

**Alice CHAUVIN
Victor FARAUD**

du 1^{er} juin au 30 août 2008

**Ecole Polytechnique de Marseille
Département ME**

Rapport de Stage



**Simulation de la gazéification de bois
et vérification expérimentale
avec un gazéificateur pilote de 10 kWél**

**Encadrant : Prof. Ferruccio Pittaluga
Università degli Studi di Genova
Laboratorio DIMSET/SCL**

Sommaire

I- Introduction.....	p4
II- Gazéification de la biomasse.....	p5
1. <u>Introduction à la gazéification de la biomasse.....</u>	p5
2. <u>Les différents types de gazéificateur.....</u>	p8
3. <u>Présentation du gazéificateur pilote.....</u>	p12
III- Biomasse.....	p16
1. <u>Etude de la biomasse.....</u>	p16
a- <u>Définition de la biomasse.....</u>	p16
b- <u>Critère pour la mise en place d'un gazéificateur.....</u>	p16
c- <u>Afforestation à croissance rapide.....</u>	p19
IV- Prise en main et présentation du logiciel EES.....	p22
1. <u>Familiarisation avec le logiciel.....</u>	p22
2. <u>Composition moyenne du bois.....</u>	p23
3. <u>Refused derived fuel.....</u>	p24
V- Exploitation du logiciel- Simulations.....	p24
1. <u>Prise en main du logiciel.....</u>	p27
2. <u>Variation de la température de gazéification.....</u>	p28
a. <u>Variation de la température.....</u>	p28
b. <u>Variation du débit de bois.....</u>	p31
3. <u>Optimisation avec vapeur et gaz chauffés en entrée.....</u>	p37
4. <u>Gazéification à l'oxygène.....</u>	p44
5. <u>Comparaison.....</u>	p52
6. <u>Conclusion/Résumé.....</u>	p54
VI- Le gazéificateur d'un point de vue économique.....	p55
1. <u>Evaluation d'un investissement.....</u>	p55
a. <u>Pay-Back Period.....</u>	p55
b. <u>L'actualisation.....</u>	p56
c. <u>Net Present Value : NPV.....</u>	p58
d. <u>Internal Rate of Return : IRR.....</u>	p55
2. <u>Application au gazéificateur.....</u>	p60
3. <u>Estimation de la durée minimale d'exploitation du gazéificateur.....</u>	p61
a. <u>Break Even Point : BEP.....</u>	p61
b. <u>Application au gazéificateur.....</u>	p62
VII- Annexes.....	p65
Point Méthode : faire des relevés complets.....	p66

Point Méthode : Gazéification à l'oxygène.....	p69
Lexique.....	p74
Bibliographie.....	p72
Pouvoir calorifique des produits de la gazéification.....	p73
Mesure expérimentale du PCI.....	p74
Remerciements.....	p82

I. Introduction

Les gazéificateurs à charbon étaient largement utilisés lors de la seconde guerre mondiale, notamment pour les transports (gazogènes). Une fois la guerre finie, les véhicules fonctionnant avec des gazéificateurs ont progressivement disparus pour laisser place aux voitures utilisant des combustibles dérivées du pétrole (essence, diesel...). Ces derniers présentant plusieurs avantages par rapport à ceux fonctionnant avec la gazéification (du charbon ou de la biomasse) : entretien moindre, carburant plus facile à stocker. De plus, ils possèdent une bonne autonomie et leur utilisation est plus aisée (pas besoin de rajouter du charbon ou du bois dans le gazéificateur)

Au jour d'aujourd'hui, il se pourrait bien que la gazéification de la biomasse (et non plus au charbon) se révèle la solution aux problèmes énergétiques que nous rencontrons. Plusieurs facteurs poussent ainsi différents pays à s'intéresser aux gazéificateurs fonctionnant grâce à la biomasse. Il y a d'une part la prise de conscience de la raréfaction du pétrole ainsi que l'augmentation incessante de son prix et également une volonté de réduire les gaz à effet de serre, qui, à terme, provoquent des dérèglements climatiques.

Les appareils de gazéification de biomasse apparaissent comme une solution à ce problème énergétique. Ils utilisent une énergie que nous pouvons considérer comme renouvelable, la biomasse, et la combustion du gaz de bois dégage autant de CO₂ que ce qu'il en absorbe durant sa vie (bilan carbone neutre). Gazéifier la biomasse présente donc un fort intérêt afin de développer une énergie alternative aux énergies fossiles.

Nous allons donc présenter un aperçu des travaux effectués dans ce domaine mais aussi l'état des recherches en cours, au niveau des gazéificateurs.

Nous présenterons également un logiciel de modélisation de gazéification pour un « dawn-draft gasifier ». Nous aborderons son environnement d'exploitation et la recherche de l'optimisation de notre gazéificateur pilote à partir de ce logiciel.

II. Gazéification de la biomasse

La gazéification est une transformation thermochimique d'un solide combustible (charbon, bois...) en présence d'un composé gazeux (O_2 , air, CO_2 , vapeur d'eau...). Le but de cette transformation est de convertir le solide en un mélange de gaz combustible. Ce gaz est communément appelé le syngas (gaz de synthèse). Les gazéificateurs peuvent donc être utilisés pour générer de l'énergie électrique grâce à la combustion du gaz synthétique dans un moteur thermique à combustion interne.

Après un exposé rapide sur le principe de la gazéification de la biomasse nous aborderons les divers types de gazéificateurs. Enfin, nous décrirons le gazéificateur pilote dont nous nous sommes servis pour établir les données expérimentales

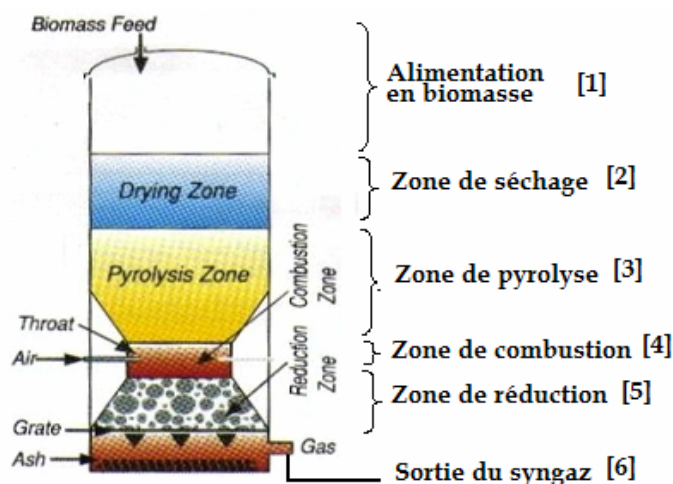
1. Introduction à la gazéification de la biomasse

a. Fonctionnement général d'un gazéificateur.

La gazéification de la biomasse se fait par l'intermédiaire d'un gazéificateur (à lit fixe ou à lit fluidisé) alimenté par de la biomasse. La biomasse, ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie, va traverser plusieurs étapes à travers le gazéificateur. Ce sera après diverses réactions chimiques de ce solide combustible qu'il sortira du gazéificateur un mélange gazeux combustible.

Nous allons illustrer ses différentes étapes grâce à un 'downdraft gasifier' (un gazéificateur à lit solide où l'air et la biomasse ont la même direction: descendante).

Le *downdraft gasifier* se présente comme suit :



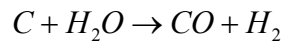
Les phases décrites ci-dessous se produisent pour chaque type de gazéificateur. Ce sont les étapes principales que la biomasse subit et qui permettent de fournir du syngas à la sortie de l'appareil de gazéification.

- **La pyrolyse[3]** de la biomasse est une décomposition thermique irréversible sous la seule action de la chaleur, en l'absence d'oxygène ou sous une atmosphère pauvre en

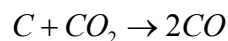
oxygène. Cette action fait se libérer des gaz qui pourront subir des réactions de gazéification. La température de pyrolyse est comprise entre 300°C et 500°C.

- **La combustion** [4] est une réaction chimique exothermique. Elle se produit au fur et à mesure que les produits volatiles réagissent avec l'oxygène, il se forme alors du dioxyde de carbone ainsi que du monoxyde de carbone : $C + \frac{1}{2}O_2 \Leftrightarrow CO$
- **La gazéification** est une réaction endothermique hétérogène entre le carbone contenu dans la biomasse et un gaz réactant. Ce gaz réactant peut être soit de la vapeur d'eau (H₂O) soit du dioxyde de carbone (CO₂).

Les réactions sont :



et



Cette réaction fournira au syngas les deux composants principaux (CO et H₂) qui lui confèrent un bon pouvoir calorifique.

b. Composition du biogaz

La biomasse utilisée dans les gazéificateurs est essentiellement composée de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Le but de la gazéification est de casser les chaînes carbonées contenues dans la biomasse afin d'obtenir des fumées avec des éléments combustibles tels que le monoxyde d'oxygène [CO], le dihydrogène [H₂] mais aussi des hydrocarbures comme le méthane [CH₄]. Cette fumée peut alors être utilisée comme carburant dans des moteurs à combustion interne. Ce carburant synthétique est appelé le syngas.

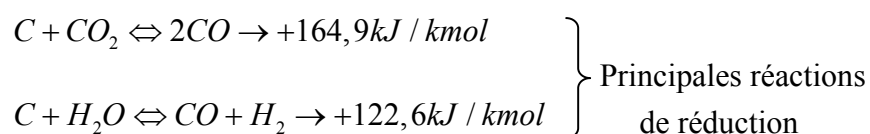
Il faut préciser que les fumées générées par ce processus contiennent également du dioxyde de carbone [CO₂], de l'eau [H₂O], des goudrons et de l'azote [N₂] (dans le cas d'une gazéification à l'air, car l'air est composée d'environ 79% d'azote et de 21% de dioxygène).

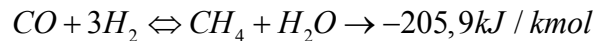
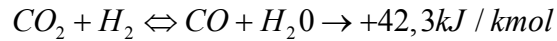
Il est bon de noter que la présence d'éléments inertes, comme l'azote, ou d'éléments comme l'eau dans les fumées peuvent réduire la capacité calorifique du syngas. Le potentiel énergétique du gaz de synthèse se trouve abaissé par le fait que des éléments peu énergétiques se retrouvent dans les fumées : la présence de ces éléments diminue la concentration des éléments 'énergétiques', le pouvoir calorifique du syngas s'en retrouve donc diminué.

c. Equations du syngas

1) Réactions de réduction

Nous avons vu que les principaux composants combustibles contenus dans les fumées étaient le monoxyde de carbone, le dihydrogène et le méthane [CH₄]. Les réactions qui engendrent ces éléments se situent dans la partie réductrice du gazéificateur et sont les suivantes :





Le signe positif signifie que la réaction requiert de la chaleur. Un signe négatif veut dire que la réaction fournit de la chaleur.

Nous pouvons voir grâce à ces équations que les phases de réduction demandent de l'énergie. Cela explique alors pourquoi la température décroît durant cette phase.

De plus la réaction :

$CO_2 + H_2 \Leftrightarrow CO + H_2O \rightarrow +42,3kJ / kmol$ tend à équilibrer les concentrations en CO, H₂O, CO₂ et H₂. Elle est appelée la 'gas water shift reaction' (la réaction gaz-eau). En théorie, pour chaque température les concentrations de CO, H₂O, CO₂ et H₂ sont données par la constante d'équilibre K_{WE} de la réaction.

$$\text{Avec } K_{WE} = \frac{(CO) * (H_2O)}{(CO_2) * (H_2)}$$

En pratique en dessous de 700°C cette réaction est figée, car elle se produit seulement lorsque les taux et le temps de la réaction sont suffisants. Etant donné que le taux de réaction diminue avec la décroissance de la température et qu'en dessous d'une température de 700°C le taux de réaction devient trop faible, la réaction se fige en dessous de la température de 700°C.

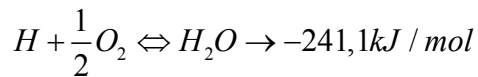
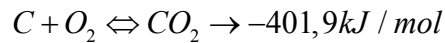
Le tableau suivant montre quelques valeurs de la constante d'équilibre K_{WE} pour des températures fixées :

Température [°C]	Kwe
600	0.38
700	0.62
800	0.92
900	1.27
1000	1.60

Nous avons vu que les concentrations de monoxyde de carbone, de dihydrogène, de dioxyde de carbone et d'eau peuvent se calculer grâce à la constante d'équilibre pour des températures constantes. Cette propriété peut alors être utilisée pour calculer la composition du syngas, une modélisation numérique de la gazéification peut donc être envisagée en utilisant cette formule pour des températures constantes.

2) Réactions d'oxydation

Le moteur fonctionnant au syngas utilisera le méthane, le monoxyde de carbone ainsi que le dihydrogène pour générer de l'énergie. Lors de la combustion du gaz synthétique dans le moteur le CO et le H₂ seront oxydés avec l'air injecté et donneront respectivement du CO₂ et de l'H₂O. Ces réactions d'oxydations créent de l'énergie comme suit :



L'oxydation de 12 grammes de carbone fournira une énergie de 401,9 kJ et 2.016 g d'hydrogène donnera 241,1 kJ avec cette réaction.

L'optimisation d'un gazéificateur consiste à générer un biogaz ayant un taux élevé de monoxyde de carbone, de dioxygène et de méthane. Plusieurs modèles de gazéificateurs existent et chacun d'entre eux possèdent des caractéristiques diverses que nous allons étudier.

2. Les différents types de gazéificateurs

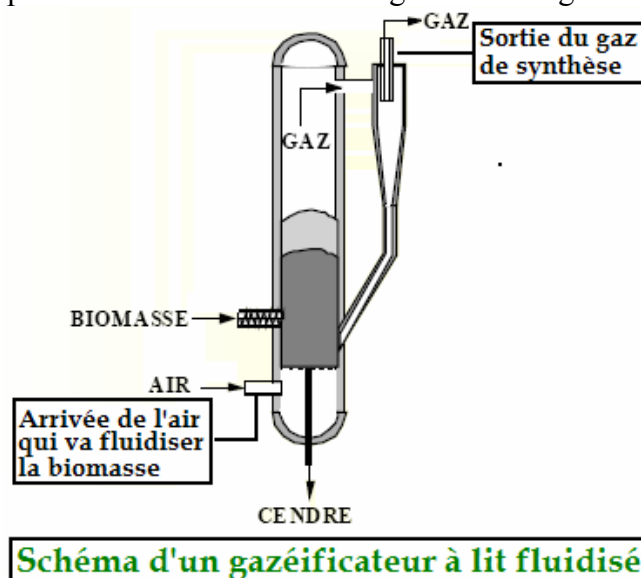
Il existe deux grands types de gazéificateur : les gazéificateurs à lit fluidisés et les gazéificateurs à lit fixe. Nous allons exposer dans cette partie les caractéristiques de ces différents appareils de gazéification.

a) Procédé à lit fluidisé

Par définition, un lit fluidisé est constitué d'un ensemble de particules solides traversées par un fluide (air, eau...) ascendant, dont le débit est tel que le poids des grains est compensé par le frottement du fluide sur eux. Pour fluidiser un lit de biomasse il faut donc avoir préalablement réduit la biomasse en taille (quelques dizaines de millimètre au maximum). Les fins copeaux de biomasse vont ensuite être préalablement séchés et introduits dans du sable afin d'augmenter les transferts de chaleur et de matière.

Les trois types de gazéificateur à lit fluidisé se distinguent par la variation du débit du fluide. On peut recenser les gazéificateurs à lit fluidisé dense, à lit fluidisé circulant et à lit fluidisé entraîné.

Le schéma ci-après décrit le fonctionnement général d'un gazéificateur à lit fluidisé.



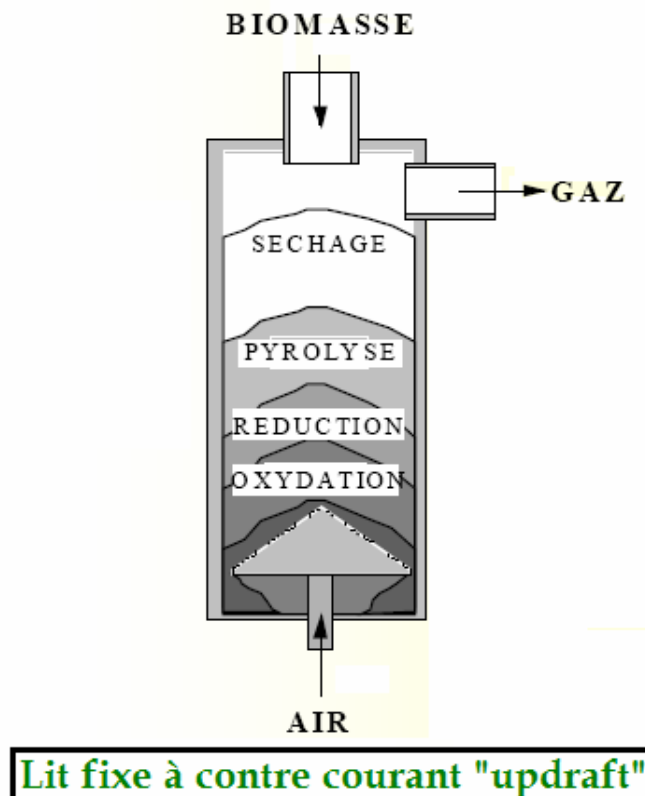
La principale contrainte d'un gazéificateur à lit fluidisé est la réduction en taille de la biomasse avant son introduction dans l'appareil. Toutefois ce type de gazéificateurs possède comme avantage de pouvoir développer des puissances assez importantes.

b) Procédé à lit fixe

Dans les procédés à lit fixe, le combustible est introduit par la partie supérieure du gazéificateur et descend par gravité dans le réacteur où les diverses réactions chimiques de gazéification ont lieu. Les cendres issues de la gazéification de la biomasse sont récupérées dans la partie basse de ces gazéificateurs. C'est ensuite le design du gazéificateur qui diffère, on peut alors distinguer les gazéificateurs à lit fixe, à contre-courant et à co-courant.

