisation des résidus agricoles, ce séchage peut être réalisé via de la chaleur résiduelle à basse température ou un séchage solaire.

- La taille et la forme des résidus représentent un enjeu majeur pour les résidus agroalimentaires. Elles dictent la densité énergétique tant pour le transport que pour leur valorisation énergétique avec un impact sur la taille des installations. Il y a également un impact sur la puissance des installations, etc. C'est un élément essentiel, la balle de riz par exemple, au vu de sa taille et forme ne se comportera pas du tout comme les coques d'anacarde. Cette diversité peut mener soit à des installations de conception très différente soit à la nécessité de transformer les résidus dans une étape de prétraitement pour uniformiser leurs propriétés
- Les cendres sont un enjeu car elles diluent le contenu énergétique mais aussi parce qu'elles peuvent amener à des contraintes au niveau des équipements de transformation. On pense notamment au slagging (cendres fondues) et au fouling (encrassement par les cendres volantes) surtout pour des résidus à forte teneur en cendres. Les cendres ont aussi potentiellement une qualité agronomique et leur récupération peut s'avérer une première étape pour une valorisation ultérieure.
- La teneur en carbone fixe est importante tant en pyrolyse qu'en gazéification et, dans une moindre mesure, en combustion. Elle pointe vers les analyses sommaires et ultimes qui permettent de mieux déterminer le comportement des résidus lors de leur conversion thermochimique.

2. Etat des lieux des technologies Bioénergie à partir de biomasse ligno-cellulosique

Cette partie présente les principes généraux des technologies de combustion et gazéification pour la production d'énergie à partir de biomasse ligno-celluloacxtisique.

La pyrolyse n'est pas traitée spécifiquement ici, car en tant que procédé Bioénergie produisant une énergie thermique, elle s'apparente à la combustion.

Les procédés de production de bioénergie à partir de biomasse ligno-cellulosique se décomposent en 3 étapes principales : i) l'approvisionnement et le conditionnement de la biomasse, ii) la conversion thermochimique, iii) la conversion en énergie utile, chaleur ou électricité (Figure 1).

La 1^{ère} étape, pas toujours nécessaire, vise à préparer la biomasse afin de lui conférer des propriétés (granulométrie, densité) ou une composition (teneur en humidité) adapté au procédé utilisé.

La 2^{ème} étape de conversion thermochimique permet, sous l'effet de la température essentiellement, de convertir l'énergie contenue dans la biomasse soit sous forme de chaleur dans des fumées (procédé de combustion) ou sous forme chimique dans un gaz de synthèse souvent appelé syngaz (procédé de gazéification).

La 3^{ème} étape (production d'énergie) consiste à transformer cette énergie thermique ou chimique, en énergie utile par l'intermédiaire d'un ou plusieurs modules tels que chaudière, turbine vapeur, moteur gaz, brûleur.



Figure 3 : Plusieurs étapes sont nécessaires pour produire de l'énergie à partir de biomasse ligno-cellulosique

2.1. Technologies de combustion

Les technologies de combustion couvrent une très grande gamme de puissances, depuis les petits poêles domestiques de quelques kW, jusqu'aux grandes centrales de cogénération de plusieurs dizaines de MW. En production d'électricité, les installations de référence ont des puissances bien supérieures à 1 MWe, même s'il existe des constructeurs qui proposent des technologies à des puissances inférieures.

Une installation de combustion de biomasse (Figure 4) est constituée de trois modules : le foyer (ou chambre) de combustion, la chaudière et éventuellement une turbine (ou moteur) à vapeur et sa génératrice pour la production d'électricité. Bien entendu la préparation/alimentation du combustible et le traitement des fumées de combustion sont également des points essentiels sur des installations biomasse.

