

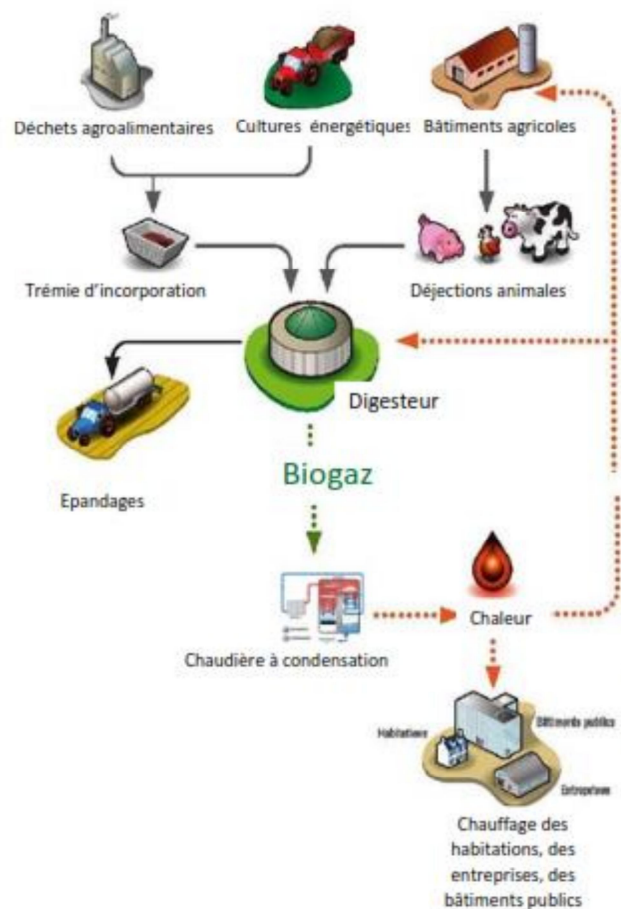
Mastère : Professionnel

DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Spécialité : Ingénierie des Systèmes Energétiques , Management et Gestion de l'Energie

PROCEDES DE CONVERSION THERMOCHIMIQUES A LA BIOMASSE

*Présenté par:
Dr. TRIGUI Abdelwaheb*



COURS :

PROCEDES DE CONVERSION THERMOCHIMIQUES A LA BIOMASSE

Niveau : M2(S1)

Unités d'Enseignement : Biomasse et environnement

Nature de l'UE : Fondamentale

Elément constitutif d'UE (ECUE n°1) : Procédés de conversion thermochimiques à la biomasse

VHS : 21h (Cours/TD : 1h30)

Crédits : 3

Coefficient : 1.5

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Introduction aux Procédés de conversion thermochimique de biomasses

Chapitre 2 : Combustion directe

Chapitre 3 : Torréfaction

Chapitre 4 : Carbonisation

Chapitre 5 : Gazéification

Chapitre 1 :

Introduction aux Procédés de conversion thermochimique de biomasses

Introduction

A l'aube du 21^{ème} siècle, de nombreuses et importantes questions se posent à notre société qui doit se préparer à faire face à l'accroissement de la population mondiale. Un paramètre clé du développement et du bien-être de l'humanité sera la disponibilité de l'énergie, en quantité et qualité suffisantes, pour assurer l'équilibre et la durée de notre fragile écosystème. Au moment où notre société industrielle commence à entrevoir la fin du pétrole, et, où la prise de conscience collective évolue en faveur de la lutte contre l'effet de serre, l'utilisation de la biomasse et des déchets comme source d'énergie constitue une alternative particulièrement attrayante et un enjeu majeur pour notre avenir.

I- Définition de la biomasse (Qu'est-ce que la biomasse ?)

La biomasse telle qu'elle est indiquée par la directive européenne n°2003/30/CE du 8 mai 2003, et fournie par l'article L211-2 du Code de l'Energie, est « la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et de leurs industries connexes, ainsi que de la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux (ménagers)».

La biomasse est définie comme l'ensemble des matières organiques directement issues du vivant, accessibles sur une base renouvelable et durable : cultures dédiées, co-produits et résidus de cultures ainsi que résidus de diverses activités (papeteries, scieries, fraction organique des déchets industriels, ménagers et agricoles...).

En plus des différentes sources de biomasse données dans la figure 1, il y a la biomasse algale qui consiste à élever des micros organismes (algues microscopiques ou cyanobactéries) pour produire la biomasse. Cette biomasse deviendra une source d'énergie par combustion, après méthanisation ou d'autres transformations.

II- Le potentiel de la biomasse

La biomasse est la matière première essentielle pour des usages très variés (alimentation, papeterie, textile, construction, intermédiaires pharmaceutiques et chimiques...), la biomasse peut apporter une contribution significative à l'offre énergétique mais se révéler, dans cette application, concurrentielle avec ses autres utilisations.

La biomasse était la première source d'énergie à avoir été exploitée par les hommes, et longtemps elle a été la plus importante. Ce n'est qu'avec la révolution industrielle et les hydrocarbures(charbon, pétrole) qu'elle a perdu de son importance dans les pays industrialisés.

Cependant, en tant que source d'énergie renouvelable et neutre en carbone, la biomasse est l'objet d'un regain d'intérêt.

Les technologies disponibles pour produire de l'énergie à partir de la biomasse sont multiples. Schématiquement, elles peuvent être subdivisées comme suit (figure 2 et 3) :

- les techniques de préparation ou conditionnement de la biomasse;
- les techniques de conversion primaire comprenant toutes les opérations transformant la biomasse en gaz, en liquide ou en vapeur;
- les techniques de conversion secondaire transformant les combustibles obtenus en énergie électrique ou en chaleur.

La biomasse peut être convertie en vecteurs énergétiques solides, liquides ou gazeux, ce qui se traduit par une vaste gamme d'applications de la bioénergie. Elle peut en effet subir une combustion directe et fournir de la chaleur ou de l'électricité ou une conversion biochimique, catalytique ou thermique et produire des combustibles liquides (par exemple de l'éthanol et du combustible diesel renouvelable). Elle peut aussi être traitée par digestion ou gazéification afin de produire des combustibles gazeux, ainsi que par pyrolyse afin d'obtenir des huiles de pyrolyse et des produits chimiques de grande valeur.

1- Les filières de valorisation énergétique de la biomasse

L'énergie de la biomasse peut être récupérée selon les quatre principales voies suivantes que l'on va décrire brièvement, avant de les analyser plus en détails:

- La plus courante, la combustion (ou l'incinération) produit essentiellement de la chaleur à un niveau de température qui est limité, vers 650°C, par la présence dans les fumées de l'azote introduit avec l'air et de vapeurs acides ou de goudrons condensables, qui donnent lieu à des phénomènes de corrosion.

Dans ces conditions, la cogénération d'électricité et de chaleur, au moyen d'un cycle à vapeur, ne permet d'obtenir que 25% d'électricité et 75% de chaleur, laquelle est un complément économiquement difficile à valoriser dans notre contexte national.

- La deuxième voie possible est la méthanisation, réalisée par la fermentation anaérobie, c'est à dire la décomposition par action bactérienne en absence d'air, de substances très humides comme les algues, les déjections animales ou les déchets ménagers.

Il est ainsi possible d'obtenir un mélange gazeux de méthane (50 à 60 %) et de gaz carbonique (35 à 40 %) rendant son utilisation difficile et, en général, limitée à une combustion in situ pour la production de chaleur et d'électricité.

- Une troisième voie, la fermentation alcoolique, est adaptée à la valorisation des produits saccharifères, comme la betterave ou la canne à sucre, ou amylacés, comme les céréales.

Après hydrolyse et préparation d'une solution sucrée, soumise à la fermentation, on obtient une solution, titrant moins de 15° d'alcool, dont l'éthanol peut être extrait par distillation.

Le rendement global de l'opération est largement pénalisé par la consommation d'énergie, associée partiellement à la culture des plantes, et surtout, à l'opération de distillation.

Sur le plan du bilan énergétique, cette filière est relativement comparable à la voie, conduisant à la préparation du "diester", qui utilise l'huile des plantes oléagineuses pour produire l'Ester Méthylique d'Huile Végétale (EMHV).

Dans les deux cas, seule une fraction, de l'ordre de 50% de la plante, est utilisée pour la production de carburant.

- La transformation thermo-chimique, enfin, qui conduit à la gazéification des substances organiques et végétales, convient particulièrement bien à la valorisation des produits lignocellulosiques comme le bois, les graminées ou les pailles, mais peut aussi être appliquée aux plantes citées précédemment, comme les céréales ou les oléagineux, en utilisant la plante entière.

C'est cette filière qui présente le plus fort potentiel énergétique pour la production de carburants mais elle n'est actuellement qu'au stade de la recherche et du développement.

2- Les atouts majeurs de la valorisation de la biomasse

Les **nouvelles valorisations de la biomasse** offrent des **débouchés essentiels** pour l'agriculture et les forêts, et contribuent ainsi au maintien d'une **économie rurale active (Figure 4)**.

La production, l'exploitation / mobilisation et la transformation industrielle de la biomasse constituent des gisements durables en **emploi local**. Il y a donc un enjeu majeur lié aux usages de la biomasse pour l'économie nationale.

Les céréales, les betteraves, les huiles de colza, de tournesol, de soja ou de palme... sont aussi des matières premières de base pour fabriquer des **agrocarburants** pour alimenter les véhicules.

Enfin, la biomasse s'impose de plus en plus comme ressource dans la production de **biomatériaux** car les chimistes trouvent chaque jour de nouvelles méthodes pour fabriquer des produits à partir de cette matière première.

Chapitre 2 : CONVERSION THERMOCHIMIQUE

PAR COMBUSTION

Introduction

Une partie des déchets contenus dans nos poubelles ne sont ni recyclables, ni compostables ou méthanisables. Ils constituent néanmoins une source énergétique importante dont l'exploitation limitera d'autant l'utilisation de ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon,...) ou nucléaires. C'est ce qu'on appelle des déchets résiduels. Ces déchets peuvent faire l'objet d'un traitement par incinération avec valorisation énergétique.

I- L'INCINERATION : LE POUVOIR CALORIFIQUE DES ORDURES

L'incinération ne constitue pas seulement une solution pour se débarrasser des déchets. Elle est aussi génératrice d'énergie. Qu'ils soient issus des ménages, de l'industrie ou de l'agriculture, de nombreux déchets se transforment en chaleur ou en électricité.

La valorisation énergétique des déchets est très intéressante :

- C'est une source d'énergie "renouvelable" tant que nous produirons des déchets.
- C'est une énergie dont le coût est faible.
- C'est une source d'énergie qui contribue à la réduction de l'effet de serre.

L'incinération traite les déchets ménagers et assimilés non recyclables et non compostables dans les conditions techniques et économiques possibles.

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Ainsi, par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres.

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools) ;
- les gazeux (ex : biogaz).

La combustion produit de la chaleur par l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, d'électricité. La production combinée de chaleur et d'électricité est appelée cogénération.

L'incinération des déchets est un procédé assez ancien qui permet d'en réduire le volume (de l'ordre de 90 %) et de récupérer de l'énergie. La valorisation énergétique de la biomasse par la combustion a bénéficié du développement de la chaîne de traitement thermique des déchets (Figure 1).

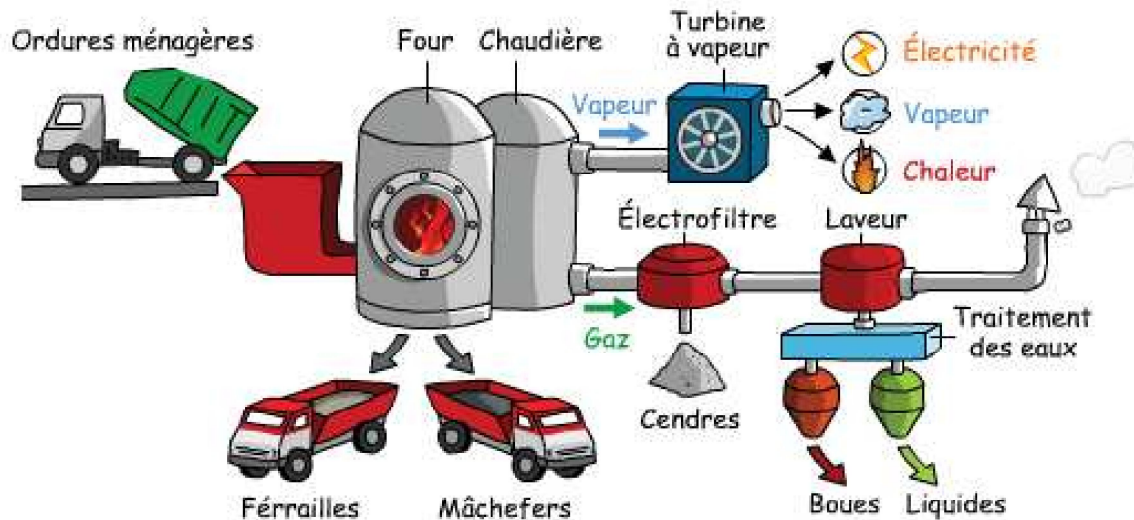


Figure 1 : Procédé d'incinération avec valorisation énergétique

Cette chaîne de traitement est composée de cinq éléments : système d'alimentation de l'équipement de combustion,

- l'équipement de combustion (les différents types de four)
- un éventuel système de récupération d'énergie,
- un dispositif d'analyse et de traitement des fumées,
- un espace de stockage des résidus solides après stabilisation.

Les formes et caractéristiques variables des solides à brûler requièrent des dispositifs de combustion différents. Les technologies les plus utilisées sont les fours à grilles, les fours à lit fluidisé et les fours rotatifs. Les fours à charbon pulvérisé sont très utilisés dans les essais de co-combustion (la combustion du mélange charbon – biomasse).

II - MONOCOMBUSTION DE LA BIOMASSE

Ce procédé subit en permanence des modifications afin de l'adapter aux unités industrielles et de diminuer au maximum les émissions polluantes. Une bonne combustion de la biomasse doit se traduire de la façon suivante :

- une combustion complète du carbone ; ceci nécessite une chambre de combustion permettant un mélange homogène entre comburant et produits de dévolatilisation de la biomasse, un excès d'air optimum et un système approprié de contrôle de la combustion,
- un dispositif permettant la séparation des cendres et des gaz,
- une bonne récupération d'énergie,
- la réduction des NOx par technique primaire (étagement du comburant et /ou du combustible) ou secondaire.

Nous nous intéresserons plus particulièrement ici aux cas du bois et des résidus agricoles qui représentent des gisements très importants.

La biomasse est principalement composée de **lignine** (C₄₀H₄₄O₆) (25 %), et de **carbohydrates** C_n(H₂O)_m (cellulose C₆H₁₀O₅ et hemicellulose) (75 %). Le rendement de la combustion est bon dans la mesure où le combustible est riche en glucides structurés (cellulose et lignine), et surtout suffisamment sec (humidité inférieure à 35 %).

La composition de la biomasse varie beaucoup selon son origine et son humidité. On pourra cependant retenir des valeurs voisines de 25 % de lignine (C₄₀H₄₄O₆) et 75 % de carbohydrates C_n(H₂O)_m (cellulose C₆H₁₀O₅ et hemicellulose).

Sur le plan thermodynamique, les **principaux paramètres** qui influencent la combustion de la biomasse sont les suivants :

- en premier lieu, bien évidemment, la composition du combustible
- en second lieu, son humidité, qui d'une part détermine l'enthalpie nécessaire au séchage, d'autre part joue sur la composition des gaz, et enfin influence la dissociation du CO
- enfin, la température de figeage et le taux de dissociation du CO₂

Afin de séparer autant que possible l'influence de ces deux premiers paramètres, la composition de référence est celle du combustible sec, et l'humidité sera prise en compte par un apport d'eau. Etant donné que l'humidité globale n'est pas nécessairement celle qui régit l'équilibre thermodynamique, une partie de la vapeur d'eau pouvant, pour des raisons de cinétique ou de géométrie, ne pas réagir, nous introduisons un paramètre complémentaire, égal à la fraction de l'eau intervenant dans la combustion. Physiquement, cela signifie qu'une fraction de l'eau n'est pas dissociée : elle doit être vaporisée mais joue sur la composition des gaz comme si elle était inerte.

