



HAL
open science

Valorisation énergétique du typha

Benjamin Cluet, Romain Pénot

► **To cite this version:**

Benjamin Cluet, Romain Pénot. Valorisation énergétique du typha. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2011. hal-01881048

HAL Id: hal-01881048

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01881048>

Submitted on 25 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**Rapport de projet de fin
d'études
- Ingénieur 3^{ème} année -**

Valorisation énergétique du typha



**Encadrant : Yann Rogaume
Co-encadrement : Sébastien Couasnet**

**Cluet Benjamin
Pénot Romain
2010 / 2011**

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'équipe technique de l'atelier, ainsi que l'équipe énergie du LERMAB pour l'aide technique et scientifique qu'ils nous ont apportée.

Nous remercions Marie-Laure Antoine pour son écoute et son aide précieuse.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
- PARTIE 1 - DESCRIPTION DE L'ETUDE	2
1. LOCALISATION DU PROJET	2
2. BIOMASSES DISPONIBLES	6
- PARTIE 2 - PROCEDES INDUSTRIELS DE CARBONISATION.....	8
1. ETUDE DU CHARBON.....	8
2. PROCEDES INDUSTRIELS DE CARBONISATION.....	10
- PARTIE 3 - EXPERIMENTATIONS.....	18
1. ETUDE DES MATIERES PREMIERES VEGETALES	18
2. PROCEDES DE CARBONISATION	23
3. ETUDE DE LA COMPACTION ET DE L'AGGLOMERATION DU CHARBON.....	28
- PARTIE 4 - ETUDE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.....	29
1. EVALUATION ECONOMIQUE DU PROJET.....	29
2. ANALYSE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	30
3. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE	31
4. DISCUSSION	35
5. INTEGRATION DU PROJET DANS LE MARCHE DU CARBONE.....	36
CONCLUSION	42
BIBLIOGRAPHIE.....	43
RESUMÉ	46
ABSTRACT.....	46

INTRODUCTION

En 2001, le Sénégal a ratifié le protocole de Kyoto et s'est engagé à limiter ou à réduire ses émissions de gaz à effet de serre par des mesures et des politiques appropriées, tout en permettant son développement économique et social. En effet, les effets du changement climatique sont réels et partagés par tous mais ils sont plus durement ressentis par les pays en voie de développement et les pays les moins avancés, souvent situés en zone tropicale ou équatoriale. Le Sénégal a la volonté d'intégrer des mesures de lutte contre le changement climatique dans son programme de développement afin d'en diminuer les impacts, notamment sur les conditions de vie de la population (*Direction de l'environnement et des installations classées, 2010*). Un axe d'amélioration porte sur la valorisation énergétique de la biomasse locale.

Or, le Sénégal est confronté à un désordre écologique dans la vallée du fleuve Sénégal. Suite à la construction du barrage de Diama à proximité de l'embouchure du fleuve, un roseau appelé *Typha australis* se développe à très grande vitesse. Cette expansion est due à un manque de fluctuation du niveau d'eau et de sa salinité. Les impacts sont non seulement écologiques mais aussi sociaux : l'accès à l'eau est réduit, la circulation des pêcheurs est restreinte, les maladies d'origine hydrique sont en pleine expansion.

L'État met en œuvre des moyens de lutte contre cette prolifération par le financement de campagnes d'arrachage mécanisé. Cependant, cette biomasse n'est pas utilisée. Cette plante qui est considérée comme un désagrément peut être vue comme une ressource disponible à des fins énergétiques. Une industrie serait prête à accepter ce combustible mais cela nécessite une densification énergétique préalable de telle sorte à faciliter son transport et son utilisation.

L'objectif de ce travail est d'étudier la carbonisation du typha et de développer un procédé semi-industriel simple pouvant être mis en fonctionnement au Sénégal.

Le contexte énergétique du Sénégal est critique. Pour répondre à une demande forte en énergies renouvelables, les ressources végétales disponibles dans le Nord-Ouest du pays sont multiples.

Ces biomasses peuvent être valorisées par carbonisation dans des procédés industriels variés. Une analyse de ces procédés a permis de développer un réacteur expérimental.

Une analyse économique et environnementale de l'implantation d'un procédé industriel a permis de mettre en évidence des axes de réflexion pour la poursuite du projet.

Cette situation en bordure de fleuve pourra également permettre de distribuer par voie fluviale le combustible. La navigation sur le fleuve est possible durant toute l'année grâce au barrage de Diama construit dans les années 1980 à l'embouchure du fleuve.

L'ensemble des zones entourées en vert est couvert de typha, plante susceptible d'être récoltée afin d'être valorisée énergétiquement. Cette biomasse pourra également être apportée à l'usine par voie fluviale.

1.1. Situation énergétique globale.

La situation énergétique du Sénégal a été étudiée sur la base de la deuxième communication nationale à la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (2010).

1.1.1. Situation actuelle

1.1.1.1. Consommation d'énergie

La consommation en énergie finale du Sénégal en 2000 est de 1 690 tep (tonne équivalent pétrole) répartie comme suit :

- 943,6 tep (soit 55,83 %) en produits pétroliers raffinés,
- 662,8 tep (soit 39,21 %) en biomasse,
- 83,7 tep (soit 4,95 %) en électricité.

Il faut ajouter 53 502 tonnes de fuel représentant la quantité que la SOCOCIM (société de Cimenterie) a utilisé pour le chauffage du clinker.

La plupart de l'énergie provient du bois et du charbon (57 %), la quasi-totalité du pétrole provient de l'importation. La facture énergétique en 2000 était de 248 milliards de FCFA ce qui représente environ 22,5 % des importations du pays.

*Tableau 1 : Production ou approvisionnement en tonnes
(Direction de l'environnement et des installations classées, 2010)*

Produits	Production	Importation	Exportation	Soute internat.	Variation de stock
Pétrole brut		890 688			25 100
Gaz naturel (en Nm3)	628 620				
Essence	145 254		47 194		1 057
Jet kérosène	65 525	142 806	2 055		11 953
Pétrole lampant	21 366		2 772		
Gasoil/diésel oil	390 296	149 598	65 444	93 592	- 6 077
Fuel	236 509	126 909	33 484		- 6 936
Gaz butane (GPL)	9 070	91 885	3 130		76
Naphta	16568				
Lubrifiant		13 332,9			
Bois de feu	1 089 132				
Charbon de bois	329 062				
Bagasse	302 383				
Coque d'arachide	50 494				

Les ressources hydro-électriques sont estimées à environ 1 200 MW sur les fleuves Gambie et Sénégal.

Le secteur énergétique sénégalais est soumis à plusieurs contraintes :

- faibles performances de la société nationale électrique,
- forte pression sur les matériaux ligneux par l'utilisation de bois et de charbon de bois pour la cuisine,
- l'arrêt de la subvention pour l'utilisation du butane en 2008.

1.1.1.2. Emission de gaz à effet de serre

Les émissions en équivalent CO₂ (éq. CO₂) sont détaillées dans la Figure 3 : Emissions par secteur en équivalent CO₂. Le gouvernement sénégalais a mis en place des plans d'actions environnementales dans le but de limiter l'impact des activités humaines.

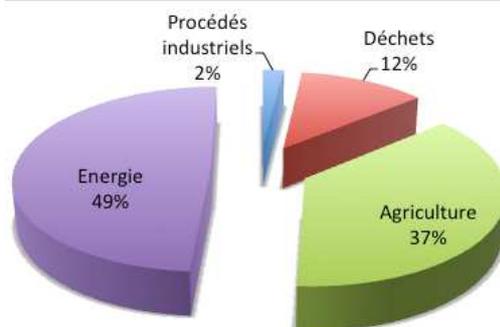


Figure 3 : Emissions par secteur en équivalent CO₂

L'augmentation du prix du pétrole entraîne le Sénégal dans la recherche d'autres sources d'énergie. L'utilisation du charbon minéral est beaucoup plus polluante que le pétrole : elle libère 2 à 3 fois plus de gaz à effet de serre (GES).

Tableau 2 : Comparaison des émissions de CO₂ par type de produit en Gg éq. CO₂ (Direction de l'environnement et des installations classées, 2010)

Produits	années	
	2000	1994
Produits pétroliers	3876,4	2620
Biomasse	3558,6	987,4
Total	7435	3660

Ce comparatif permet de voir l'essor très important de la consommation globale d'énergie en 16 ans (une augmentation d'environ 103 %). La part d'énergie provenant de biomasse a fortement évolué (+ 260 %). D'après le Tableau 3 : Emission de CO₂ par produit (éq. CO₂), environ 82 % de la biomasse consommée provient du bois et du charbon.

Tableau 3 : Emission de CO₂ par produit (éq. CO₂) (Direction de l'environnement et des installations classées, 2006)

Produit	Emission en 2000 (Gg)	Emission en 1994 (Gg)	Emission en 1994 (Gg) recalculé
Pétrole brut	2 630,24	555,8	1 407,32
Gaz naturel	1,84	11,85	11,85
Essence	- 148,3	55,5	- 94,60
Jet kérosène	406,53	423,13	200,37
Pétrole lampant	- 8,83	- 9,73	- 9,73
Gaz/diesel oil	- 10,68	504	141,72
Fuel oil résiduel	649,30	929,8	438,42
LPG	263,27	152,7	96,62
Naphta	54,14		
Lubrifiant	38,90		
Total produits pétroliers	3 876,40	2 620	2 180,13
Bois de chauffe	1 989,29	53,7	2 732,8
charbon	1 025,28	286,2	1 039,74
bagasse	544,08	557,4	510,69
Coque d'arachide	90,85	83,18	210,69
coton		7	
Total biomasse	3 558,66	987,4	4 493,32
Emission totale	7 435,06	3660	6 685,30

1.1.1.3. Evolution du couvert forestier

Une réduction considérable du couvert végétal a été notée au cours des quatre dernières décennies à cause de l'avancée des fronts agricoles et charbonniers dont les effets sont renforcés par la sécheresse et l'utilisation du bois par les ménages. En effet, pour la cuisine, 55,5 % des ménages utilisent du bois et 11 % utilisent du charbon.

La superficie totale des forêts est passée à 11,9 millions d'hectares en 1990 contre 12,9 millions d'hectare en 1981, ce qui correspond à une régression du couvert forestier de 80 000 ha/an (*Direction de l'environnement et des installations classées, 2010*). Cela est dû à l'exploitation du bois, aux défrichements agricoles, aux feux de brousse et aux pratiques pastorales non durables. Ce rythme de recul des forêts s'est ralenti pour descendre à 45 000 ha/an selon la FAO (2010).

1.1.1.4. Evolution de l'activité industrielle

De 2002 à 2005 l'essor industriel n'a pas faibli. Les chiffres suivants sont valables entre 2004 et 2005 une hausse a été constatée dans les secteurs suivants :

- Industrie du papier et du carton : 42,6 %
- Secteur de l'énergie : 9,7 %
- Matériaux de constructions : 9,3 %.

Près de 60% de la population active travaille dans l'agriculture. Ce secteur représente une faible part du produit intérieur brut (environ 10 % de 2007 à 2010). Malgré cette forte présence de l'agriculture, la dépendance alimentaire est très importante (plus de 50 %).

Le développement de l'emploi rural non agricole est un axe stratégique important pour la réduction de la pauvreté. Des programmes spécifiques de transformation des produits agricoles et de facilitation de leur commercialisation sur les marchés participent à la diversification des revenus non agricoles.

1.1.2. Conséquences

L'Etat n'est plus en mesure de subventionner ses importations d'énergie.

Les ménages se tournent de plus en plus vers le charbon de bois, entraînant une augmentation de l'usage non contrôlé du bois. En 20 ans, la surface forestière a diminué de 9 % (FAO, 2010). Cette diminution entraîne une perte importante de la biodiversité, une dégradation et un appauvrissement des sols ainsi qu'une augmentation de la désertification. Ceci conduit une augmentation de la pauvreté dans les zones rurales donc à un exode rural.

1.1.3. Objectifs

Dans ce contexte d'importation massive d'énergie, l'objectif est de créer un biocombustible. Il doit être fait localement en respectant l'environnement et en valorisant les déchets et sous produits agricoles, afin d'améliorer l'impact écologique de l'utilisation d'énergie. Ce projet doit également apporter de l'emploi aux locaux.

Le biocombustible créé doit être performant, avoir un pouvoir calorifique inférieur (PCI) se rapprochant de 6 000 kcal/kg.

Dans un premier temps l'étude vise à fabriquer du charbon pour remplacer le charbon minéral utilisé par la cimenterie de Saint Louis. La consommation de cette usine est de 200 000 tonnes de charbon minéral par an, avec un PCI de 6000 kcal/kg. L'usine devra donc être en mesure de répondre à ces attentes.

Dans un second temps, ce charbon pourra servir aux populations locales pour remplacer le charbon de bois afin de limiter les impacts sur la forêt.

2. BIOMASSES DISPONIBLES

2.1. *Typha australis*

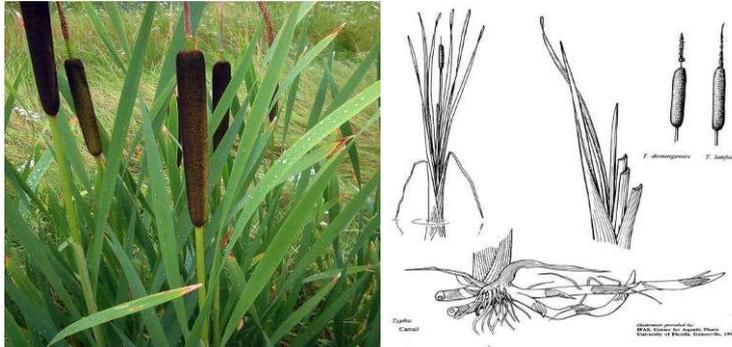


Figure 4 : Représentation du Typha australis

Ce roseau, très invasif, a colonisé les berges du Sénégal depuis la création du barrage de Diama en 1986.