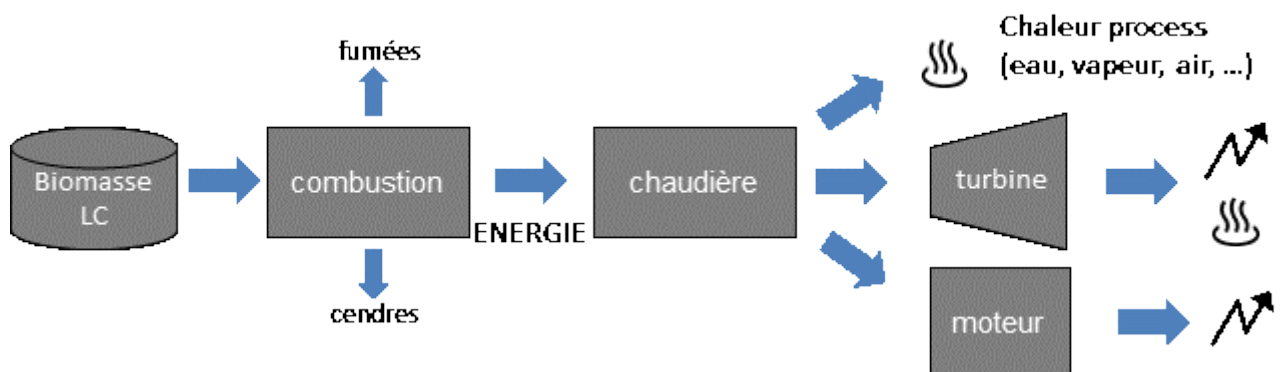


Figure 4 : La combustion mène à la production de chaleur et/ou d'électricité

Les différents modules constitutifs d'un procédé de combustion sont décrits brièvement ci-dessous.

Le foyer, où se fait la combustion, est alimenté en combustible biomasse et en air pour produire de la chaleur. Il existe 2 grandes catégories de foyers :

- *Les foyers à grilles* sont constitués d'une grille sur laquelle le combustible est introduit et à travers laquelle l'air primaire est injecté. De l'air secondaire est injecté au-dessus du lit de biomasse pour permettre la combustion des produits gazeux et améliorer la qualité de la conversion. Les foyers les plus simples et robustes de ce type sont à "grilles fixes", utilisés notamment pour les applications thermiques. Ceux dits à "grilles mobiles" (alternatives, vibrantes, rotatives, etc.) offrent une combustion plus efficace des biomasses dont le taux d'humidité ou le taux de matières minérales (cendres) est élevé. Les foyers "volcan" sont une variante dans lesquels la biomasse est alimentée au centre.

- *Les foyers à lit fluidisé* sont constitués d'une enceinte cylindrique. L'air primaire de combustion est injecté en partie basse au travers d'une grille de distribution et un lit de particules inertes (sable de silice généralement). La présence d'un lit de matériau maintenu

en suspension dans le foyer favorise l'homogénéisation du milieu réactif et les échanges thermiques. Il existe deux types de foyers de ce type, ceux à lit fluidisé dense et ceux à lit fluidisé circulant, tous deux étant des technologies éprouvées. Bien que le principe de fonctionnement soit similaire, certaines caractéristiques les distinguent, dont la vitesse de fluidisation, la température de fonctionnement, la granulométrie de la matière constituant le lit et la granulométrie du combustible.

Dans le cadre de l'Action, les puissances thermiques requises étant faibles (<1 MW), seules des solutions basées sur des technologies de foyers à lits fixes seront recherchées.

La chaudière est essentiellement un échangeur de chaleur qui permet de transférer la chaleur sensible contenue dans les fumées de combustion à un fluide, généralement de l'eau. Elle produit donc de l'eau/vapeur à des débits, températures, et pression précisément définies et contrôlées en fonction des besoins du procédé agroalimentaire en amont. Pour la production d'électricité, les chaudières de type "à tubes d'eau" sont adaptées à la production de vapeur à moyenne et haute pression/température (de 12 bars/250°C jusqu'à 60 bars/480°C par exemple). Ce type de chaudière permet de répondre à la contrainte de résistance mécanique des matériaux métalliques dans ces conditions opératoires.

Lorsque l'objectif est la production d'air chaud (basse, moyenne, ou haute température) on parle plutôt de "Générateur d'Air Chaud". On en distingue alors deux types :

- Les générateurs d'air chaud « direct » qui utilisent directement dans le procédé en amont les fumées de combustion, avec ou sans dilution; ils trouvent leur application dans les procédés à hautes températures principalement et pour lesquels la propreté de l'air chaud n'est pas une limite;
- Les générateurs d'air chaud « indirect », qui utilisent la chambre et les fumées de combustion pour réchauffer l'air à destination du procédé : l'air ambiant est propulsé à travers le générateur au moyen d'un ventilateur externe afin d'être réchauffé autour de la chambre de combustion ou dans un échangeur dont le circuit primaire est alimenté par les fumées de combustion. Ces types de générateurs d'air chaud sont le plus souvent destinés aux applications (process, chauffage) nécessitant un air pur.