Une estimation de la composition du gaz de synthèse et de son PCI (valeurs rapportées au gaz sec) est donnée dans le tableau ci-dessous.

	[CO]	[H ₂]	[CH ₄]	[CO ₂]	[N ₂]	PCI MJ/m ³ N
Charbon bois	28-31	5-10	1-2	1-2	55-60	4,6-5,6
Bois 12 % humide	17-22	16-20	2-3	10-15	50-55	5-5,85
Paille de froment	14-17	17-19	-	11-14		4.5
Estimation-type	19-15	15-20	3-5	10-15	40-50	4-6

1- Unités de mesure et chiffres clés : Pouvoir calorifique

Sans entrer dans les formules chimiques de combustion, il est indispensable de connaître les pouvoirs calorifiques des combustibles.

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous la pression atmosphérique normale, de l'unité de combustible, celui-ci ainsi que les produits de combustion étant à 0 °C.

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur exprimée en kWh ou MJ, qui serait dégagée par la combustion complète de un (1) Mètre Cube Normal de gaz sec dans l'air à une pression absolue constante et égale à 1,01325 bar, le gaz et l'air étant à une température initiale de zéro (0) degré Celsius, tous les produits de combustion étant ramenés à la

température de zéro (0) degré Celsius (c'est à dire à 0°C et sous une pression de 1 013 mbar). On distingue 2 pouvoirs calorifiques :

$$\text{PCS} = \text{PCI} + \text{Chaleur latente d'évaporation.}$$

* PCS = Pouvoir Calorifique Supérieur. C'est la quantité de chaleur exprimée en kWh ou MJ, qui serait dégagée par la combustion complète de un (1) Mètre Cube Normal de gaz. L'eau formée pendant la combustion étant ramenée à l'état liquide et les autres produits étant à l'état gazeux.

* PCI = Pouvoir calorifique inférieur. Il se calcule en déduisant par convention, du PCS la chaleur de condensation (2511 kJ/kg) de l'eau formée au cours de la combustion et éventuellement de l'eau contenue dans le combustible.

* Chaleur latente de vaporisation. La combustion d'un produit génère, entre autres, de l'eau à l'état de vapeur. Pour la vaporisation de 1 kg d'eau, 2 511 kJ/kg sont nécessaires. Cette énergie se perd avec les gaz de combustion évacués par la cheminée à moins de condenser la vapeur d'eau et d'essayer de récupérer la chaleur s'y étant accumulée. Certaines techniques permettent de récupérer la quantité de chaleur contenue dans cette eau de combustion en la condensant (chaudières à condensation).

→ Unité : [kJ/kg(n) de combustible] ou [kJ/m³(n) de combustible]

→ Remarque : (n) signifie que toutes les réactions se produisent dans les conditions normales de température et de pression.

Le pouvoir calorifique est dit *inférieur (PCI)* quand l'eau résultant de la combustion de l'hydrogène et des hydrocarbures est supposée à l'état de vapeur dans les produits de combustion.

Le pouvoir calorifique est *supérieur (PCS)* quand cette eau de combustion est ramenée à l'état liquide dans les fumées.

$$\text{PCS} - \text{PCI} = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot L_v$$

Avec $L_v = 2500 \text{ kJ/kg}$ aux CNTP

Masse d'eau contenue dans les fumées :

Elle dépend de la quantité d'hydrogène présente dans le combustible

Exemple : $m_{(\text{H}_2\text{O})} = 1,6 \text{ kg}$ dans les fumées pour la combustion de 1 m³(n) de gaz naturel

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) désigne le dégagement maximal théorique de chaleur qu'on peut tirer d'un combustible lors de sa combustion.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) ne prend pas en compte la chaleur de condensation de la vapeur d'eau qui se dégage lors de la combustion. Ce PCI est souvent employé pour comparer l'intérêt calorifique de différents combustibles. Il peut être exprimé en mégajoules par kg (MJ/kg) ou en kWh/kg, sachant que 1 kWh = 3,6 MJ.

Pour produire de l'énergie, il faut de grandes quantités de biomasse car son PCI n'est globalement pas très élevé⁽²⁾ :

- Paille : 14,3 MJ/kg ;
- Bois (dans la nature) : 10,8 MJ/kg ;
- Déchets urbains, bagasse (résidu fibreux de la canne à sucre) : 7,77 MJ/kg.
- Notons que le pouvoir calorifique du bois est directement lié à son taux d'humidité. Des granulés de bois dont le taux d'humidité est très faible (5 à 10%) a un PCI bien meilleur, de l'ordre de 18 MJ/kg. A titre de comparaison, le PCI du fioul domestique avoisine 42 MJ/kg (26 MJ/kg pour la houille).
- La biomasse couvre près de 10% des besoins mondiaux en énergie. Deux tiers de la consommation mondiale d'énergie issue de la biomasse sont consacrés à la cuisine et au chauffage dans les pays en voie de développement⁽³⁾.

La quantité d'énergie à récupérer sous forme de vapeur est le produit de la masse M des déchets par son pouvoir calorifique (PCI) et par le rendement thermique R du four :

$$E_v = M \times \text{PCI} \times R$$

2- Généralités sur la réaction de combustion

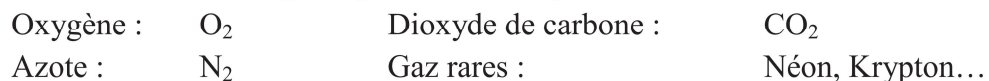
2.1. Définition

La combustion est une réaction chimique d'oxydation *exothermique*.



2.2. Nature et composition de l'air comburant

Le comburant est l'air atmosphérique dont la composition est la suivante :



En combustion, pour déterminer les quantités d'air théoriques, on utilise les pourcentages suivants :

	% en Masse	% en Volume
O ₂	24	21
N ₂	76	79

2.3. Caractéristiques des combustibles

La composition générale des combustibles courants est donnée dans le tableau suivant.

	SOLIDE	LIQUIDE	GAZ Hydrocarbures
Constituants	C, H ₂ O, Cendres	C ; H ₂ ; S	Mélanges C _n H _m , N ₂ , CO ₂
Combustibles courants	Charbons, Anthracites, Bois	Fioul Domestique Fiouls Lourds n°1 et 2	Gaz naturels, Butane et Propane commerciaux, Air propané

Exemple :

Bois « sec » : en moyenne 19% d'eau, 1% de cendres, 40% de Carbone, 5% d'Hydrogène, 35% d'Azote et d'Oxygène, mais la teneur en eau peut varier de quelques pour cents.

2.4. Produits de combustion (fumées)

Les produits de combustion (fumées) sont constitués de :

<u>Principalement :</u>		<u>Eventuellement :</u>	
1. Dioxyde de carbone :	CO ₂	4. Oxyde de soufre	SO ₂
2. Vapeur d'eau :	H ₂ O	5. Oxygène :	O ₂
3. Azote :	N ₂	6. Monoxyde de carbone :	CO
		7. NOx :	NO, NO ₂
		8. Hydrogène libre :	H ₂
		9. Imbrûlés solides ou gazeux	

La présence et le pourcentage de ces constituants présents dans les produits de combustion permettront :

- a) De définir le type de combustion
- b) D'envisager les risques potentiels :
 - d'asphyxie pour les personnes
 - de corrosion du matériel (chaudière, conduit de fumées)
 - de pollutions atmosphériques
- c) D'affiner les réglages du brûleur et d'améliorer les rendements.

* Compléments sur les NOx (Oxydes d'azote)

L'azote de l'air reste globalement neutre dans la combustion. Une infime partie est oxydée. Ils ne sont pas pris en compte dans les équations de combustion classique, mais sont à l'origine des pluies acides par formation d'acide nitrique. C'est pourquoi des textes de loi limitant les rejets de NOx existent selon le combustible et la puissance.

3 - Exemple pratique : Détermination du PCI des déchets de biomasse

La partie organique combustible des déchets de biomasse est constituée essentiellement de carbone (C = 12), d'hydrogène (H = 1) et d'oxygène (O = 16), d'où l'écriture d'une formulation chimique que l'on met sous la forme CH_xO_y. Pour déterminer les valeurs de x et de y, il faut disposer de la composition chimique fournie par l'analyse chimique.

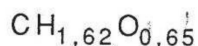
A titre d'exemple : L'analyse chimique des déchets, effectuée sur le produit sec (séchage à 130°C), a fourni les résultats suivants :

C: 37%		} Total 100 %
H: 5%	Total 74 %	
O: 32%		
Autres (incombustible)	26%	

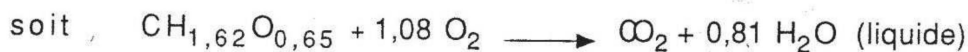
$$x = \frac{H}{C} \text{ (en moles)} = \frac{5/1}{37/12} : \frac{5}{3,085} = 1,62$$

$$y = \frac{O}{C} \text{ (en moles)} = \frac{32/16}{37/12} = \frac{2}{3,085} = 0,65$$

La formule chimique de la partie combustible s'écrit donc :



La détermination du LSCS par calorimétrie adiabatique a fourni la valeur 2500 kcal par kg de déchet sec, donc correspondant à 0,740 kg de matière combustible. L'équation de combustion s'écrit :



La combustion de 0,740 kg de matière organique de masse moléculaire $CH_{1,62}O_{0,65} = 24,02$ g conduit donc à la formation de $\frac{0,81 \times 18 \times 0,740}{24,02} = 0,449$ kg d'eau liquide.

Le PCI correspondant à une réaction de combustion avec formation d'eau à l'état de vapeur, sa valeur est obtenue aisément à partir de celle du PCS et de la connaissance de la valeur de la chaleur de vaporisation de l'eau (540 kcal/kg)

$$PCI = 2500 - 540 \times 0,449 = 2258 \text{ kcal/kg}$$

4- Obtention de l'énergie

L'obtention d'énergie est réalisée en refroidissant les gaz de combustion par transfert calorifique : ce refroidissement s'opère dans une chaudière. La chaleur est transmise à un fluide auxiliaire l'eau et la vapeur.

Une chaudière à vapeur est un échangeur complexe dans lequel interviennent différents modes de transmission de la chaleur.

L'échange se fait en trois phases

- échauffement de l'eau jusqu'à ébullition (économiseur)
- vaporisation de l'eau à pression et température constantes

(faisceau vaporisateur)

- élévation de la température de la vapeur, ou surchauffe (surchauffeur)

Le potentiel thermique de la vapeur peut être valorisé de trois façons

- soit dans un réseau de chauffage : la vapeur produite peut être vendue à un utilisateur extérieur (exploitant de chauffage central ou établissement industriel) situé au voisinage de l'usine d'incinération

- soit après transformation en énergie électrique. la vapeur est détendue dans une turbine à condensation couplée à un alternateur (turbo-alternateur) qui produit de l'énergie électrique, laquelle peut être vendue à la STEG ou éventuellement à un distributeur local. La production d'électricité doit être réservée aux grandes installations ;

Une solution mixte peut être adoptée : la vapeur est d'abord partiellement détendue en contre-pression dans un turbo-alternateur, ce qui assure les besoins électriques de l'usine d'incinération, puis livrée, comme dans le premier cas, à un utilisateur pour assurer les besoins thermiques.

Le choix entre les trois solutions ne peut se faire qu'en tenant compte des contraintes locales dans le cas particulier considéré. Les éléments à prendre en compte sont nombreux :

- tonnage d'O.M. a traiter annuellement ;
- existence d'utilisateurs potentiels de vapeur a une distance convenable ;
- quantité d'énergie valorisable qu'il est effectivement possible de vendre
- nécessités particulières de protection de l'environnement

La quantité d'énergie a récupérer sous forme de vapeur est le produit de la masse M des déchets par son pouvoir calorifique (PCI) et par le rendement thermique R du four :

$$E_v = M \times \text{PCI} \times R$$

En retranchant de cette valeur, la consommation propre de l'usine et les pertes liées a sa transformation pour la vente, on obtiens la quantité d'énergie nette disponible au départ usine.

La récupération d'énergie est liée a certains facteurs :

- la masse KM des déchets a traiter :
- la récupération n'est pas justifiée si $M < 50\,000$ t/an ;
- la récupération est possible si $50\,000 \text{ t/an} < M < 120\,000$ t/an et ceci pour des ordures a PCI élevé ;
- la récupération s'impose toujours si $M > 120\,000$ t/an, si le PCI est élevé, et l'intérêt économique croit avec la taille de l'usine.

Le seuil de l'intérêt économique est fonction du produit M x PCI et de la solution choisie.

- Le pouvoir calorifique des déchets : les O.M. sont toujours plus moins humides (30 % d'eau), ce qui abaisse le PCI. Pour les PCI faibles (1200-1600 kcal/kg) le fonctionnement du four est instable, le débit de vapeur subit donc des fluctuations importantes non souhaitables. La récupération d'énergie ne sera intéressante que pour des usines ta grande capacité utilisant un combustible d'appoint qui régularise le débit calorifique.

- pour les PCI moyens et 'forts (> 1600 kcal/kg), l'énergie recueillie croit linéairement en fonction du PCI et le débit de vapeur est stable. La récupération s'impose économiquement des que la capacité de l'usine est importante.

- Le rendement thermique du groupe four-chaudière son expression approchée est :

$$R = \frac{Q_v}{Q_v + P_{IM} + P_{cf}}$$

Q_v quantité d'énergie délivrée par la chaudière

P_{IM} : pertes par imbrulés dans les mâchefers

P_{cf} : pertes par chaleur sensible dans les fumées

Par construction, ce rendement peut varier de 50 a 70 %.

Application N°2 : Expression de la quantité de vapeur fournie par une chaudière

L'application du principe de la conservation de l'énergie permet d'obtenir l'expression de l'énergie calorifique EV recueillie par la chaudière en fonction de la masse M de déchets, du PCI et du rendement thermique R du groupe four-chaudière :

$$E_v = M \times \text{PCI} \times R = \Delta H \cdot Q_v$$

Q, est la quantité de vapeur fournie, en kg

ΔH est la différence d'enthalpie entre la vapeur fournie par la chaudière et l'eau qui alimente cette chaudière

Le taux X de vaporisation en kg de vapeur par kg de déchet s'écrit :

donc :

$$X = x = \frac{Q_v}{M} = \frac{1}{\Delta H} \times \text{PCI} \times R$$

Les trois termes du second membre dépendent des caractéristiques de l'usine, de la qualité (PCI) des déchets traités et de l'état de la chaudière.

Exemple numérique : avec les données numériques suivantes :

Masse d'O.M. : M = 1 kg de PCI = 1500 kcal/kg

Rendement du groupe four-chaudière : R = 0,60

Vapeur délivrée sous 20 bars à 300°C avec une eau d'alimentation à 100°C :

$\Delta H = 620$ kcal/kg

$$Q_v = X = \frac{1}{620} \times 1500 \times 0,60 = 1,450 \text{ kg de vapeur}$$

Energie électrique (en kwh) recueillie aux bornes d'un groupe turbo-alternateur absorbant 1 kg de vapeur,

avec $\Delta H_1 = 215$ kcal, chute enthalpique théorique de la vapeur au cours de sa détente.

$R_1 = 0,80$; rendement interne de la turbine et sachant que :

1 kwh vaut 860 kcal (1 wh = 3600 j = $\frac{3600}{4.18}$ cal = 860 cal

$$Q_e = \frac{\Delta h_1 \times Q_v \times R_1}{860} = \frac{215 \times 1 \times 0,80}{860} = 0,2 \text{ kwh}$$

Soit, pour 1,450 kg de vapeur (produite par 1 kg d'O.M.)

$$0,2 \times 1,450 = 0,290 \text{ kWh}$$

Pour 1 t d'O.M. incinérée, la quantité d'électricité produite est donc de 290 kwh dans l'exemple choisi.

III- LE RENDEMENT ENERGETIQUE

Deux types d'énergie sont produits dans une usine d'incinération : de la chaleur et de l'électricité. Chacune obéit à un mode de production propre et leurs rendements se révèlent inégaux.