1) Gazéificateur à lit fixe à contre-courant : 'Updraft'

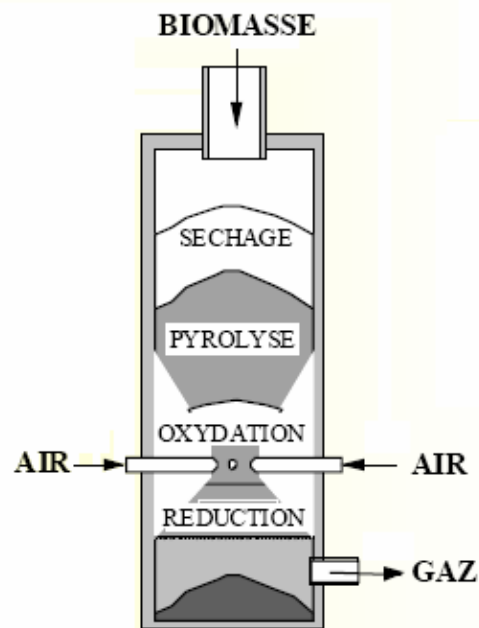
Les gazéificateurs de type 'Updraft' se présentent sous la forme suivante :



Les gaz synthétiques formés quittent le réacteur en partie haute du gazéificateur. Ils passent alors dans la zone de pyrolyse avant de sortir. Le syngas comporte alors un taux élevé en produits de pyrolyse, goudrons et particules, ce qui est positif du point de vue énergétique (car ces composants ont un fort pouvoir calorifique) mais plutôt négatif du point de vue sanitaire car certains de ces produits sont cancérigènes.

2) Gazéificateur à lit fixe à co-courant : 'downdraft'

Les gazéificateurs de type 'downdraft' se présentent sous la forme suivante :



Lit fixe à co-courant "downdraft"

Le syngas formé lors de la gazéification sortira dans la partie basse du gazéificateur contrairement aux gazéificateurs de type 'updraft' (où le syngas sort dans la partie haute). Cette caractéristique permet aux composants volatils émis lors de la phase de pyrolyse de passer à travers la zone la plus chaude : des réactions chimiques ont alors lieu et les chaînes carbonées pourront alors être cassées. Le syngas sortant du gazéificateur à lit fixe à co-courant est donc plus propre qu'un gazéificateur à contre courant car la teneur en produits volatils de pyrolyse est diminuée.

Les appareils de gazéification à lit fixe ont comme principal avantage leur facilité de construction.

c) Données comparatives entre les diverses technologies de gazéification

1) Contraintes que doit respecter la biomasse pour les différents types de gazéificateurs

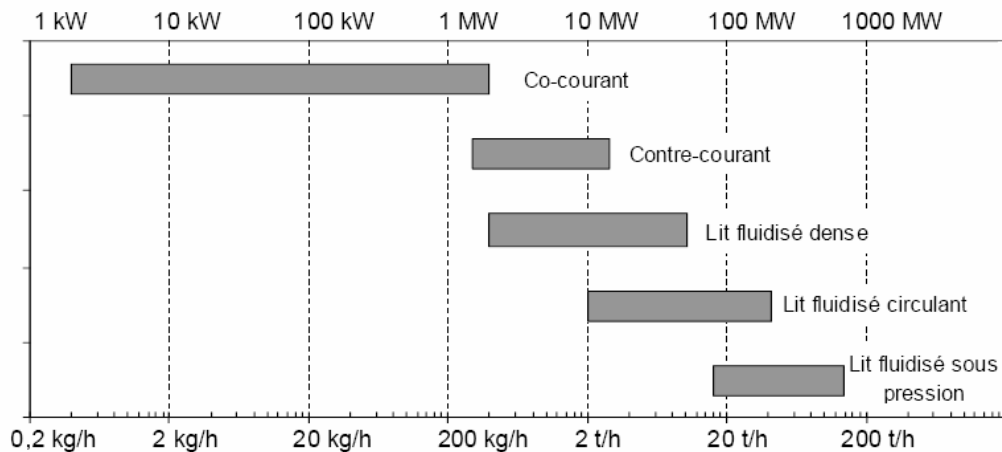
	Co-courant	Contre courant	Lit fluidisé	Lit entraîné
Granulométrie [mm]	20-100	5-100	1-10	<1
Humidité [%owb]	<15-20	<50	<40	<15
Cendres [%odb]	<5	<15	<20	<20
Point de Fusion cendres [°C]	>12.50	>1000	>1000	>1250
Densité [kg/m ³]	>500	>400	>100	>400

2) Avantages et inconvénients des différents types de gazéificateurs

TABEAU 1 : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS POUR LA GAZÉIFICATION DE LA BIOMASSE

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Co-courant - Simple de conception et éprouvé pour certains combustibles - Simple de construction - Taux de conversion élevé - Gaz relativement propre si combustible approprié	- Combustible homogène et de taille significative - Taille des installations très limitée (350 kWe) - Possibilité de fusion des cendres dans la grille du réacteur avec blocage - Faible humidité des combustibles nécessaire - Coût de maintenance élevé (usure)
Contre courant - Construction simple et robuste - Rendement thermique élevé - Plus grande souplesse vis à vis de l'humidité de la matière première	- Température des gaz faible en sortie avec risque de condensation - Gaz très chargé en goudrons - Inadapté à la production d'électricité
Lit fluidisé dense - Bon contrôle des températures - Vitesses de réaction élevée - Bon contact solide/gaz - Construction relativement simple et opérationnelle - Pas de limite de taille - Traitement catalytique dans le lit possible	- Taille minimale pour être économique (20 MWe) - Taux de particules dans les gaz élevé - Pertes de C avec cendres par entraînement limitant les rendements - Nécessite des particules de faible taille - Humidité faible <20% - Sensible à la répartition granulométrique - Taux goudrons modéré à élevé
Lit fluidisé circulant - Bon contrôle de température et vitesse de réaction - Grande tolérance par rapport au combustible (type, taille) - Taux goudrons dans les gaz modérés - Taux de conversion élevé - Pas de limite de taille	- Taux de particules dans les gaz élevé - Humidité faible < 20% - Taille minimale pour être économique (20 MWe) - Perte de C avec les cendres - Nécessite des particules de faible taille pour bénéfice optimal des propriétés
Lit entraîné - Bon contact gaz solide et mélange - Vitrification des cendres - Pas de limite de taille - Taux de conversion élevé - Gaz propre par rapport aux goudrons	- Coût préparation biomasse élevé - Haute température donne gaz de qualité mais faible PCI - Inventaire des combustibles limité - Très forte taille minimale (>50 MWe)

3) Diagramme représentant les puissances des différentes installations de gazéification



Rensfelt, 1997

Bien que les données de ce diagramme datent de plus de 10 ans et qu'elles aient pu évoluer, elles donnent toutefois un ordre de grandeur sur la puissance pouvant être fournie par les installations de différents types de gazéificateurs. On s'aperçoit alors que le gazéificateur à lit fixe de type 'updraft' peut offrir une plus grande puissance qu'un gazéificateur de type 'downdraft'.

Au vu du *tableau 1* et du *diagramme*, il apparaît préférable d'utiliser un gazéificateur à courant, pour la production de petite puissance. En revanche, les lits fluidisés circulant apparaissent plus avantageux pour des unités devant produire une grosse puissance.

3. Présentation du gazéificateur pilote

Le gazéificateur pilote dont nous disposons est du type 'downdraft' et produit une puissance moyenne de 10 kW. Actuellement, la gazéification se fait avec de l'air. Toutefois, il est envisagé d'effectuer une gazéification avec de l'oxygène afin de voir les variations de rendements pour une gazéification avec 100% d'oxygène. La gazéification avec l'oxygène permet aussi d'effectuer le procédé Fischer-Tropsch pour la production des biocombustibles liquides.

Nous allons présenter l'installation sur laquelle nous avons travaillé et les différents éléments qui la composent.

a. Description du gazéificateur pilote.

Le gazéificateur, fournit par la société CAEMA (<http://www.caemaenergia.com>) est un WBG 15 de chez « Ankur Scientific Ltd. » (<http://www.ankurscientific.com>).

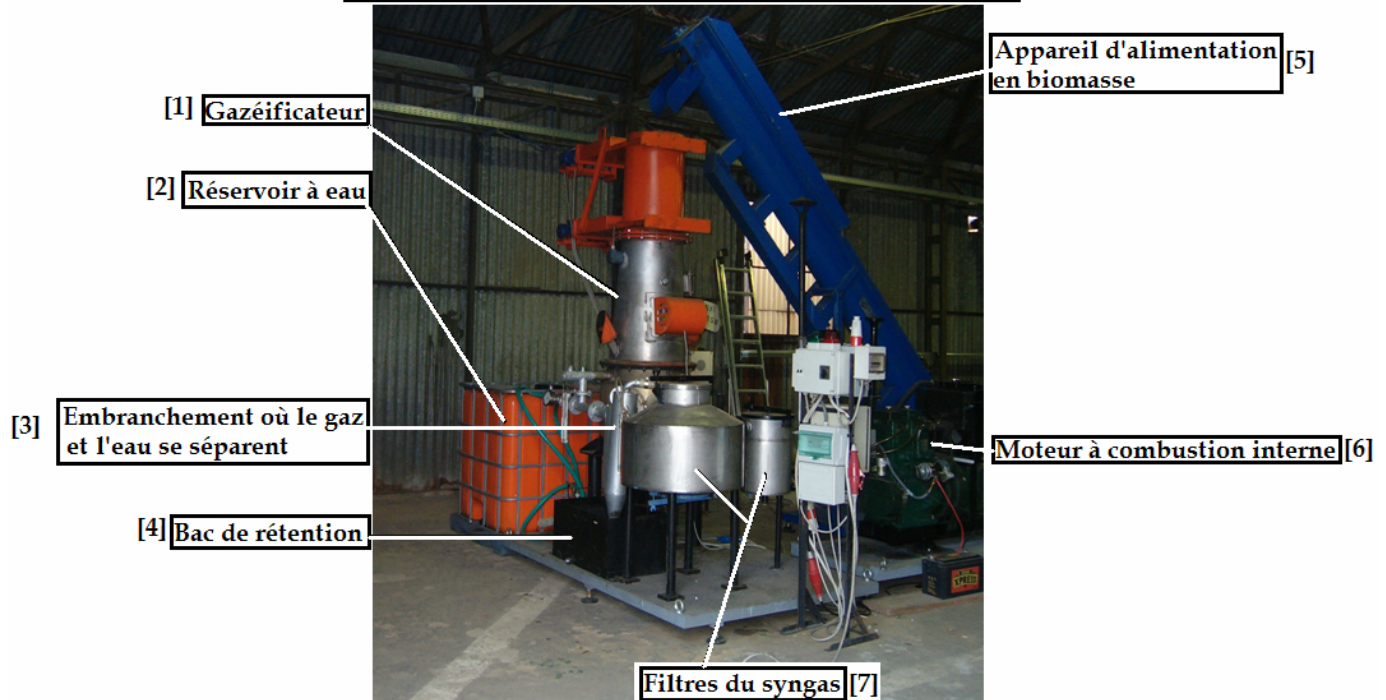
Il possède les avantages suivants :

- Bonne qualité du gaz (faible production de goudron notamment) en utilisant le bois, de préférence sec, comme matière première.
- L'un des premiers à gazéifier les amandes (cosse de riz etc...) sans la fabrication de briquettes
- Filtrage biologique des gaz
- Systèmes totalement dépendants de la biomasse locale et pouvant être très facilement gérés par la main-d'oeuvre locale
- Des mécanismes brevetés pour les opérations de contrôle et de maintenance.

Un gazéificateur réellement intéressant pour notre étude est un système suffisamment petit pour permettre une gestion aisée et composée de dispositifs de contrôle faciles à mettre en œuvre. Par ailleurs l'annonce faite sur le site (<http://www.ankurscientific.com>) «Ultra Clean and Tar Free gas with wood as a feedstock » appuie le choix de ce gazéificateur.

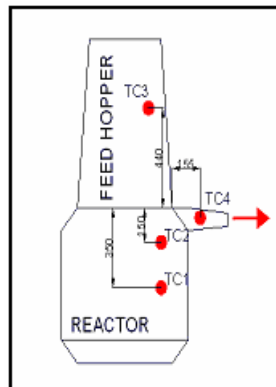
Le système de génération d'énergie à partir de la biomasse est composé d'une part du gazéificateur avec un système d'extraction et de purification du syngas. D'autre part le système est composé d'un moteur à combustion interne qui permet de générer de l'énergie électrique. Ce moteur est alimenté avec le gaz de synthèse créé lors de la gazéification de la biomasse. Des photographies, ci-après, illustrent ces deux parties principales.

PHOTO CONCERNANT LA PARTIE GAZEIFICATEUR



Lorsque le gaz sort du gazéificateur il est aspiré grâce à un effet venturi créé par une circulation d'eau. Le gaz, plus léger, est ensuite séparé de l'eau en passant dans un embranchement à chute d'eau [3]. Le syngas traversera alors deux filtres [7] avant d'être envoyé dans le moteur.

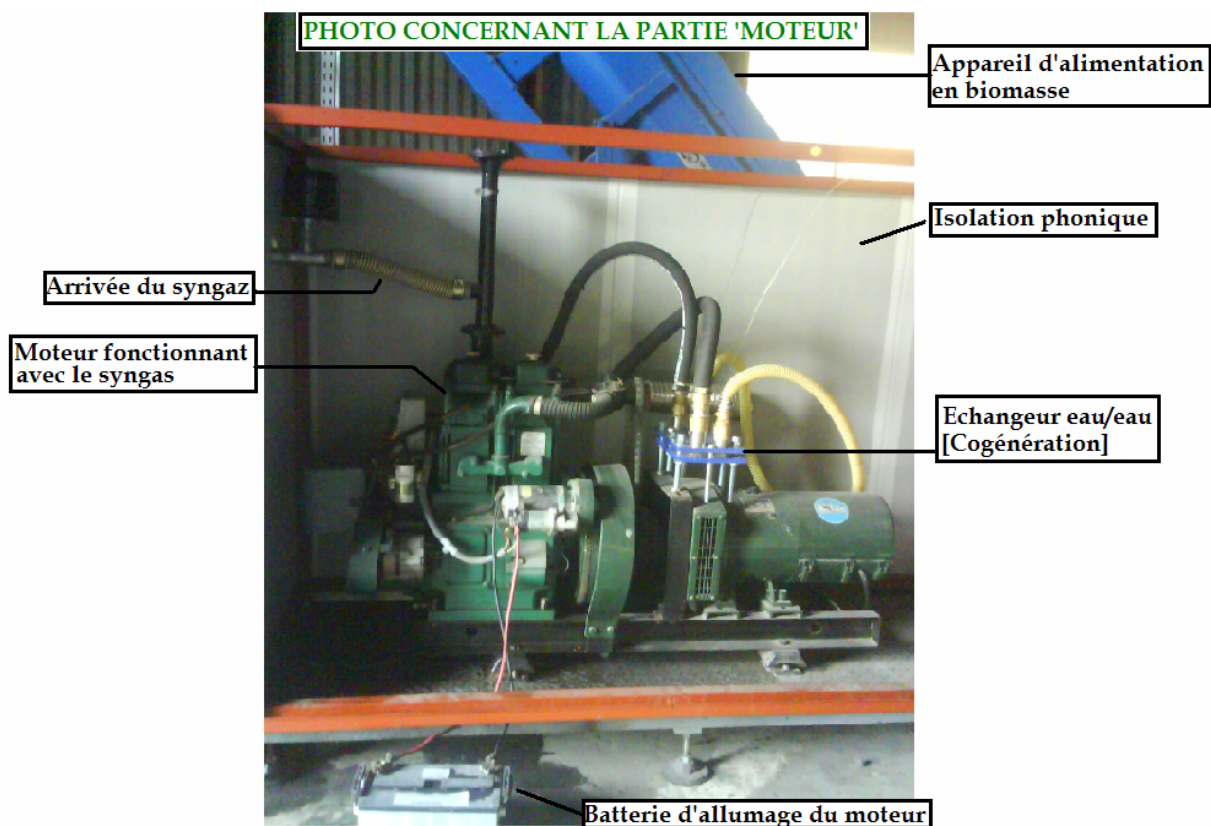
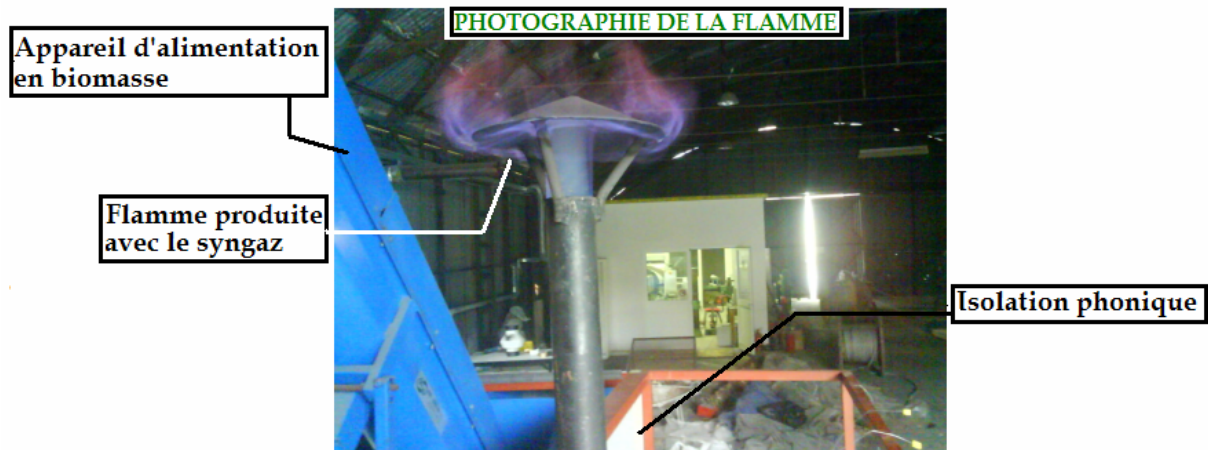
Lors des expérimentations des thermocouples (TC1, TC2, TC3 et TC4) sont placés dans le gazéificateur comme suit :



Remarques : -L'eau qui résulte de la séparation du mélange gaz/eau (en sortie du gazéificateur) tombera dans un bac de rétention [4] avant d'être aspiré par une pompe pour être remise dans le réservoir à eau [2].