Ce barrage a été construit afin de permettre aux populations en amont d'avoir accès à l'eau douce pour les cultures.

Or cela a également entraîné la prolifération du typha (plante d'eau douce). Ce roseau, pouvant atteindre deux mètres, empêche l'accès à la rivière ce qui pose de gros problèmes.

Il est donc arraché ou coupé et stocké. Durant la phase de stockage, le typha pourrit et libère des gaz à effet de serre : par exemple CO₂ et CH₄.

D'après l'OMVS-SAED (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal - Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du fleuve Sénégal) il est possible de récolter 150 000 T de typha par an. Selon les données de notre partenaire, il serait possible d'arracher de 300 000 T à 500 000 T de Typha par an. Ce qui représente une ressource importante.

2.2. Balle de riz



Figure 5 : balle de riz

La balle de riz, enveloppe protectrice du grain, (Figure 5) est un coproduit issu de la transformation du riz.

D'après les informations du SAED, il est possible de récupérer 175 000 T de balle de riz.

2.3. Bagasse



Figure 6 : Bagasse

Cette biomasse (Figure 6) est un coproduit de la fabrication du sucre, c'est le résidu fibreux de la canne à sucre après broyage. La sucrerie de Richard Toll produisait en 1996 environ 250 000T de bagasse.

2.4. Autres déchets agricoles

D'autres produits issus de l'agriculture peuvent être utilisés mais ils n'ont pas été étudiés pour le moment.

La paille de riz est la partie de la tige coupée lors de la moisson. La biomasse disponible est d'environ 200 000 T par an, d'après les données du SAED.

Les bouts blancs sont les restes des tiges de cannes à sucre. Il est possible d'en récolter 300 000 T par an, d'après les données du SAED.

Les boues de sucrerie sont aussi disponibles mais leur très grande teneur en humidité les rend énergétiquement peu intéressantes.

- PARTIE 2 - PROCÉDES INDUSTRIELS DE CARBONISATION

A la différence des procédés traditionnels de carbonisation (production de charbon de bois sur le terrain), un procédé industriel de carbonisation est caractérisé par (*Emrich, 1985*):

- une optimisation de la carbonisation tant sur la valorisation des produits connexes 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

A la lueur de ces caractéristiques, il est nécessaire d'étudier la faisabilité technique et économique de l'opération en fonction de l'implantation géographique du projet et du matériau à transformer.

1. ETUDE DU CHARBON.

1.1. Définition

Dictionnaire des sciences et techniques (2011) : Substance constituée essentiellement de carbone (a minima 55%), extraite du sous-sol ou obtenue par combustion incomplète de végétaux (charbon de bois). [...]

Sans dispositif adapté, la combustion du charbon produit une quantité importante de gaz à effet de serre (CO₂) ainsi que de nombreux polluants (oxyde de soufre, oxydes d'azote, poussières) et des cendres pouvant renfermer des métaux lourds. [...] Toutefois, le charbon peut faire figure de source d'énergie propre, lorsqu'il est utilisé dans des centrales à lit fluidisé ou dans les centrales à cycle combiné à gazéification intégrée (IGCC). En particulier, dans les chaudières à lit fluidisé circulant, les émissions en oxyde d'azote sont de moins de 250 mg/Nm³ au lieu de 600 [mg/Nm³] pour les chaudières conventionnelles, grâce à une température de combustion inférieure (850°C).

Encyclopedia britannica (2011) : 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 pyroligneux. Le résidu solide peut se présenter de conglomérat, être réduit en poudre ou être compacté en granulé ou en brique.

1.2. 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 augmente.

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) (*Stretov et al., 2007*).

Le processus de carbonisation suit le profil de température suivant (*Emrich, 1985*):

- 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

Tableau 4 : Rendements massiques typiques obtenus par différents procédés de pyrolyse (Bridgwater, 2007)

Procédé	Conditions		Rendement massique sur sec (%)		
	Température	Temps de séjour des gaz	Liquide	Charbon	Gaz
Rapide	775 K	1 s	75	12	13
Intermédiaire	775 K	10 – 20 s	50	20	30
Lent	675 K	Très long	30	35	35
Gazéification	1075 K	long	5	10	85

Tableau 5 : Rendements massiques obtenus à différentes températures pyrolyse (Balat, 2009)

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

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. (*FAO, 1985*)

2. PROCÉDES INDUSTRIELS DE CARBONISATION

2.1. Classification des procédés

Les procédés industriels de carbonisation peuvent être classés en trois catégories (Emrich, 1985 – Numazawa, 2000 – Peláez-samaniego, 2008) :

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

2.1.1. 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 (Numazawa, 2000).

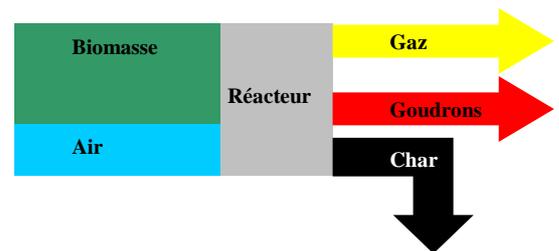


Figure 7: Schéma de principe du procédé avec chauffage interne

2.1.2. 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 (Emrich, 1985).

Les rendements massiques de ces procédés se situent entre 28 % et 32 % (masse anhydre) (Numazawa, 2000).

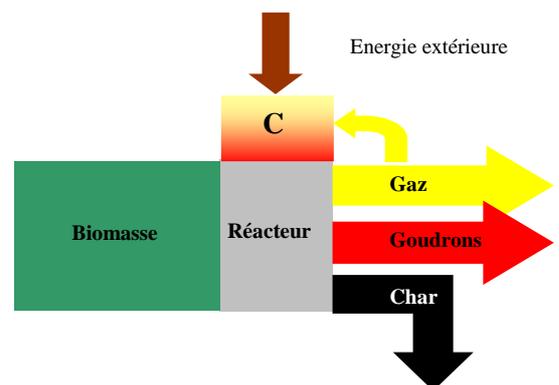


Figure 8: Schéma du principe du procédé avec chauffage externe

2.1.3. 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 (Gronli, 2009).

Les rendements en charbon et coproduits sont élevés (Emrich et al., 1985). 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. (Numazawa, 2000).

Ces procédés sont coûteux donc viables pour des installations importantes (Emrich et al., 1985).

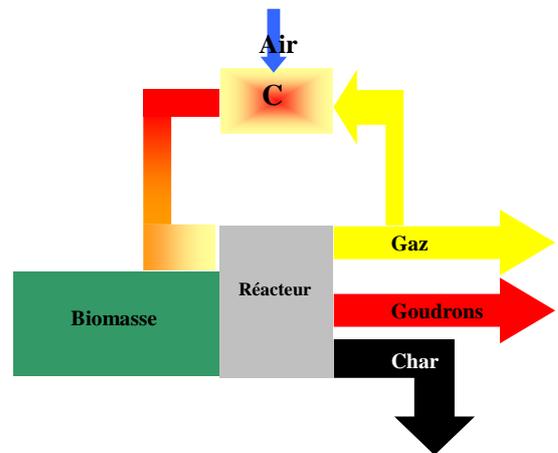


Figure 9: Schéma du principe du procédé avec chauffage per contact avec des gaz chauds

2.1.4. Types de réacteurs

Une nomenclature des différents types de réacteur a été menée par Meier et Faix, 1999. Les procédés de pyrolyse peuvent être différenciés selon s'ils sont discontinus ou continus. Le procédé continu est possible si la matière première est sous forme de particules. Ceci offre l'avantage d'accroître les échanges thermiques entre le réacteur, les gaz et la biomasse donc de diminuer le temps de carbonisation. De plus, certains types de réacteur sont à lit fluidisé, adaptés à la carbonisation des particules fines. Le réacteur peut être fixe ou rotatif.

Du fait du faible rendement des procédés avec source d'énergie interne, ces derniers ne seront pas étudiés ici.

2.2. Etude des procédés les plus pertinents

2.2.1. Les procédés avec chauffage externe

Four de Reichenbach, dit four « Carbo » Emrich, 1985

Ce procédé a été développé pour récupérer le charbon de bois.

Ce réacteur combine apport de chaleur externe et valorisation énergétique des gaz de pyrolyse.

L'apport énergétique primaire est fourni par une combustion externe. Les gaz de combustion circulent autour du réacteur via des serpentins, cédant leur énergie à la matière première. Les gaz incondensables de pyrolyse sont injectés dans un tube interne. Ils sont mélangés à l'excès de gaz de combustion externe, contenant de l'oxygène. Ce mélange permet la combustion des gaz de pyrolyse. Le rendement énergétique de ce procédé est très bon (Emrich, 1985).

Four Bosnic – Emrich, 1985

Ce procédé a été développé pour récupérer la fraction condensable des gaz de pyrolyse.

L'apport de chaleur initial est donné par une combustion externe ; puis, lorsque des gaz de pyrolyse sont produits, ils sont injectés dans la chambre de combustion externe. L'amélioration par rapport au précédent est la dissociation des réacteurs du bâti du four. Ce four offre la possibilité d'interchanger les réacteurs donc d'obtenir un procédé semi-continu.

Fours jumelés

Ce four est constitué de deux réacteurs et d'une chambre de combustion centrale (Figure 11 et Figure 10).

Le premier réacteur est chauffé avec une source d'énergie externe. Une fois la pyrolyse démarrée, les gaz sont introduits dans la chambre de combustion et brûlés, fournissant l'énergie nécessaire à la pyrolyse du second réacteur (Figure 10).

Le taux massique en charbon est de 30 à 32 %, sur sec (Gronli, 2009). La capacité de production est de 6000 à 7000 tonnes/an. Ce système nécessite la présence de 3 ouvriers.



Figure 11 : Fours Jumelés (Gronli)

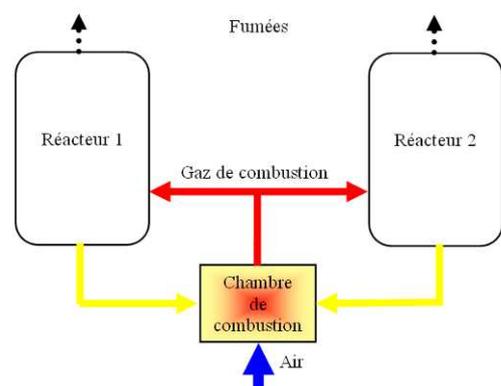


Figure 10 : Schéma de l'Ekoblok/Carbo

Ekoblok/Carbo Group a développé un système semi-continu basé sur ce principe (Domac et Trossero, 2008) (Figure 13). La semi-continuité du procédé est garantie par une rotation des réacteurs (Figure 12).

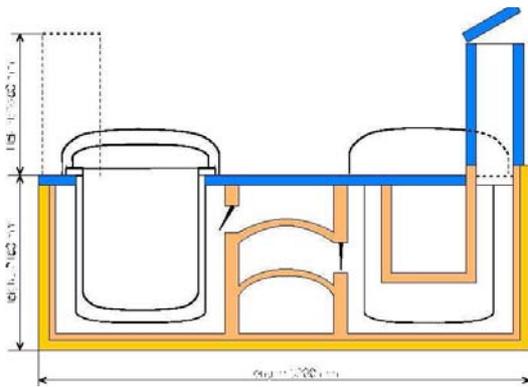


Figure 13 : Schéma de l'EkobloK/Carbo

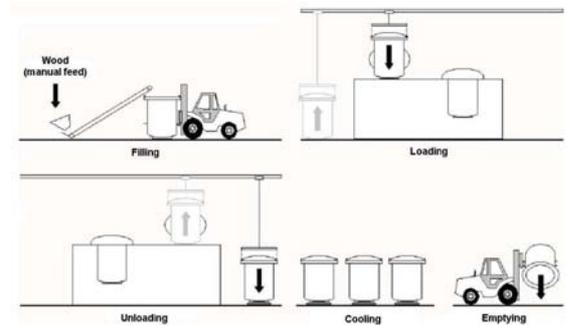


Figure 12: Mode de chargement du réacteur

2.2.2. Les procédés par chauffage par contact avec des gaz chauds

Procédé Reichert ou Dagussa

Ce procédé est le premier réacteur qui permet d'éliminer les difficultés de transmission de la chaleur à la matière première par l'utilisation des gaz issus de la pyrolyse.

Le principe de ce procédé est synthétisé par le schéma ci-dessous (Figure 14).