La turbine permet de produire de l'énergie mécanique (puis électrique) par la détente de la vapeur. Les turbines à vapeur sont généralement mise en place pour des centrales électrique de puissances élevées (>5 ou 10 MWe) ; cette solution ne semble à priori pas compatible avec les besoins du projet.

Le moteur à vapeur, tout comme la turbine, les moteurs peuvent être de type vertical ou horizontal. Les moteurs verticaux sont de conception modulaire et comprennent 1 à 4 cylindres. Les plus performants de ces équipements utilisent la vapeur pour alimenter en cascade plusieurs cylindres par le jeu d'ouverture de valves.

2.2. Technologies de gazéification

La gazéification de biomasse lignocellulosique dans un réacteur à haute température (800-1100 °C) permet de générer un gaz de synthèse, sous l'effet de réactions thermochimiques. La biomasse solide est ainsi convertie en un gaz combustible. La production d'électricité se fait ensuite par l'intermédiaire d'un moteur à combustion interne, qui entraîne une génératrice

électrique. La figure 5 présente les différents modules d'une installation de gazéification: réacteur de gazéification, système d'épuration du "syngas" (gaz de synthèse généré), et moteur à combustion interne couplé à un alternateur.

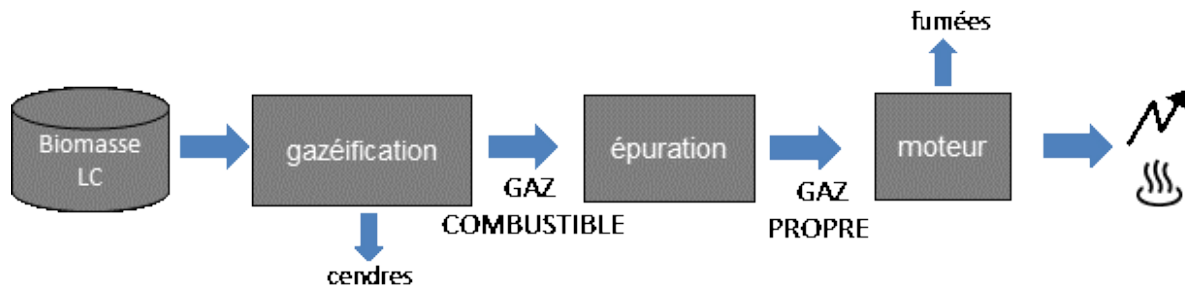


Figure 5 : La gazéification de biomasse lignocellulosique permet de produire de l'électricité à petite échelle.

Les différents modules constitutifs d'un procédé de production d'électricité par gazéification de biomasse sont décrits brièvement ci-dessous.

Le réacteur de gazéification, anciennement appelé **gazogène**, est le siège de la transformation de la biomasse en un gaz combustible en présence d'un gaz réactif (souvent de l'air) et sous l'effet de températures élevées (entre 800 et 1100 °C). Les technologies se déclinent en deux grandes catégories : les lits fixes et les lits fluidisés :

- Les réacteurs à lit fixe se rapprochent dans leur conception des réacteurs de combustion à grille fixe. Ils sont en général de construction simple et robuste et sont couramment classés en 2 types. Dans les réacteurs dits "contre-courant", l'alimentation en biomasse se fait en partie haute tandis que l'air est introduit par le bas, à contre-courant du combustible solide. Dans les réacteurs "co-courant", la biomasse et l'air se déplacent à co-courant, tous les deux vers le bas. A noter que les réacteurs étagés sont une variante de ceux à co-courant, mais contrairement à ce dernier, les étapes principales de pyrolyse puis de gazéification sont réalisées dans deux zones distinctes.

- Les réacteurs à lit fluidisé pour la gazéification sont de conceptions similaires à ceux utilisés en combustion ; ce sont essentiellement les conditions opératoires (température, atmosphère) qui vont les différencier. Suivant les applications, et notamment le type de biomasse utilisée et le niveau de puissance de l'installation, ils se déclinent eux aussi en lits fluidisés denses ou circulants.

De la même manière que pour les technologies de combustion, dans le cadre de BioStar, où les puissances requises sont faibles (<1 MW), seules des solutions basées sur des technologies de foyers à lits fixes seront recherchées.