-Lors des premières minutes de l'allumage du gazéificateur, le syngas n'est pas directement transmis au moteur : il est tout d'abord brûlé. Ce sera seulement lorsque la flamme produite apparaîtra régulière avec une belle couleur bleutée (synonyme de fort potentiel énergétique) que le gaz de synthèse sera transmis au moteur.

Voici une photographie de la flamme suivit d'une photographie du moteur :



Le moteur à combustion interne est démarré au moyen d'une batterie standard. Un échangeur eau/eau a été placé pour récupérer des calories à partir de l'eau de refroidissement du moteur ce qui revient à effectuer un système de cogénération. D'une part le gazéificateur couplé au moteur produit de l'énergie électrique et d'autre part l'échangeur produit de l'énergie thermique.

Actuellement l'équipe du Laboratoire DIMSET/SCL envisage d'effectuer aussi la gazéification de la biomasse avec de l'oxygène (au lieu d'une gazéification avec de l'air) en partenariat avec Capenergies (<http://www.capenergies.fr>). Ces développements ont lieu pour étudier les différences de rendements entre gazéification à l'air ou à l'oxygène mais aussi pour étudier le procédé Fischer-Tropsch, c'est à dire un procédé catalytique de production d'hydrocarbures liquides, à partir de gaz de synthèse ($\text{CO} + \text{H}_2$) : ce procédé pourrait fournir un combustible liquide pour les transports routiers, maritimes et aériens.

Il convient de préciser que les recherches entreprises au Laboratoire DIMSET/SCL concernent non seulement l'optimisation de la gazéification mais aussi le développement durable entre les différents acteurs économiques de toute la filière du bois. C'est pourquoi des recherches sont aussi entreprises sur la biomasse elle-même et sur les moyens d'approvisionner un site industriel fournissant électricité, chaleur, biogaz, biocombustibles, à partir de la gazéification. C'est dans ce but : envisager la gazéification de la biomasse comme une entreprise à l'échelle industrielle, qu'il faut tenir compte d'une part du rendement du gazéificateur, mais aussi de l'approvisionnement en biomasse.

III. Biomasse

1) Etude de la biomasse

a) Définition de la biomasse

Le terme biomasse désigne d'un point de vue biologique la quantité totale de toutes les espèces vivantes présentes dans un milieu naturel donné. Du point de vue énergétique, la biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. C'est bien sûr dans ce dernier sens que nous utiliserons le terme 'biomasse' lors de notre rapport.

La biomasse peut être transformée chimiquement pour obtenir des biocombustibles. Par un processus de méthanisation des matières organiques on peut aussi fabriquer du biogaz et enfin la biomasse peut aussi être brûlée pour obtenir de la chaleur (bois 'énergie') ou pour obtenir du biogaz par un processus de gazéification.

Le processus de gazéification de la biomasse a l'avantage d'utiliser la biomasse lignocellulosique, ce qui ne pose pas de problème conflictuel entre besoins nutritionnels et besoins énergétiques contrairement à la biomasse à glucide (céréales, betteraves sucrières) ou à la biomasse oléagineuse (colza).

La biomasse lignocellulosique peut être récoltée sous différentes formes :

- Produits, déchets et résidus provenant d'exploitation agricole (paille)
- Produits, déchets et résidus provenant de la sylviculture (copeaux de bois)
- Déchets et résidus végétaux de l'industrie

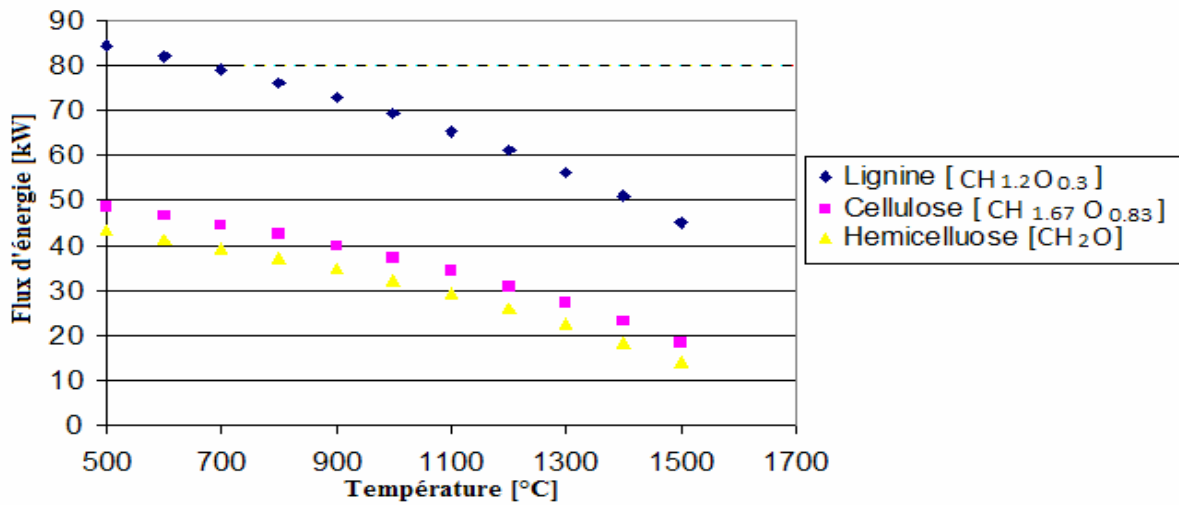
b) Critères pour la mise en place d'un site expérimental

1) Influence de la qualité du bois sur la qualité du syngas

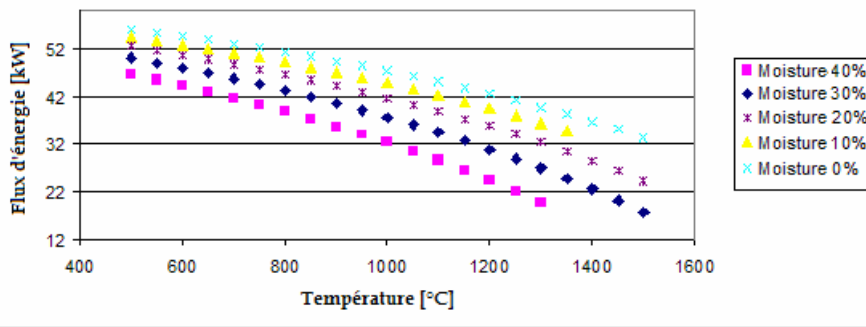
Le rendement d'un gazéificateur dépend d'une part de son design mais aussi de son approvisionnement en biomasse. Les critères liés à la biomasse et influençant la qualité du gaz, donc le rendement du gazéificateur, sont le pouvoir calorifique de la biomasse et son taux d'humidité.

Nous pouvons voir leur influence d'un point de vue énergétique dans les trois graphiques suivants :

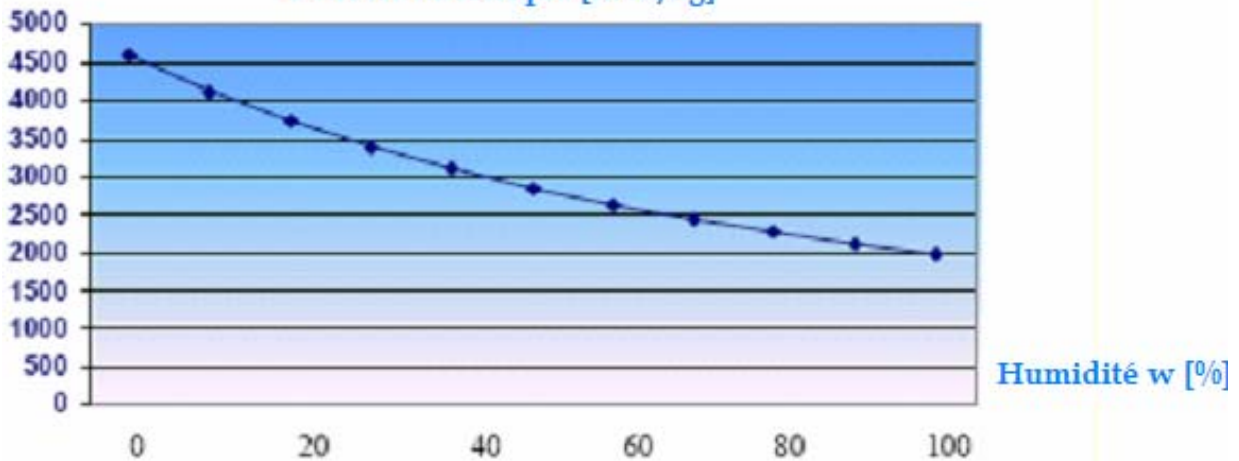
Evolution du flux d'énergie en fonction de la température de gazéification pour différentes compositions de biomasse



Evolution du flux d'énergie pour différentes humidité du bois



Pouvoir calorifique [kWh/kg]



N.B: Ici le terme de pouvoir calorifique n'est pas adapté. En effet, ce dernier est indépendant du taux d'humidité, le terme de chaleur de combustion est plus adéquat

Les deux premiers graphiques ont été obtenus avec le logiciel EES (présenté ultérieurement).

Le premier graphique montre l'évolution du flux d'énergie du gaz en fonction de la température de gazéification pour différentes compositions de bois, c'est-à-dire différents

pouvoirs calorifiques du bois. Dans le second graphique nous pouvons observer l'évolution de l'énergie interne du gaz en fonction de la température de gazéification pour différents taux d'humidité.

Le troisième graphique représente l'évolution du pouvoir calorifique du gaz en fonction de l'humidité.

En observant les résultats que fournit le premier graphique on remarque que plus la biomasse introduite possède un fort pouvoir calorifique, plus le gaz est énergétique (son flux d'énergie est alors plus important). D'après le second graphique et le troisième graphique on peut voir que plus le taux d'humidité augmente moins le gaz produit est énergétique.

Nous avons donc vu comment les différents critères liés à la biomasse (taux d'humidité et composition du bois) influencent la qualité du syngas.

2) Mise en place d'une plantation à croissance rapide

Dans notre projet, nous voyons la gazéification comme un moyen de produire l'énergie de façon durable mais aussi comme une approche visant à minimiser les émissions de CO₂ et à obtenir une indépendance vis-à-vis du pétrole et des autres énergies fossiles. Par conséquent pour envisager une exploitation pérenne il faut prévoir les différents potentiels qu'aura un site à réunir assez de biomasse de qualité pour produire l'énergie voulue.

Pour envisager une création d'énergie électrique grâce à un module de gazéification il est souhaitable de développer une exploitation forestière en parallèle d'une récolte de biomasse évoquée précédemment (résidus agricoles, déchets...). La mise en place d'une sylviculture rentrera alors aussi dans le cadre d'un développement durable visant à ne pas dégrader les ressources naturelles.

Le choix de la plantation se fera donc selon trois critères :

- Bois à fort pouvoir calorifique pour obtenir un gaz le plus énergétique possible
- Variété de bois qui pousse rapidement afin de pouvoir assurer un renouvellement de la ressource suffisant pour éviter des manques de combustibles
- Espèce adaptée au pourtour méditerranéen

Le tableau ci-dessous nous donne le PCI de quelques variétés de bois.

***base de référence**

Essence	Densité des bois		Pouvoir calorifique
	Etat vert kg	Etat sec kg	
Epicéa (sapin rouge)	840	470	68
Mélèze	860	580	84
Pin sylvestre (daille)	900	530	78
Sapin blanc	940	450	64
Pin Weymouth	800	400	60
Aulne noir (verne)	950	530	71
Bouleau (biolle)	950	650	93
Charme (charmille)	1000	820	110
Châtaigner	1050	620	89
Chêne	1000	690	96
Erable sycomore	950	620	84
Frêne	900	690	97
Hêtre (foyard)	1000	710	100*
Orme (ormeau)	1050	680	96
Peuplier euraméricain	850	460	60
Robinier	770	660	97
Tilleul	770	540	76
Peuplier tremble	800	510	60

• source: agenda forestier et de l'industrie du bois

- Densité : Poids d'un mètre cube, soit à l'état vert, soit à l'état sec à l'air (15% d'eau)
- Pouvoir calorifique : Les différentes essences sont classées à volume égal et à même degré d'humidité sur la base du pouvoir calorifique du hêtre, fixé arbitrairement à 100.

Ces données nous seront utiles pour déterminer quelles sont les variétés de bois qui présentent le plus fort intérêt énergétique.

Des parcelles d'étude de différents arbres adaptés au climat Ligurien ont été plantées. Au vu de la croissance et la résistance de chacune des espèces par rapport au climat et au vu de leur pouvoir calorifique nous pourrions créer une parcelle avec des bois à croissances rapide et à fort pouvoir calorifique.

c) Afforestation à croissance rapide : parcelles expérimentales de Bossarino

L'équipe du DIMSET/SCL a donc uni ses efforts avec la société *Ecosavona* (Société qui opère dans le secteur des déchets solides urbains et assimilés ainsi que des déchets spéciaux) dans cette plantation. Pour les uns c'est l'occasion d'étudier et de produire ce que l'on espère être le biogaz et le biocombustible de demain, pour les autres le moment de prouver qu'ils sont aptes à gérer correctement leurs déchets.

Les arbres sont donc plantés sur les lieux remblayés de la décharge, cette quantité végétale joue un rôle de filtre pour drainer les polluants qui se retrouvent dans le sol et de filtre pour les nuisances olfactives. La décharge de Bossarino qui est dans l'obligation de planter des arbres pour continuer son activité a donc été choisie comme lieu pour effectuer une plantation pilote. En effet, les résultats que nous tirerons de cette exploitation pourront être vus à la hausse dans une forêt car le terrain sur lequel les végétaux pousseront sera de meilleure qualité.

Vingt deux variétés d'arbres adaptés aux côtes liguriennes ont donc été plantées sur une surface de 2000 mètres carrés. L'évolution de chaque plant nous donnera une indication sur

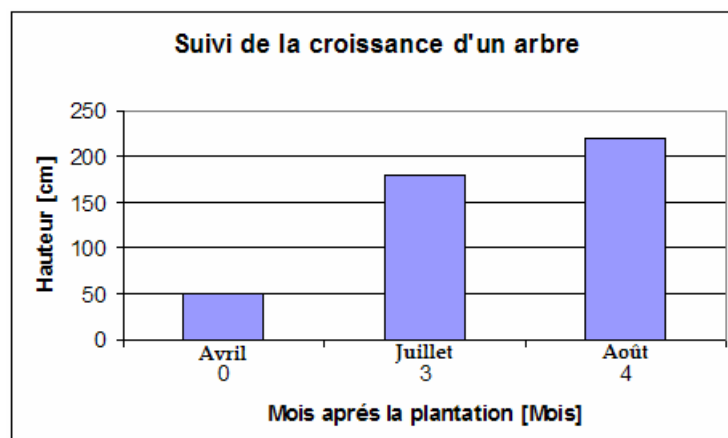
les variétés d'arbres qui réunissent les critères de croissance rapide et de fort pouvoir calorifique. On pourra alors planter à une plus grande échelle les variétés présentant les meilleures caractéristiques.

Les différents arbres ont été plantés à l'âge d'un an et leur taille variée alors de 25 à 45 cm. Deux mois après leur plantation certains atteignent plus d'un mètre quatre vingt comme on peut le voir sur la photo suivante :



Un mois après cette photo, un autre relevé a été effectué sur cet arbre qui mesurait alors plus de deux mètre vingt cinq.

Le diagramme suivant montre l'évolution de la croissance d'un arbre en 3 mois.



Cette évolution est de bon augure quant à l'avenir de l'afforestation à croissance rapide.

Le coût tout compris de cette exploitation a été de 1,30 euro par plant. Ce coût comprend l'achat des plants, l'achat d'un tapis biodégradable permettant de garder l'humidité au pied de chaque arbre ainsi que la consommation de 4 litres d'eau par pied et par jour.

Une estimation du coût à l'hectare d'une telle exploitation serait d'environ 6000 à 12000 €.

Le prix de revient de la culture de ces arbres est assez faible car c'est la décharge qui s'en occupe en parallèle des arbres déjà plantés pour filtrer les désagréments engendrés par la décharge. Dans cette plantation, qui est la première expérience de forêt à croissance rapide de Ligurie, les deux parties y trouvent donc leurs comptes.