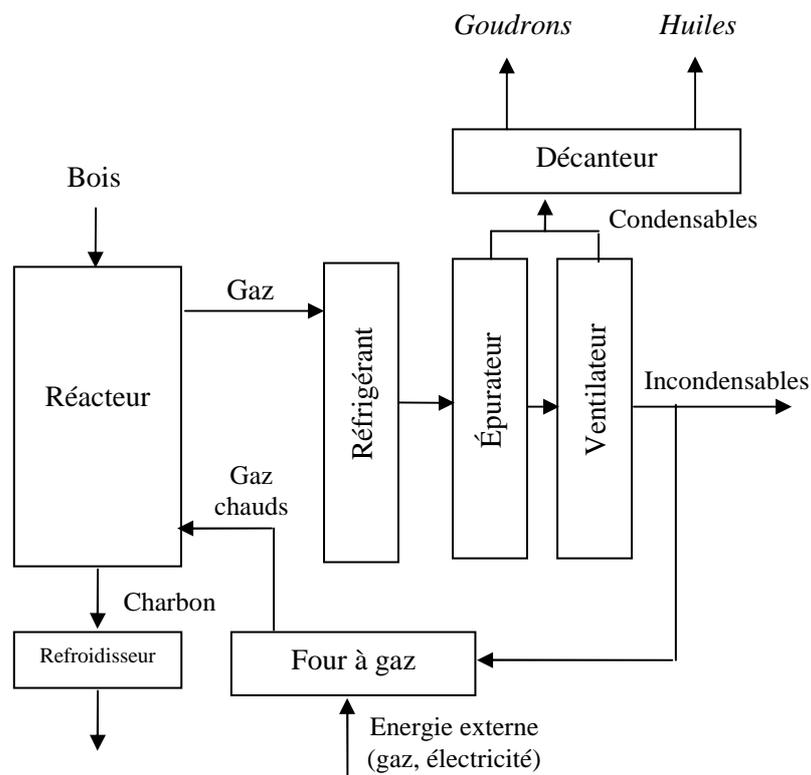


Figure 14 : Procédé Reichert ou Dagussa

Le réacteur est approvisionné par un convoyeur. Après chargement, l'arrivée de gaz de combustion est ouverte pour permettre la montée en température du réacteur (gaz externes dans un premier temps, puis récupération des gaz de pyrolyse). Pendant le cycle de carbonisation, d'une durée de 16 à 20 h (Gronli, 2009). Le front de carbonisation descend progressivement vers le bas du réacteur. Les gaz issus de la pyrolyse passent au travers du réfrigérant et de l'épurateur. La fraction condensable est récupérée. Les incondensables gagnent le four à gaz où ils sont brûlés. Les fumées dégagées par la combustion passent au travers de la biomasse non carbonisée et permettent son séchage.

Tableau 6 : Produits de la carbonisation de bois (Emrich, 1985)

Produit	Rendement (sur sec)
Charbon	33 – 38 %
Alcool	1,5 – 2 %
Acide acétique	6 %
Goudrons et huiles	14 %

Ce procédé consomme 800 kWh/tonne de bois sec pour le préchauffage et 100 kWh/tonne de bois sec pour l'apport du combustible du lieu de stockage au four.

La production s'élève à 8 tonnes de charbon /mois/m³ sur sec (seuil de rentabilité-Emrich, 1985).

Le procédé Lambiotte (SIFIC)

Ce procédé met en œuvre une carbonisation continue qui permet de diminuer la consommation d'énergie pour maintenir le réacteur à température (Guo et al., 2009).

La biomasse est introduite par le haut du réacteur, de façon continue. Pendant la carbonisation, la biomasse descend dans le réacteur. Elle passe dans la zone de séchage puis de torréfaction et de carbonisation où elle est décomposée en matière solide et gazeuse. Le charbon est ensuite refroidi an atmosphère inerte avant de sortir du réacteur.

Le chauffage de la biomasse est fait par un courant de gaz inertes chauds circulant à contre-courant du flux de biomasse. Ceci implique que les gaz doivent être chauffés et introduits au centre du réacteur, dans la zone de carbonisation. De plus, les gaz froids sont introduits dans la zone de refroidissement du charbon

La biomasse introduite est portée à la température nécessaire par les gaz chauds pour initier les réactions de carbonisation exothermiques. La chaleur dégagée est ensuite récupérée par les gaz froids dans la zone de refroidissement du charbon. Un contrôle des débits de gaz introduits permet de gérer l'étendue de la zone de carbonisation.

Sur le dessin ci-dessous (Figure 15, Lambiotte, 1942), le réacteur est composé d'un corps (a), d'une zone de stockage de la biomasse (b) et d'une zone de déchargement (c).

Les gaz chauds sont introduits au point (d), les gaz froids au point (e) ; ces gaz ainsi que ceux dégagés par la réaction sont récupérés dans la partie haute du réacteur (f). Un réfrigérant (g) permet de dissocier les produits condensables des incondensables. Les condensats sont récupérés en (j). Les incondensables sont épurés (i) puis une partie de ceux-ci sont réintroduits dans le circuit et sont chauffés.

La température et la quantité de gaz inerte à introduire dépend des caractéristiques de la biomasse (nature, taille, humidité).

- PARTIE 2 - PROCÉDES INDUSTRIELS DE CARBONISATION

En pratique, la température des gaz chauds varie de 300 à 600 °C (Lambiotte, 1942), alors que celle des gaz froids est de 40 °C. Pour carboniser un mètre cube de bois, il est nécessaire d'utiliser 800 à 2000 m³ de gaz inertes dont 150 à 200 m³ sont utilisés pour le refroidissement.

Les systèmes de chauffage des gaz utilisés sont divers :

- Soit, préchauffage : échangeur, four à gaz, ...
- Soit, combustion des gaz de pyrolyse (variante SIFIC)

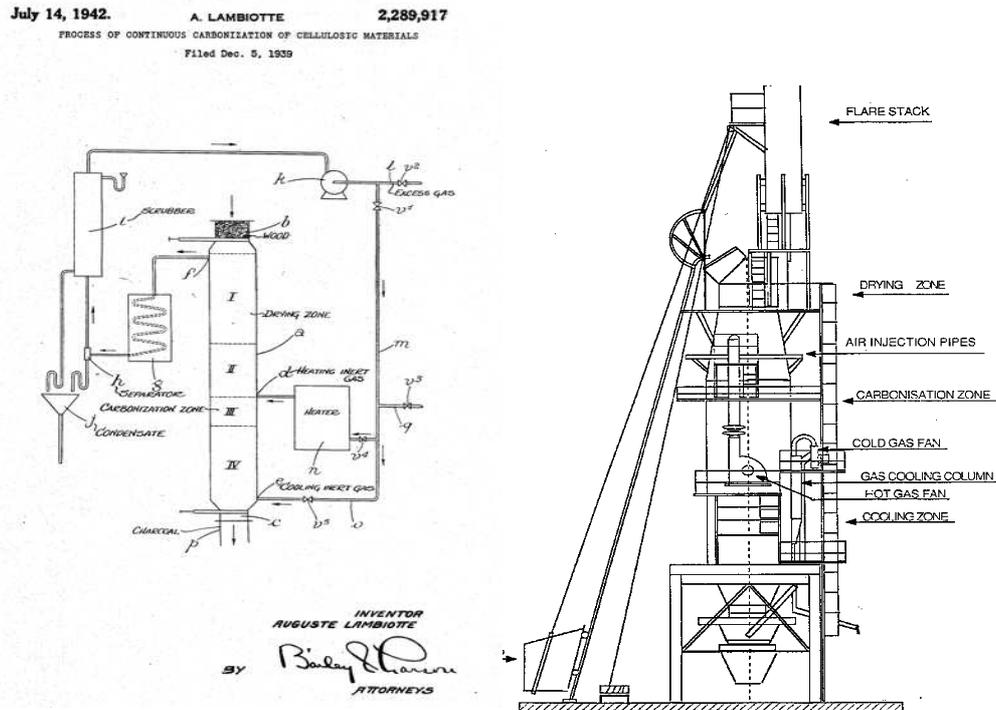


Figure 15 : Schéma du réacteur Lambiotte (schémas en annexe)

Tableau 7 : Caractéristiques de l'installation (Source : Lambiotte SA)

Production annuelle de charbon	2 000 – 6 000 tonnes, selon dimensions.
Quantité de bois quelque soit le type et la qualité	8,000 – 24 000 tonnes - humidité sur brut 25 % - longueur maximale des bois : 33 cm. - diamètre maximal 10 cm
Rendement en charbon	245 kg par tonne de bois
Puissance installée	120 à 150 kW.
Puissance consommée	40 à 60 kW.
Masse	95/100 tonnes.
Surface	600 m ² .
Main d'œuvre requise	14 à 17 personnes .
Durée de vie	15 ans.

Le procédé Pyro-7 (Figure 16) utilise le même principe mais avec un réacteur rotatif horizontal. Il a été développé par Green Charcoal international pour produire du charbon agricole à partir de typha. Le taux de charbon est aux alentours de 20 à 30 % à partir du typha sec à l'air.

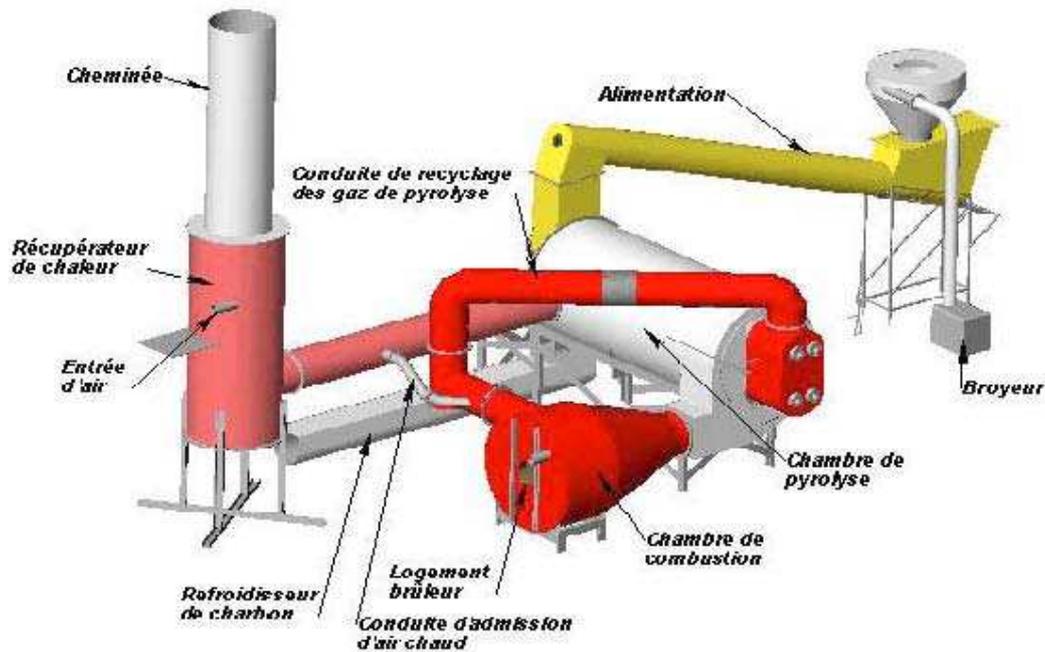


Figure 16 : Schéma du réacteur Pyro 7F, Green charcoal international, 2008

Les procédés précédents à lit continu fonctionnent sur le même principe et mettent en œuvre des organes identiques. Les différences sont liées à leur degré d'industrialisation.

Leur fonctionnement peut être synthétisé par le schéma en Figure 17: Schéma synthétique d'un réacteur à lit continu

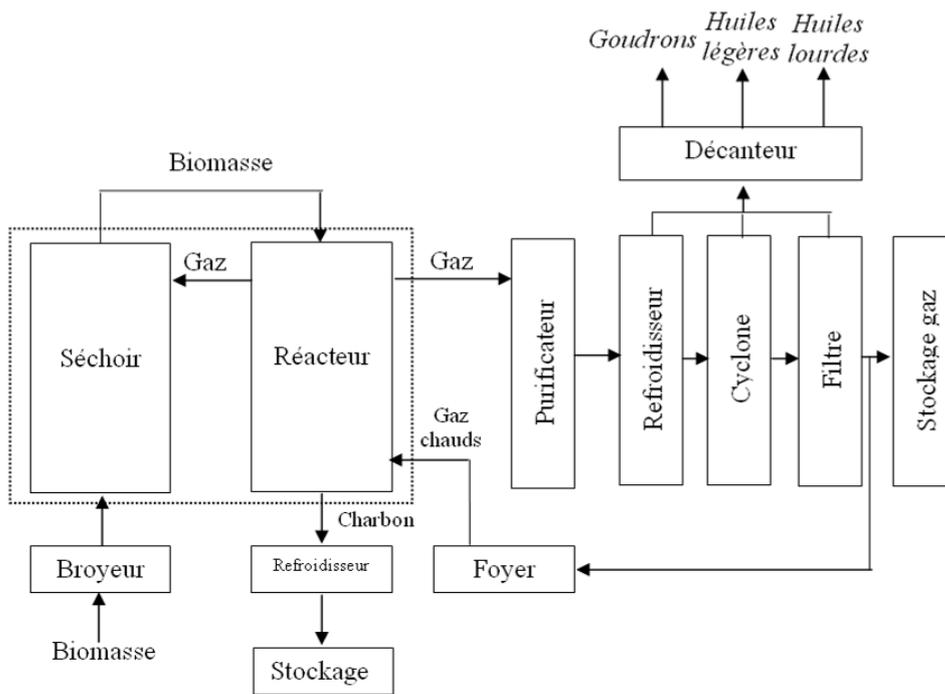


Figure 17: Schéma synthétique d'un réacteur à lit continu

- PARTIE 3 - EXPERIMENTATIONS

1. ETUDE DES MATIERES PREMIERES VEGETALES

1.1. Méthode

1.1.1. Humidité des biomasses

La biomasse étudiée provient de la région d'implantation du projet au Sénégal.

La mesure de l'humidité doit répondre à un protocole strict à respecter.