- la production de chaleur. Pour cela de l'eau, chauffée par la combustion des déchets, suffit. Le rendement se révèle alors très bon : 70 à 80 % de la chaleur de combustion sont récupérés après incinération, soit environ 1 500 kilowatts/heure thermiques par tonne d'ordures. Il faut bien sûr lui trouver ensuite une utilisation dans les environs de l'usine. (Voir le dossier : « Mieux utiliser la chaleur »).
- la production d'électricité. L'échangeur doit contenir de la vapeur à la plus haute pression possible. Cette vapeur est dirigée vers une turbine qui entraîne un générateur électrique. L'électricité produite peut être apportée au réseau électrique toute l'année. Le rendement énergétique est de l'ordre de 20 à 25 % (300 à 400 kilowatts-heure).

Il existe une meilleure solution que les productions de chaleur seule ou d'électricité seule. C'est la cogénération (électricité + chaleur). Pour cela, on utilise la chaleur résiduelle de la vapeur

sortant de la turbine de production d'électricité. Le rendement de la cogénération atteint alors 50 à 60 %.

Dans un incinérateur, il faut 5 à 7 tonnes de déchets pour obtenir l'équivalent d'une tonne de fioul.

IV-Les usines d'incinération

L'incinération des ordures se révèle d'abord un moyen d'en éliminer une bonne partie : 90 % du volume initial part en fumée. Il s'agit d'un progrès en termes sanitaires par rapport aux immenses décharges d'autrefois.

Une usine d'incinération comporte un four et une chambre de postcombustion. Dans le four, les déchets subissent une décomposition par la chaleur (pyrolyse) qui produit des gaz combustibles. Ceux-ci sont brûlés à 800-900 °C dans la chambre de postcombustion. L'énergie est récupérée à la sortie du four, dans les fumées, grâce à un échangeur de chaleur dans lequel circule de l'eau ou de la vapeur surchauffée.

En fonction des besoins, les incinérateurs peuvent tous être équipés d'un système de récupération d'énergie et de traitement des rejets.

1- Types de fours

Qu'il s'agisse :

- d'incinérer quelques kilos ou quelques tonnes de déchets,
- d'une installation manuelle ou entièrement automatisée,
- de déchets solides, gazeux ou liquides.

Les solutions proposées en fonction de l'application sont :

- four tournant,
- four à grille,
- four statique.

Four tournant

Le four tournant permet de traiter dans les meilleures conditions des déchets industriels très variés du type déchets industriels spéciaux, banals, hospitaliers, etc. Qu'ils soient sous forme solide, boueuse, pâteuse, liquide ou gazeuse.

Les déchets arrivent à une cadence comprise entre 0,3-5 tonnes/heure. Ceux-ci entrent dans le tambour rotatif à +/- 1200 °C. Ce type d'incinérateur est utilisé pour la combustion de déchets dangereux, médicaux et chimiques. Il est également possible de brûler les déchets domestiques, mais l'installation doit rester rentable.

Avantage :

- brassage efficace des déchets solides,
- retournement régulier des solides sur le réfractaire chaud, avec oxygénation favorable des déchets,
- ajustement du temps de séjour des solides dans le tambour,

- pas d'organe mécanique soumis au contact simultané des cendres et de la température,
- extraction des cendres en continu.

Four à grille

Capacité : 250 kg/h à 3 T/h

Le Four à grille permet de traiter des déchets solides tels que déchets hospitaliers, ordures ménagères...

Les déchets, chargés dans une trémie, sont introduits à intervalles réguliers dans le foyer au moyen du tiroir-poussoir constituant le fond de la trémie.

Cette gamme bénéficie de tous les dispositifs nécessaires à une exploitation entièrement automatisée (pouvant fonctionner 24h/24h).

Fours statique (fixe)

Dispositif d'incinération utilisé pour les déchets liquides ou gazeux qui sont introduits dans le foyer par des brûleurs qui assurent à la fois atomisation et combustion. Ce type de four est sous la forme d'une enceinte verticale munie d'un revêtement réfractaire (briques), les déchets à traiter ou les effluents sont pulvérisés autour de la flamme stable d'un brûleur.

C'est un four avec une chambre à combustion statique pour la destruction thermique de fumées, gaz, et liquides dangereux. Ce système n'est pas approprié pour l'incinération de déchets solides. Dans cette chambre de combustion statique, seuls les déchets liquides et gazeux sont autorisés.

Exemples

Four à flamme ascendante,

Four à flamme spirale,

Four à flamme inversée.

2- Le traitement des rejets

L'incinération génère également des sous-produits :

- des mâchefers (résidus solides de combustion) qui, s'ils respectent des exigences de qualité définies par arrêté ministériel, peuvent être ensuite valorisés en matériaux routiers (200 à 250 kg de mâchefers générés par tonne de déchets incinérés) ;
- des fumées épurées ;
- des résidus d'épuration des fumées qui doivent ensuite être traités (20 à 30 kg générés par tonne de déchets incinérée) ;
- des métaux ferreux et non ferreux (aluminium, plomb, zinc...), captés et recyclés ;
- pour certaines installations, des rejets liquides.

a- Les fumées

Conformément à la réglementation européenne et aux dispositions du droit français, l'Unité de Valorisation Énergétique (UVE) est équipée d'un système d'épuration des fumées. Il existe trois types de traitement des fumées : sec, semi-humide et humide. L'épuration des fumées par traitement sec ou semi-humide comprend quatre étapes : le

dépoussiérage, la neutralisation des gaz acides, le captage des dioxines et furanes et le traitement des oxydes d'azote.

b- Les eaux

Pour certaines UVE, il n'y a aucun rejet liquide polluant dans l'environnement. Les eaux utilisées dans le procédé de traitement sont utilisées en circuit fermé ou recyclées. Les eaux de pluie sont collectées par un réseau spécifique et traitées. Elles sont soit réutilisées sur le site soit stockées pour assurer la défense incendie des équipements.

c- Les mâchefers

Les mâchefers sont les résidus solides et non toxiques recueillis en sortie du four d'incinération. Ils sont constitués de produits minéraux incombustibles : verre, oxydes et hydroxydes métalliques, silice,...

Les mâchefers représentent environ un quart de la masse de déchets introduits dans le four, soit environ 250 kg par tonne de déchets incinérés.

Ces résidus subissent les traitements suivants :

- une extraction des métaux ferreux par aimantation
- une extraction des métaux non ferreux par un système de courant de Foucault (les métaux extraits sont recyclés en sidérurgie)
- la part restante est concassée et valorisée en matériaux pour travaux routiers.

d- Les REFIOM

Les REFIOM sont des Résidus solides d'Épuration des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères. Ce sont les cendres, les particules volantes issues du dépoussiérage et les déchets pulvérulents issus du traitement des fumées.

Ils concentrent tous les polluants contenus par les fumées de combustion des ordures ménagères et représentent environ 3% du tonnage entrant.

Ces résidus ultimes sont stabilisés et stockés en Centre d'Enfouissement Technique de déchets spéciaux de classe 1, conformément à la réglementation en vigueur.

III-Avantages / inconvénients

1. Points forts

- L'incinération permet une réduction des déchets à mettre en stockage (décharge)
- A travers la production d'énergie, elle participe à la réduction de l'utilisation de ressources fossiles
- Enfin l'incinération emploie en moyenne 29 personnes en équivalent temps plein pour une unité de 100 kt/an, ce qui est plus faible que les filières de tri (en moyenne 66 ETP pour une même capacité de 100 kt/an), mais trois fois plus élevé que la filière stockage (environ 10 ETP pour 100 Kt/an). Bénéfice

environnemental et création d'emplois se conjuguent donc pour inciter, sur un territoire, à privilégier les filières de valorisation.

2. Points faibles et points de vigilance

- L'incinération suscite des craintes en raison de mauvaises pratiques passées. Comme les autres modes de traitement des déchets, l'incinération génère des émissions et notamment des polluants atmosphériques (dioxines et furanes, métaux lourds, gaz acides, poussières) qui, à haute dose, peuvent avoir un impact sur la santé (certains cancers ou troubles de la reproduction) si ces émissions ne sont pas filtrées. Les niveaux de risques apparaissent très liés aux niveaux de performances de l'épuration des fumées (émissions de métaux lourds et de substances organiques) et sont très faibles pour les installations récentes.

- L'incinération génère des craintes sur le fait qu'elle constituerait un obstacle au développement du recyclage et de la prévention

L'incinération demande des investissements lourds, dépendant notamment de la taille de l'installation et du taux d'occupation de l'incinérateur au regard de sa capacité. Certains craignent que le dimensionnement initial de l'installation puisse donc constituer, s'il est trop important, un frein ou une moindre incitation au développement de la prévention ou du recyclage des déchets. Il pourrait être en effet plus intéressant pour la collectivité de traiter un maximum de déchets pour amortir les coûts de l'installation par la revente d'énergie, par exemple.

Conclusion

L'incinération n'a pas vocation à supplanter les autres modes de **valorisation** des **déchets**. Solution industrielle nécessaire et indispensable à une gestion des **déchets** respectueuse de l'environnement, elle s'intègre dans un processus multi-filières où les différents modes de **valorisation** se complètent en vue d'une optimisation écologique et économique.

La combustion du bois a été la principale source de chaleur utilisée par l'homme avant que le charbon, puis le pétrole et le gaz, ne deviennent pour un temps, plus disponibles et plus attractifs.

Pour limiter les rejets de gaz à effet de serre, et en prévision de la raréfaction et du renchérissement des combustibles fossiles, un nouvel essor est donné à l'utilisation du bois pour le chauffage ou la cogénération, tant pour les applications industrielles que dans les secteurs tertiaire, individuel et collectif.

Il faut cependant noter que la combustion émet des poussières et des gaz nocifs (CO, COV, HAP), qui ne peuvent être éliminés que sur des installations de forte capacité.

Chapitre 3 :

Torréfaction de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, la notion de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Pour limiter les rejets de gaz à effet de serre, et en prévision de la raréfaction et du renchérissement des combustibles fossiles, un nouvel essor est donné à l'utilisation du bois pour le chauffage ou la cogénération.

Le bilan quantitatif CO₂ de l'utilisation de biomasse comme source d'énergie est nul à condition que toute l'énergie qu'il a fallu dépenser pour extraire du combustible de la biomasse soit elle aussi d'origine biomasse et à condition que le procédé d'extraction ne libère pas d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane, qui a un pouvoir réchauffant environ 21 fois plus important que CO₂. L'énergie tirée de la biomasse peut ainsi dans la plupart des cas être considérée comme une énergie renouvelable.

I. Procédé de torréfaction de la biomasse

1. Principe

La torréfaction est un procédé de pyrolyse qui se produit à des températures de 250-320°C. Ce procédé est réalisé sous des conditions atmosphériques et en présence d'une quantité minime d'oxygène (ou en l'absence d'oxygène) et parfois sous balayage d'azote, afin d'éviter une combustion spontanée. La torréfaction supprime l'humidité et les composés organiques volatils de la biomasse brute. Elle permet de concentrer l'énergie dans le matériau et de rendre ce dernier plus cassant et donc plus facilement broyable pour une utilisation en poudre. Le produit obtenu se présente sous forme de matériel sec et noirci, connu sous le nom de biomasse torréfiée ou biocharbon. 70% de la masse est conservée comme produit solide et contient environ 90% de son contenu énergétique initial.

La torréfaction de biomasse est un procédé tout à fait analogue à la torréfaction de café. Cependant, dans le cas de la torréfaction du bois, la problématique de la fluidité de l'entraînement de la matière dans le procédé est beaucoup plus aiguë, du fait que les grains de café se présentent sous une forme idéale de bille.

2. Domaines d'application

Un premier domaine d'application de la torréfaction est une étape de préparation de la biomasse entre le séchage et l'étape de production des biocarburants de 2^{ème} génération par voie thermo-chimique, en particulier la conversion de biomasse en carburant liquide par gazéification. Les gazéificateurs acceptent mal l'humidité et les variations de paramètres de la biomasse. De plus, les coûts de broyage sont très importants. Les recherches menées sur l'optimisation de la préparation de la biomasse ont démontré que le bois torréfié présentait des caractéristiques très avantageuses à cet égard : facilité de broyage, caractère hydrophobe, variabilité moindre de composition que le bois naturel en fonction des différentes essences.

Un deuxième domaine d'application de la torréfaction de biomasse est la production d'un co-combustible pour des centrales au fuel ou au charbon.

Un troisième domaine d'application est la production de bois décoratif par agglomération.

* Production d'un biocombustible

La torréfaction produit un biocombustible solide dont les capacités de manutention, de broyage et de co-combustion sont supérieures aux autres biocombustibles solides.



La densité énergétique des granules de biocharbon est de 15 GJ/m³ et de 9.5 GJ/tonne pour les copeaux de bois ayant un taux d'humidité de 50% HR.

Les granules de biocharbon peuvent être produites à partir de matières premières à faible coût tel que des résidus forestiers, du bois de construction, de rénovation et de démolition (CRD), de l'écorce et des déchets agricoles.

Les procédés de torréfaction ne sont pas tous identiques et ne peuvent tous produire les mêmes produits. Plusieurs noms sont utilisés pour décrire les différents produits résultant de la torréfaction de la biomasse (figure 1): Biocharbon, Granules torréfiées, Biomasse torréfiée, Biocoke, Biochar.

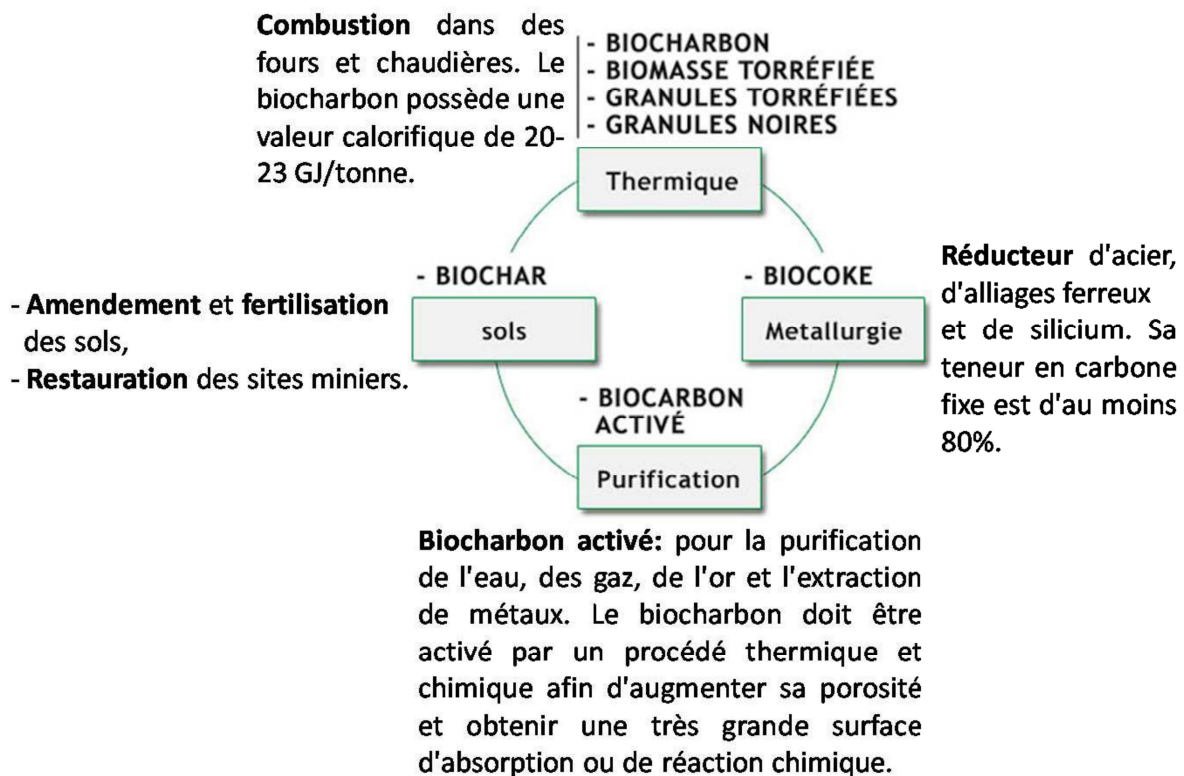


Figure 1 : Les différents produits de la torréfaction de la biomasse

3. Etapes du procédé

Dans une première phase, un prétraitement thermique sous forme d'un séchage poussé est effectué pour ajuster l'humidité de la biomasse. Ce prétraitement libère l'eau, en ce compris l'eau liée, qui est à l'origine du retrait du bois. Le bois séché comporte de 10 à 15% d'humidité en surface et environ 20% à coeur.