Une des étapes du projet Méditerranéen METRID qui vise à lier le développement énergétique avec l'écologie et l'environnement est donc franchie en Ligurie.

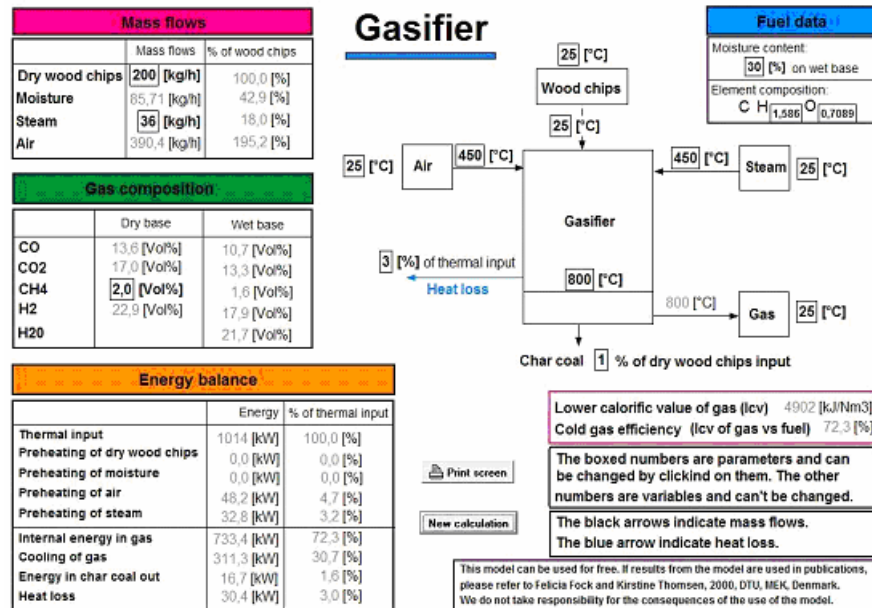
En effet, le projet METRID vise à relier l'énergie, l'écologie et l'économie (triple 'E') par l'intermédiaire d'entreprises localisées dans le pourtour méditerranéen. Il s'agira de générer un système économique rentable fournissant de l'énergie à partir de la gazéification du bois. La croissance du bois ainsi que sa récolte aura pour but d'être assurée le plus écologiquement possible (proximité des sites de ramassages de bois et des sites de gazéification). L'objectif sera donc d'établir un développement durable entre les différents acteurs impliqués dans la création d'énergie électrique par l'intermédiaire de la gazéification de la biomasse.

IV. Prise en main et présentation du logiciel EES

1. Familiarisation avec le logiciel

Le logiciel EES (Engineering Equation Solver) à été créé pour modéliser un gazéificateur du type downdraft en mode stationnaire et sans pyrolyse externe. La prise en main se fait assez facilement grâce à une interface graphique très édulcorée.

Voici comment se présente EES à son ouverture :



Les valeurs d'entrées de ce logiciel sont les suivantes :

- L'humidité de la biomasse :
The moisture content of fuel
- Le débit de biomasse sèche:
Mass flow of dry wood chips
- Le débit de vapeur d'eau (si a lieu cette injection) :
Steam mass flow
- Le pourcentage de CH₄ que contiendra le gaz de synthèse à la fin de la combustion:
Percentage of CH₄ in the gaz composition at the end of the process
- La température d'entrée de l'air dans l'appareil de gazéification :
Temperature of entrance of air in the gasifier
- Les pertes de chaleur:
Heat loss
- La température initiale de la biomasse:
Initial temperature of chips
- La température de gazéification
Gasification temperature
- La température à laquelle est amené le gaz:
Refreshment of gas

Toutes ces entrées sont dépendantes du type de gazéificateur que nous employons. Dans le laboratoire DIMSET/SCL, il y a actuellement un gazéificateur WBG 15 dont les caractéristiques sont résumées ci-dessous (cf. <http://www.ankurscientific.com/range.htm>):

Gasifier Model	WBG-15
Gas Flow Rate	37.5 Nm ³ /hr
Thermal Output	39,000 kCal/hr
Biomass Consumption	12-15 Kg/hr

Nous établissons les entrées moyennes de notre gazéificateur :

- **Dry Wood Chips** : 13.5 kg/h
- **Steam** : 0 kg/h (dépend des diverse simulations)
- **CH₄** : 3%
- **Moisture Content** : 25%

Les températures de l'air, du bois et de la vapeur dépendent quant à elles du type de simulation que nous faisons. Nous prenons 25°C comme *valeur par défaut*.

Il ne nous reste plus qu'un paramètre à évaluer, la composition de notre bois, c'est-à-dire établir une formule du type CH_xO_y

NB: A la date à laquelle nous écrivons ce rapport nous ne disposons pas encore de la version complète de EES c'est pourquoi nous avons développé quelques méthodes qui permettent une utilisation optimale de ce produit (voir les points méthodes développés en Annexe) :

2. Composition moyenne du bois

Le bois est fait de trois éléments majeurs :

-la cellulose $C_6H_{10}O_5 \rightarrow CH_{1,67}O_{0,83}$

-l'hémicellulose, globalement en quantité double de la cellulose CH_2O

-la lignine, l'élément le plus intéressant pour la combustion compte tenu de son fort pouvoir calorifique $CH_{1,2}O_{0,3}$

Nous pouvons désormais établir notre composition moyenne :

Soit x le pourcentage de lignine présente dans le bois et y le pourcentage d'hémicellulose, nous avons

$$100-x = y+2y$$

$$y = (100-x)/3$$

De la même façon que nous avons trouvé les proportions de cellulose et d'hémicellulose, nous avons trouvé pour x le pourcentage de lignine : $23 \leq x \leq 30$

Nous pouvons donc établir deux compositions :

-la première ayant la plus forte proportion de lignine (et donc le plus fort PCI)

-l'autre avec un PCI moins élevé

- Minoration du taux de lignine

$$x=23\% \text{ et donc } y = (100-23)/3, y = 25,66 \%$$

Carbone :

Nous travaillons avec la normalisation d'un atome de carbone (imposé par le logiciel EES)

Hydrogène :

$$0,255*1,67 + 2*0,255*2 + 0,23*1,2 = 1,72$$

Cellulose *hémicellulose* *lignine*

Oxygène :

$$0,255*0,83 + 2*0,255 + 0,23*0,3 = 0,79$$

Cellulose *hémicellulose* *lignine*

Formule $\text{CH}_{1,72}\text{O}_{0,79}$

- Majoration du taux de lignine

$$x=30\% \text{ et donc } y = (100-30)/3, y = 23,33 \%$$

Carbone :

Nous travaillons avec la normalisation d'un atome de carbone (imposé par le logiciel EES)

Hydrogène :

$$0,233*1,67 + 2*0,233*2 + 0,3*1,2 = 1,68$$

Cellulose *hémicellulose* *lignine*

Oxygène :

$$0,233*0,83 + 2*0,233 + 0,3*0,3 = 0,74$$

Cellulose *hémicellulose* *lignine*

Formule $\text{CH}_{1,68}\text{O}_{0,74}$

Pour coller le plus à la réalité nous nous placerons par la suite dans la configuration de minoration de la lignine et nous utiliserons donc la formule $\text{CH}_{1,72}\text{O}_{0,79}$

Nous avons déjà dressé la liste de nos paramètres par défaut (voir plus haut) auxquels nous pouvons rajouter une composition $\text{CH}_{1,72}\text{O}_{0,79}$.

Si par la suite nous ne précisons pas ces paramètres où l'un de ces paramètres, c'est que sa valeur est une valeur énoncée dans ce paragraphe.

3. RDF: Refuse Derived Fuel

Le bois n'est pas le seul combustible possible pour notre gazéificateur. Un combustible sérieux à ce projet pourrait bien être les ordures ménagères. De la même façon que nous avons

établi la composition moyenne du bois, nous pouvons établir la composition moyenne des ordures ménagères italiennes.

La composition des RDF (ordures ménagères) est complexe et instable ; cependant nous avons réussi à trouver la constitution des ordures ménagères dans cet article : <http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/pdf/rdf.pdf> (p50/229).

Tableau récapitulatif :

	Italy
waste fraction	(%)
plastic	23
paper/cardboard	44
wood	4.5
textiles	12
other	14
glass,stone,metal	2.5
dry-solid content	

La prochaine étape est d'estimer de quoi sont faits ces divers éléments:

	Composition		
	C	H	O
plastic	2	3	
paper/cardboard	6	10	5
woods	1	1.57	0.69
textiles	7.2	12.4	4.4
other=organic degradable food		Inconnue	
glass,stone,metal			

Plastic :PVC

Paper: fait de cellulose, soit $C_6H_{10}O_5$

Woods: Moyenne faite à partir de bois « tendre ». On remarque que la qualité est moindre que celle que nous ont fourni nos estimations précédentes.

Les deux dernières lignes sont vides, en effet, pour la ligne “glass, stone, metal”, le faible pourcentage nous autorise à ignorer cette donnée, par ailleurs la ligne “other” est trop vague pour en déduire une quelconque composition. Nous préférons donc ne pas la prendre en compte.

Par ailleurs sur le même site nous trouvons que pour l'Italie “other” se réfère à des aliments dégradables: ce qui peut se transformer en terreau (si l'on s'intéresse à un traitement complet de ces déchets)

Avec ces hypothèses, nous obtenons:

	Italy garbage composition		
[%]	C	H	O
Plastic	23	34.5	0
paper/cardboard	44	73.33	37
woods	4.5	7.08	3.1
textiles	12	20.67	7.3
other=organic degradable food	0	0	0
glass,stone,metal	0	0	0
total	83.5	135.58	47
Normalisé	1	1.62	0.6

Nous pouvons déjà remarquer une proportion en hydrogène (H) très intéressante. La formule finale étant $\text{CH}_{1.62}\text{O}_{0.6}$. Cela reste certes inférieur au bois mais tout de même, étant un combustible « gratuit », c'est un élément à ne pas négliger par la suite (lorsque nous utiliserons des gazéificateurs de façon plus répandue).

L'étude des RDF permet de voir les larges possibilités du gazéificateur, cependant expérimentalement nous nous contenterons à des combustibles classiques tels le bois, l'herbe compactée etc...

V. Exploitation du logiciel EES - Simulations

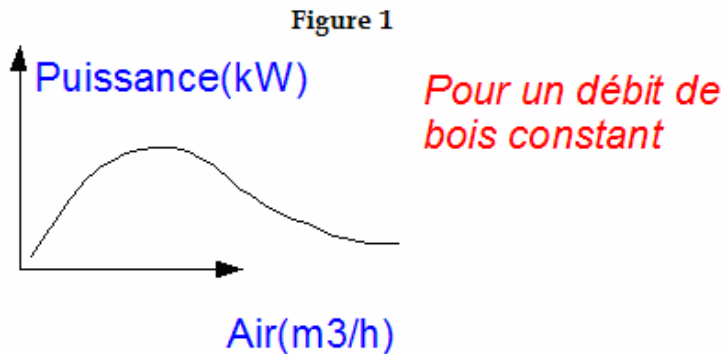
Notre approche de la gazéification commence avec une simulation numérique grâce au logiciel EES (Engineering Equation Solver) dont nous avons parlé précédemment.

Au laboratoire du DIMSET/SCL la gazéification doit allier rentabilité et écologie. Nos simulations visent donc à trouver une optimisation du processus, pour cela nous jouerons sur les différentes entrées de notre programme.

1. Prise en main du logiciel

Dans un premier temps il est nécessaire de savoir ce que l'on recherche : l'objectif est de maximiser le flux d'énergie chimique du syngas (brièvement appelé « énergie »). Par la suite, confronter la simulation à l'expérimental deviendra indispensable. Pour l'instant nous nous intéressons à l'évolution de l'énergie du syngas en fonction du débit d'air en entrée du gazéificateur obtenue avec le logiciel.

Nous nous attendons à trouver une courbe de ce type :



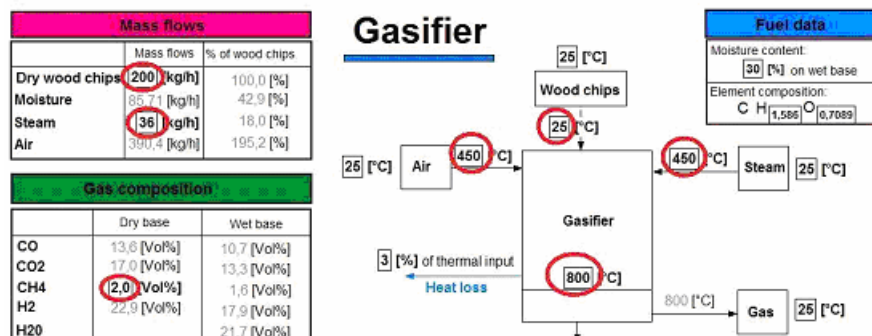
Explications :

Au début, le gazéificateur n'a pas assez d'air : il y a un fort excès de combustible. Sur la seconde moitié du graphique (après le maximum) il y a trop d'air : ce qui consomme de l'énergie pour augmenter l'oxydation, et donc la température globale de la chambre de gazéification.

Tout du moins, c'est ce à quoi l'on s'attendait, mais la simulation n'a pas répondu à cette attente.

- Accéder au débit d'air

Le premier problème est que l'on ne peut pas accéder directement au débit d'air, il convient donc de s'attarder sur les entrées modifiant le débit d'air :



Les paramètres qui modifient le débit d'air sont :

- Dry wood chips
- Steam
- CH4
- Température d'entrée d'air
- Température d'entrée du bois
- Température d'entrée de vapeur
- Température de gazéification

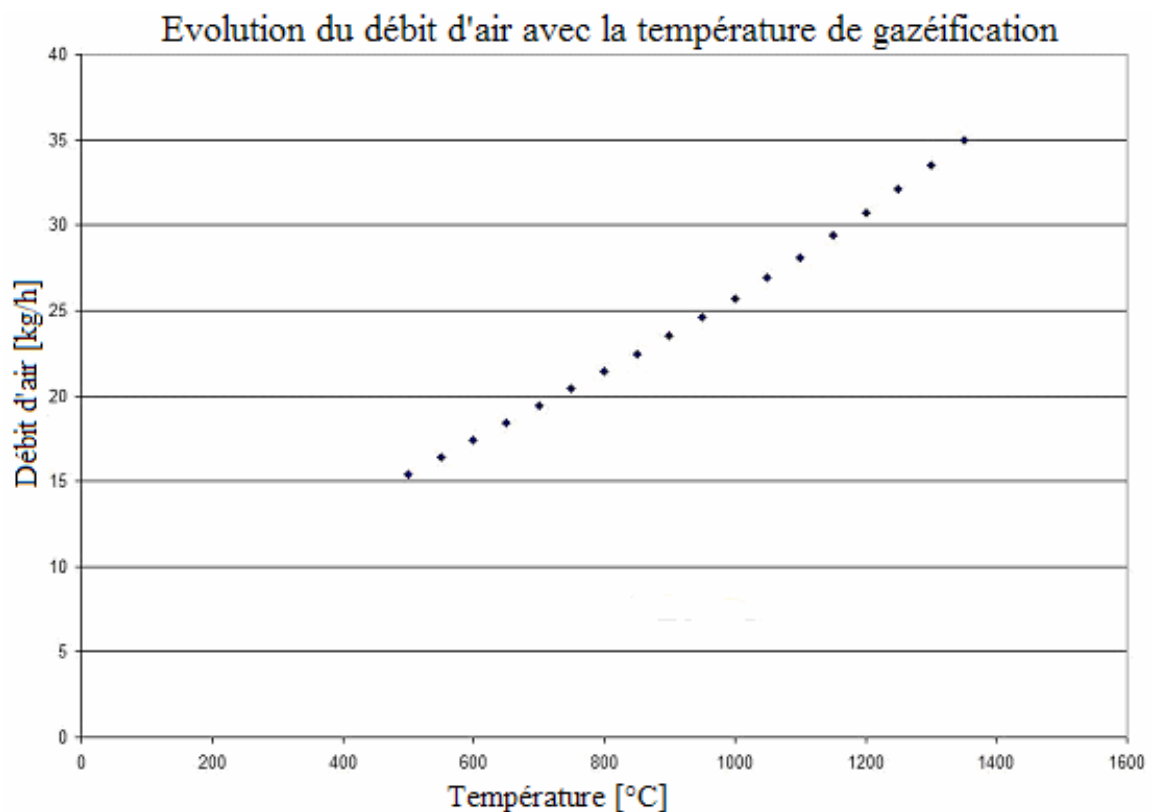
Les paramètres sur lesquels nous pouvons jouer pendant les manipulations sont plus limités que ce que le logiciel veut bien le laisser croire. Nous retenons deux paramètres accessibles également lors des expérimentations :

- le débit de bois
- la température de gazéification.