L'humidité calculée est l'humidité sur sec, d'après la formule suivante :

$$H(\%) = \frac{m_h - m_a}{m_a} * 100 \text{ avec } \begin{cases} m_a \text{ masse anhydre} \\ m_h \text{ masse humide} \end{cases}$$

Le séchage a lieu dans une étuve à $103^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Lorsque la variation de masse est inférieure à 1%, la biomasse est considérée sèche.

Pour effectuer un PCI, il faut que la biomasse soit anhydre. Pour les essais de carbonisation la biomasse est conservée à température et humidité ambiante, elle a donc une humidité non nulle (environ 8-12%).

1.1.2. Etude du pouvoir calorifique



Figure 18 : Pastille et pastilleuse

Cette étude se fait sur des petits échantillons anhydres de biomasse pesant entre 0,5 g et 1,5 g. Si elle se trouve sous forme pulvérulente, il faut alors la compacter sous forme de pastille (Figure 18) de manière à éviter tout risque d'explosion dans la bombe. Ce compactage se fait manuellement à l'aide d'une presse hydraulique (ou pastilleuse) permettant de monter à 10 000 PSI (environ 690 bars). Si l'agglomération ne fonctionne pas, il peut être ajouté à la biomasse étudiée une quantité connue d'acide benzoïque. Connaissant le PCI de cet acide (26 454 kJ/kg), la valeur du PCI de la biomasse peut être alors déterminée.

Une fois la pastille effectuée, il faut la positionner dans la coupelle métallique de la bombe calorimétrique (Figure 19, flèche bleu). Pour initier la combustion, un fil chaud de longueur constante est placé en contact avec l'échantillon (Figure 19, un tour de bobine, soit 10cm). Ce fil est connecté aux pattes du couvercle de la bombe.

- PARTIE 3 - EXPERIMENTATIONS

Protocole d'essai à la bombe calorimétrique

- Lorsque la biomasse est installée sur le support, fermer la bombe en veillant à ce que la vidange d'air (Figure 19, flèche verte) soit bien ouverte et serrer le couvercle.
- Fermer la vidange et brancher la bouteille d'oxygène sur la bombe calorimétrique (Figure 19, flèche rouge) afin de la remplir d'oxygène (10 bars) ; cet excès d'oxygène permet la combustion complète de l'échantillon.
- Brancher les fils à la bombe calorimétrique (Figure 19, flèches oranges)
- Plonger dans le réservoir d'eau précédemment remplie de 2 litres d'eau à environ 17°C.
- Fermer le couvercle du calorimètre et suivre les instructions à l'écran.



Figure 19 : Bombe calorimétriques et accessoires (photo B.Cluet)

A la fin de l'essai, le PCI s'affiche.

1.1.3. Analyse élémentaire de biomasse

Un échantillonnage a été effectué afin de les envoyer au laboratoire pour faire des analyses élémentaires. Ces analyses ont eu pour objectif de déterminer les concentrations en chlore, soufre, potassium, sodium, calcium, cuivre, fer et aluminium.

1.1.4. Taux de cendre

Le taux de cendre se fait sur des quantités de biomasse comprise entre 30 g et 100g. Cette masse doit être mesurée précisément (au centième de gramme).

Cinq taux de cendre peuvent être effectués en même temps, lorsque les prélèvements sont effectués, il faut installer les récipients dans le support prévu (Figure 20). Le tout est ensuite posé sur une plaque chauffante à 350°C pendant environ 9h. Cette étape permet de carboniser une grande partie de la biomasse et éviter d'émettre trop de polluants dans le laboratoire.

Les récipients sont ensuite disposés dans le four permettant de monter à 815°C, les échantillons restent dans le four pendant 24h.

A la fin de l'essai le récipient est pesé et la masse de cendre restante et le taux de cendre peut être déterminé grâce à la formule suivante.

$$\text{Taux de cendre (\%)} = \frac{\text{masse de cendre}}{\text{masse de biomasse sèche}} * 100$$

La biomasse influe sur la couleur, l'aspect et la quantité de cendres (Figure 20)



Figure 20 : Cendres et matériels pour la détermination du taux de cendre

1.2. Résultats et analyse

1.2.1. Humidité

Tableau 8 : Humidité des biomasses

Humidité de la biomasse	Humidité sur sec	Humidité de la biomasse	Humidité sur sec
typha tige	719,13%	balle de riz	13,03%
typha feuille	66,96%	bagasse	59,50%

La balle de riz était relativement sèche, à cette humidité, il est possible de la carboniser directement sans phase de séchage, la tige de typha est au contraire extrêmement humide, cela pose un problème car il faut une phase de séchage préalable à tout traitement ultérieur. La bagasse et les feuilles de typha ont une humidité relativement élevée, il faut en tenir compte pour la suite du projet et régler ce paramètre.

1.2.2. Analyses élémentaires

Le graphique suivant est une synthèse des résultats des analyses élémentaires.

La concentration en cuivre, potassium, chlore, sodium et calcium est plus importante dans le typha que dans les autres biomasses ; cela pourrait s'expliquer par le fait que le typha pousse sur des sols humides qui étaient précédemment recouvert par de l'eau saumâtre.

La bagasse a un taux d'aluminium relativement élevé.

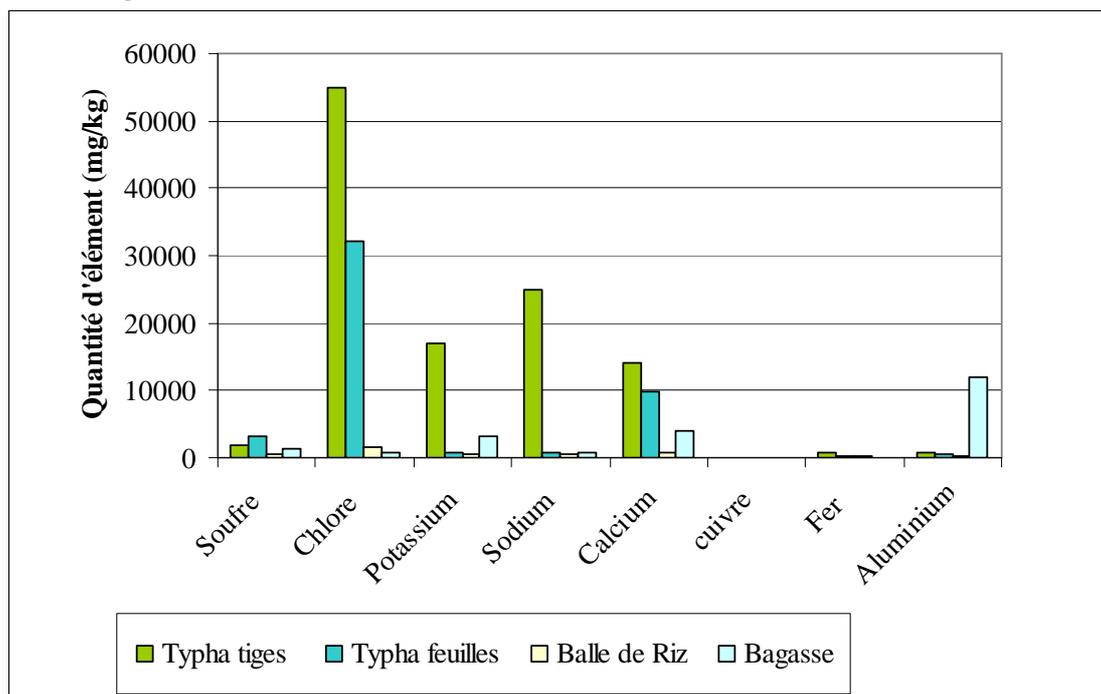


Figure 21 : Analyse élémentaire des biomasses

Le pouvoir calorifique inférieur des biomasses est compris entre 15 000 kJ/kg et 18 000 kJ/kg.

A) Typha.

	Soufre (mg/kg)	Chlore (mg/kg)	Potassium (mg/kg)	Sodium (mg/kg)	Calcium (mg/kg)	Cuivre (mg/kg)	Fer (mg/kg)	Aluminium (mg/kg)	PCI (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	Taux de cendre à 815°C
Typha tiges	1800	55000	17000	25000	14000	4,7	690	900	16000	3824	15,76
Typha feuilles	3200	32000	690	840	9700	5,1	370	470	18800	4493	8,23

Dans cette biomasse, la quantité de chlore est extrêmement importante, 5,5 % sur masse sèche. Ce composé est très dérangeant pour la combustion car il s'évapore et cela engendre des fumées très toxiques (organochlorés). Ces composés organochlorés sont écotoxiques, mutagènes, cancérigènes et ou reprotoxiques. Autrement dit, il faut absolument régler ce problème par un filtrage des fumées. Ces composés sont également extrêmement stables, leur durée de vie peut aller jusqu'à plusieurs siècles.

La concentration en sodium est également relativement élevée (1,7 %).

La concentration en soufre de 0,18 % pourrait aussi générer des problèmes car ce composé peut se combiner avec l'hydrogène pour former des sulfures d'hydrogènes (toxique) ou encore en se combinant à l'oxygène il y a dégagement de dioxyde de soufre (SO₂) qui est responsable de l'acidification des pluies par la formation d'acide sulfurique en présence de dioxyde d'azote.

Ces grandes concentrations en chlore et sodium peuvent s'expliquer par le fait que les roseaux poussent sur un sol qui était recouvert par de l'eau saumâtre jusqu'à la création du barrage dans les années 1980.

Le pouvoir calorifique des feuilles de typha est plus élevé que ceux des biomasses étudiées.

Le taux de cendre est supérieur à celui du bois. C'est cependant le moins élevé de l'étude.

B) Balle de riz

	Soufre (mg/kg)	Chlore (mg/kg)	Potassium (mg/kg)	Sodium (mg/kg)	Calcium (mg/kg)	Cuivre (mg/kg)	Fer (mg/kg)	Aluminium (mg/kg)	PCI (KJ/kg)	PCI (Kcal/kg)	Taux de cendre à 815°C
Balle de Riz	480	1700	430	560	890	2,7	270	370	15203	3634	20,67

La balle de riz est de composition plus saine : les taux de soufre et chlore sont beaucoup plus faibles. Il faut cependant bien faire attention à la composition des fumées afin de vérifier si il y a un risque lié aux 0,17 % de chlore.

Le taux de cendre est quant à lui beaucoup plus élevé.

D'après les essais de pastillage que nous avons effectués, la balle de riz se compacte bien et les pastilles effectuées sont bien cohésives. Il serait peut être intéressant de faire des granulés de balle de riz avant de les transporter afin de densifier le combustible.

C) Bagasse

	Soufre (mg/kg)	Chlore (mg/kg)	Potassium (mg/kg)	Sodium (mg/kg)	Calcium (mg/kg)	Cuivre (mg/kg)	Fer (mg/kg)	Aluminium (mg/kg)	PCI (KJ/kg)	PCI (Kcal/kg)	Taux de cendre à 815°C
Bagasse	1200	830	3200	830	4100	17	2	12000	16830	4022	23,95

La bagasse à le taux de chlore le plus faible, il contient cependant un petit peu de soufre (0,12 %). La quantité d'aluminium est relativement importante.

Le taux de cendre est également très élevé : pratiquement ¼ de la biomasse.

1.3. Discussion

La concentration en chlore est un réel problème pour la combustion ou la carbonisation car elle entraîne la formation de composés chimiques particulièrement dangereux pour la santé humaine et l'environnement. Il faudra donc mettre en place un système de traitement des biomasses, des charbons et des fumées afin de garantir la qualité des charbons.

Cette phase de traitement est extrêmement importante si le charbon est destiné à l'usage ménager car dans ce cas le charbon est brûlé dans des foyers sans traitement des fumées. Ceci entraîne des altérations environnementales et sanitaires.

Les pouvoirs calorifiques sont relativement élevés mais pas suffisant pour que la biomasse soit utilisée en tant que substituant au charbon minéral, c'est pourquoi il faut mettre en place un processus de densification énergétique.

2. PROCEDES DE CARBONISATION

2.1. Carbonisation dans un four traditionnel

Les premiers essais ont été réalisés dans un four classique à 350 °C (le four utilisé pour faire les taux de cendres) durant ½ heure. La masse initiale et la masse finale ont été mesurées. Les rendements de la carbonisation sont d'environ 32 % sur masse humide (à humidité ambiante). Le PCI du charbon est de 25000 kJ/kg, soit une densification énergétique de 47% (sur la biomasse sèche).

La densification énergétique à été calculée ainsi :

$$\text{Densification énergétique} = \frac{PCI_{\text{charbon}} - PCI_{\text{biomasse}}}{PCI_{\text{biomasse}}} * 100$$

Ce procédé a permis de valider la possibilité de faire du charbon avec le typha.

2.2. Dessin des réacteurs

Un réacteur en pyrex, présenté en Figure 22, a été dessiné afin de fabriquer du charbon tout en permettant un contrôle de l'évolution du front de combustion.

L'allumage du réacteur sera effectué grâce à un collier chauffant. Lorsque la température interne du réacteur sera suffisamment élevée, le collier chauffant pourra être ôté. Le contrôle de la réaction se fera grâce à l'alimentation en air ou en azote par les tubes d'alimentation se trouvant en bas du réacteur.

Si la température interne est trop faible, il faudra augmenter l'insufflation d'air pour augmenter les réactions d'oxydation ; si au contraire, la température est trop élevée, il faudra insuffler de l'azote pour diminuer les réactions d'oxydation.