L'épuration du gaz, en aval du procédé de gazéification, est nécessaire pour éliminer les produits indésirables tels que des particules, goudrons et composés inorganiques, et atteindre les spécifications qualitatives pour leur combustion en moteur. Pour les particules, le système de filtration associe un séparateur grossier de type cyclone à une filtration de type "lit granulaire" ou filtre à manches (céramiques, métalliques). Les filtres électrostatiques sont aussi parfois utilisés dans les procédés de gazéification. En ce qui concerne les goudrons, leur élimination peut se faire par lavage humide ou par craquage thermique ou catalytique.

Le moteur à combustion interne est alimenté en gaz de synthèse pour produire de l'électricité via un alternateur. Des moteurs à gaz, diesel ou essence sont utilisés après certaines adaptations/modifications essentiellement en ce qui concerne la régulation. Un carburateur en amont permet de mélanger le gaz de synthèse et l'air avant l'injection. Dans certains cas, des moteurs diesel sont utilisés en mode "dual fuel", ce qui permet d'injecter un mélange de gazole et de gaz de synthèse, notamment pour répondre à des questions de fluctuation de la demande.

3. Etat des lieux des technologies solaires en agro-industrie voies de conversion de la biomasse

L'énergie solaire peut être directement utilisée par des systèmes solaires photovoltaïques (PV) et des systèmes solaires thermiques. La principale différence entre ces systèmes est le principe de fonctionnement de la conversion d'énergie.

3.1. Systèmes solaires photovoltaïques (PV)

L'utilisation de l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques (PV) est aujourd'hui non seulement un moyen durable de produire de l'électricité, mais aussi un moyen rentable. Les panneaux photovoltaïques produisent de l'électricité (courant continu, DC pour direct current), car le rayonnement solaire met en mouvement des électrons dans les cellules photovoltaïques. Différents types de panneaux PV sont disponibles sur le marché, tels que les panneaux amorphes, monocristallins et polycristallins.

Un système photovoltaïque est composé de différents éléments (voir Figure 6) tels qu'un régulateur de charge, une batterie, un onduleur, un fusible et un interrupteur d'isolement. Un régulateur de charge solaire est utilisé pour assurer un processus de charge adéquat des batteries, puisque la production d'énergie solaire d'un panneau solaire fluctue en raison du degré variable de rayonnement solaire. Un onduleur convertit le courant électrique DC en courant alternatif (AC), qui peut être directement utilisé pour alimenter des machines commerciales et des appareils électroniques. Une batterie est utilisée pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques pendant la journée. En outre, des composants de sécurité, tels que des fusibles et des interrupteurs d'isolement, sont également nécessaires pour isoler les composants, en particulier la batterie et le régulateur de charge solaire, afin de les protéger des défaillances dues à des décharges profondes et à des erreurs de charge.

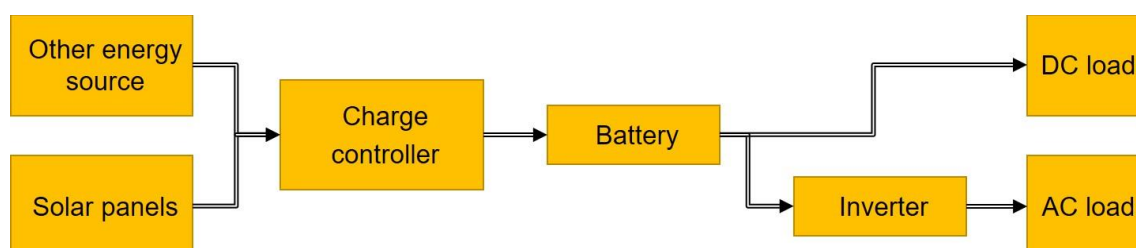


Figure 6 : Composants principaux d'un système photovoltaïque (système hybride)