2. Variation de la température de gazéification

a. Variation de la température

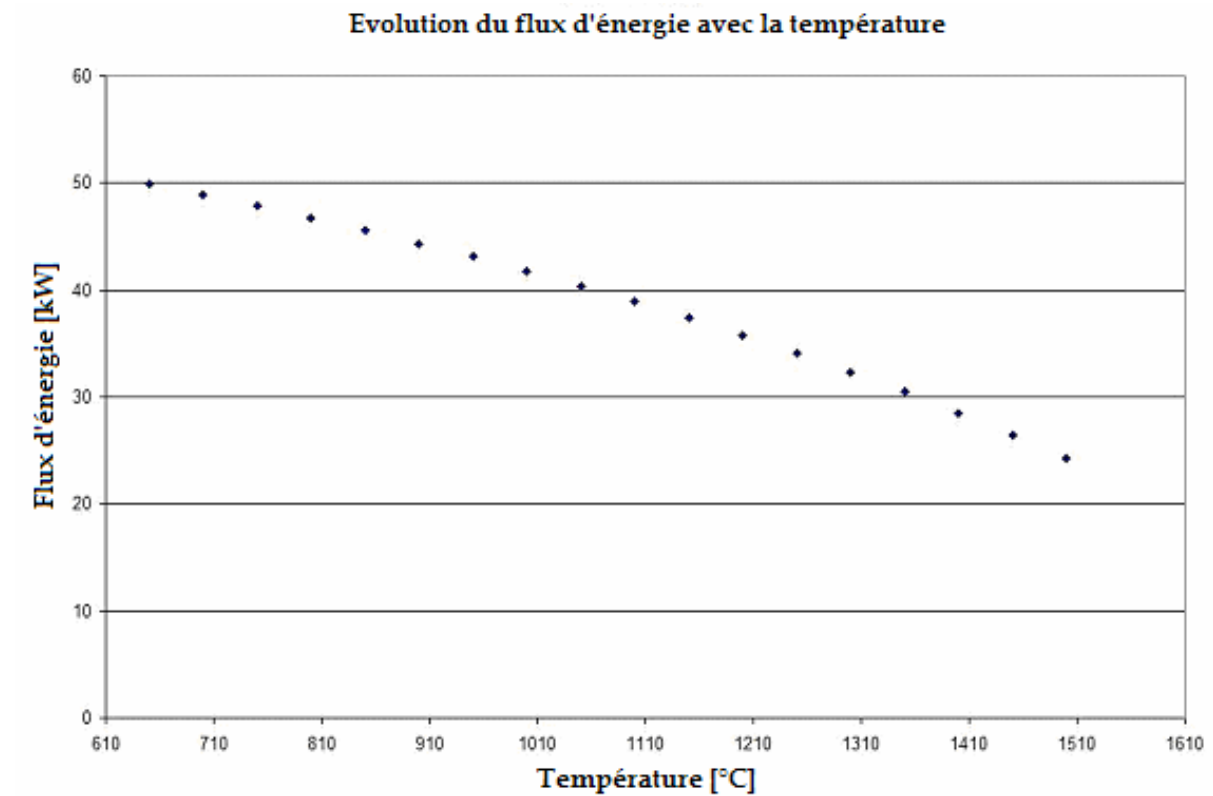
Nous devons voir comment évolue le débit d'air en fonction de la température :



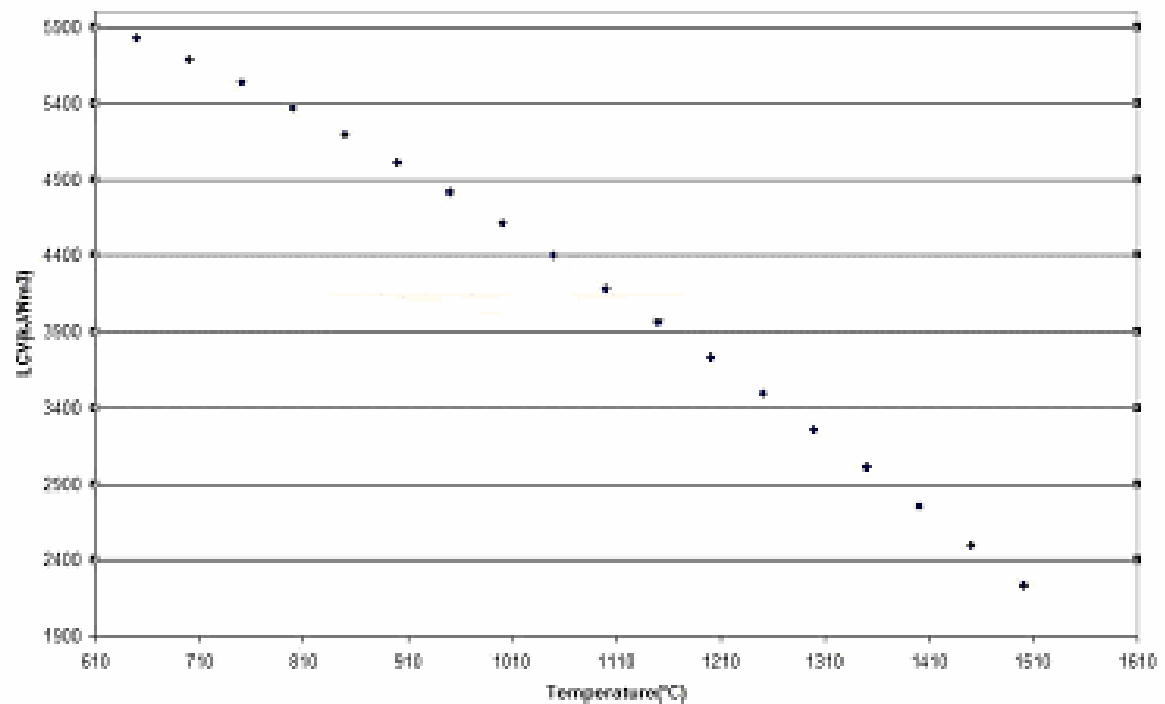
L'évolution du débit d'air présente une évolution quasiment linéaire en fonction de la température, nous pouvons donc prendre la température comme référence pour faire varier le débit d'air (si nous gardons tous les autres paramètres constants).

Par la suite, tous les graphiques ayant la température en abscisse sont synonymes de graphiques variant en fonction du débit d'air.

Nous pouvons désormais tracer les courbes que nous voulions :



Evolution du pouvoir calorifique inférieur en fonction de la température de gazéification

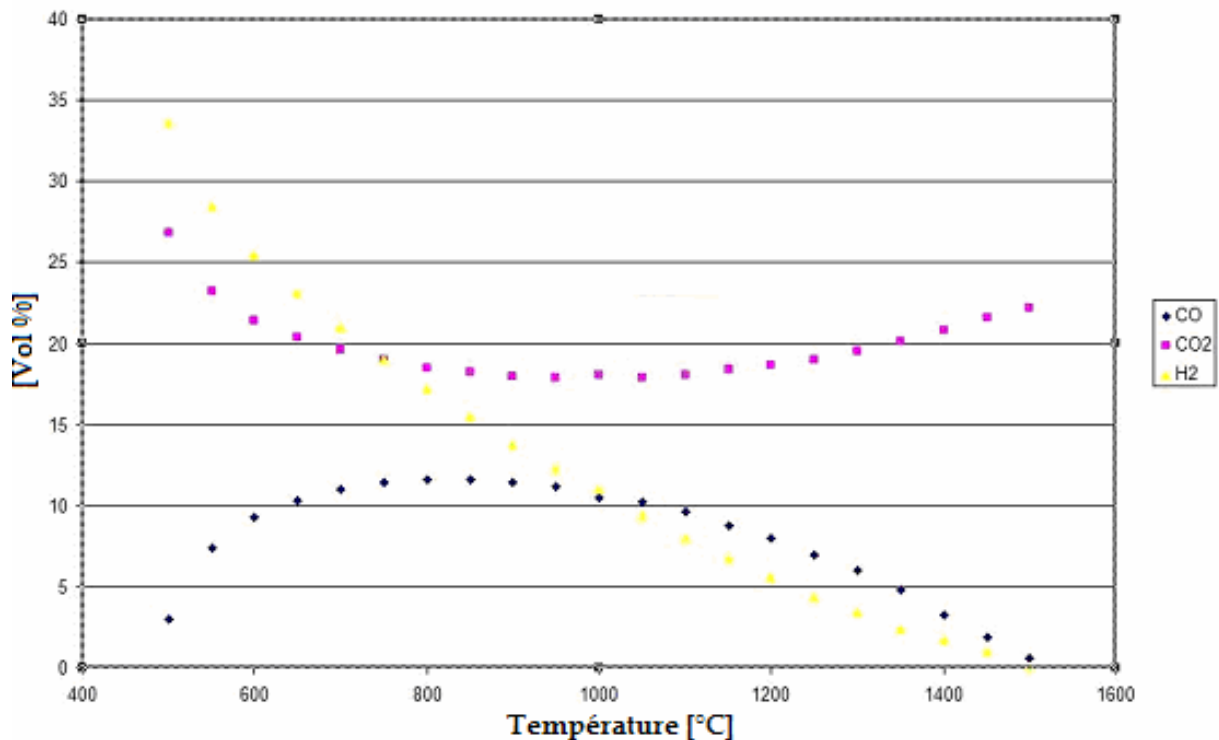


Observations :

On remarque une décroissance constante pour le flux d'énergie et le *LCV* (Pouvoir Calorifique Inférieur). L'évolution est quasi linéaire, nous n'observons donc aucun maximum. Nous nous attendions à voir un maximum autour des 1100°C ce qui n'est pas le cas ici. Nous voyons aussi que le PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur ou *LCV*, *Lower calorific value of gas* dans le programme) et le flux d'énergie constituent deux paramètres complémentaires pour pouvoir conclure sur la qualité du gaz

Revenons tout de même un instant sur la composition du gaz :

Composition du gaz de synthèse



Observations :

Aux alentours de 900°C, on peut observer :

- un minimum de CO₂
- un maximum de CO
- une proportion intéressante en H₂

Malgré la convergence des deux premiers facteurs, il n'y a quasiment aucune répercussion sur le PCI. La décroissance du H₂, qui a un fort pouvoir calorifique (respectivement 1,5 et 12 fois plus élevé que pour ceux du CH₄ et du CO, voir annexe) pourrait bien expliquer que le PCI varie peu. Nous soulignons que nous avons intérêt à maximiser la teneur en H₂ dans le produit final car c'est sa variation qui influence le pouvoir calorifique du syngas.

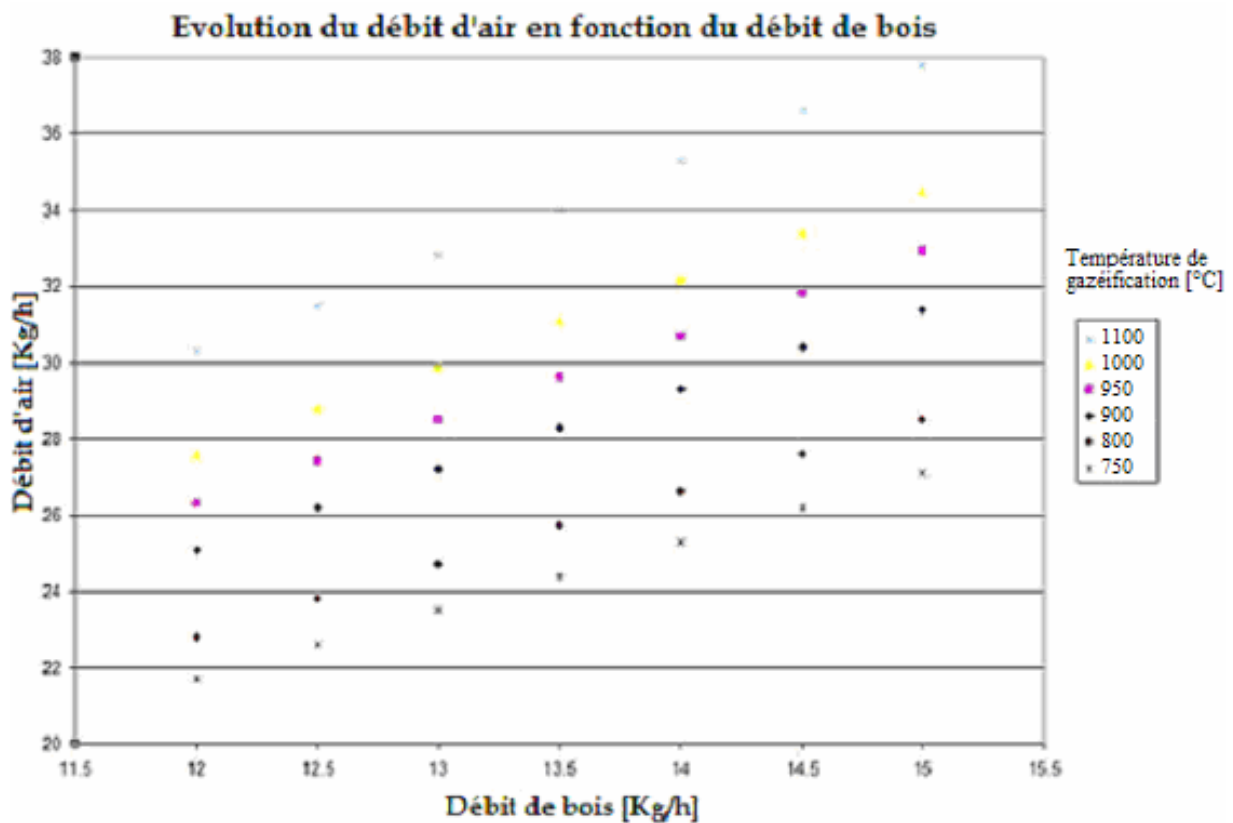
En fait les espèces les plus énergétiques se forment à basse température (par exemple lorsque nous nous trouvons dans la zone de pyrolyse). Des longues chaînes carbonées peu ou pas oxydées sont produites avec un important rapport Carbone/Oxygène.

Lorsque nous nous éloignons de la pyrolyse, c'est à dire que nous nous dirigeons vers la gazéification, nous augmentons l'apport d'air et par la même occasion nous oxydons nos chaînes carbonées. En conclusion si nous voulons gazéifier, cela se fera au détriment du pouvoir calorifique du gaz mais pas au détriment de la qualité sanitaire puisqu'à hautes températures les goudrons ont quasiment disparus.

b. Variation du débit de bois

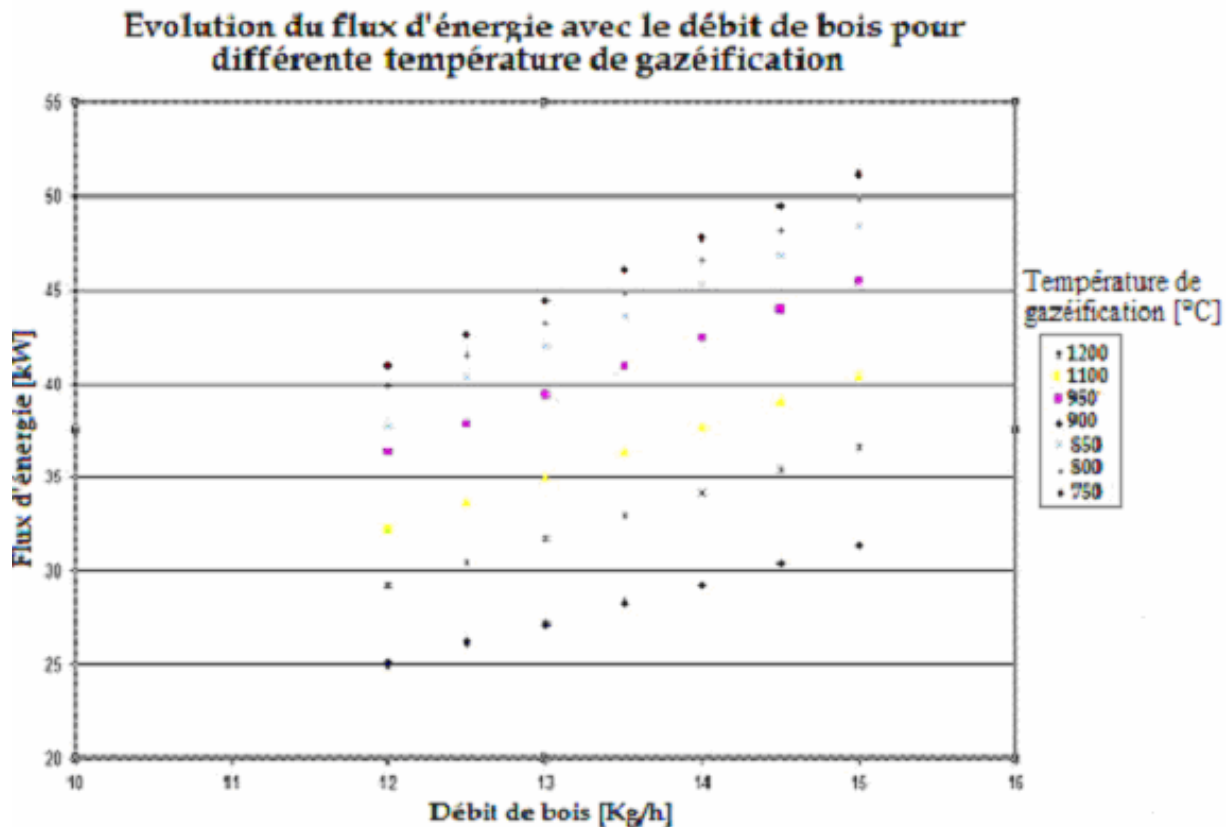
Comme dans le cas précédent nous essayons de faire varier l'entrée d'air mais cette fois ci en modifiant le débit de bois.