Dans une seconde phase, on fragilise la biomasse par un traitement thermique doux, qui est la torréfaction proprement dite, en l'absence d'air, et qui sera suivie d'un broyage permettant d'ajuster la granulométrie à la valeur désirée avant l'entrée dans un four de pyrolyse par exemple. Dans cette étape, on « dégrade » les lignines, les celluloses et les hémicelluloses du bois. Les réseaux polymères de lignine sont en fait plutôt réarrangés que dégradés. Ce phénomène qui apparaît à partir de 160°C confère au bois un caractère hydrophobe. Le bois torréfié a ainsi son équilibre hygroscopique aux alentours de 3%. (Figure 2).

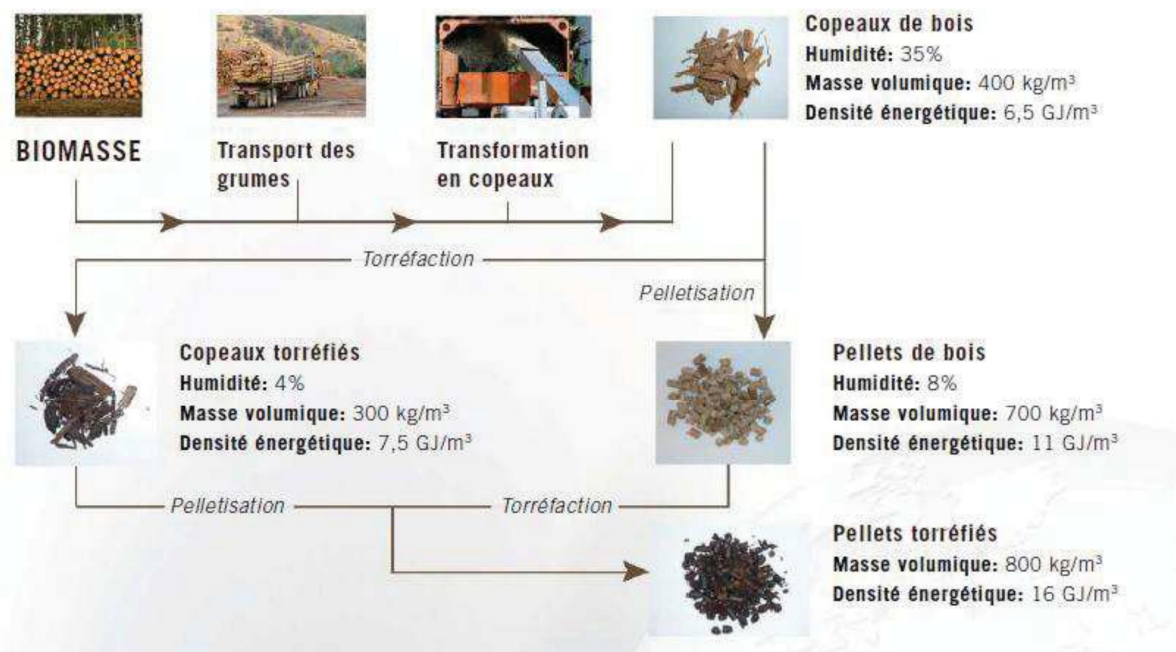


Figure 2 : Torréfaction de la biomasse

La première phase de la torréfaction, appelée communément séchage poussé, les gaz effluents sont principalement aqueux alors que dans la seconde phase, appelée torréfaction, ces gaz effluents sont de compositions diverses mais connues et surtout sont combustibles.

II. Exemple de Procédé : Biogreen

1. Schéma du principe

C'est un procédé de conversion thermochimique sans oxygène (figure 3). À basse température (250-280°C), il produit un résidu de type charbon, un bois torréfié. Le procédé Biogreen peut aussi s'appliquer à la torréfaction de résidus de biomasse agricole (paille, miscanthus, pulpe...)

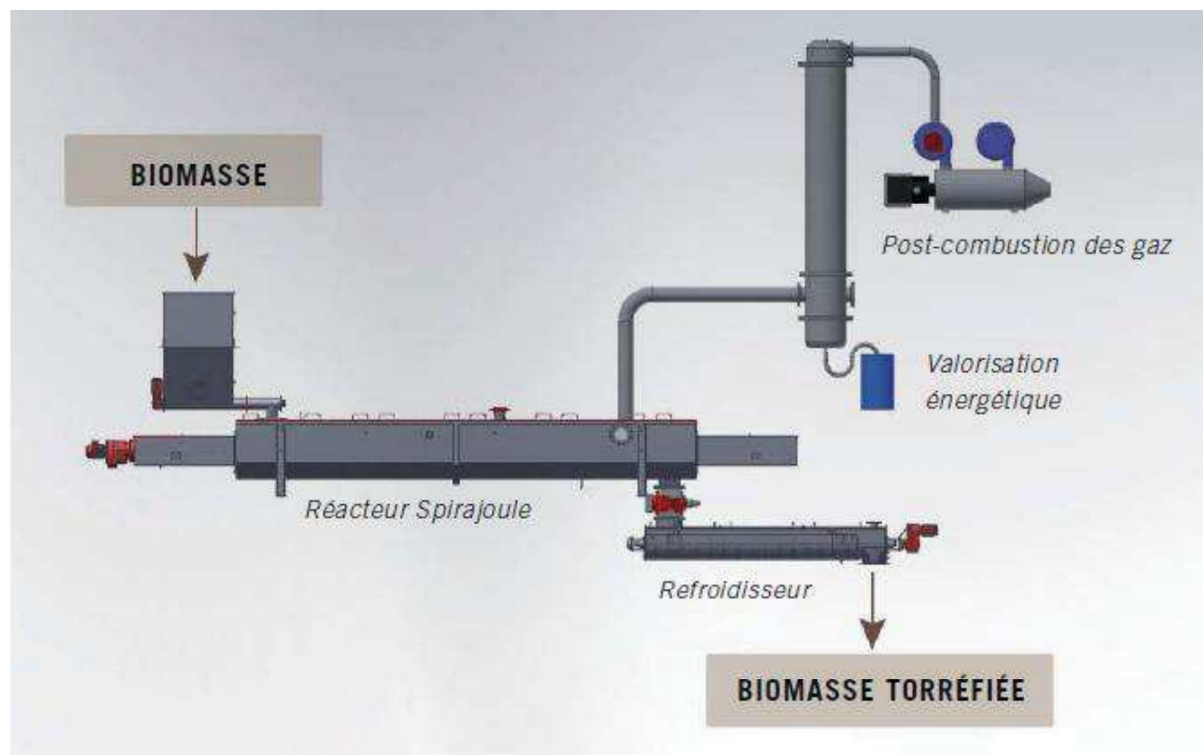


Figure 3 : Procédé et fonctionnement

(Biogreen® Thermochemical Conversion An ETIA Technology, www.biogreen-energy.com)

2. Analyse du produit

- Temps de séjour : 5-20min
- Température du procédé : 250-300°C
- Capacité : jusqu'à 1200kg/h par module
- Autres produits pouvant être traités : Paille, miscanthus

Analyses comparées d'un charbon minéral et de pellets torréfiés

	Charbon	Pellets de bois torréfiés
PCI	25 GJ/t	22 GJ/t
Cendres	10%	3%
Soufre	3%	0,1%
Azote	1,5%	0,2%
Chlore	0,05%	0,01%

3. Avantages :

- Rendement 66 à 75% de la matière entrante
- 90% du PCI de la biomasse initiale conservé
- Combustible solide homogène facilement broyable et pelletisable
- Capacité calorifique importante par unité de volume
- Faible humidité résiduelle
- Hydrophobicité, stockage facile sans reprise en humidité
- Résistance aux agents extérieurs (champignons, bactéries, parasites)
- Faible ratio O/C favorable lors de la combustion

Chapitre 4 :

Procédés de carbonisation

1. Généralités

A la différence des procédés traditionnels de carbonisation (production de charbon de bois sur le terrain), un procédé industriel de carbonisation est caractérisé par :

- une optimisation de la carbonisation tant sur la valorisation des produits que sur l'efficacité énergétique du procédé
- la production de charbon de qualité adaptée au marché
- une possibilité d'utilisation de diverses matières premières végétales
- des investissements financiers élevés et variables suivant les procédés choisis

2. Charbon

Le charbon est le produit obtenu lorsque des matériaux carbonés, d'origine végétale ou animale, sont partiellement brûlés ou chauffés. Ce procédé génère des goudrons et des matières volatiles. Par conséquent, le charbon est le produit d'un procédé thermo-chimique, appelé « pyrolyse lente » ou « distillation sèche ». Ce produit, résidu solide à taux élevé en carbone, résulte du chauffage de biomasse végétale ou animale en conditions anoxique. Charbon, gaz (condensables et incondensables) sont les produits principaux de la pyrolyse. Les condensables donnent, après condensation, des goudrons et des acides pyrolytiques. Le résidu solide peut se présenter de conglomérat, être réduit en poudre ou être compacté en granulés ou en briquette.

3. Théorie des procédés de carbonisation

La carbonisation entre en jeu lorsque la matière organique est portée à haute température (au-delà de 180 °C) sous atmosphère anoxique ou en contrôlant précisément l'apport d'air.

Le contrôle de la carbonisation permet d'optimiser la production de charbon à haut contenu énergétique. Or, la température est le facteur le plus important, contrôlant la distribution quantitative des produits de pyrolyse.

Plus la température de carbonisation augmente, plus le rendement massique en charbon diminue et ceux en liquide et gaz augmentent. (*Tableau 1*)

Tableau 1 : Rendements massiques obtenus à différentes températures pyrolyse

Conditions	Rendement massique sur sec (%)		
	Liquide	Charbon	Gaz
507 K	0	97	3
584 K	15,9	76,2	7,9
655 K	25,4	62,9	11,7
1075 K	35,0	49,0	16,0

Le charbon est produit à faible température et lente vitesse de chauffe. Lorsque la vitesse de montée en température passe de 10°C/min à 50 °C/min, le taux de condensables produits est inchangé mais le taux de gaz double et le taux de charbon diminue de près de 35 % (sur masse anhydre).

Le processus de carbonisation suit le profil de température suivant :

- 100° - 170 °C : évaporation de l'eau libre et liée contenue dans la matière.
- 170° - 270 °C : émissions gazeuses (notamment CO, CO₂) et de condensables.
- 270° - 280 °C : réactions exothermiques ; diminution des émissions de CO et de CO₂ ; augmentation des émissions de condensables.

4. Classification des procédés industriels de carbonisation

La température est un facteur prépondérant du procédé de carbonisation. De façon à initier la carbonisation et à maintenir la température requise, un apport de chaleur est nécessaire. Les procédés industriels visent à diminuer le coût de cet apport de chaleur en mettant en œuvre différents principes.

Les procédés industriels de carbonisation peuvent être classés en trois catégories

- chauffage interne avec contrôle de la combustion de la matière première
- chauffage externe,
- chauffage par contact de gaz chauds issus de la pyrolyse

a) Les procédés avec chauffage interne

L'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par la combustion d'une partie de la biomasse et des gaz générés. Ceci nécessite un contrôle permanent et rigoureux de la quantité d'air injecté dans le réacteur. Ce procédé est viable lorsque le coût de la matière première est faible (e.g déchets agricoles, de scierie, ...).

Les rendements massiques de ces procédés se situent entre 15 % et 25 % sur masse anhydre.

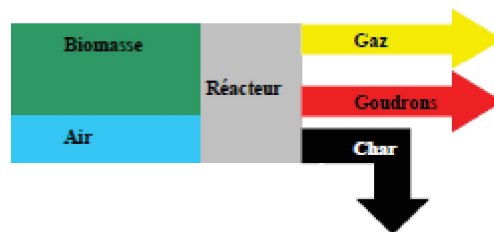


Figure 1: Schéma de principe du procédé avec chauffage interne

b) Les procédés avec chauffage externe

L'énergie nécessaire est apportée par la combustion d'un carburant ou des gaz produits par la pyrolyse à l'extérieur du réacteur. Ce procédé présente l'avantage de conserver des conditions anoxiques dans le réacteur, garantes d'une parfaite carbonisation.

Les rendements massiques de ces procédés se situent entre 28 % et 32 % (masse anhydre).

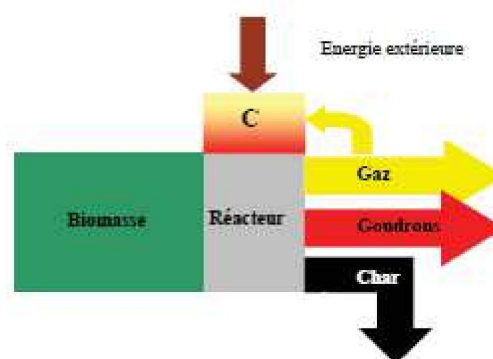


Figure 2: Schéma du principe du procédé avec chauffage externe

c) Les procédés avec chauffage par contact avec des gaz chauds

Une partie des gaz issus de la pyrolyse est brûlée dans une chambre de combustion externe les gaz issus de cette combustion sont injectés dans le réacteur, permettant ainsi l'apport d'énergie nécessaire au processus.

Les rendements en charbon et coproduits sont élevés. Ces coproduits sont récupérés par condensation. La combustion des gaz peut être aussi envisagée afin de produire de la vapeur (turbine) ou de sécher la biomasse. Ces procédés sont coûteux donc viables pour des installations importantes.

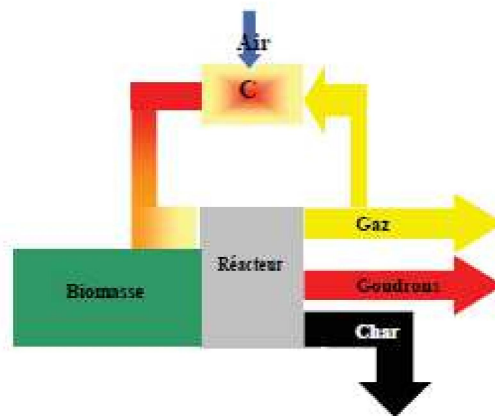


Figure 3: Schéma du principe du procédé avec chauffage per contact avec des gaz chauds.