La faisabilité d'un système photovoltaïque ne dépend pas seulement de son coût. Il existe de nombreux autres facteurs qui influencent fortement la rentabilité, tels que la stratégie d'exploitation, le coût de l'électricité, le PIB par habitant, les subventions gouvernementales

et bien d'autres encore. La plus grande dépense d'un système photovoltaïque est le coût d'investissement. Par conséquent, des aspects importants, tels que la quantité d'énergie requise par l'utilisateur, la comparaison de la rentabilité avec l'électricité du réseau et la taille optimale des composants solaires, doivent être identifiés avant l'installation d'un système PV. En outre, il convient d'obtenir des informations importantes sur le terrain, telles que les conditions météorologiques, la puissance et l'énergie requises et l'état du site (ombre, arbres, lieu d'installation des composants et sécurité). De nos jours, de nombreux logiciels commerciaux sont disponibles pour estimer les dimensions des composants solaires. Cependant, pour un système complexe, comme un congélateur ou une unité de refroidissement qui a un fonctionnement variable dans le temps, ou une presse à huile qui fonctionne à différentes vitesses ou capacités de production, il faut soit un logiciel personnalisé, soit un modèle de simulation. Ce système complexe peut également faire référence à un système hybride quand une source d'énergie secondaire, comme la biomasse, le biogaz ou le biodiesel, est intégrée avec un système PV.

Ce type de système complexe est très courant dans les unités de transformation agroalimentaires. La stratégie de fonctionnement d'une unité de transformation doit être adaptée au caractère fluctuant de l'énergie solaire pour assurer la satisfaction et la productivité des utilisateurs. La figure 7 présente quelques exemples d'unités de traitement dans les technologies de séchage, de pressage de l'huile, de refroidissement et de broyage.

- Séchage

Des séchoirs solaires, tels que le séchoir solaire gonflable et le séchoir tunnel pour les produits agricoles frais, sont disponibles dans le commerce. Un système photovoltaïque est utilisé pour alimenter le ventilateur afin de fournir de l'air dans les séchoirs solaires. Les séchoirs solaires peuvent accélérer le processus de séchage par rapport au séchage en plein soleil. Ils sont conçus pour préserver les produits agricoles du vent, de la pluie, de la poussière et des pertes de qualité dues aux insectes et aux oiseaux.



Figure 7 : Exemples d'applications de systèmes PV dans le domaine agroalimentaire.

- Pressage de l'huile

Ici, un système photovoltaïque est utilisé pour alimenter une presse à vis mécanique (presse à huile) avec un moteur électrique à courant alternatif, qui a une capacité maximale de 20 kg

de graines oléagineuses par heure. La presse à huile peut être utilisée pour différentes graines oléagineuses, comme le sésame, le soja, la noix de karité et l'arachide. Le coût d'investissement peut être considérablement réduit grâce à un dimensionnement approprié des composants solaires.

- Refroidissement

Le système PV est appliqué à différentes configurations d'unités de refroidissement, telles qu'une machine à glace pour le refroidissement du poisson/lait, un refroidisseur d'eau pour une chambre froide et des boîtes de lait. Il existe également différentes unités de refroidissement à faire soi-même (DIY), qui peuvent être construites à partir de composants disponibles sur le marché local. Cette approche donne plus de flexibilité et d'adaptabilité au système de refroidissement.

- Broyage

Un broyeur solaire est une technologie prête à l'emploi qui encourage l'utilisation de l'énergie solaire pour faciliter l'application d'une technologie de broyage pour les petits exploitants agricoles et les coopératives dans les zones rurales.

3.2. Systèmes solaires thermiques

L'énergie solaire thermique est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus simples. Fondamentalement, un système solaire thermique convertit la lumière du soleil en chaleur, afin d'augmenter la température d'un objet solide ou d'un fluide (eau, air, etc.). Dans les secteurs de l'agriculture et de l'alimentation, plusieurs exemples d'application des systèmes thermiques solaires, tels que le séchage, la cuisson, le chauffage et la production d'électricité, sont présentés à la Figure 8. Les séchoirs en serre utilisent l'énergie solaire pour sécher les produits agricoles (légumes, fruits, etc.). Les cuisinières solaires concentrent la lumière directe du soleil sur une plaque de cuisson. Les chauffages solaires sont utilisés pour fournir de l'air chaud dans les bâtiments d'élevage et les serres, ainsi que de l'eau chaude pour les exploitations laitières. Les capteurs solaires à concentration concentrent le rayonnement solaire sur un récepteur qui exploite la chaleur à haute température pour produire de l'électricité.