Pour cela nous devons encore observer l'évolution du débit d'air en fonction du débit de bois :



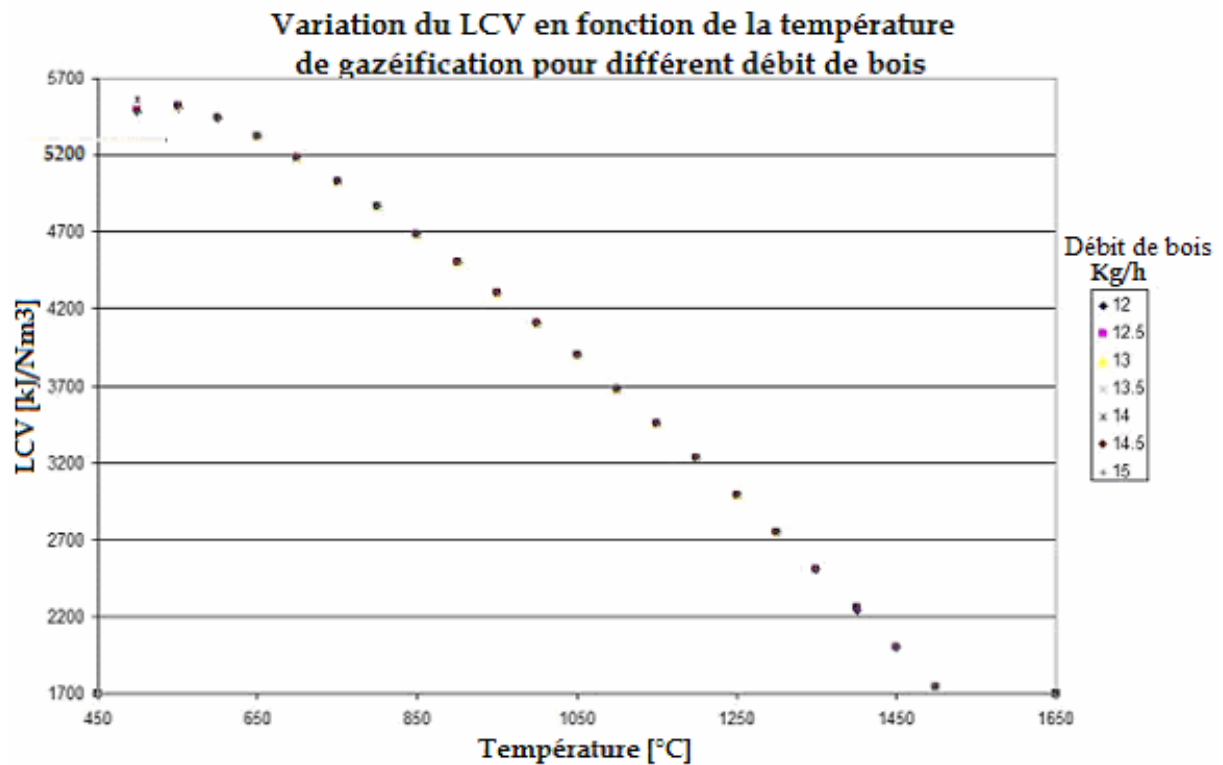
Ce graphique confirme que l'on peut relier le débit de bois au débit d'air assez facilement (évolution linéaire).

Nous pouvons désormais nous intéresser à l'évolution de la puissance calorifique contenue dans le gaz :



Nous nous attardons également sur le pouvoir calorifique inférieur (LCV ou PCI) en kJ/Nm^3 .

Remarque : Le logiciel de simulation ne prévoit pas les variations du pouvoir calorifique inférieur du gaz de synthèse en fonction du débit de bois mais il les prévoit en fonction de la température de gazéification. En effet, le LCV (PCI) est une grandeur spécifique (par unité de volume) et, pour de mêmes conditions thermochimiques (la température de gazéification par exemple) il ne peut pas dépendre du débit de bois.



Observations :

On confirme le résultat de notre première simulation : le maximum d'énergie se trouve pour la température la plus faible, d'autre part le flux d'énergie croît de façon linéaire avec le débit de bois.

Le traitement des données du logiciel EES ne donne pas de maximum du flux d'énergie. Cela s'explique par le fait que les courbes sont obtenues à débit de bois constant. En fait, expérimentalement le débit de bois ne peut être considéré comme constant : l'augmentation de la température de gazéification accroît l'apport d'air et la consommation de bois (donc le débit de bois). Par conséquent, nous devons nous attendre en réalité à une augmentation du flux d'énergie avec l'augmentation de la température de gazéification et cela, grâce à l'augmentation de la consommation de bois gazéifié.

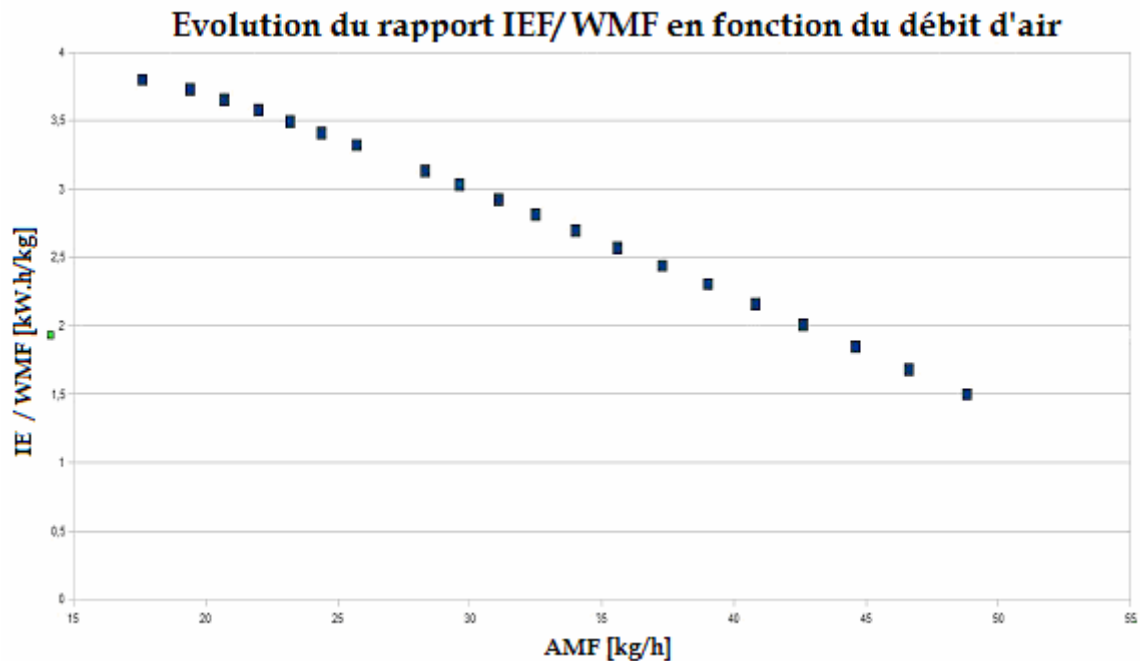
La courbe de fonctionnement obtenue expérimentalement avec notre gazéificateur se promènera donc sur les courbes obtenues au moyen du logiciel EES.

Jusqu'à présent nous nous sommes seulement intéressés à l'énergie et à la puissance disponible, pour trouver une optimisation de notre gazéificateur, une variable intéressante pourrait bien être le rendement (une formule du rendement théorique est développée dans le paragraphe suivant) mais pour l'instant le rapport IEF/WMF est un critère suffisant.

Nous précisons les significations des diverses abréviations que nous pourrions utiliser par la suite. Celles-ci dérivent des grandeurs de sorties ou d'entrée du logiciel EES :

- IEF : Internal Energy in gas **(le flux d'énergie) [kW]**
- WMF : Wood Mass Flow **(le débit de bois) [kg/h]**
- AMF : Air Mas Flow **(le débit d'air) [kg/h]**

Le rapport IEF/WMF est synonyme de rapport qualité/prix, à défaut d'avoir calculé un rendement exact:



Observations :

Le ratio diminue de façon constante, et le maximum se trouve toujours pour une température la plus faible, nous nous attarderons plus en détail sur cette courbe dans le paragraphe suivant. Dans les conditions actuelles nous avons donc deux possibilités d'étude : en faisant varier la température ou le débit de bois. Fondamentalement, cela ne change pas beaucoup car dans les deux cas nous faisons varier le débit d'air en entrée du gazéificateur.

Maintenant que nous nous sommes intéressés au flux d'énergie ainsi qu'au *LCV*, on peut envisager d'étudier un autre paramètre qui résume mieux l'efficacité de notre installation.

Comme dans tout procédé, il est intéressant, voire nécessaire de se préoccuper du rendement du système. Pour cela nous listons l'énergie que l'on récupère et celle que l'on fournit

Energie fournie :

- ✓ Chauffage de l'air : C_{air}
- ✓ Chauffage de la vapeur : C_{vap}
- ✓ Chauffage du bois : C_{bois}
- ✓ Refroidissement du gaz : R_{gaz}
- ✓ Energie contenue dans le bois : E_{bois} (nous avons pris un pouvoir calorifique de 15 MJ/kg pour le combustible - bois).

Energie récupérée

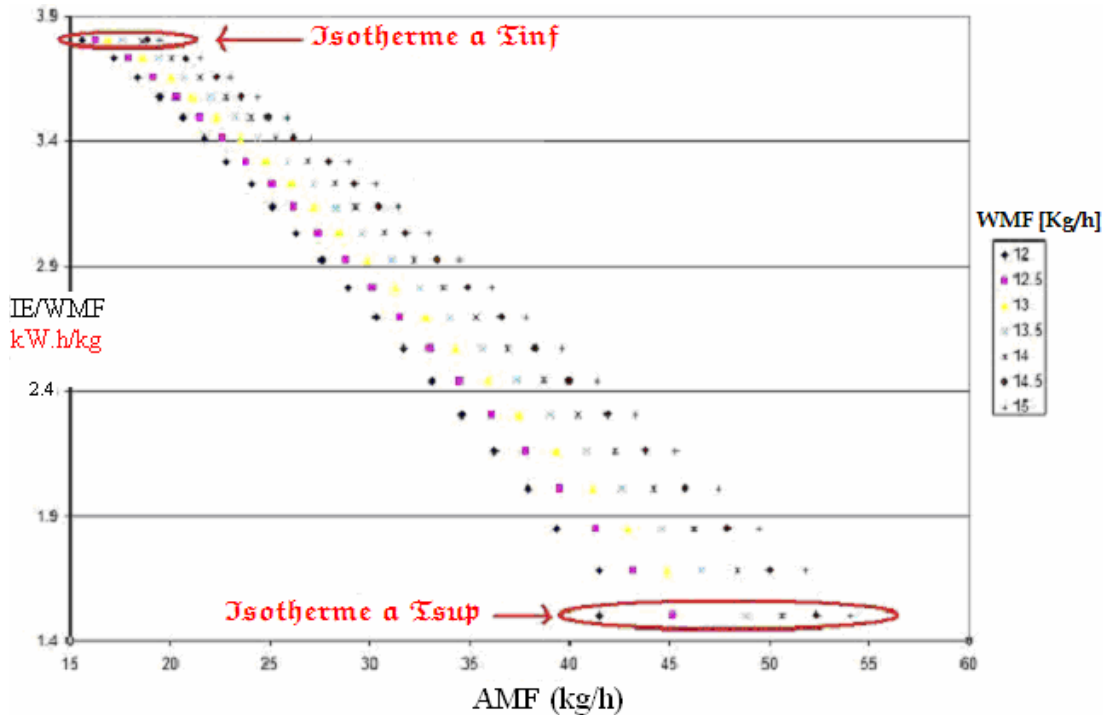
- ✓ Energie interne du gaz (flux d'énergie chimique, c'est elle que l'on utilise lors d'une utilisation en tant que combustible, appelée « internal energy » dans le programme) Soit E_i cette énergie.
- ✓ Energie thermique du gaz : I_{th} .

On en déduit notre formule du rendement :

$$R = (I_{th} + EI) / (C_{air} + C_{vap} + C_{bois} + R_{gaz} + E_{bois})$$

Ceci est le rendement théorique par excellence, nous avons également utilisée une formule beaucoup plus simplifiée pour avoir une idée de l'énergie (chimique) que l'on peut récupérer grâce à la formule :

$$R_0 = IEF \text{ (kW)} / WMF \text{ (kg/h)}$$



Evolution du rapport (Internal Energy/Syngas Volume Flow)/ Air Mass Flow en fonction du volume d'air et pour différents débits de bois.

Ici, nous avons considéré la puissance totale disponible (IEF), nous pouvons également faire une approche différente en considérant l'énergie disponible dans un norme mètre cube de syngas pour voir la différence, la formule devient alors :

$$R_0 = \text{Lower Calorific Value} / WMF \Leftrightarrow [kJ/Nm^3] / [kg/h]$$

Observations :

Pour le premier graphique :

Le rapport n'est pas fonction du débit de bois car le LCV est indépendant de cette grandeur et diminue avec le débit d'air.

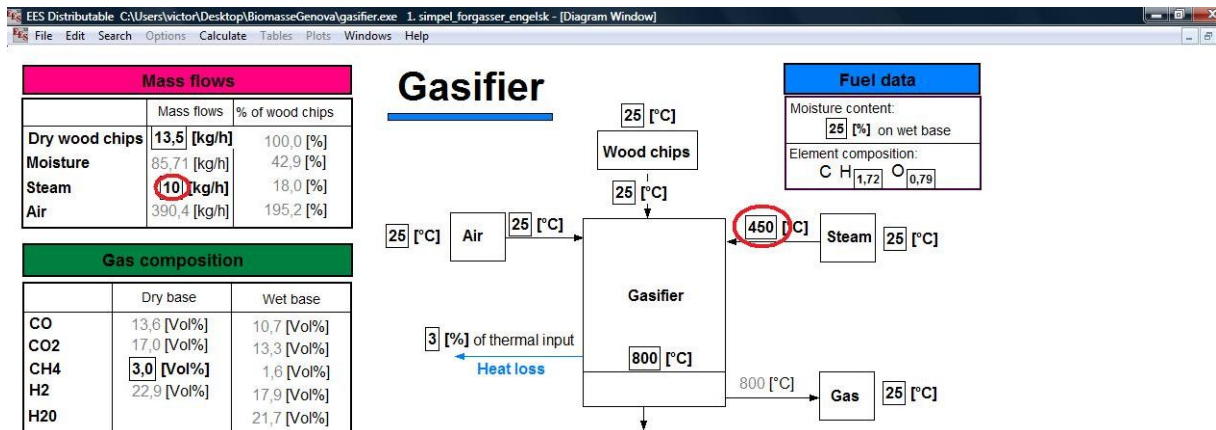
Ce qui signifie que pour obtenir un rapport maximum, on doit se placer au minimum de débit d'air, ce qui est synonyme de diminution de la température de gazéification. Nous confirmons donc toutes les remarques précédentes.

Le logiciel EES ne peut fournir que des comportements résultats paramétriques sans pour autant pouvoir décrire le fonctionnement d'un gazéificateur spécifique. Cela est dû au fait que le programme a été construit avec des grandeurs adimensionnelles, c'est pourquoi on ne peut pas mettre dans les grandeurs d'entrée les dimensions caractéristiques de notre gazéificateur. Le comportement du gazéificateur lors d'essais expérimentaux pourra être rendu par les courbes paramétriques obtenues avec le logiciel. Ce sera donc par cette voie là que nous pourrons prévoir le comportement du gazéificateur (en comparant les courbes paramétriques avec les courbes expérimentales). Par conséquent, nous pourrons trouver des valeurs optimum par ce biais.

3. Optimisation avec vapeur et air chauffé en entrée

L'injection de vapeur est une technique très importante en particulier pour la gazéification de charbon. Pour la biomasse, elle n'est pas utilisée. Voyons pourquoi.

Nous pouvons jouer à la fois sur la température et sur le débit de vapeur :



Nous comparons les résultats obtenus avec ceux sans injection de vapeur.

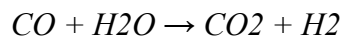
Nous devons mettre en évidence deux paramètres importants :

- Le préchauffage de l'air
- Le préchauffage de la vapeur

Nous pensons que la *water shift reaction* peut jouer un rôle important.