ANNEXE



Figure 1 : Ressources génératrices de biomasse

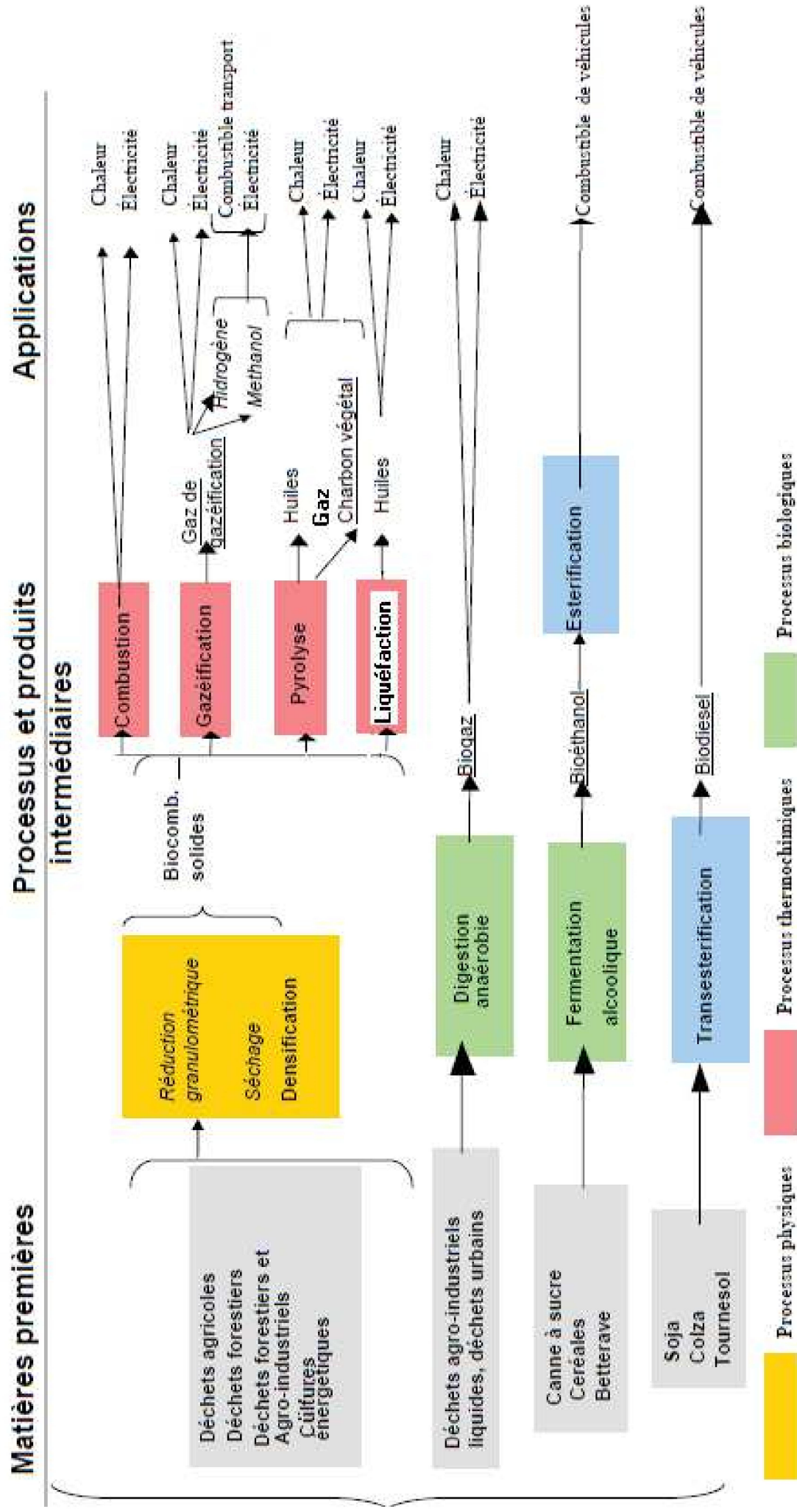
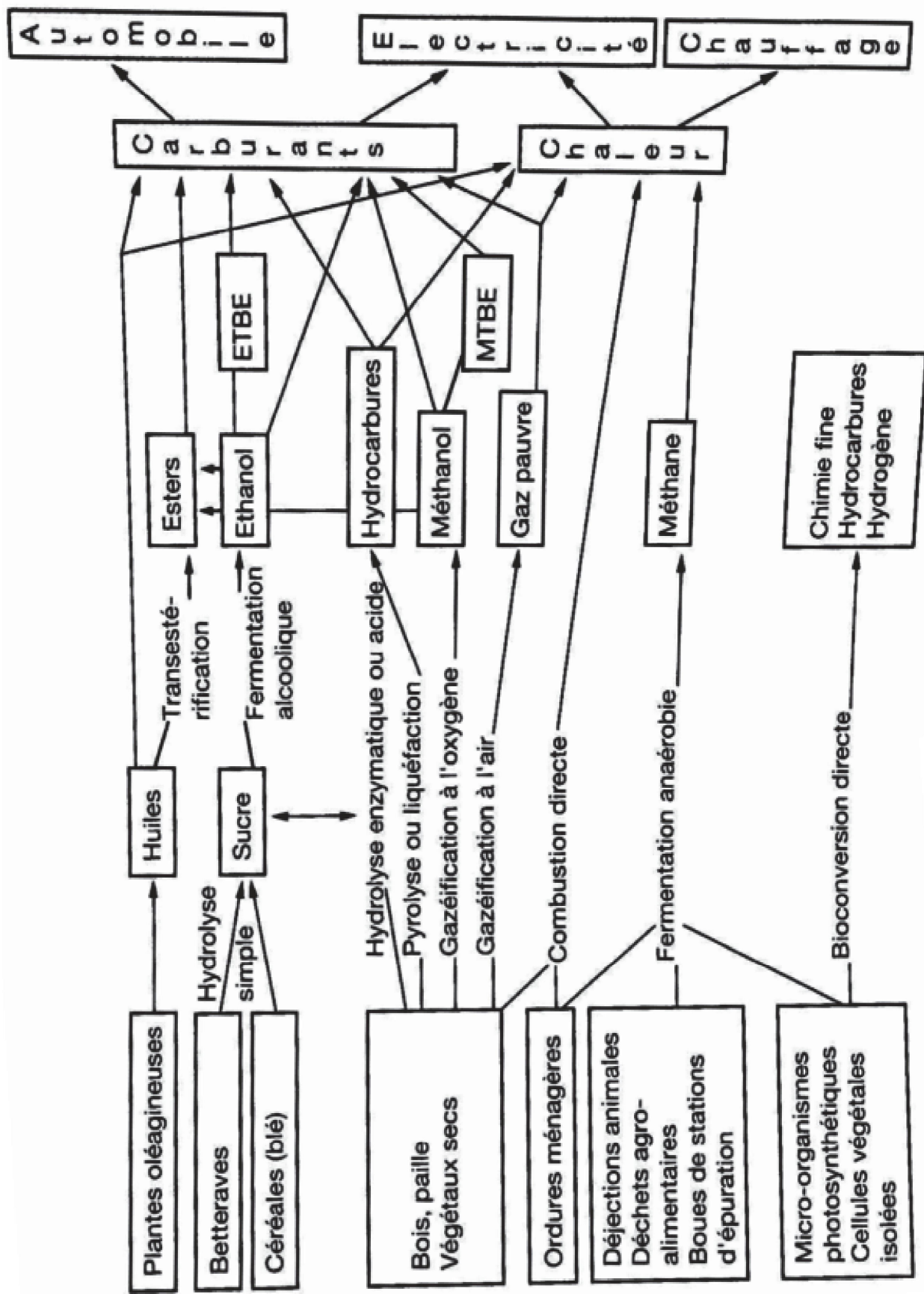


Figure 2: Processus de conversion énergétique de la biomasse (autre que les microalgues): matières premières utilisées et applications



Martin et Vanhemelrijck, 1992

Figure 3: Les filières de valorisation énergétique de la biomasse

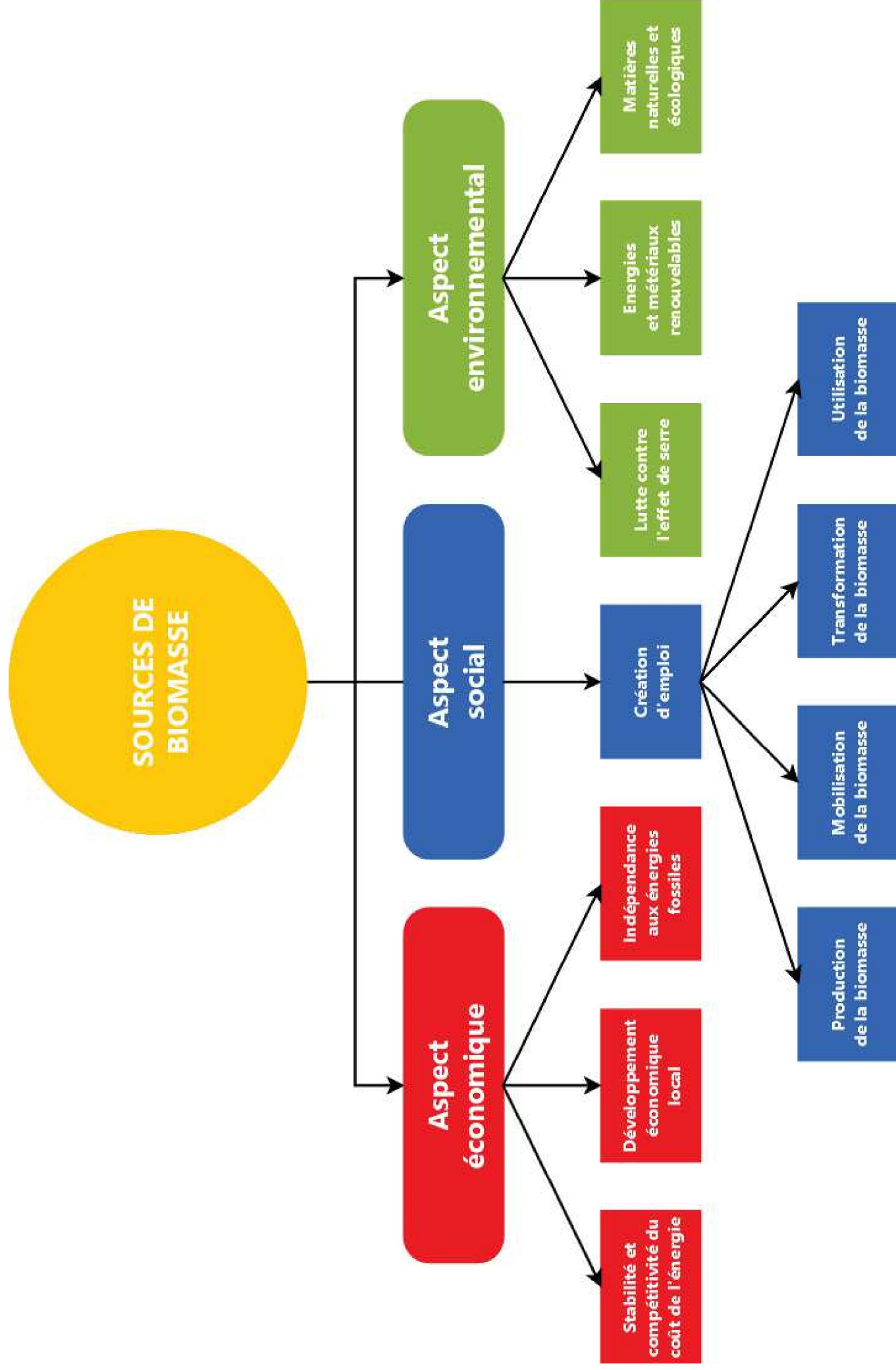
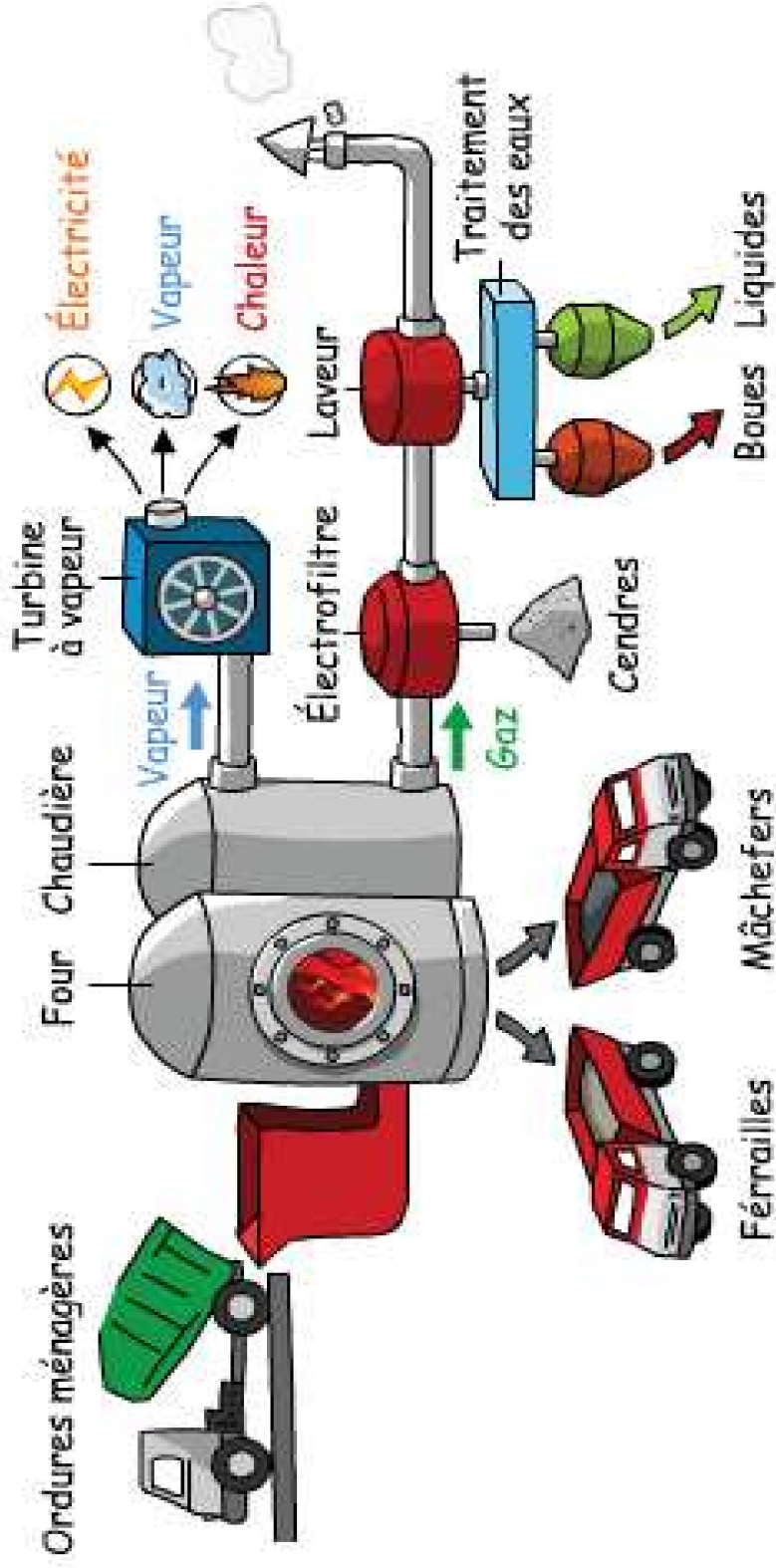
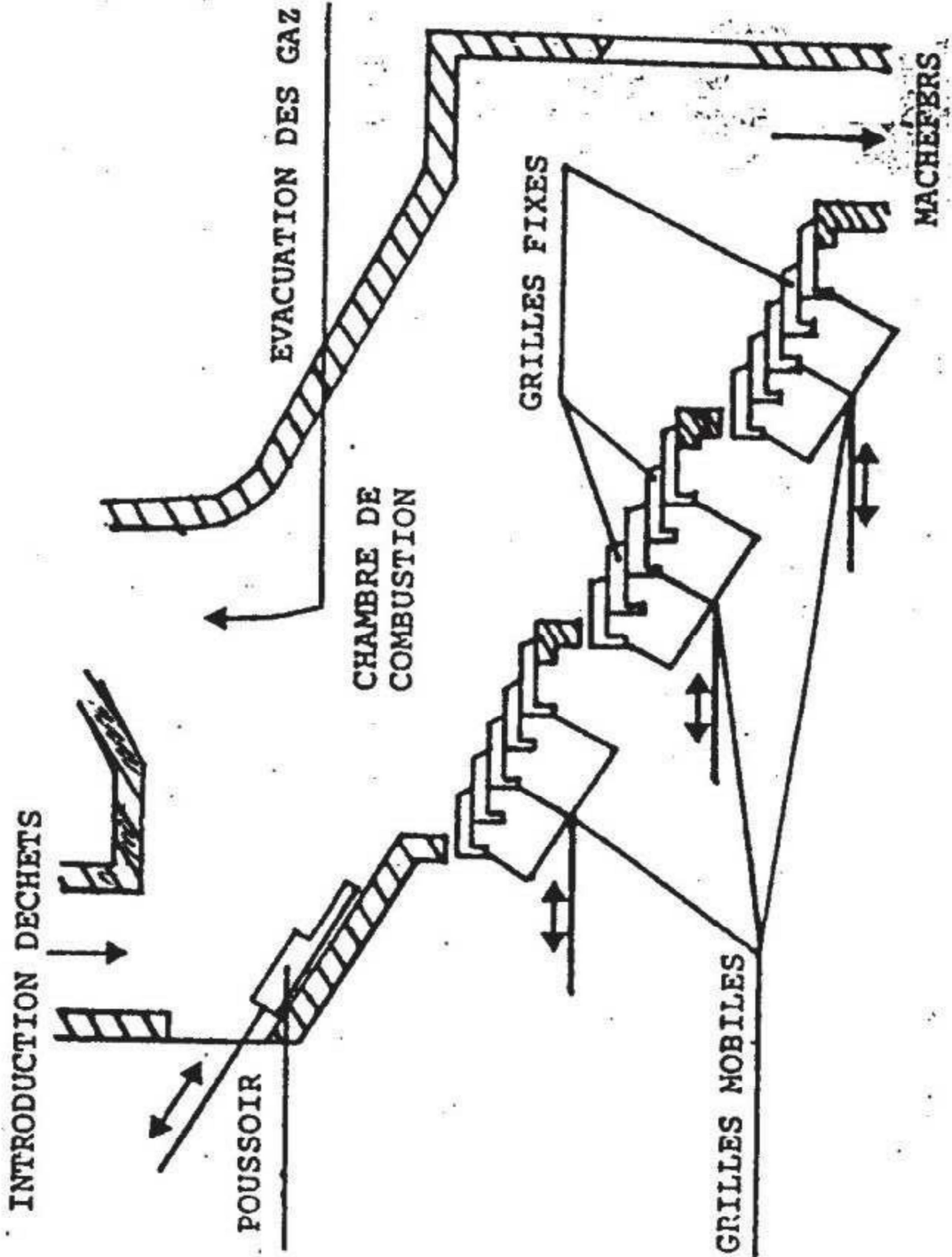