Ce réacteur transparent permettra de visualiser le front de pyrolyse qui devrait, (selon des expériences effectuées précédemment durant le stage de 2^{ème} année (*Rapport de stage 2^{ème} année Cluet 2010*)) évoluer du bas vers le haut de manière extrêmement lente. L'idée de ce réacteur serait d'augmenter légèrement l'oxydation de la biomasse afin d'accélérer la vitesse de propagation du front de pyrolyse.

Le réacteur est en cours de réalisation, les expériences n'ont donc pas pu être réalisées. Elles le seront lors du stage de fin d'étude.

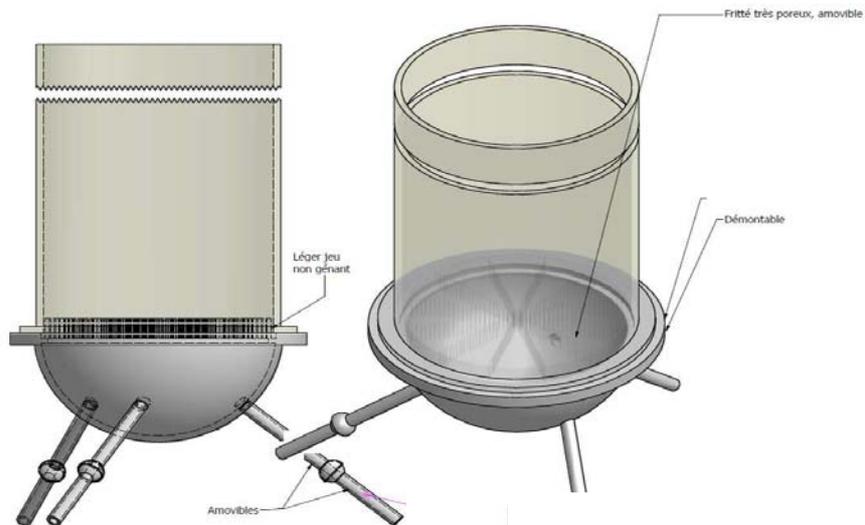


Figure 22 : Réacteur en pyrex

Un réacteur (Figure 23) avec un tube de cheminée isolé par de la laine de roche densifiée (tube intérieur et extérieur en inox) a été fabriqué. Ce tube dont le fond est bouché par un disque métallique.

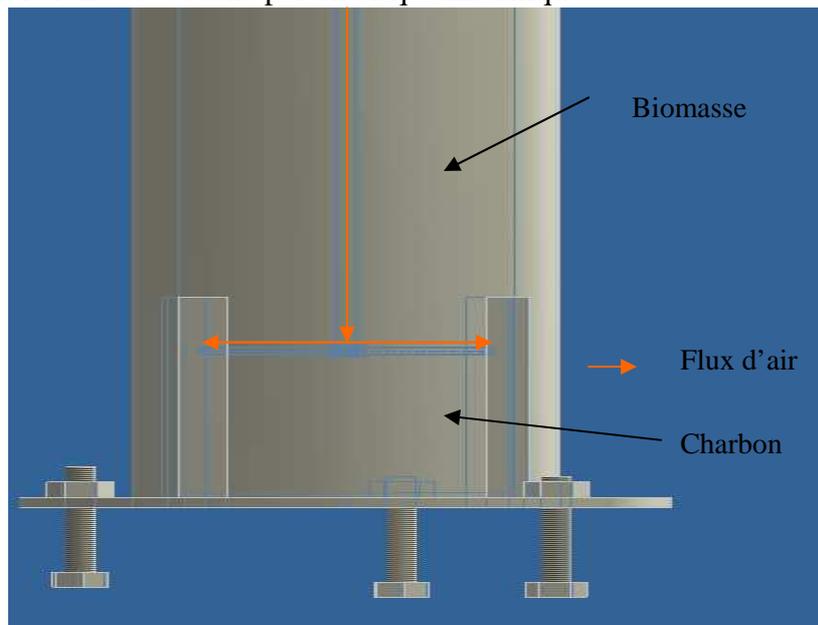


Figure 23 : Réacteur métallique

Ce réacteur est différent du précédent car il a pour but de modéliser le fonctionnement d'un lit continu, la canne d'alimentation en air est mobile, elle peut translater de bas en haut. En début de manipulation, elle se trouve au fond du réacteur, puis elle est remontée au fur et à mesure de l'expérience de façon à simuler un lit continu.

2.3. Méthode

2.3.1. Préparation du matériel

Le réacteur peut être divisé en deux parties : le corps du réacteur (Figure 24) et la canne d'alimentation en air (Figure 25).



Figure 25 : Canne d'alimentation en air



Figure 24 : Corps du réacteur

Protocole de carbonisation

- Fixer à la canne d'alimentation en air le thermocouple afin que la température mesurée soit juste au niveau de l'alimentation en air.
- Mesurer le débit d'air injecté dans le réacteur, à l'aide d'un débitmètre à liquide. Pour cela brancher en sortie de la vanne manométrique le pistolet. Connecter le pistolet au débitmètre et régler le débit souhaité. Lorsque le débit est réglé ne plus le dérégler de toute la manipulation.
- Peser la biomasse à insérer dans le réacteur.
- Mesurer le PCI de la biomasse.
- A la fin de l'essai peser la masse de charbon fabriqué et mesurer le PCI

Déroulement de l'essai

- Démarrer le réacteur par combustion d'une partie de la biomasse à carboniser, utiliser la canne d'alimentation en air pour apporter le comburant nécessaire à la combustion.
- Lorsque la température de combustion est suffisamment élevée (supérieure à 400 °C), insérer la canne d'alimentation en air et remplir le réacteur de la biomasse à carboniser.
- A partir de ce moment il faut régler le débit d'air à un niveau très faible et ne plus y toucher jusqu'à la fin de la manipulation.

- Attendre que la température se stabilise. Si la température est supérieure à 400 °C, relever la canne de 3 cm en la secouant afin de faire tomber la biomasse qui se trouve au dessus dans la zone chaude.
- Attendre que la température atteigne de nouveau 400 °C et recommencer jusqu'à arriver en haut de la biomasse.
- Une fois que toute la biomasse a été carbonisée, sortir la canne d'alimentation en air et vider le contenu du réacteur dans une caisse métallique et refermer immédiatement la caisse afin de limiter au maximum que le charbon soit oxydé par l'air.
- Lorsque la température de la caisse est inférieure à 150 °C, la caisse peut être ouverte sans risque d'oxydation.

2.3.2. Première modification du réacteur

Des thermocouples sont installés le long du réacteur afin de pouvoir voir l'évolution de la température. Ils sont installés dans des tubes (Figure 26 flèches oranges) traversant le tuyau et ne dépasse que d'environ 1cm dans la biomasse. Sur la photo suivante, les tubes pour les thermocouples sont bouchés par du scotch afin d'éviter les entrées d'air non maîtrisées.

Le déplacement vertical de la canne est manuel, la canne est bloquée à l'aide d'un pince pour être sûr qu'elle ne redescende pas. Il n'y a pas de moyen permettant d'être certain que la biomasse est bien tombée au fond du réacteur, il peut se créer une poche d'air entraînant un dysfonctionnement.



Figure 26: Modification du réacteur

2.4. Résultats

Les premiers essais effectués ont été fait avec du bois, Les résultats sont encourageant : le charbon de bonne qualité (PCI d'environ 29 500 kJ/kg) et relativement homogène.

La position de l'admission en air est donc faite au jugé en fonction du temps et de la quantité de fumées sortant du réacteur.

Un essai avec du typha a été effectué, le résultat est beaucoup plus mitigé. Le contrôle ne se fait pas si facilement que prévu et les températures ne se distinguent pas bien les unes des autres.

D'autre part, le combustible récupéré a été stocké dans un récipient sans air, or la température était trop élevée, il y a eu du « smouldering » (consumation très lente en présence de très peu d'oxygène). La quasi-totalité du charbon s'est consumée, le petit échantillon récupéré à un PCI de 21 000 kJ/kg. Le produit obtenu est plutôt du typha torréfié car la couleur n'est pas uniformément noire mais plutôt marron foncé.

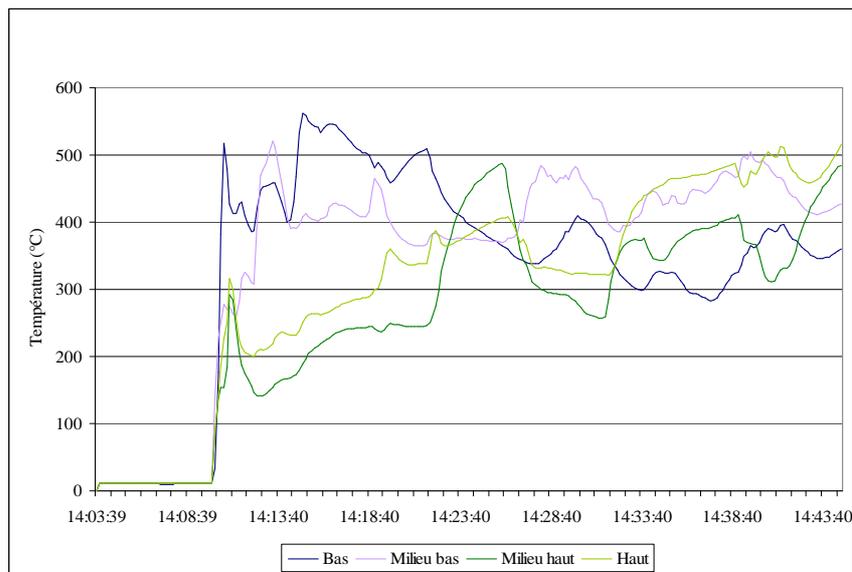


Figure 27 : Evolution de la température dans le réacteur

2.5. Discussion

La manipulation (Figure 27) actuelle n'est pas aboutie, la gestion de l'admission en air n'est pas très précise et il est difficile de remonter progressivement la canne d'alimentation sans mélanger la biomasse. Les prises de températures sont fixes, cependant lorsque la canne bouge, la biomasse se déplace également ; cela engendre des variations importantes de température, par exemple, à 14h20 la canne a été remontée, ce mouvement a entraîné un déplacement de la matière et une partie de la biomasse chaude est venue au contact du thermocouple milieu haut alors qu'une partie de biomasse plus froide est venue en contact du thermocouple bas.

Afin de pouvoir réellement suivre l'évolution de la carbonisation il faudrait que la source d'air provienne de l'extérieur afin de ne pas détériorer les strates de biomasses.

Durant l'un des essais, l'ensemble de la biomasse s'est enflammée. Cela est dû à un excès d'air insufflé, dans ce cas nous n'avons aucun moyen d'arrêter la combustion, il pourrait être utile d'installer un dispositif permettant d'éteindre les flammes en cas de problème (système soufflant de l'azote ou un piston qui chasserait l'air et empêcherait toute combustion).

Il serait également intéressant de trouver la température à partir de laquelle le charbon ne risque pas de se décomposer par smouldering. Pour cela il faudrait faire des tests en élevant petit à petit la température jusqu'à trouver à partir de quel moment la réaction est autoalimentée.

Si une réaction de smouldering s'initie, il risque d'être extrêmement difficile d'éteindre ce feu. D'autre part si un stock de charbon commence à se dégrader par smouldering, il y a un risque non négligeable de déclencher un incendie de grande ampleur.

3. ETUDE DE LA COMPACTION ET DE L'AGGLOMERATION DU CHARBON

3.1. Méthode

L'objectif de cette granulation est d'augmenter la densité du charbon. En effet, le charbon obtenu à partir du typha, de la balle de riz ou de la bagasse est sous forme poudre (ou de particules fines). Cette poudre est très peu dense, il est possible de la densifier par vibration. Cependant la densité reste toujours trop faible pour être viable : le chargement d'un camion ne représenterait pas assez d'énergie pour être économiquement et environnementalement rentable.

3.2. Résultats

Les seuls essais effectués ont été réalisés sur du charbon de typha fait dans un four à 300°C. La densité de ce charbon une fois broyé est de 162 kg/m³ contre 215 kg/m³ pour le même charbon une fois tassé par vibration. Ces masses volumiques sont trop faibles pour se permettre de transporter ce combustible sur 400 km.

- PARTIE 4 - ETUDE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

1. EVALUATION ECONOMIQUE DU PROJET

L'installation doit produire au minimum 200 000 tonnes de charbon par an à un PCI de 25 000 kJ/kg.

Pour un réacteur de type Lambiotte/SIFIC, les données sont les suivantes :

- Consommation annuelle de biomasse par réacteur : 6000 t (sur sec)
- Production annuelle de charbon attendue par unité : 2000 t (rendement de 30 %) à 25 000 kJ/kg

Il faut donc 20 réacteurs de ce type pour obtenir le volume désiré par la cimenterie.

Le coût du réacteur est de 1 000 000 € (prix actualisé, *Emrich, 1985*). L'installation complète est de 20 000 000 €.

Tableau 9 : Estimation des coûts en euros, 2011

	Prix unitaire	Quantité	Prix total	Source
Réacteur de carbonisation	1 000 000	20	20 000 000	Emrich, 1985 - actualisés
Agglomérateur à vis	50 000	20	1 000 000	INGESAHEL, 1998
Transporteurs	100 000	20	2 000 000	Emrich, 1985 - actualisés
		Investissements	23 000 000	
Main d'œuvre	2 000	50	100 000	PERACOD, 2008 INGESAHEL, 1998 Lambiotte, 2010
Maintenance	6 000	20	120 000	INGESAHEL, 1998
Electricité	6 000	20	120 000	Emrich, 1985 - actualisés
		Charges annuelles	340 000	
Production de charbon	450	200000	90 000 000	Cours du Charbon - 2011
		Produits annuels	90 000 000	

Par conséquent, il est possible de calculer grossièrement le coût de revient de la tonne de charbon. L'amortissement de l'installation est considéré sur 15 ans (durée de vie du réacteur Lambiotte). Le prix de la tonne de carbone est de 15 €.