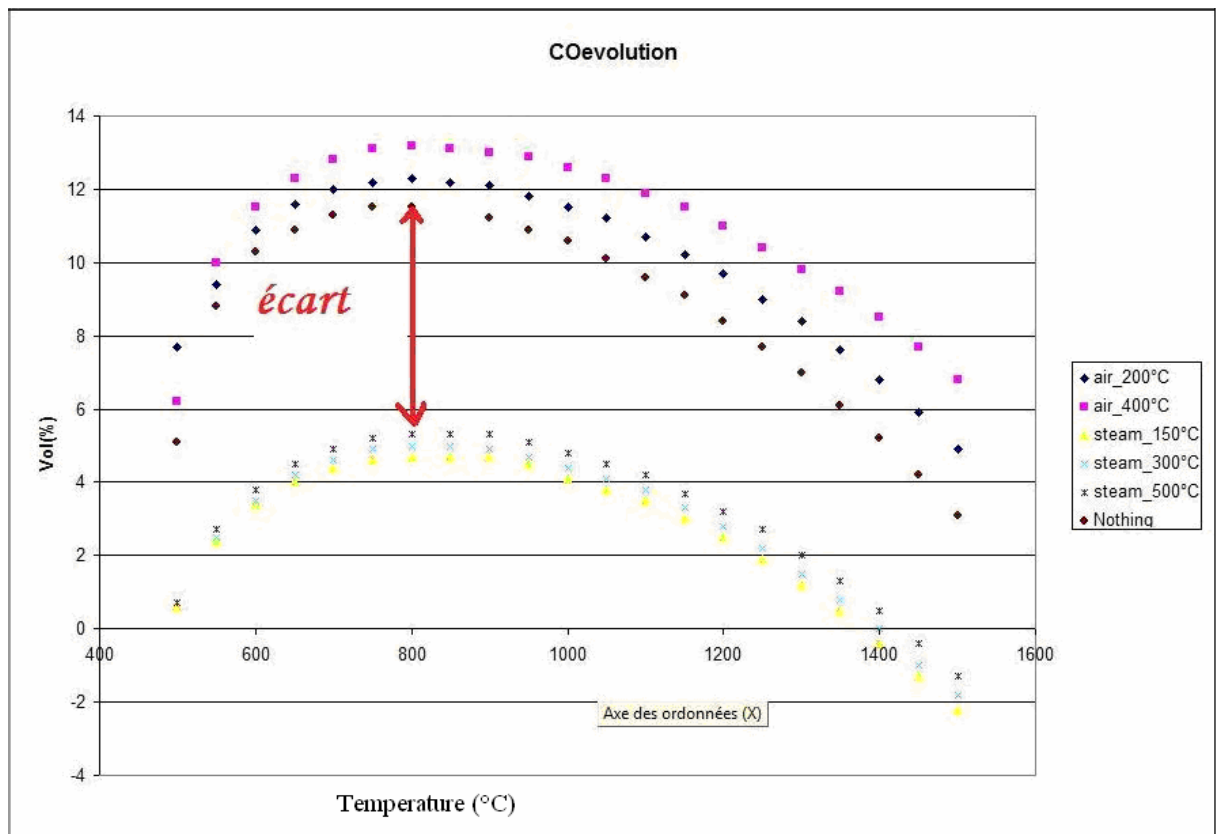
Définition :

« *The water gas shift reaction is a chemical reaction in which carbon monoxide reacts with water to form carbon dioxide and hydrogen:*



The water gas shift reaction is a part of steam reforming of hydrocarbons »

Pour mettre en évidence la *water gas shift reaction* nous nous intéressons à la variation de CO et de H₂ (un réactif et un produit de la réaction) :



Les deux courbes au dessus correspondent à une gazéification avec de l'air préchauffé en entrée, respectivement à 400°C et à 200°C. La courbe marron correspond à une gazéification « simple » (ni vapeur ni air préchauffé en entrée). Quant aux trois dernières courbes elles représentent une gazéification avec injection de vapeur en entrée (150°C, 300°C, 500°C)

Observations :

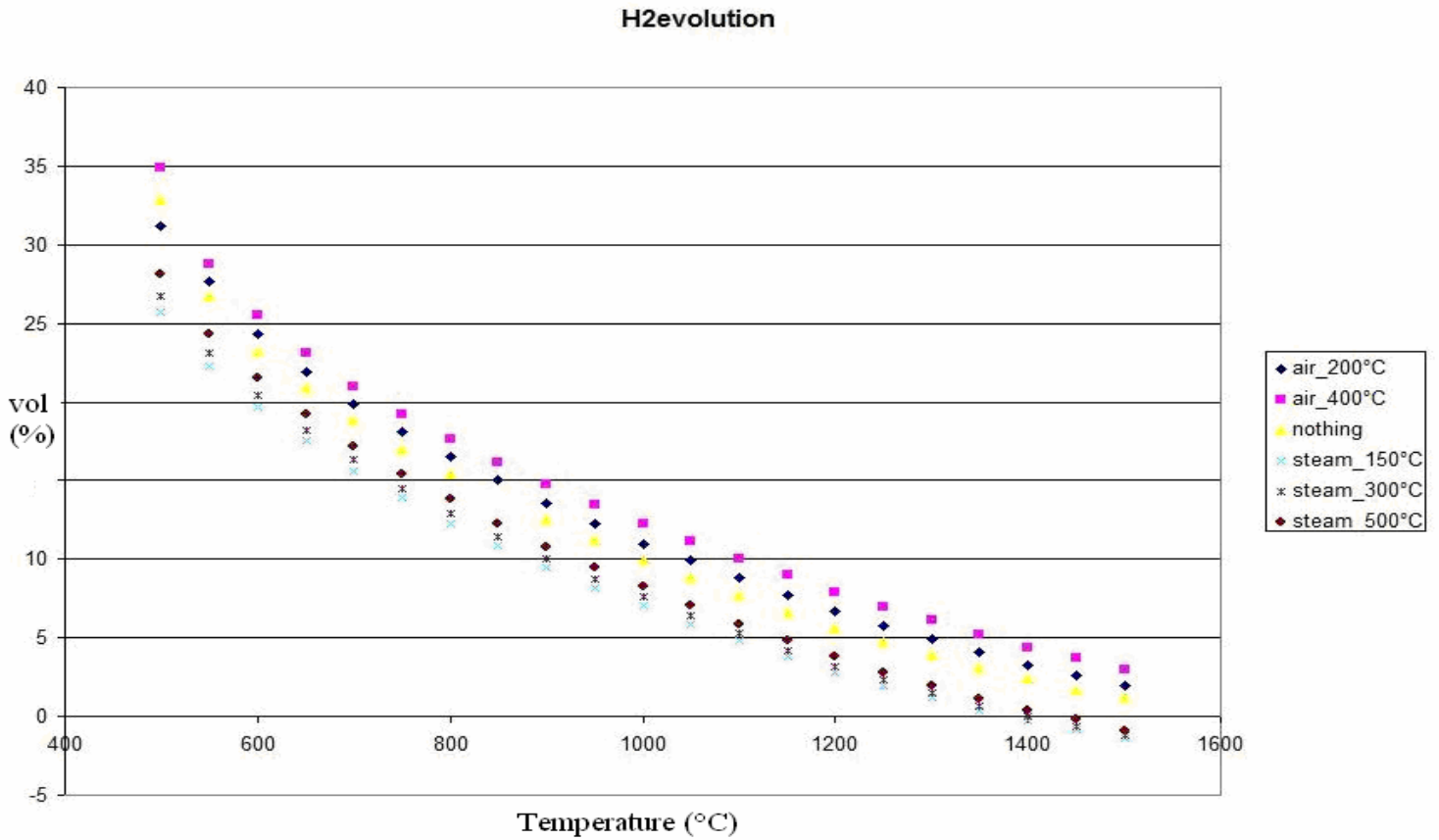
Tout d'abord, on peut souligner le fait que chauffer l'air modifie la composition du syngas, il faudra s'attarder sur ce point en faisant une étude comparative en énergie (voir graphique ci-dessous).

On remarque également qu'il y a une différence importante entre la gazéification avec et sans injection de vapeur.

On s'attendait effectivement à un comportement différent du CO (car il joue un rôle dans la *water gas shift reaction*) mais la baisse significative de CO dès 500°C nous interpelle quelque peu. En fait il y a une explication multiple à cette baisse :

- L'injection de H₂O augmente le volume total, et donc réduit les quantités exprimées en %
- En introduisant du N₂ (gazéification à l'air) on joue sur la loi d'action de masse : nous augmentons le volume total, et donc nous diminuons la concentration des réactifs de la *water gas shift reaction*

Intéressons nous maintenant à la variation de H₂ :



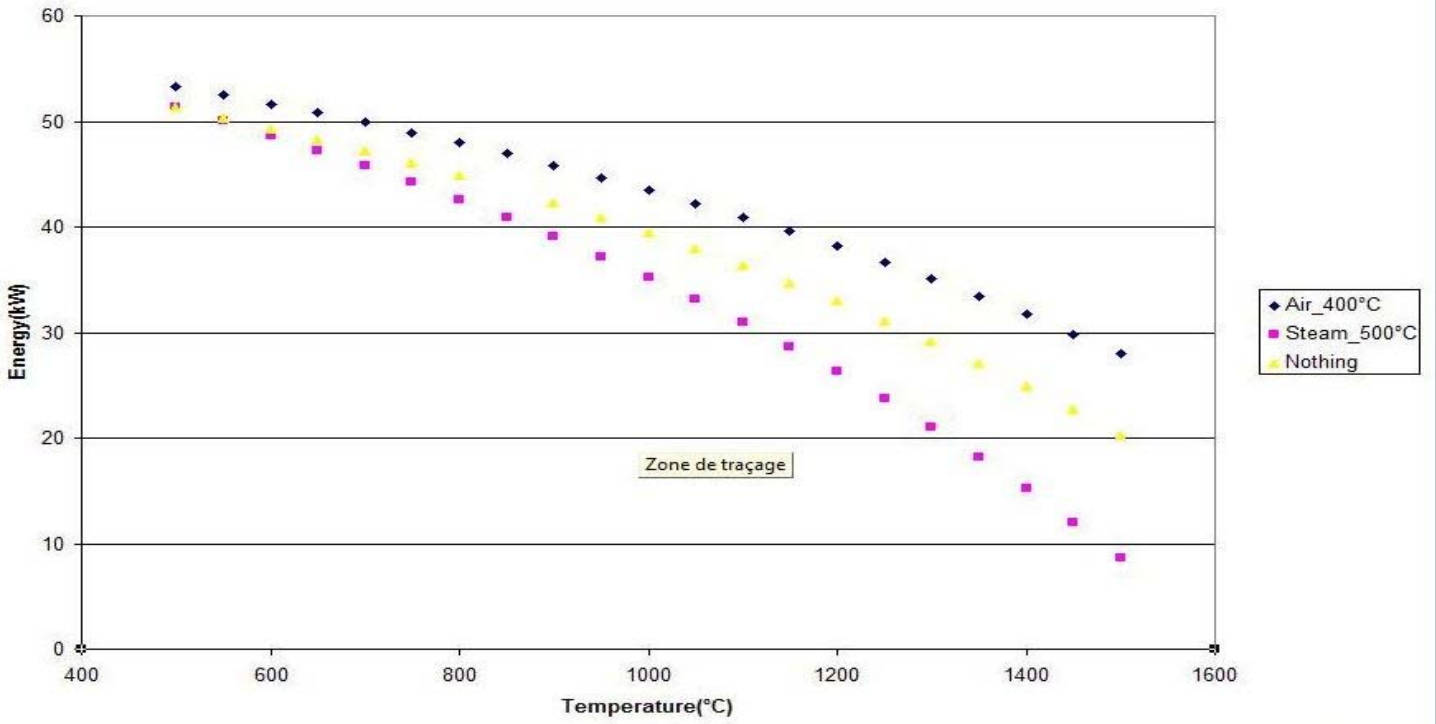
Les courbes s'organisent exactement de la même façon que sur le graphique précédent

Observations :

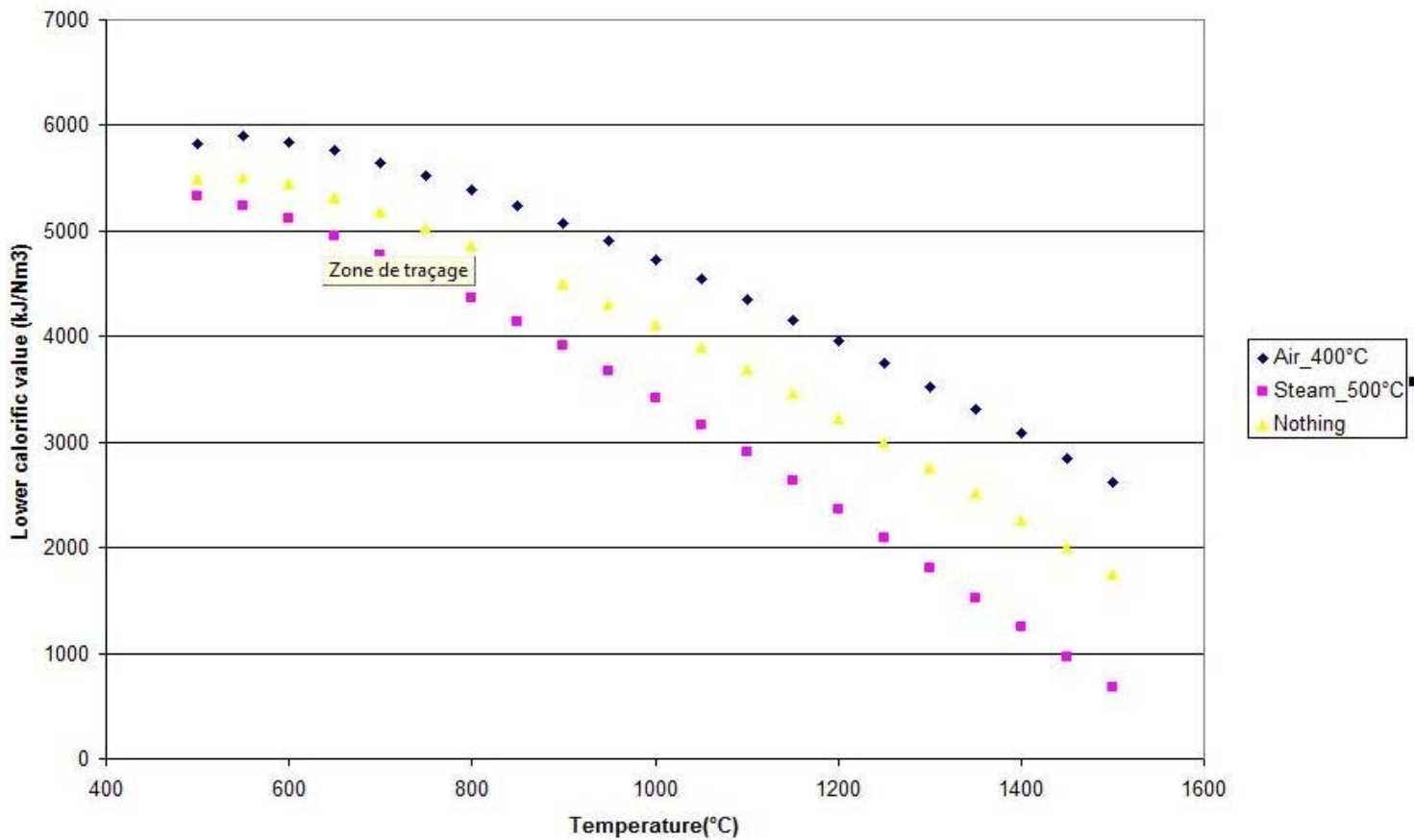
La diminution conséquente de CO e celle de H₂ (même si elle est moins importante) indiquent une forte présence de H₂O (malheureusement très peu venant de la gas water shift reaction) qui occupe un volume très important dans le syngas. Ce qui fait diminuer la concentration de CO et de H₂. Autrement dit, injecter de l'eau ne semble pas être une pratique indiqué quand on gazéifie la biomasse.

Mais avant toute chose, il nécessaire, voire indispensable de s'intéresser à la puissance et à l'énergie :

Energy evolution



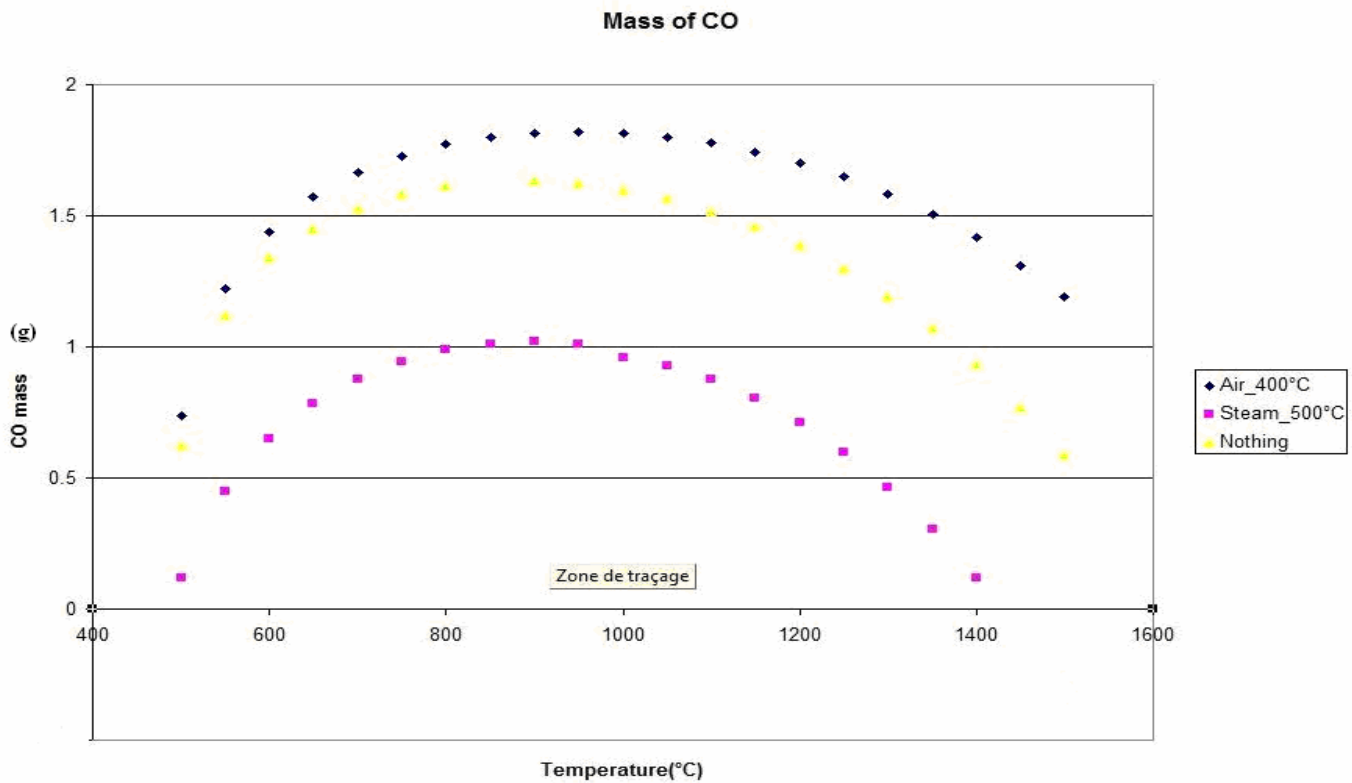
Energy evolution



Observations :

Que ce soit d'un point de vue unitaire ou global (kJ/Nm³ ou kW), le gaz le plus énergétique est toujours celui obtenu avec de l'air préchauffé et le moins énergétique celui obtenu avec de la vapeur en entrée.