Figure 4: Avantages générés par l'usage de la biomasse



Procédé d'incinération avec valorisation énergétique



Exemple: Four à éléments de grille mobiles

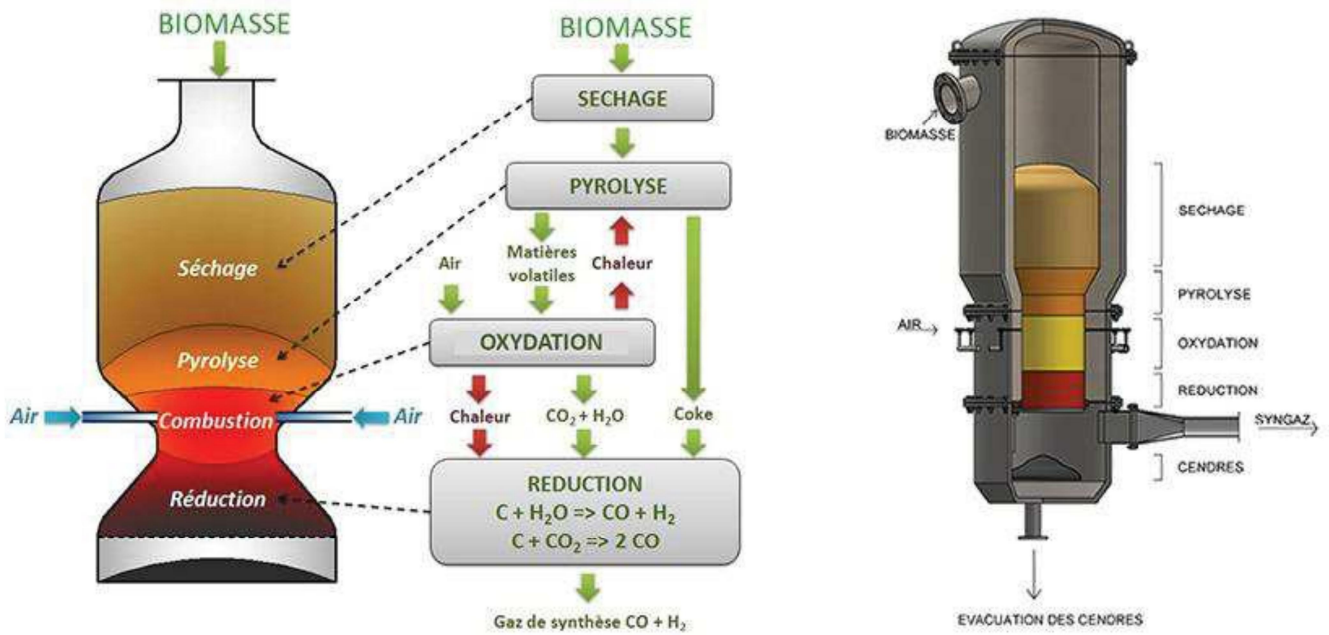


Figure 1 : Schéma du principe de la gazéification

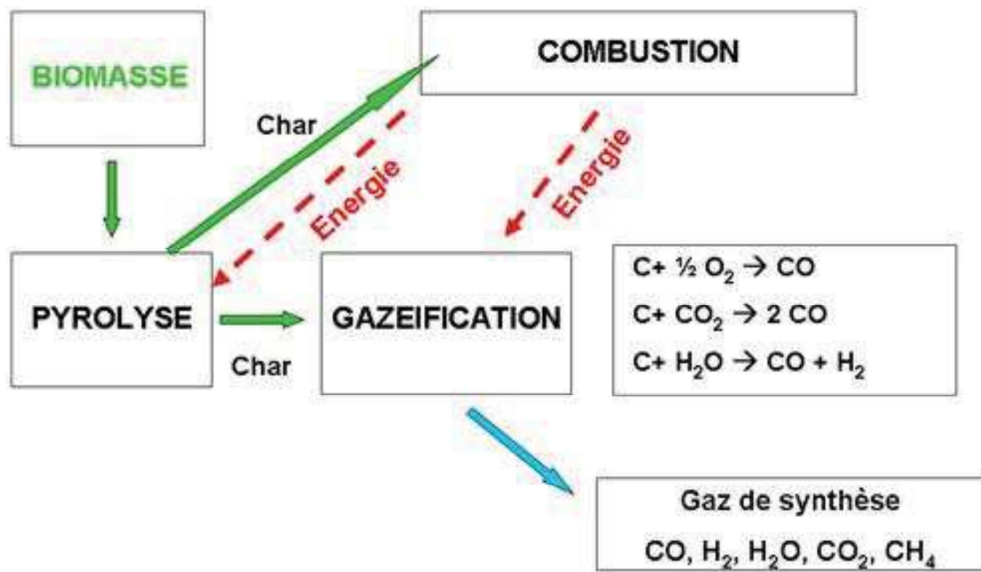


Figure 2: Procédé simplifié de gazéification

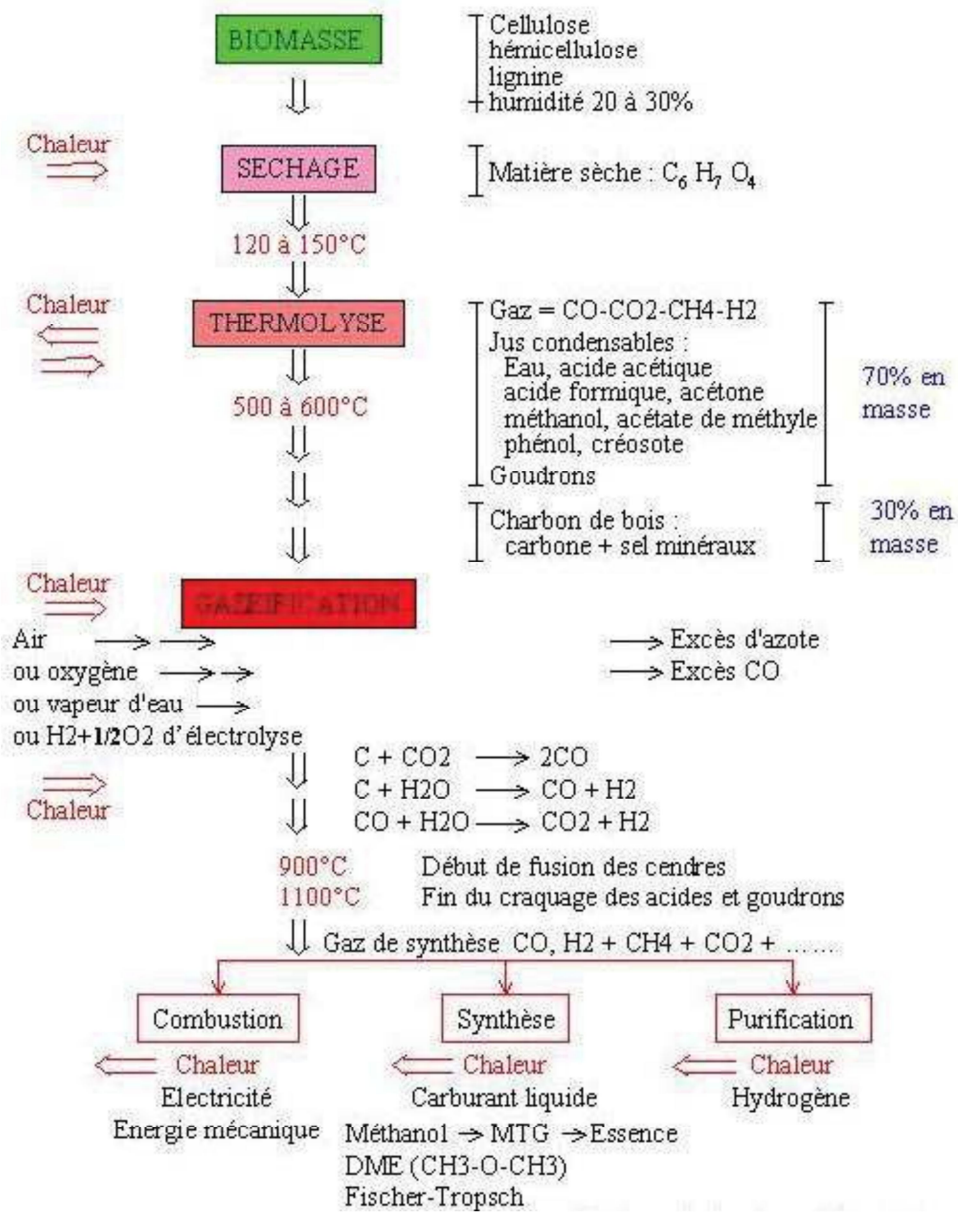


Figure 3 : Filière thermochimique de thermolyse et gazéification

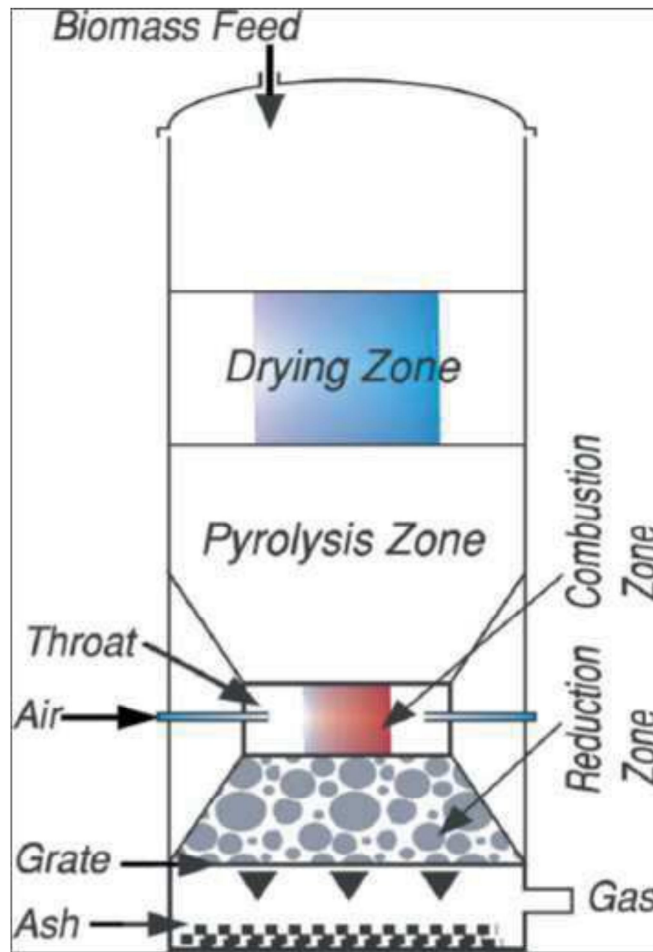


Figure 4 : La technologie de gazéification : le lit fixe à co-courant.