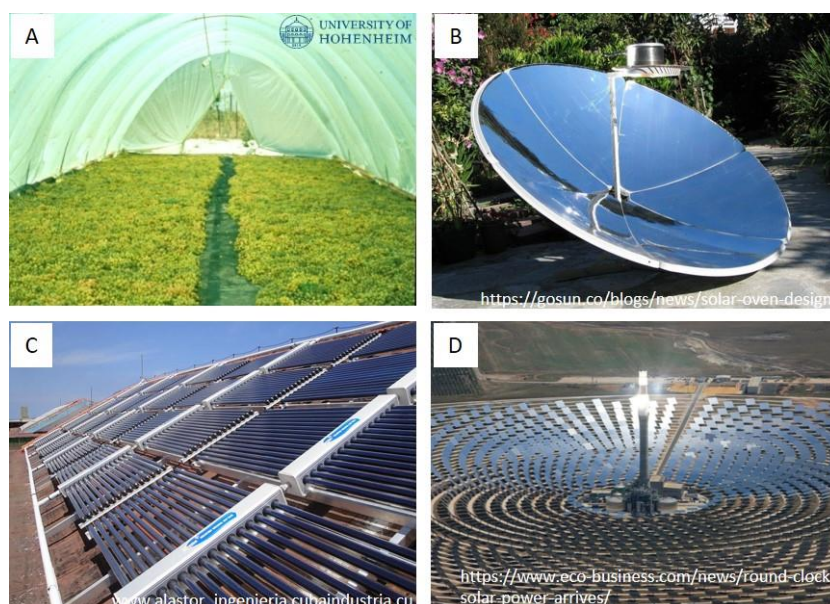


Figure 8 : Exemples de systèmes solaires thermiques : (A) séchoir, (B) cuiseur, (C) chauffage d'eau et (D) production d'électricité.

4. Le contenu des fiches de recensement des technologies

Les thèmes des différentes fiches sont synthétisés ci-après avec une classification basée sur le type de production et ensuite le type de technologie.

Vecteurs énergétiques	Catégories de technologies	Thématiques
Chaleur / Froid (via air, eau ou vapeur)	Chaudières et Foyers	Foyer à balle de riz Foyer amélioré Chaudière Dioulouou Chaudière grille fixe Chaudière buche à flux descendant Chaudière foyer à vis Chaudière foyer volcan Chaudière horizontale sudafricaine Chaudière horizontale vietnamienne Chaudière verticale
	Four de pyrolyse	Carbonisateur double fût Four H2CP Foyer type Anila
	Solaire thermique	Séchoir à éléments séparés Séchoir à feuilles Séchoir tunnel CEAS Séchoir tunnel UH
	Gazéification + chaudière	Voir gazéification ci-dessous
Force motrice / électricité	Gazéification + moteur ou turbine	Gazogène Ankur (Po) Gazogène Ankur (Sénégal) Gazogène Free work services Gazogène Ifinite-PG-60 (Bama) Gazogène Europe Gazogène SCPL (Sénégal)
	Chaudière + moteur à vapeur ou turbine	Moteur à vapeur
	Solaire photovoltaïque	Chambre froide solaire Machine à glaçons solaire Refrigérateur solaire Moulin solaire (BOSS Kit Pro Farina) Moulin solaire (solar milling) Presse solaire (KK20F) Presse Solaire (KK40F) Presse solaire (KK oil prince)

ANNEXE : Les fiches de recensement

Production chaleur

Procédés bioénergie

1. *Foyer balle de riz*
2. *Foyer amélioré*
3. *Chaudière grille fixe*
4. *Chaudière buche à flux descendant*
5. *Chaudière foyer à vis*
6. *Chaudière foyer volcan*
7. *Chaudière horizontale sudafricaine*
8. *Chaudière horizontale vietnamienne*
9. *Chaudière verticale*
10. *Carbonisateur double fût*
11. *Four H2CP*
12. *Foyer type Anila*

Solaire thermique

13. *Séchoir à éléments séparés*
14. *Séchoir à feuilles*
15. *Séchoir tunnel CEAS*
16. *Séchoir tunnel UH*

Production électricité

Procédés bioénergie

17. *Gazogène Europe*
18. *Gazogène Ankur*
19. *Gazogène BAMA*
20. *Moteur vapeur*

Solaire photovoltaïque

21. *Chambre froide solaire*
22. *Machine à glaçons solaire*
23. *Réfrigérateur solaire*
24. *Moulin solaire (BOSS Kit Pro Farina)*
25. *Moulin solaire (solar milling)*
26. *Presse solaire (KK20F)*