Tableau 10 : Coût de revient de la tonne de charbon

Calcul du prix de revient		
<i>Ammortissement sur 15 ans</i>	<i>1 533 333</i>	
<i>Charges annuelles</i>	<i>340 000</i>	
Total annuel	1 873 333	
Prix de revient	9	€/tonne de charbon
Carbone économisé	135	€/tonne de charbon

Les coûts de matière première sont hypothétiquement nuls. Cependant, il serait judicieux de prendre en compte les coûts d'exploitation du typha.

Ce calcul ne prend pas en compte les coûts liés aux infrastructures annexes, la location du sol, ...

Pour confirmer la faisabilité et mesurer la rentabilité économique dans le but d'une multiplication de l'activité, le développement de la technologie devrait passer par la mise en œuvre d'unités pilotes de production de charbon.

2. ANALYSE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Pour ce projet, il n'a été possible de récolter qu'une infime partie des données. Par conséquent, cette analyse n'a pu être menée jusqu'à son terme. Cependant, la méthodologie est développée afin d'initier le travail et de fournir des pistes de réflexion pour la continuité du projet.

2.1. Détermination des objectifs et du champ d'étude

2.1.1. Objectif de l'étude

L'évaluation environnementale du projet est menée avec l'outil « Analyse du cycle de vie des produits », plus connu sous le terme « ACV ».

Dans un premier temps, l'objectif est d'évaluer les impacts potentiels sur l'environnement des différentes voies de valorisation possible. Cela comprenant l'ensemble des activités associées à la fabrication du combustible depuis son extraction jusqu'à l'élimination des déchets. Dans un second temps, une comparaison des scénarii étudiés sera menée.

2.1.2. Détermination des systèmes étudiés

Les systèmes étudiés seront les suivants :

- Système 1 : Scénario actuel – Utilisation de charbon minier.
- Système 2 : Utilisation de charbon venant de la carbonisation du Typha avec différentes voies de densification massique.

2.1.3. Définition de l'unité fonctionnelle

De façon à pouvoir comparer les bilans environnementaux des scénarii, il faut définir une base de comparaison, appelée unité fonctionnelle :

L'unité fonctionnelle est :

« Produire 200 000 tonnes par an de charbon ayant un PCI de 6 000 kcal/kg »

2.1.4. Périmètres du projet

La définition du périmètre de l'étude est une étape fondamentale dans la méthodologie de l'ACV. Il existe trois niveaux de périmètre :

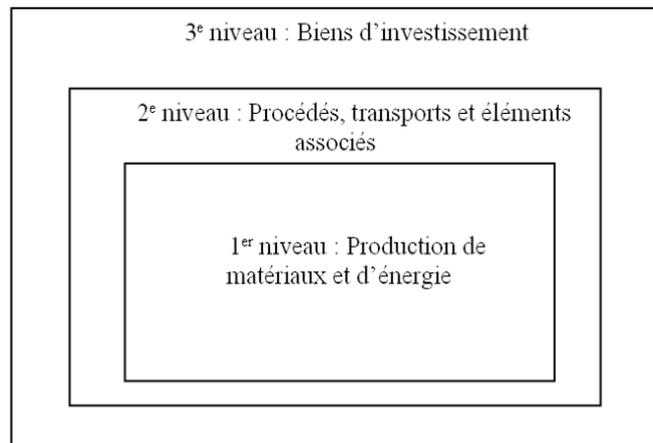


Figure 28 : Périmètre d'étude de l'ACV

Pour cette étude, il apparaît judicieux de travailler sur les niveaux 1 et 2 puisque les procédés, transports et éléments annexes sont différents. Cependant, l'évaluation des impacts des biens d'investissement n'apparaît pas pertinente car le ratio « énergie consommée pour la construction du bien » sur la quantité totale de matière transformée semble négligeable devant la quantité d'énergie consommée pour la production du bien.

D'autre part, chaque scénario étudié génère un produit principal (le charbon) et des coproduits. Comment, dès lors, attribuer l'impact de chaque activité à chacun des produits ?

Il faudrait éviter le plus possible d'utiliser l'imputation en modélisant les filières des coproduits. Lorsque l'imputation ne peut être évitée, il faudrait essayer d'identifier les relations physiques entre les coproduits (exemple : taux massique de produit, énergie) et affecter aux produits des pondérations reflétant ces relations physiques.

3. INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE

3.1.1. Collecte des données

La collecte des données n'a pas pu être faite. Pour mener l'ACV, il faudrait se rendre sur place et récolter les données nécessaires auprès, d'industriels, d'experts et de rechercher des données dans les logiciels d'ACV. Les bases de données EcoInvent ne sont adaptées qu'au contexte européen ; il apparaît peu judicieux d'utiliser ces dernières à un contexte sénégalais.

Ces données doivent avoir une représentativité :

- géographique : données du Sénégal et d'Afrique du Sud pour le charbon minier
- temporelle : données actuelles
- technologique : technologie moyenne utilisée

3.1.2. Description des filières étudiées

La première étape consiste à définir la séquence d'activités présentes dans chacun des scénarii étudiés, de l'extraction de la matière première au traitement des déchets finaux. L'ensemble des activités liées à l'utilisation de charbon des deux combustibles est décrite dans la Figure 29.

Cette étude prend en compte :

- La production de charbon minier
- La production de charbon végétal
- La distribution de ces deux combustibles
- La consommation en énergie et en autres fluides

Cette étude ignore :

- Le devenir du charbon après sa livraison à la cimenterie car le devenir du combustible est identique

Cette représentation permettra d'identifier clairement les activités impactantes et d'identifier les améliorations potentielles à apporter aux processus.

Certaines activités ont été regroupées dans un souci de clarté de lecture. Il faut garder à l'esprit que l'analyse doit porter sur des activités dissociées.

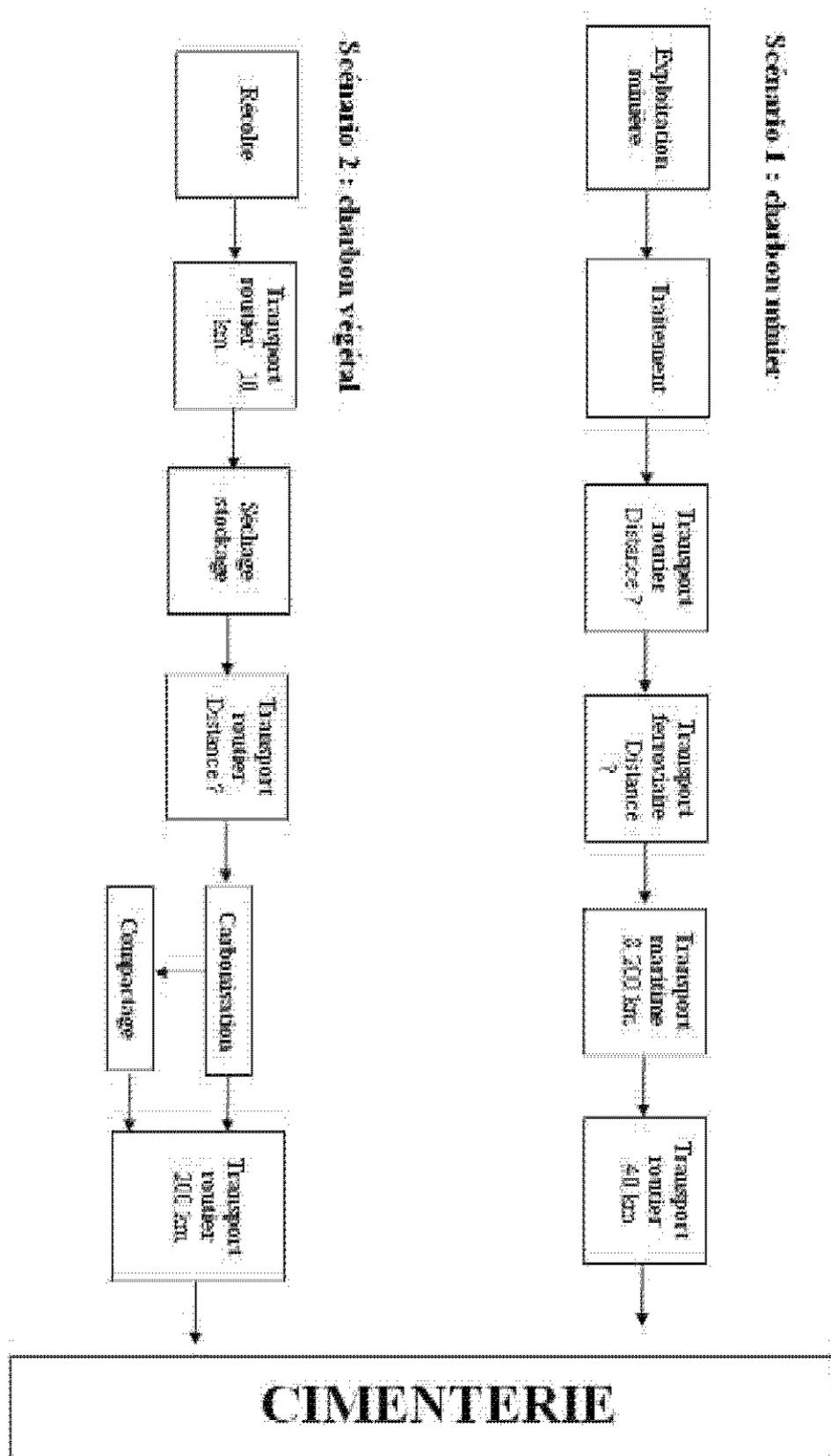


Figure 29: Organisation simplifiée des activités

3.1.3. Description des activités

La description consiste à inventorier pour chaque étape du processus les intrants et les sortants. Les intrants incluent les matériaux principaux utilisés dans le processus, les ressources et l'énergie consommée. Les sortants prennent en compte les produits principaux et les coproduits, les déchets solides, l'énergie thermique dégagée par le processus, les émissions vers l'eau, l'air et le sol.

Cette étape fournit des informations importantes sur les poids de chaque activité associés à chaque produit et scénario.

Scénario 1

Exploitation minière

Cette phase est réalisée en Afrique du Sud. Ce charbon contribue à l'alimentation de 90 % des besoins de la cimenterie.

Il n'y a pas de données facilement disponibles concernant les impacts de l'exploitation minière en Afrique du Sud.

Transport routier

Mine – Gare marchandise

Dakar – Cimenterie

L'impact environnemental dépend du type de camion utilisé (performance environnementale) qui n'a pu être déterminé.

Transport ferroviaire

Gare marchandise – Terminal de charbon du port de Richards Bay

Ce transport permet d'acheminer le charbon au port.

L'impact environnemental dépend du type de matériel ferroviaire et de la source énergétique (électricité, diesel, voire charbon) qui n'ont pas pu être déterminés. D'après les données statistiques du port de Richards Bay (*Richards Bay coal terminal, 2011*), chaque train transporte 7 900 tonnes de charbon.

Transport maritime

Ce transport permet d'acheminer le charbon depuis l'Afrique du Sud (port de Richards Bay) au Sénégal. La distance est de 8 200 km.

Le type de bateau n'a pu être déterminé. D'après les données statistiques du port de Richards Bay, chaque bateau transporte 100 000 tonnes de charbon.

Scénario 2

Récolte du typha

La récolte peut être menée par des véhicules amphibies permettant un rendement de 30 à 40 tonnes de matière sèche par jour. Ces véhicules sont composés d'une plate-forme de travail portée par 4 ou 6 roues à pneus ballons basse pression, sur laquelle différents modules de récolte peuvent être montés, notamment une faucardeuse (machine servant à faucher les herbes dans les rivières), une hacheuse, un convoyeur ou une lieuse.

Une estimation grossière donnerait une consommation des machines de 30 à 40 litres par heure de gasoil environ 10 litres d'huile pour 300 heures de fonctionnement.

Transport routier

Lieu de récolte – Unité de carbonisation

Le cheminement proposé est de faire des camions de 25 tonnes de typha entre le lieu de récolte et le lieu de carbonisation (rayon moyen d'environ 30 km)

Unité de carbonisation – Cimenterie

Il est possible d'utiliser des camions de 25 tonnes de charbon pour livrer à l'usine située à 400 km.

Séchage et stockage du Typha

Dans une première approximation, il est plausible de considérer que le séchage sera fait de manière naturelle. Il est possible d'avoir du typha sec à 20 % d'humidité sur brut en 7 à 10 jours (PERACOD, 2006) ; ceci n'est possible que 8 mois par an (INGESAHEL, 1998).

Le stockage de Typha est supposé non émetteur d'effluents. Ceci est vrai s'il n'y a pas de lessivage de la biomasse (émissions vers l'eau et le sol) ou fermentation (émission vers l'air).

Carbonisation

Aucune donnée concernant le procédé de carbonisation n'est encore disponible. Cependant, il est possible de les déterminer facilement sur la base d'autres procédés.

Compactage

Aucune donnée concernant le procédé de compactage n'est encore disponible. Cependant, il est possible de les déterminer en fonction de l'énergie électrique consommé par le processus (fonction de la puissance de l'installation).