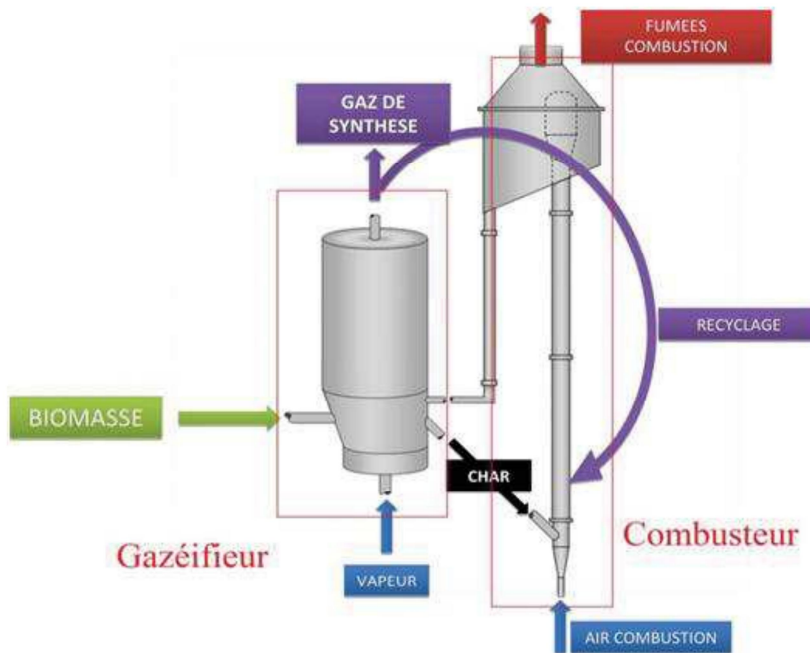


Figure5 : Les systèmes de gazéifications à lit fluidisé

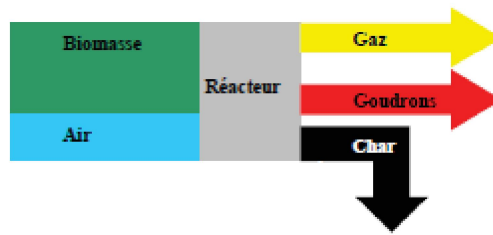


Figure 1: Schéma de principe du procédé avec chauffage interne

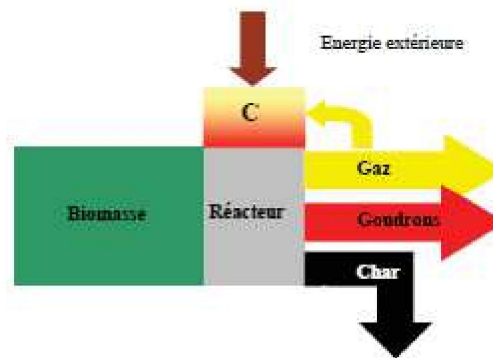


Figure 2: Schéma du principe du procédé avec chauffage externe

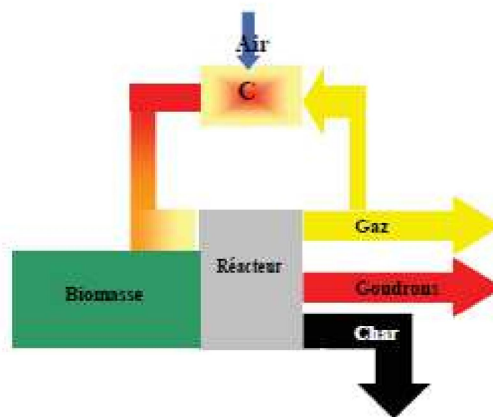
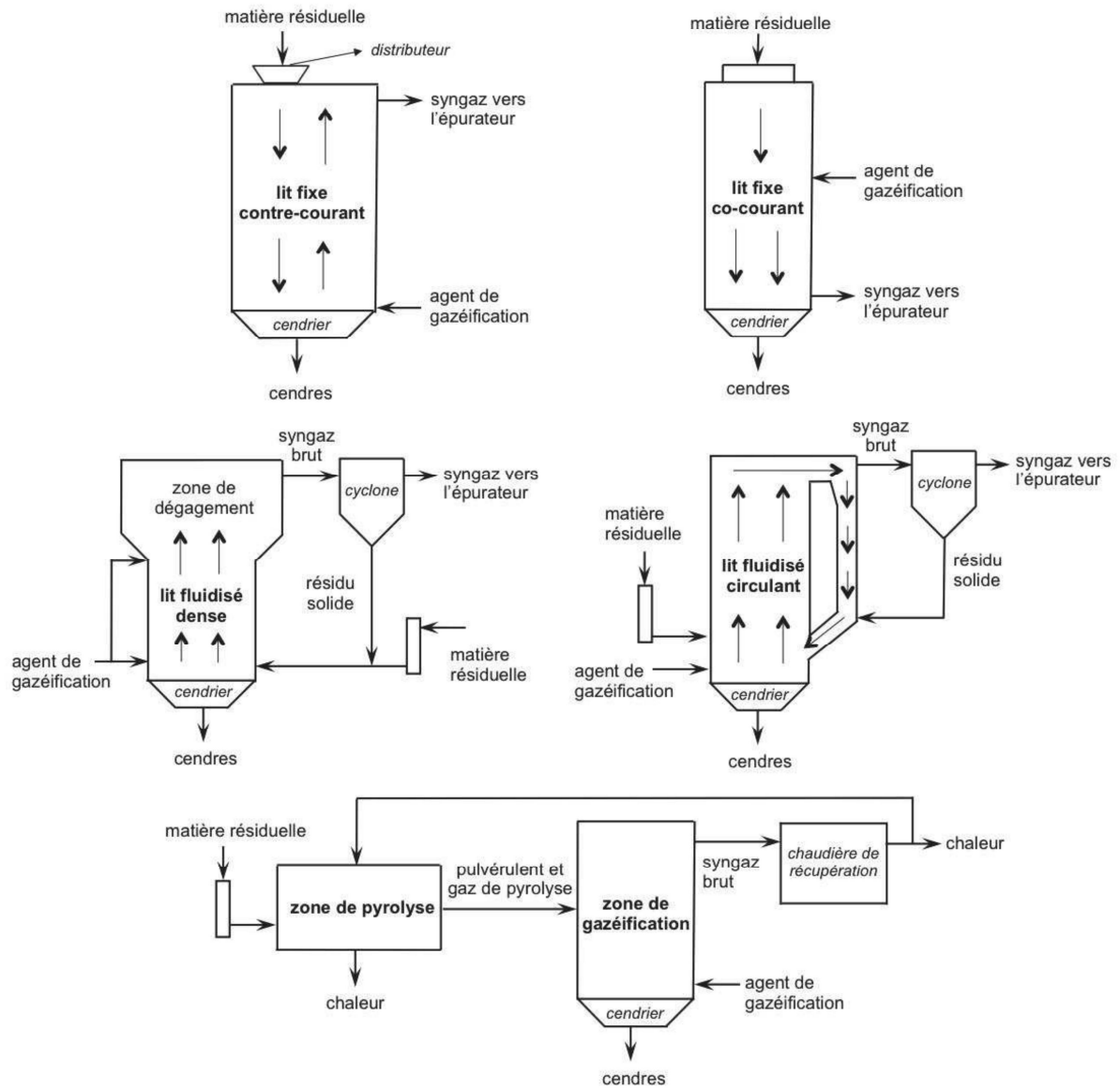


Figure 3: Schéma du principe du procédé avec chauffage per contact avec des gaz chauds



TD-1-

Questions de compréhension :

1. Citer 4 procédés thermochimiques permettant de convertir la biomasse en énergie.
2. Identifier les différents produits issus des procédés de torréfaction de la biomasse.

Donner une application valorisante pour chaque produit.

Exercice N°1 : QCM

Pour chacune des affirmations suivantes, choisir la ou les bonnes réponses.

- 1) **La valorisation énergétique de la biomasse est un enjeu :**
 - A. Environnemental
 - B. Économique
- 2) **La biomasse telle qu'elle est indiquée par la directive européenne n°2003/30/CE du 8 mai 2003, et fournie par l'article L211-2 du Code de l'Énergie, est :**
 - A. Les déchets biodégradables
 - B. La fraction biodégradable des déchets ménagers (industriels et municipaux)
 - C. La fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, de la sylviculture et de leurs industries connexes, ainsi que de la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux.
 - D. La fraction biodégradable des résidus végétaux et animaux provenant de l'agriculture.
- 3) **La biomasse est une source d'énergie :**
 - A. Renouvelable tant que nous produisons des déchets de biomasse.
 - B. Dont le coût est faible.
 - C. Qui contribue à la réduction de l'effet de serre.
- 4) **Les avantages des procédés de conversion thermochimique de la biomasse**
 - A. La réduction de l'extraction de matières premières fossiles
 - B. L'économie de produits pétroliers
 - C. La création d'emplois
 - D. La réduction du volume et du poids des déchets de biomasse stockés
- 5) **Quel est l'intérêt de l'incinération de la biomasse ?**
 - A. La réduction de la masse et du volume des déchets
 - B. La production d'énergie thermique
 - C. L'élimination des polluants
 - D. La production d'électricité
- 6) **Il existe différents types d'incinérateurs :**
 - A. Les fours tournants
 - B. Les fours à grilles amovibles
 - C. Les fours statiques
 - D. Les fours à lits fluidisés
- 7) **La torréfaction supprime de la biomasse brute :**
 - A. L'humidité
 - B. Les composés minéraux
 - C. L'humidité et les composés organiques volatils.

8) La torréfaction est un procédé thermo-chimique qui permet de:

- A. Conserver presque 90% du PCI de la biomasse initiale
- B. D'avoir des combustibles solides secs et durs
- C. De produire des carburants liquides et gazeux
- D. D'avoir des combustibles solides homogènes, secs et facilement broyables

Exercice N°2 : Questions de compréhension

- 1) Quelle est la différence entre la combustion, la pyrolyse et la gazéification?
- 2) Comment varie le rendement massique en charbon lorsque la température de carbonisation augmente ? Expliquer pourquoi ?
- 3) Présenter à l'aide des schémas simplifiés les différents procédés de carbonisation et décrire leurs principes de fonctionnement. Donner un avantage et un inconvénient pour chaque procédé.
- 4) Sans recopier la figure 1 sur la feuille de réponse, identifier les différentes configurations de gazogènes (a, b, c et d) et définir les flux entrants et sortants sur chaque système.

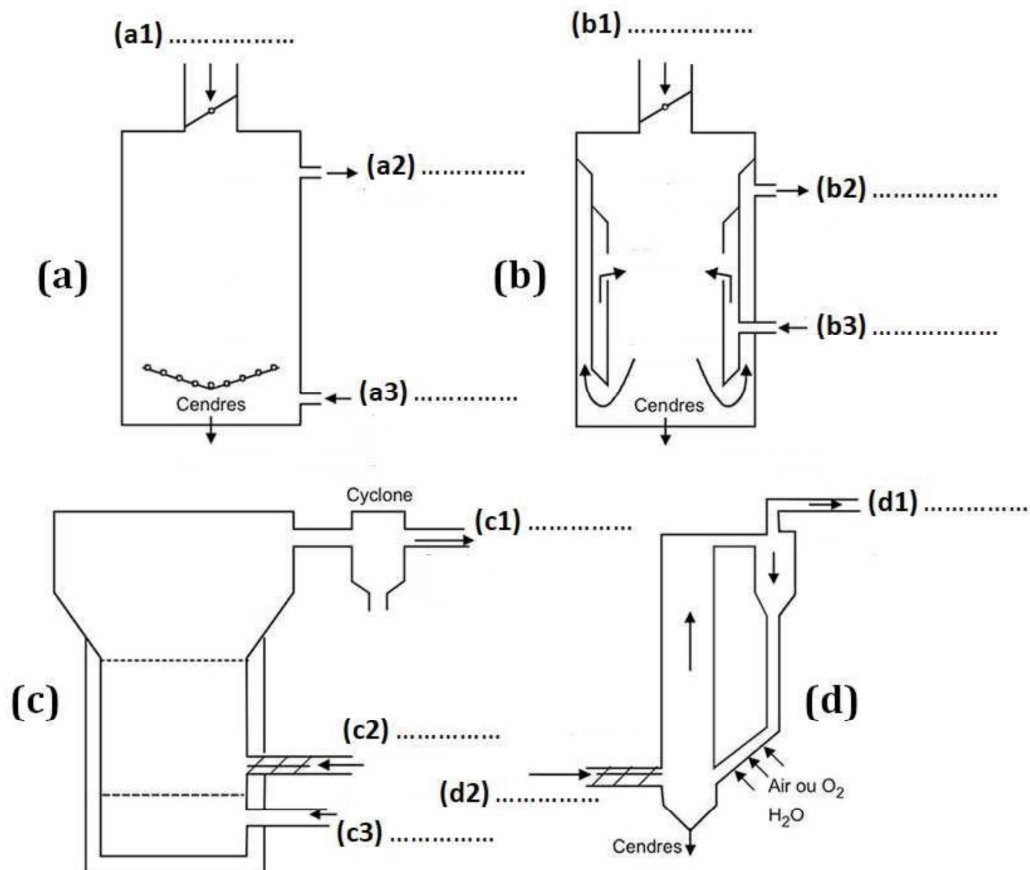


Figure 1 : Schématisation générale des différentes configurations de gazogènes

5) Recopier la figure 2 et compléter les pointillés sur le schéma du principe de la gazéification.

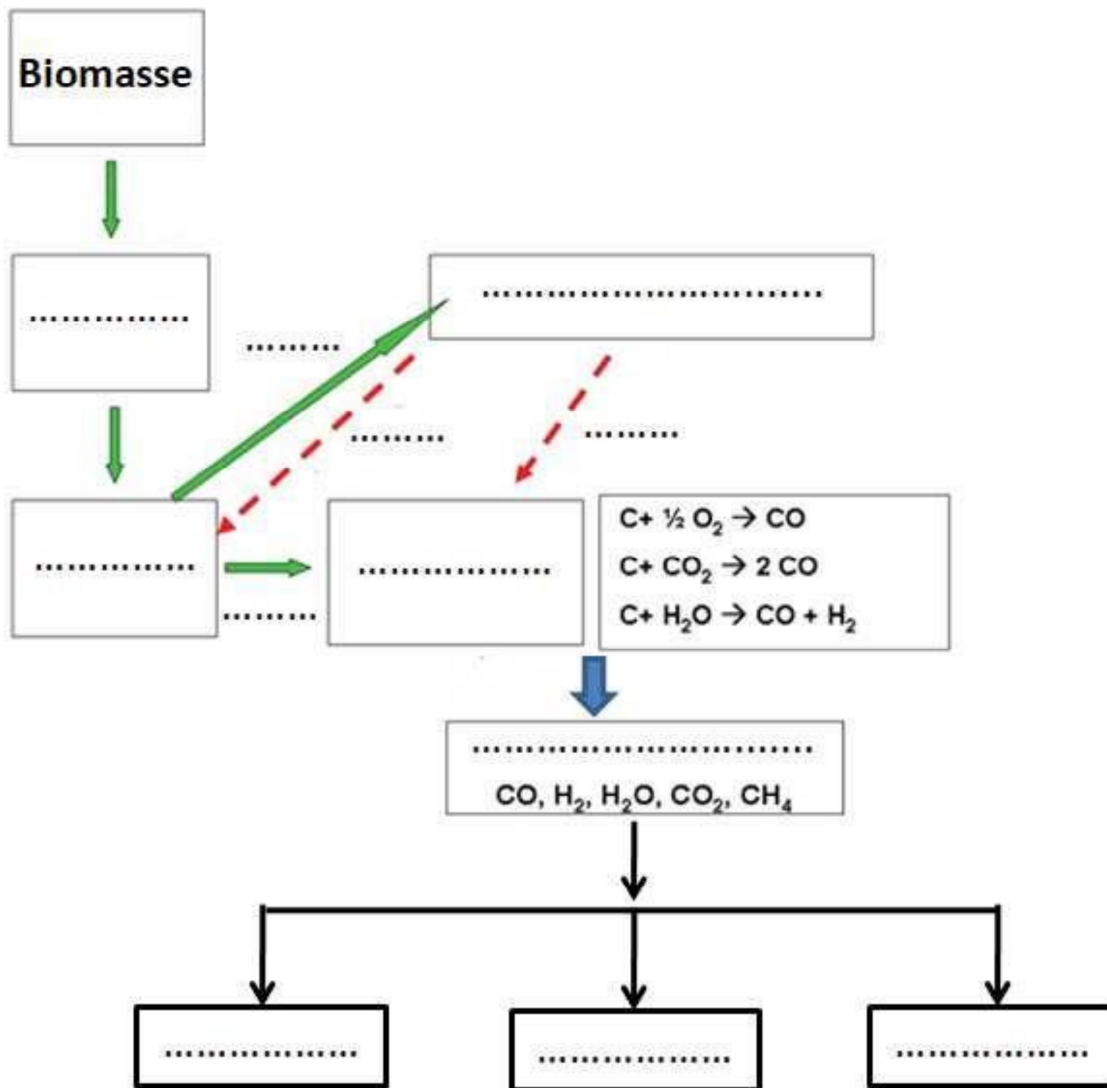


Figure 2 : Schéma du principe de la gazéification

Exercice 3 :

La collecte quotidienne de déchets de biomasse d'un village est de 3 tonnes. Les déchets ramassés sont constitués essentiellement de 80 % de matière organique et 20 % de ferrailles et mâchefers. La composition de la partie combustible est la suivante : Carbone C : 44%, Oxygène O : 28%, Hydrogène H : 8%.

1. Donner la formule chimique de la partie combustible CH_xO_y .
2. Écrire la réaction de combustion de déchets.
3. Déterminer la masse d'eau formée lors de l'incinération de déchets.
4. Calculer le pouvoir calorifique inférieur PCI (en kcal/kg) correspondant à la réaction de combustion.

5. Déduire la quantité d'énergie thermique (Q_{th}) en **MJ** et en **kWh**, produite quotidiennement par l'incinération de déchets de biomasse sachant que le rendement de l'ensemble "Four-Chaudière" est $R=65\%$.
6. Comment peut-on valoriser les incombustibles ?

On donne :

- La chaleur de vaporisation de l'eau = 540 kcal/kg
- Le pouvoir calorifique supérieur déterminé par calorimétrie adiabatique :
PCS = 2450.8 kcal/kg de déchet sec.



Combustion, calcul d'un pouvoir calorifique inférieur PCI

Données :

► Enthalpies standards de formation $\Delta_f H^0$ à 298 K d'espèces chimiques gazeuses en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$:

Espèces	$\text{CO}_{(g)}$	$\text{O}_{2(g)}$	$\text{CO}_{2(g)}$	$\text{CH}_{4(g)}$	$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$
$\Delta_f H^0$ (en $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	- 110,4	0	- 393,1	- 74,80	- 241,6

► Volume molaire à 298 K : $V_m = 24,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$.

On désire calculer le PCI du mélange CO, CH_4 combustible utilisé pour le chauffage d'une chaudière utilisée pour chauffer et transformer de l'eau liquide en vapeur, vapeur destinée aux turbosoufflantes alimentant en air un haut-fourneau.

A - Le monoxyde de carbone CO

1° question : Ecrire l'équation de la réaction n°1 entre le monoxyde de carbone CO et le dioxygène de l'air O_2 sachant qu'il se forme du dioxyde de carbone CO_2 .

2° question : Calculer l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^0(1)$ à 298 K associée à cette réaction pour une mole de monoxyde de carbone CO.

3° question : Après avoir rappelé la définition du PCI, calculer le PCI pour la combustion de CO en $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

B - Le méthane CH_4

1° question : Ecrire l'équation de la réaction n°2 entre le méthane CH_4 et le dioxygène O_2 , sachant qu'il se forme cette fois du dioxyde de carbone CO_2 et de l'eau vapeur H_2O .

2° question : En déduire l'enthalpie standard de réaction $\Delta_r H^0(2)$ pour une mole de méthane CH_4 .

3° question : Calculer son PCI en $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$.

C- Etude du mélange

Sachant que le mélange contient, en volume, 60 % de CO et 40 % de CH_4 , calculer le PCI d'un mètre-cube de ce mélange.

-TD3-Cogénération avec biomasse

La cogénération est la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir d'un combustible dans un dispositif unique : le cogénérateur. Dans une exploitation agricole, le combustible peut être le biogaz issu de la méthanisation des déchets organiques produits : fumier, résidus végétaux, etc.

L'objectif de cet exercice est d'étudier une installation de ce type. Les documents utiles sont rassemblés en fin d'exercice.

1. La méthanisation.

Vérifier la cohérence entre la composition du biogaz obtenu par méthanisation (document 1) et les données énergétiques présentes dans le document 4.

2. La cogénération.

2.1. Calculer en MW.h la quantité d'énergie libérée en un an par la combustion du biogaz dans cette installation, puis l'ordre de grandeur du volume de biogaz correspondant dans les conditions normales de pression et de température.

2.2. Déterminer, en m³, le volume d'eau qui peut être chauffé de 10°C à 70°C chaque année grâce à l'énergie thermique produite par l'installation. Justifier que l'on peut utiliser l'eau chaude produite pour la salle de traite et pour la consommation de plusieurs usagers.

Données :

- Capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

2.3. Calculer l'énergie électrique annuelle produite par le cogénérateur en utilisant la puissance électrique du cogénérateur ($P = 104 \text{ kW}$). Comparer ce résultat avec une autre donnée présente dans le document 3. Interpréter l'écart éventuel constaté.

3. Enjeux environnementaux

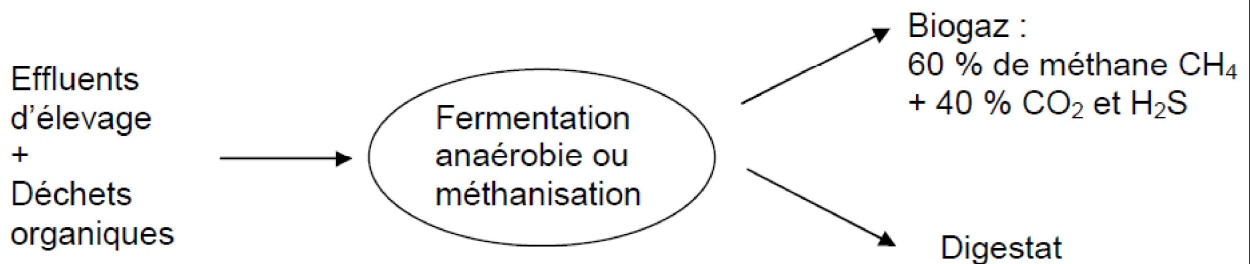
En prenant appui sur les documents et les résultats précédents, donner deux arguments montrant l'intérêt environnemental d'un dispositif méthanisation-cogénération dans une exploitation agricole.

DOCUMENTS

Document 1 : Méthanisation

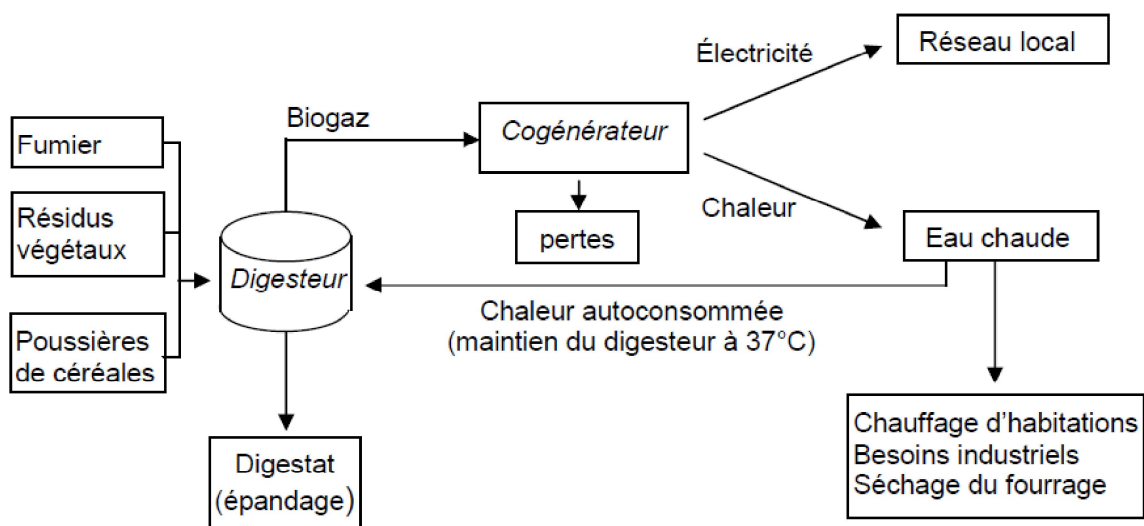
La méthanisation est un processus biologique naturel permettant de valoriser des matières organiques. Pendant 40 à 60 jours, ces matières sont placées à l'intérieur d'une cuve, le digesteur, qui est chauffée et brassée en absence de d'oxygène. La fermentation anaérobie qui a lieu produit un gaz, appelé « biogaz », et un engrais de haute valeur fertilisante, appelé « digestat ».

Schéma de principe de la méthanisation :



D'après <http://www.solagro.org>

Document 2 : Schéma de fonctionnement global d'une unité de cogénération



D'après <http://www.solagro.org>

Document 3 : Caractéristiques d'une installation de cogénération



Le GAEC les Châtelets, sur la commune de Gruffy (74) est une exploitation agricole de type élevage bovin. Ce GAEC a souhaité développer une structure de méthanisation – cogénération, mise en service à l'automne 2009. Cette structure est constituée d'un digesteur en acier (1), d'une trémie d'alimentation (2) et d'un module de cogénération(3).

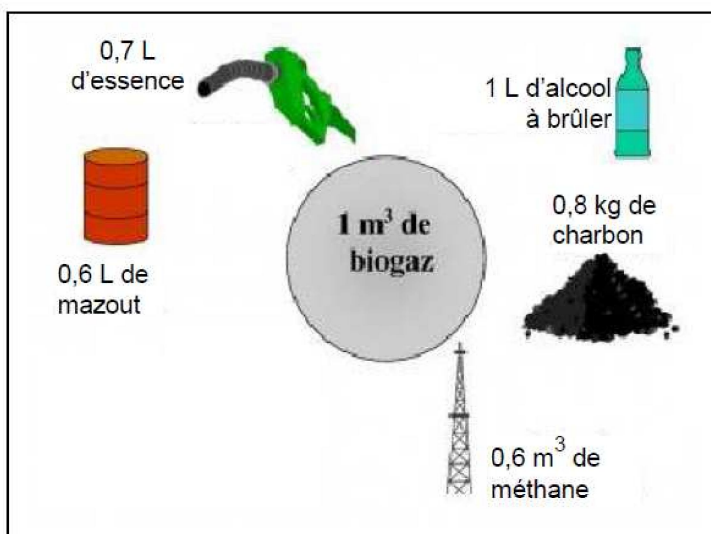
Caractéristiques :

- Digesteur de 675 m³
- Puissance électrique du cogénérateur : 104 kW
- Production annuelle d'énergie par le cogénérateur :
 - thermique : 860 MWh
 - électrique : 830 MWh
- Efficacité énergétique (ou rendement) globale : 70% (rapport de l'énergie totale produite par le cogénérateur à l'énergie issue de la combustion du biogaz)
- 3200 tonnes/an de matière organique valorisée
- Économie de CO₂ : environ 420 tonnes/an
- 200 L d'eau chaude sont consommés par jour dans la salle de traite
- Réseau de chaleur pour plusieurs usagers.

D'après <http://www.cogenerationbiomasserhonealpes.org>

Document 4 : Équivalences énergétiques

Les volumes gazeux sont mesurés dans les conditions normales de pression et de température.



La combustion de 1 m³ de méthane produit une énergie égale à 10 kWh.

D'après www.ecobase21.net

Exercice N°1: Production de méthane pour le chauffage du bâtiment agricole

L'exploitant envisage de réaliser un projet de méthanisation (figure 1). L'exploitation doit maintenir la température intérieure de ses bâtiments agricoles aux alentours de 25°C. Le méthane produit servirait à alimenter une chaudière à condensation. L'énergie produite permettrait alors :

- de chauffer le bâtiment agricole à 25°C pour une grande partie de l'année (printemps, hiver, automne),
- de chauffer le digesteur entre 55°C et 60°C,
- de sécher la production de chanvre (produit isolant naturel) en été.

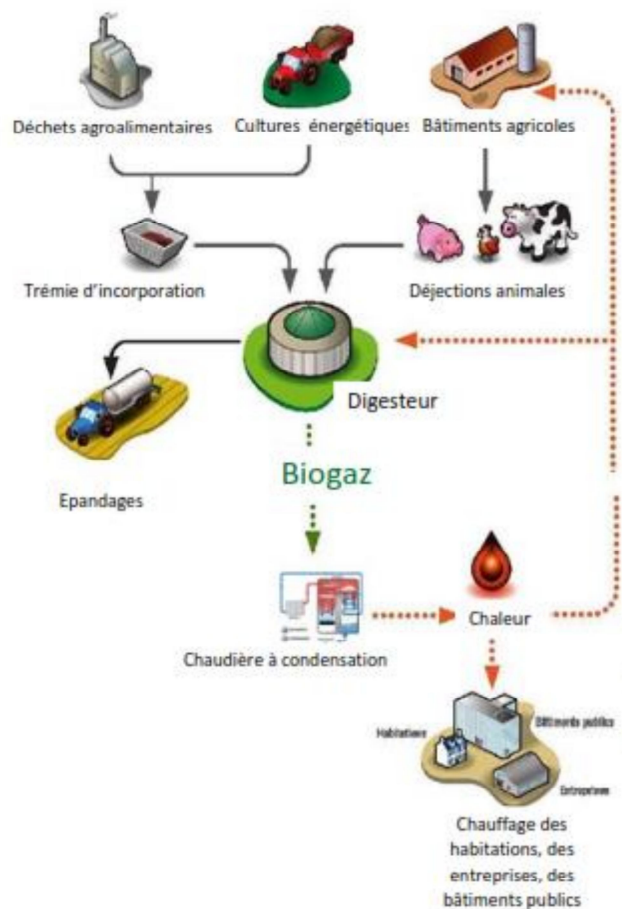


Figure 1 : Projet de méthanisation

1. Expliquer pourquoi : « L'énergie thermique produite à partir de biogaz constitue une source d'énergie renouvelable et propre. ». Vous citerez deux avantages à cette production d'énergie.

Le méthane produit servira de combustible à une chaudière à condensation.

2. Définir les termes P.C.I. et P.C.S. En déduire quelle grandeur du P.C.I. ou du P.C.S. devrait-on associer à une chaudière à condensation ?

I-Combustion

3. Écrire l'équation équilibrée de la combustion complète du méthane CH_4 dans le dioxygène de l'air.

Dans une chaudière à condensation, différents gaz (CO_2 , H_2O et N_2) vont céder leur énergie par refroidissement, puis par condensation. Dans la suite de l'exercice, on voudrait connaître l'énergie produite par le refroidissement de ces gaz et par condensation de l'eau. Pour la suite de l'exercice, on considérera la combustion de 1,00 kg de méthane.

4. Calculer la quantité de matière n_{CH_4} correspondant à 1,00 kg de méthane. En déduire que la quantité de matière de dioxyde de carbone produite est de $n_{\text{CO}_2} = 62,5$ mol et que la quantité de matière d'eau formée vaut $n_{\text{H}_2\text{O}} = 125$ mol.

5. La quantité de matière de dioxygène consommée lors de la combustion de 1,00 kg de méthane est de $n_{\text{O}_2} = 125$ mol.

Lors de la combustion, le dioxygène de l'air est consommé mais pas le diazote N_2 . On considère que l'air est composé en fraction molaire de 20% d' O_2 et 80% de N_2 . Indiquer la quantité de matière n_{N_2} de diazote.

6. Calculer la masse de dioxyde de carbone formée par la combustion de 1,00 kg de méthane.

II. Bilan énergétique :

Sur une « chaudière ancienne », les fumées sont évacuées à une température d'environ 200 °C. Actuellement pour une chaudière à condensation la température de sortie des fumées est d'environ 55 °C et l'eau condensée est évacuée à une température de 20°C. On continuera dans cette partie à raisonner sur la combustion de 1,00 kg de méthane.

1. En vous aidant du tableau 1, recopier le tableau 2 et compléter le.

Gaz issus de la combustion et gaz spectateur	CO_2	H_2O	N_2
Masse molaire moléculaire (en g.mol^{-1})	44	18	28
Quantité de matières en moles des gaz issus de la combustion d'1kg de méthane.	62,5	125	500
Masse (en g) des gaz issus de la combustion d'1kg de méthane.	2750	2250	14000

Tableau 1

Constituants	Récupération d'énergie	masse (kg)	Cp (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Δ(θ) (°C)	L(J.kg ⁻¹)	E récupérée (J)
CO ₂ (gaz)	de 200°C à 55°C	2,75	650			
N ₂ (gaz)	de 200°C à 55°C	14	730			
H ₂ O (gaz)	de 200°C à 100°C	2,25	1410			
H ₂ O (gaz-Liquide)	à 100°C	2,25			2,26.10 ⁶	
H ₂ O (liquide)	de 100°C à 20°C	2,25	4185			

Total en
MJ

Tableau 2

2. Le PCI (pouvoir calorifique inférieur) du méthane est 50,1 MJ.kg⁻¹. Cela signifie que la combustion d' 1kg de méthane produit 50,1 MJ sans compter l'énergie des gaz condensés.

La valeur totale de l'énergie récupérée avec la chaudière à condensation permet-elle de justifier les économies ?

Exercice N°2: EXPLOITATION DE LA BIOMASSE AVEC LA BAGASSE ET LE BIOGAZ

Lors de la photosynthèse, grâce à la lumière, les algues consomment le dioxyde de carbone CO₂ pour produire du dioxygène O₂ mais aussi de la matière organique (glucides, lipides...).

Elles peuvent donc produire un carburant « vert ». En effet, la majeure partie de l'énergie stockée dans les algues l'est sous forme de lipides (triglycérides d'acides gras) qui, après réaction avec du méthanol, peuvent être utilisables comme carburant appelé EMAG (esters méthyliques d'acide gras). Contrairement au biocarburant issu de cultures oléagineuses (maïs, colza...), ce biodiesel ne détourne pas l'usage des terres agricoles, habituellement utilisées pour des cultures alimentaires, au profit de la production de carburant.



Culture des microalgues en photobioréacteur
Image <https://fr.wikipedia.org>

Schéma 1 : Schéma de principe d'une valorisation énergétique des algues pour la synthèse d'un biocarburant : le biodiesel.

1. Indiquer les aspects de la production d'algues marines en photo-bioréacteurs qui semblent prometteurs au plan économique ou écologique.

2. Le biodiesel (EMAG) a pour formule brute $C_{17}H_{34}O_2$ et sa combustion complète produit du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. Recopier l'équation de la réaction de combustion complète ci-dessous sur la copie, la compléter et l'ajuster.



3. Déterminer la quantité de matière n contenue dans une masse m de biodiesel valant 1,0 kg .

4. Déterminer la quantité de matière n de dioxyde de carbone produite par la combustion d'un kilogramme de biodiesel.

5. Calculer la masse m de dioxyde de carbone produite par la combustion complète d'un kilogramme de biodiesel.

6. Sachant que la combustion d'un kilogramme de diesel classique produit 3,1 kilogrammes de dioxyde de carbone, calculer la masse de dioxyde de carbone économisée par la combustion d'un kilogramme de biodiesel, par rapport à celle du diesel classique. Commenter le résultat obtenu.