3.2. Evaluation des impacts

Les méthodes pour évaluer les impacts sont très nombreuses. Les principaux impacts pouvant être évalués sont :

- Le réchauffement climatique
- La destruction de la couche d'ozone
- L'acidification
- L'eutrophisation
- L'utilisation des terres
- L'écotoxicité

La méthode d'évaluation des impacts sera à définir ultérieurement, lors de la construction de l'analyse sur un logiciel dédié.

4. DISCUSSION

Le manque de données est à déplorer. Il sera difficile de les collecter sur le terrain car aucun organisme n'a en charge cette mission au Sénégal.

Cependant, cette pré-étude permet de repérer les axes de travail à prévoir.

5. INTEGRATION DU PROJET DANS LE MARCHE DU CARBONE

5.1. Description générale du projet

L'objectif du projet est la substitution partielle ou totale de charbon minéral par du charbon végétal issu de la carbonisation de typha ou de déchets agricoles dans la cimenterie du Sahel.



Figure 30 : vue de la cimenterie au début des années 2000, CESA Engineering Février 2010

5.1.1. Description du projet

Le projet de valorisation énergétique des biomasses locales en vue d'un approvisionnement en charbon d'une cimenterie permet de réduire les émissions en gaz à effet de serre de cette industrie.

A ce titre, ce projet peut être intégré dans le marché des certificats carbone via le mécanisme de développement propre (MDP). Le MDP est un mécanisme par lequel des acteurs privés ou publics de pays ayant des engagements par le protocole de Kyoto (pays figurant à l'annexe B) doivent supporter des projets de diminution des émissions de gaz à effet de serre dans des pays n'ayant aucun engagement. En contre partie, cela permet aux partenaires de bénéficier de crédits d'émission carbone. Ce mécanisme de développement a deux objectifs principaux : promouvoir le développement durable et aider les pays développés à atteindre leurs objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre

La Société « Les Ciments Du Sahel », située à 65 km au Sud de Dakar, a installé et mis en service à la fin de l'année 2002 une cimenterie complète d'une capacité de production portée à de 3 000 000 tonnes de ciment avec l'extension réalisée en 2010.

La cimenterie consomme actuellement 200 000 tonnes de charbon minéral par an, dont 90 % sont exploités en Afrique du Sud et viennent par bateau jusqu'à Dakar. Ce charbon est ensuite livré à la cimenterie par camion.

Les sources de biomasse permettant la substitution des énergies fossiles sont diverses.

Tableau 11: Sources de biomasse – PERACOD, 2006

Biomasse	Quantité disponible annuelle	Distance de la cimenterie
Typha	500 000 tonnes	400 km
Paille de riz	200 000 tonnes	
Balle de riz	175 000 tonnes	
Bouts blancs	300 000 tonnes	400 km
Bagasse	250 000 tonnes (1996)	400 km

5.1.2. Contribution au développement durable

Ce projet contribuera au développement durable sur plusieurs points.

D'une part, l'ensemble de la chaîne de la valorisation énergétique du typha ou des déchets agricoles permettra de créer de l'emploi et donnera des opportunités de développement aux communautés rurales. Ces opportunités de développement économique et social sont d'autant plus importantes que ces communautés sont confrontées actuellement à des difficultés grandissantes dues au changement climatique : diminution des rendements agricoles, dégradation des sols, pâturage excessif et sécheresses. De plus, cette substitution, utilisant de la biomasse déjà présente ou des déchets agricoles, n'engendre pas de compétition sur l'utilisation des sols à des fins vivrières (*CDM – EXECUTIVE BOARD, 2006*)

D'autre part, la substitution du charbon importé par de la biomasse permettrait de diminuer les pollutions locales qui sont dues aux poussières de charbon minéral et aux émissions de sulfure. Il en résultera une diminution des émissions nettes de gaz à effet de serre, contribuant de ce fait à l'initiative gouvernementale. L'utilisation de ces biomasses locales permettra de réduire la dépendance énergétique du Sénégal et ouvre des stratégies énergétiques nouvelles pour le gouvernement basées sur des ressources énergétiques « vertes ».

Pour la cimenterie, cette substitution permettra de diminuer sa consommation d'énergie fossile donc de mettre sur le marché des crédits carbone.

Le Typha a colonisé de vastes espaces dans les zones d'inondation des fleuves Sénégal ainsi que sur les axes hydrauliques avec d'importantes conséquences sur les activités humaines et l'écosystème (*Demba, 2009*).

La prolifération du Typha contribue :

- au développement de maladies, (*Equipe de recherche : gestion de la vulnérabilité des systèmes rizicoles du mali aux principaux nuisibles, 2009 – OMVS, 2009*)
- à la baisse de qualité de l'eau pour la consommation humaine, (*Equipe de recherche : gestion de la vulnérabilité des systèmes rizicoles du Mali aux principaux nuisibles, 2009*)
- à la diminution du débit d'eau dans les axes d'irrigation et de drainage, (*MEAM, 2008 – UNICEF, 2010 – OMVS, 2006*)
- à l'envahissement de parcelles cultivées, (*MAEH, 2004*)
- à la création d'une zone refuge pour les oiseaux granivores entraînant une pression accrue sur les cultures céréalières, (*MAEH, 2004*)

- à la diminution d'accès à l'eau pour les populations et les animaux d'élevage, (MAEH, 2004)
- à l'encombrement des zones d'eau libre diminuant les possibilités de pêche, (COGELS, 1997 – NDIAYE, 2010)
- à l'envahissement du lac de Guiers pouvant mener à son comblement, (entraînant la disparition de la principale réserve d'eau du pays et d'un réservoir piscicole important) (COGELS, 1997)
- à l'appauvrissement en termes de biodiversité (flore, oiseaux, poissons) ; (UICN, 2009 – Ministère de l'environnement du Sénégal, 1998 – Reinaud G.)

Actuellement, le typha est entassé et subit une dégradation biologique conduisant au dégagement de gaz à effet de serre, notamment du méthane par dégradation anaérobie (fermentation).

Par conséquent, ce projet s'inscrit dans une logique d'amélioration économique, sociale et environnementale des conditions de vie des populations actuelles et futures.

5.2. Intégration du projet dans le marché du carbone

Les projets pouvant bénéficier du programme « MDP » doivent respecter certains principes (décision IPCC 17/CP.7) : additionnalité et pertinence du scénario de référence.

Un projet est dit additionnel si les émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre sont plus réduites que ce qu'elles auraient été en l'absence d'activité liée au projet de MDP (principe d'additionnalité).

La référence d'un projet de MDP est le scénario qui représente le plus raisonnablement possible les émissions de gaz à effet de serre en l'absence de projet MDP. Cette référence peut inclure des scénarii d'augmentation des émissions.

Détermination du scénario de référence

Le scénario doit être choisi parmi les scénarii approuvés par le GIEC et doit être le plus proche de la situation actuelle. Parmi ces scénarii, les approches sont différentes :

- Emissions actuelles ou historiques
- Emissions par une technologie qui représente une attractivité économique judicieuse, prenant en compte les barrières à l'investissement
- Emissions moyennes de projets similaires sur les 5 précédentes années dans un contexte social, économique, environnemental ou technique similaire et dont la performance du procédé est dans les premiers 20 % des projets de sa catégorie.

La durée de validité du scénario est de :

- Dix ans non renouvelables
- Ou 7 ans renouvelables trois fois, avec examen de la validité du scénario de référence à chaque fois.

La méthode qui s'applique à ce projet est la méthode de « réduction des émissions par une substitution partielle d'énergie fossile par des énergies alternatives ou à teneur moindre en carbone dans une cimenterie » (ACM0003)

Le scénario de référence prend en compte les émissions dues à la consommation de combustibles fossiles et à la dégradation de la biomasse disponible par fermentation naturelle.

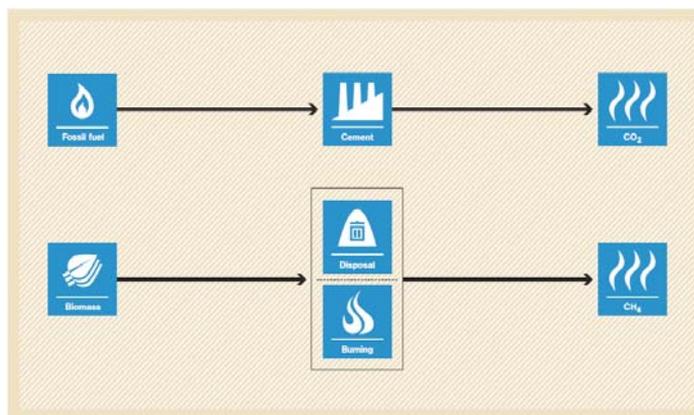


Figure 31 : Scénario de référence

Le projet de substitution permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre par utilisation de combustibles non fossiles. Ces derniers ne sont ni brûlés ni entreposés.

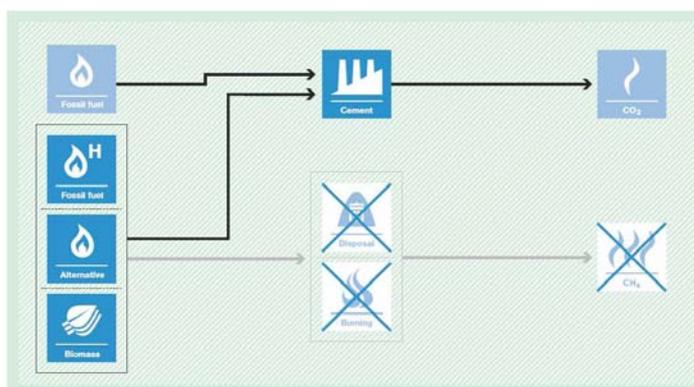


Figure 32: Scénario de substitution

5.2.1. Choix de la méthodologie, des outils et des raisons d'applications au projet

Ce projet se réfère à des méthodologies approuvées par le GIEC qui sont (UNFCCC, 2010) :

ACM0003 / Version 7.2 “Emissions reduction through partial substitution of fossil fuels with alternative fuels or less carbon intensive fuels in cement manufacture”.

Version 02.2 “Combined tool to identify the baseline scenario and demonstrate additionality”.

Version 02 “Tool to calculate project or leakage CO₂ emissions from fossil fuel combustion”.

Version 01 “Tool to calculate baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption”.

Les caractéristiques du projet doivent être conformes à la méthodologie appliquée.

Tableau 12 : Applicabilité de la méthode ACM0003 - Analyse de la conformité

Conditions d'applications	Conditions du projet	Application
Substitution par des énergies alternatives d'énergies fossiles dans une cimenterie	Le charbon consommé par la cimenterie est remplacé par de la biomasse (typha, déchets agricoles)	Applicable
Nécessité d'un investissement initial significatif pour l'utilisation des énergies alternatives	Un investissement significatif (10 000 000 €) est nécessaire pour la mise en place du réacteur	Applicable
Absence d'utilisation d'énergies alternatives pendant les trois ans avant le projet de substitution	Pas de données	
Réduction des émissions de CO ₂ liée uniquement à la combustion de charbon (pas à la matière première de fabrication du ciment : CaCO ₃ , MgCO ₃)	Le projet ne s'intéresse qu'aux combustibles	Applicable
Pas de traitement chimique de la biomasse	La biomasse utilisée n'est pas traitée chimiquement	Applicable
Stockage de la biomasse en conditions aérobies	La biomasse est stockable à l'air	Applicable
Respect des conditions requises par les méthodologies utilisées par ACM0003 à savoir : <ul style="list-style-type: none"> • Version 02.2 • Version 02.0 • Version à 1 • Outil de détermination des émissions de méthane 	Le projet respecte les conditions requises par ces méthodologies	Applicable
Pas de changement du nombre ou de la configuration des fours	Le projet ne s'intéresse qu'à l'alimentation de ces fours en biomasse	Applicable
Faisabilité des scénarii	Ce scénario de substitution est plausible, compte tenu du contexte actuel	Applicable

5.2.2. Justification de l'utilisation de biocombustibles

Pour l'industriel, la réduction des émissions de gaz à effet de serre peut se faire de deux manières : soit une amélioration de l'efficacité énergétique du procédé, soit l'utilisation de combustibles alternatifs.

- Alternative Scenario 1: Utilisation courante de charbon – pratique actuelle

A ce jour, la cimenterie utilise uniquement des combustibles fossiles. L'utilisation d'énergies alternatives est encore peu répandue au Sénégal.

- Alternative Scenario 2: Investissements pour une amélioration de l'efficacité énergétique de la cimenterie

Les perspectives d'investissement dans de nouvelles technologies sont relativement restreintes car l'industrie est récente et s'est agrandie en 2010. Par conséquent, l'industrie utiliserait des procédés efficaces vis-à-vis des impacts sur l'environnement.

- Alternative Scenario 3: Substitution partielle

L'utilisation de combustibles alternatifs apparaît comme le scénario le plus probable. Cependant, ce scénario nécessite la mise en place d'installations coûteuses qui, pour être amorties, doivent répercuter leur coût sur le combustible. Il serait à craindre que le prix des bios combustibles soit plus élevé que le coût du charbon minier utilisé actuellement. Par conséquent, ces combustibles alternatifs seraient moins économiquement intéressants pour l'industriel donc l'appel au MDP est judicieux.

Analyse des barrières

Scenario 1

Cette alternative n'engendre aucun frein car elle s'inscrit dans la continuité des pratiques courantes et n'engendre pas de coûts supplémentaires. La technologie utilisée est connue, maîtrisée et largement utilisée.

Scenario 2

Cette alternative engendre des coûts importants pour la cimenterie qui a déjà investi ces deux dernières années pour son agrandissement. L'État a investi de l'argent dans la création de cette cimenterie de telle sorte à concurrencer la première cimenterie sénégalaise détenant le monopole sur le ciment en Afrique de l'Ouest et faisant flamber les prix.

Scenario 3

La principale barrière de cette alternative est technologique. Cependant, les difficultés pourront être levées facilement, notamment concernant la fabrication du charbon en continu.

Ce scénario pourrait recevoir l'approbation et l'aide du gouvernement sénégalais car il s'inscrit dans les orientations énergétiques du Sénégal déclarées en 2010.

D'après la *deuxième communication nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques au Sénégal* (2010), l'utilisation de charbon de typha permettrait d'éviter l'émission de 9 téqCO₂ par tonne de charbon de typha utilisée en combustible.

L'impact de l'enregistrement du projet dans le mécanisme de développement propre permettrait de garantir la continuité et la rentabilité du projet. Ce projet pourrait permettre d'impulser des démarches similaires dans le pays, conduisant à la substitution d'énergies fossiles par de la biomasse locale

CONCLUSION

La présente étude confirme la possibilité de valorisation énergétique du Typha par carbonisation. Cette valorisation de biomasse permet de répondre à la volonté des politiques énergétiques Sénégalaises et aux attentes de la cimenterie du Sahel.

La pré-étude dresse un inventaire des procédés industriels existants et une analyse de leur fonctionnement. Sur la base de leurs caractéristiques, un prototype de laboratoire a été développé. Ce réacteur a permis de tester la production de charbon.

Les charbons obtenus ont des caractéristiques satisfaisantes bien que la qualité de la production soit hétérogène.

Certains déchets agricoles pourraient faire l'objet de valorisation pour la production de combustibles en se substituant au charbon. Cette diversification des matières premières permettrait de pallier toute rupture d'approvisionnement en Typha, notamment lorsque la récolte ou le séchage de la biomasse n'est pas possible. Actuellement, de nombreuses recherches sont menées sur les diverses valorisations du typha.

Il serait intéressant de poursuivre le développement du procédé et de son dimensionnement. L'étude environnementale reste à développer, notamment la création de la base de données pour l'ACV.

BIBLIOGRAPHIE

Introduction et Partie I

CDM - EXECUTIVE BOARD, Partial Substitution of Coal by Jatropha Fruits and Biomass Residues in the Production of Portland Cement, Project design document form (CDM PDD) – Version 01, *UNFCCC/CCNUCC*, Bonn, 2008, 64 p.

FAO FRA – 2000, Rapport principal, *Evaluation des ressources forestières mondiales – 2000*, Rome, 2000, 462 p.

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DES INSTALLATIONS CLASSEES, Deuxième communication nationale à la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, *Ministère de l'environnement et de la protection de la nature*, Dakar, 2010, 177 p.

Partie II

BALAT M. et al., Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals Part 1: Pyrolysis systems, *Energy Conversion and Management* 50, n° 12, 2009, pp. 3147-3157.

BRIDGWATER T., Pyrolysis of biomass, IEA bioenergy: task 34, Birmingham,, *Bioenergy Research Group*, Aston University, 2007

DICTIONNAIRE DES SCIENCES ET TECHNIQUES, charbon, *Sciences en ligne – Le dictionnaire interactif des sciences et techniques*, Sciences en ligne, 2011

DOMAC J., TROSSERO M., Industrial charcoal production, *Development of a sustainable charcoal industry*, FAO, Zagreb, 2008, 33 p.

EMRICH W., Commission of the European Communities, *Handbook of charcoal making: the traditional and industrial methods*, Energy from biomass, Vol. 7, D.Reidel publishing company, 1985, 278 p.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, Charcoal, *Encyclopædia Britannica Online*. Encyclopædia Britannica, 2011

FAO, Modern carbonising retort systems, In : *Industrial charcoal making*, Chapter 3, FAO Forestry Paper, FAO, Rome, 1985, 14 p.

GRØNLI M., Industrial production of charcoal, SINTEF Energy Research, Trondheim, 2009, 5 p.

GUO J., WANG S., TAN H. et DING S., Study on continuous carbonization process of biomass, In : INTERNATIONAL GAS UNION, 24th World Gas Conference, Buenos Aires, Argentina, 2009, 5 p.

LAMBIOTTE, Auguste, Process of continuous carbonization, US PATENT 2289917, Bruxelles, Juillet 1942, 3 p.

LAMBIOTTE SA – BALTCARBON Specification of the installation - Lambiotte technological process, 2011 <http://www.baltcarbon.lv/?mode=invest&lang=en> (accédé de 18 février 2011)

BIBLIOGRAPHIE

MEIER, D. FAIX, O. State of the art applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials – a review, *Biosource Technology*, n° 68, 1999, pp. 71 - 77

NUMAZAWA, S., Contribution à l'étude de la pyrolyse lente sous pression du bois, génie des procédés industriels, Compiègne: Université de technologie de Compiègne, 2000, 94 p.

PELÁEZ-SAMANIEGO M.R. et al., Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, n° 4, 2008, pp.1063-1086.

STREZOV V. et al., Fundamental aspects of biomass carbonisation, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 79, n° 1, 2007, pp. 91-100.

Partie III

CLUET, B. Biochar reactor and smouldering experimentation, BRE centre for fire safety engineering, University of Edinburgh, *Rapport de stage à l'étranger*, Épinal, 2010, 18 p.

Partie IV

CDM - EXECUTIVE BOARD Partial substitution of fossil fuels with biomass in cement manufacture – Cementos Avellaneda S.A, La Calera, San Luis Province, Argentina, Project design document form (CDM PDD) – Version 03, *UNFCCC/CCNUCC*, Bonn, 2006, 71 p.

COGELS, F. -X. Suivi et gestion de l'hydrologie et de la qualité des eaux du lac de Guiers (Sénégal), *Freshwater Contamination (Proceedings of Rabat Symposium S4)*, IAHS Publ. no. 243, Rabat, 1997, pp. 277 – 286

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DES INSTALLATIONS CLASSEES Deuxième communication nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, *Ministère de l'environnement et de la protection de la nature*, Dakar, 2010, 177 p.

DEMBA M. Projet de Gestion Intégrée des Adventices Aquatiques Envahissantes en Afrique de l'Ouest, Ministère de l'environnement, de la protection de la nature, des bassins de rétention et des lacs artificiels du Sénégal, 2009

http://www.environnement.gouv.sn/article.php3?id_article=153 (accédé de 18 février 2011)

EMRICH W. Commission of the European Communities, *Handbook of charcoal making: the traditional and industrial methods*, Energy from biomass, Vol. 7, D.Reidel publishing company, 1985, 278 p.

EQUIPE DE RECHERCHE : GESTION DE LA VULNERABILITE DES SYSTEMES RIZICOLES DU MALI AUX PRINCIPAUX NUISIBLES Lutte contre les végétaux flottants nuisibles, *Centre national de spécialisation en riz*, Bamako, 2009, 16 p.

INGESAHEL Étude de faisabilité d'une valorisation des résidus agricoles et agro-industriels comme combustibles domestiques au Sénégal – rapport de synthèse, dakar, 1998, 28 p.

MAEH (MINISTERE DE L'AGRICULTURE, DE L'ELEVAGE ET DE L'HYDRAULIQUE) Dossier 2 – Village de Mbane, construction sociale de la demande de formation entretiens de compréhension et restitution dans quatre villages, *Diagnostic participatif pour la construction de la demande et l'adéquation de l'offre de formation dans la région du fleuve Sénégal*, Dakar, 2004, 45 p.

BIBLIOGRAPHIE

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, DE LA PROTECTION DE LA NATURE, DES BASSINS DE RETENTION ET DES LACS ARTIFICIELS DU SENEGAL, Présentation du projet, *Projet RAF/98/G31 « Conservation de la diversité biologique par la réhabilitation participative des terres dégradées dans les zones arides et semi-arides – transfrontalières entre la Mauritanie et le Sénégal »*, Saint-Louis, 1998, 17 p.

MEAM (MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ASSAINISSEMENT DU MALI) Etude d'identification des villages affectés par les plantes aquatiques nuisibles proliférantes dans le bassin du fleuve Niger, rapport final, *Projet multinational de gestion intégrée des plantes aquatiques proliférantes en Afrique de l'Ouest*, Bamako, 2008, 67 p.

NDIAYE, I, DIALLO, D, SEYE, D. Résultats de l'application cristal (vulnérabilité et adaptation aux cc des populations) ; expérience du village de Diadiam 3, proche du barrage de Diama, *Atelier de réflexion avec la société civile dans le cadre du dialogue régional sur les grandes infrastructures hydrauliques en Afrique de l'Ouest*, Nouakchott, 24 - 26 mai 2010, 14 p.

OMVS (ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SÉNÉGAL) Rapport de synthèse du forum régional africain sur la contribution des projets FEM à la gestion des bassins transfrontaliers : cas du bassin du fleuve Sénégal, *Projet de gestion des ressources en eau et de l'environnement du bassin du fleuve Sénégal*, Dakar, 2006, 122 p.

OMVS (ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SÉNÉGAL) L'offensive de l'OMVS : une approche régionale pour maîtriser le paludisme et les bilharzioses, Dakar, 2009, 7 p.

PERACOD Etude finale sur la faisabilité technico-économique du développement d'une filière de valorisation du *Typha australis* en combustible domestique par la technologie de carbonisation « 3fûts » dans le delta du fleuve Sénégal *projet MEPRED*, Saint-Louis, 2006, 23 p.

PERACOD Mise en œuvre d'unités pilotes de production de biocharbon de *Typha* et mesure de la rentabilité économique de cette nouvelle activité, *projet MEPRED*, Saint-Louis, 2008, 87 p.

REINAUD, G. Lier la lutte contre la pauvreté avec la conservation de la biodiversité et la lutte contre les changements climatiques, Pro natura international, Paris, 22 p.

RICHARDS BAY COAL TERMINAL (RBCT) Operating statistics, Richards Bay, 2011

UICN La Lettre des Aires Protégées en Afrique de l'Ouest, n°19, Ouagadougou, 2009, 6 p.

UNFCCC CDM methodology booklet, UNFCCC, Bonn, 2010

UNICEF Etude de faisabilité des forages manuels identification des zones potentiellement favorables, République du Sénégal, Dakar, 2010, 45 p.

RESUMÉ

Ce rapport porte sur la carbonisation de déchets agricoles et d'une espèce de roseau sénégalais (*Typha australis*). Cette densification énergétique est étudiée selon quatre aspects : les procédés industriels disponibles, l'influence des variables du procédé sur les caractéristiques du charbon, la rentabilité économique et l'impact environnemental des procédés. Les différents procédés industriels de carbonisation sont analysés selon leur robustesse, leur simplicité et leur coût.

Une analyse élémentaire du Typha (feuilles et tige), de la balle de riz et de la bagasse permet de déterminer l'impact environnemental de leur carbonisation. Le pouvoir calorifique inférieur de ces produits et du charbon sont mesurés : Typha (feuilles) : 18 800 kJ.kg⁻¹, Typha (tige) : 16 000 kJ.kg⁻¹, balle de riz : 15 220 kJ.kg⁻¹, Typha (Charbon - 400° C) : 22 900 kJ.kg⁻¹. Le typha contient plus de chlore que les autres produits, notamment la tige qui contient 5,5 % de chlore.

L'influence des variables du procédé sur le charbon est mesurée avec l'instrumentation d'un réacteur expérimental. Les résultats montrent que plus la température de carbonisation augmente, plus le rendement en charbon diminue. La réduction du rendement est rapide jusqu'à une température de 500° C puis lente après. Le taux de carbone augmente avec la température.

Les impacts environnementaux du procédé de carbonisation sont évalués grâce à la méthode de l'analyse du cycle de vie. Le charbon obtenu est considéré comme une énergie renouvelable ; par exemple, il peut être utilisé en substitution au charbon minéral.

Mots clés : carbonisation, typha, déchets agricoles, charbon, procédé industriel

ABSTRACT

This report deals with the carbonisation of agricultural waste and a specie of Senegalese marsh (*Typha australis*). This energy densification is studied through 4 points: industrial processes available, influence of process variables on char characteristics, economic return and environmental impacts of the processes. The different industrial carbonization processes are analysed on the basis of their robustness, simplicity and cost.

Analysis of chemical elements contained in Typha (leaves and stem), rice husk and bagasse permits to determine the environmental impacts of their carbonization. The lower heating value of these products and their char are measured: Typha (leaves): 18 800 kJ.kg⁻¹, typha (stem): 16,000 kJ.kg⁻¹, rice husk: 15,220 kJ.kg⁻¹, Typha (Char - 400° C): 22,900 kJ.kg⁻¹. Typha contains more chlorine than the other biomass, especially the stem which contains 5.5% of chlorine.

The influence of process variables on char characteristics is measured with the instrumentation of an experimental reactor. The results proved that as the carbonization temperature was increased, the yield of char decreased. The reduction in yield was rapid up to the final temperature of 500° C and was slower thereafter. The carbon rate increased, as the carbonization temperature increased.

Environmental impacts of carbonization process are evaluated using the life cycle assessment methodology. The char obtained is suitable as renewable fuel; for instance, it could be used to substitute charcoal.

Key words: carbonisation, typha, agricultural waste, char, industrial process