Par ailleurs, en approfondissant notre feuille de traitement, il se peut que l'on ait effectivement accès à la masse des gaz de sorties, voici un aperçu des courbes obtenues (voir point méthode : [Faire des relevés complets](#)) :

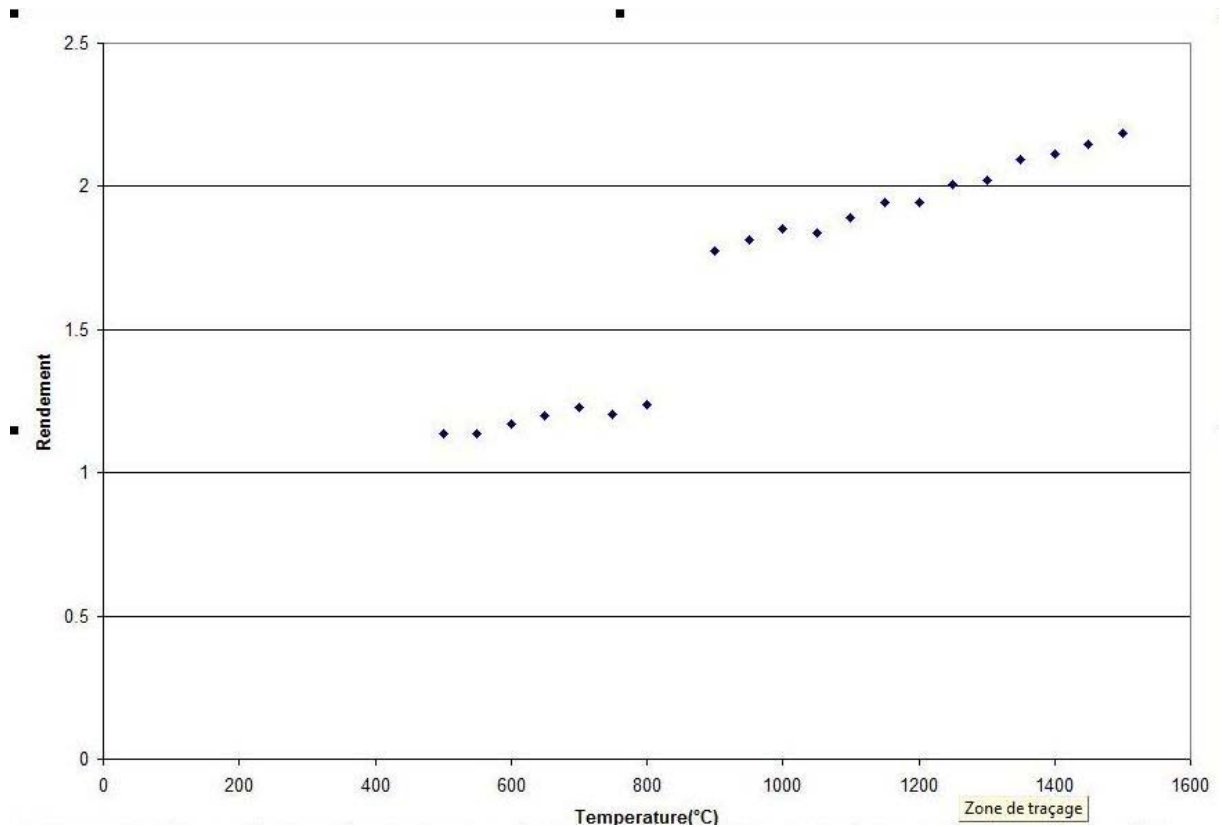


Observations :

Définitivement l'injection de vapeur n'est pas intéressante quand nous avons à faire à une gazéification au bois. Par contre le préchauffage de l'air augmente de façon intéressante l'énergie interne de notre syngas.

Nous avons tracé ci-dessous le rendement, calculé selon avec la formule

$$\frac{\Delta \text{Energy}}{\text{Energy of preheated air}}$$



Conclusion :

Une conclusion univoque s'impose : préchauffer l'air injecté est un atout pour son contenu énergétique. Nous recommandons fortement l'emploi d'un dispositif dédié à cet effet. Quant à la température optimale d'air préchauffé, d'un point de vue expérimental nous ne sommes pas encore à ce degré d'avancement. Un compromis entre simulation et expérimentation recommande de déjà arriver à une température de 400°C de l'air injecté. Pour l'instant nous avons mis des sèche-cheveux aux niveaux des entrées d'air pour réaliser cette amélioration :



Installation de matériel chauffant, la feuille d'aluminium a pour but d'isoler thermiquement le sèche cheveux.

Conclusion sur l'injection de vapeur :

Préchauffer l'air peut avoir une incidence importante. Par ailleurs, injecter de la vapeur n'a pas grand intérêt (cela a plutôt un effet négatif).

L'étape suivante consiste à étudier les avantages de la gazéification à l'oxygène, peut-être que ce type de gazéification nous permettra de mettre en avant la *water gas shift reaction*. Etant donné que l'azote, élément neutre, ne sera plus compris dans les réactions de gazéification.

4. Gazéification à l'oxygène

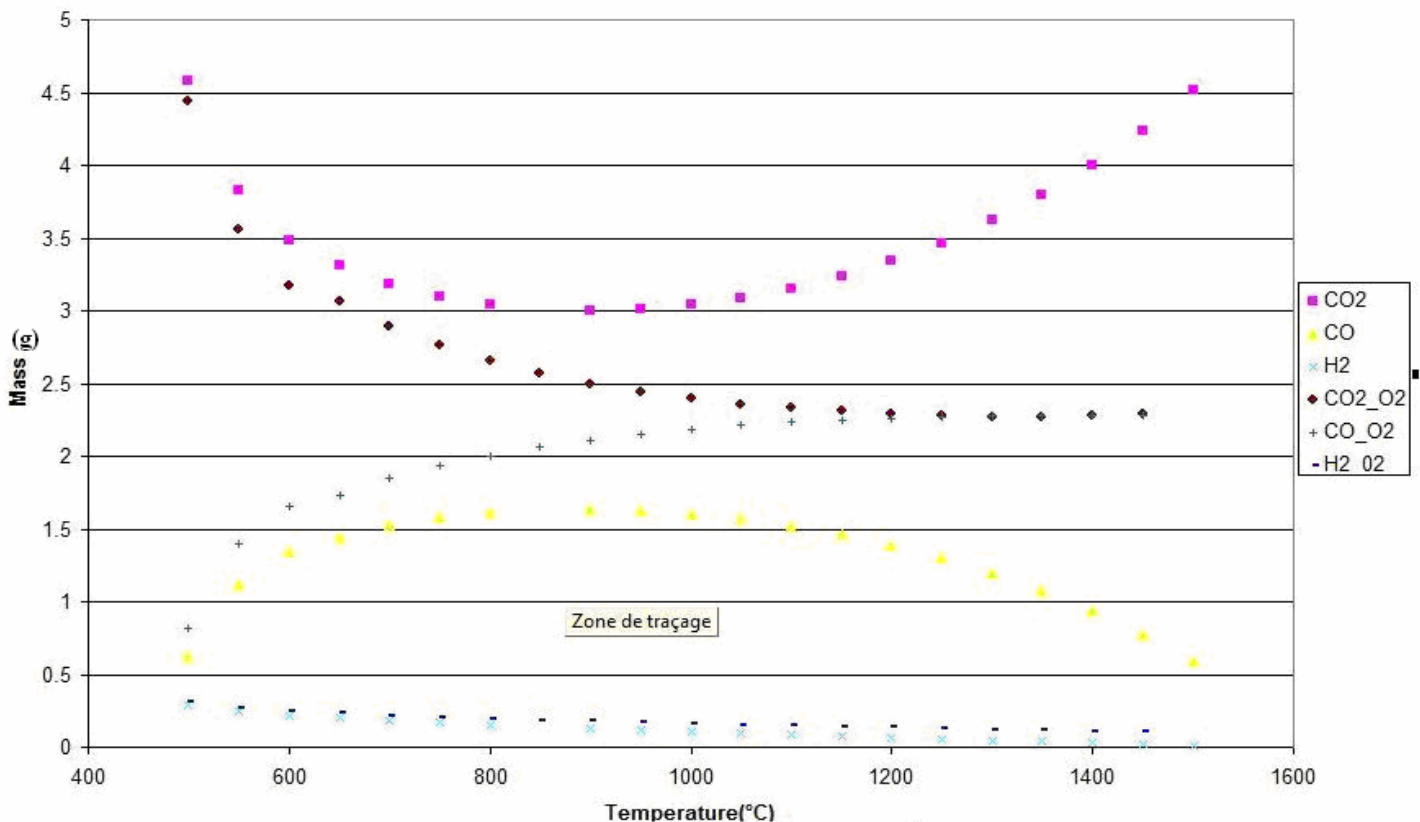
Bien qu'EES ne soit pas prévu à cet effet, nous avons réussi à simuler la gazéification à l'oxygène ([voir le Point Méthode concernant ce sujet](#)).

Nous avons répertorié les avantages de l'emploi de l'oxygène :

- Sans introduction de N_2 , pas de gaspillage d'énergie pour chauffer les gaz inertes
- Selon la loi d'action de masse : la concentration des divers réactifs est plus haute, la réaction se produit plus efficacement
- Composition plus énergétique du syngas (notamment pour produire du combustible liquide de seconde génération selon le procédé Fischer-Tropsch)

Dans un premier temps nous nous intéresserons à la composition du syngas (nous omettons de parler du CH_4 car EES l'utilise comme un paramètre). Par ailleurs nous ne parlons plus en %, mais en masse, ce qui permet une meilleure compréhension de la différence entre la gazéification à l'air ou à l'oxygène :

Difference between air and oxygen gasification



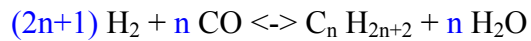
Observations :

Concernant le H_2 , on note que la variation entre les deux procédés de gazéification n'est pas significative (un léger avantage cependant pour la procédé à l'oxygène). Il doit être

remarqué que, en termes de masse, la concentration en hydrogène n'est pas bien représentée.

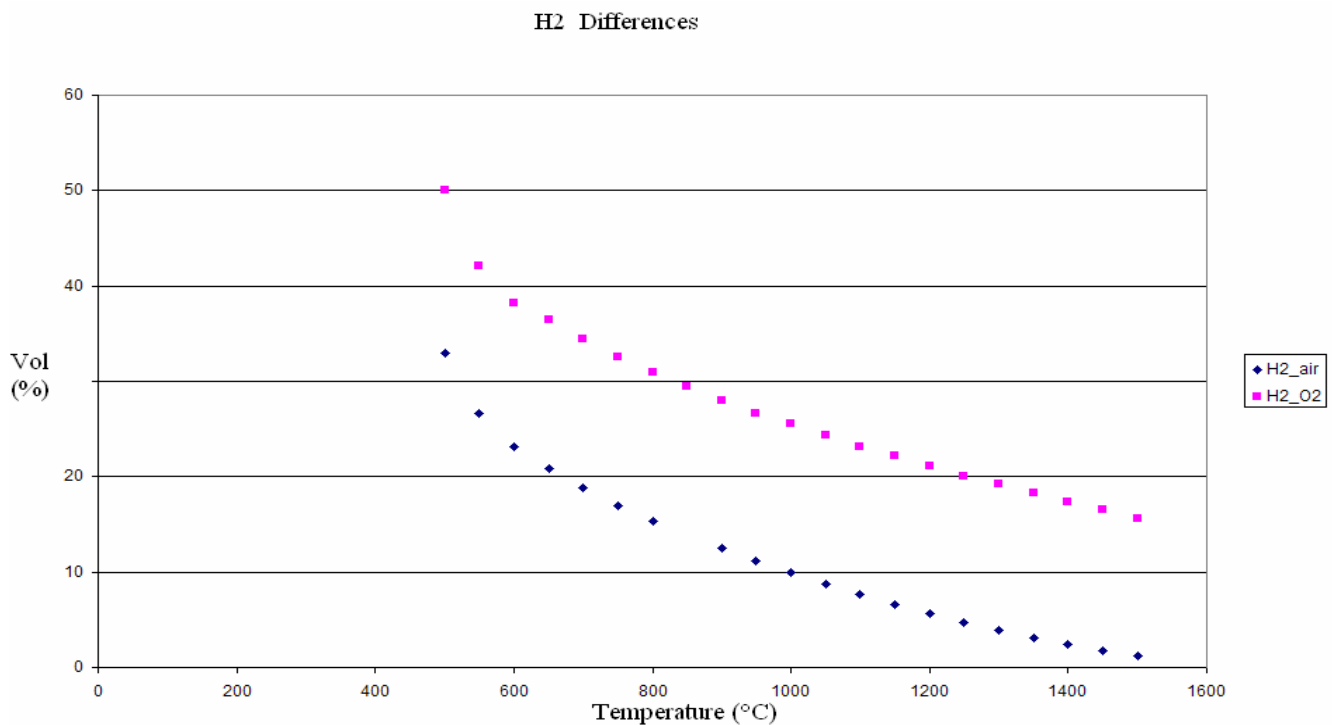
Pour le CO₂, dans le cas du gaz obtenu grâce à l'oxygène on constate une baisse quasi continue tant que l'on augmente la température (ce qui devrait se répercuter positivement sur la composition énergétique de notre syngas).

Quant au CO, nous sommes également habitués à voir un pic aux alentours de 900°C. Mais présentement le CO croît quasi continuellement avec la température : nous nous préoccupons du CO car il a un pouvoir calorifique intéressant mais aussi parce qu'il est l'un des acteurs principaux dans la réaction de Fischer Tropsch :

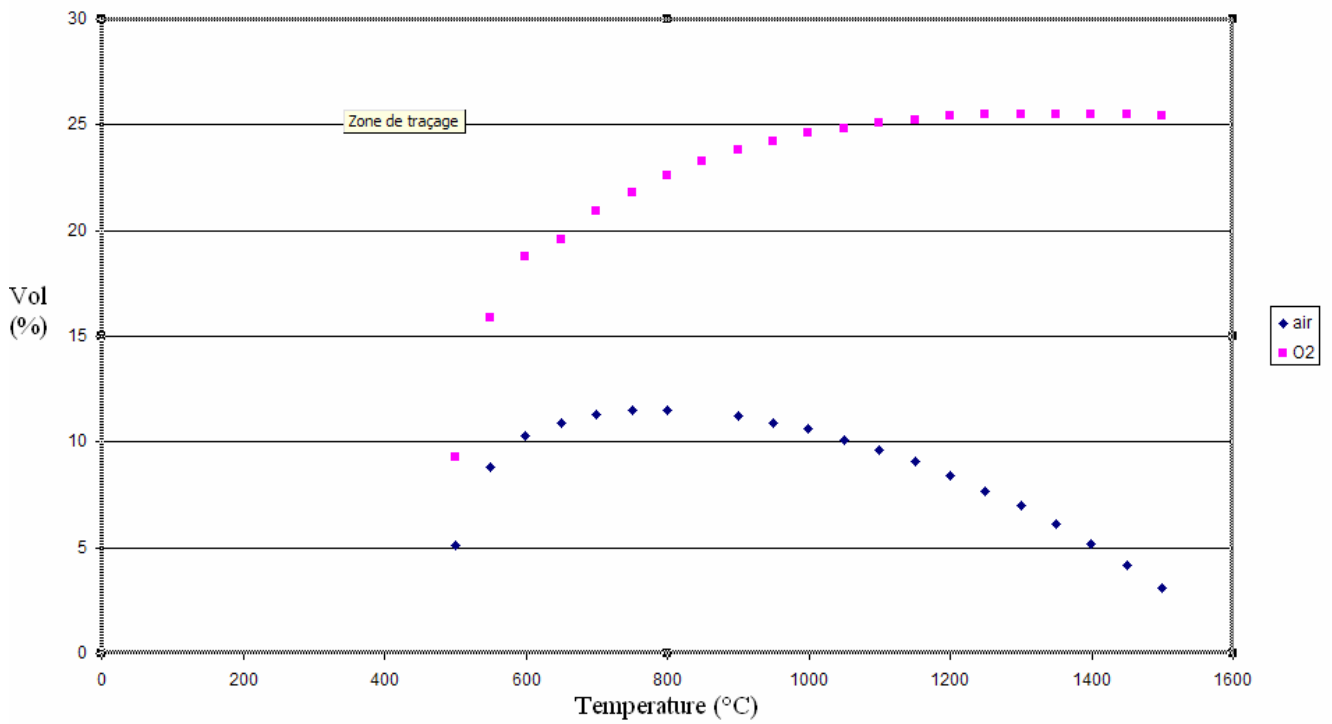


C'est donc également un bon point pour le procédé à l'oxygène.

Par ailleurs, nous venons d'effectuer une comparaison quantitative grâce à la masse, voyons ce que cela nous donne en % du volume :

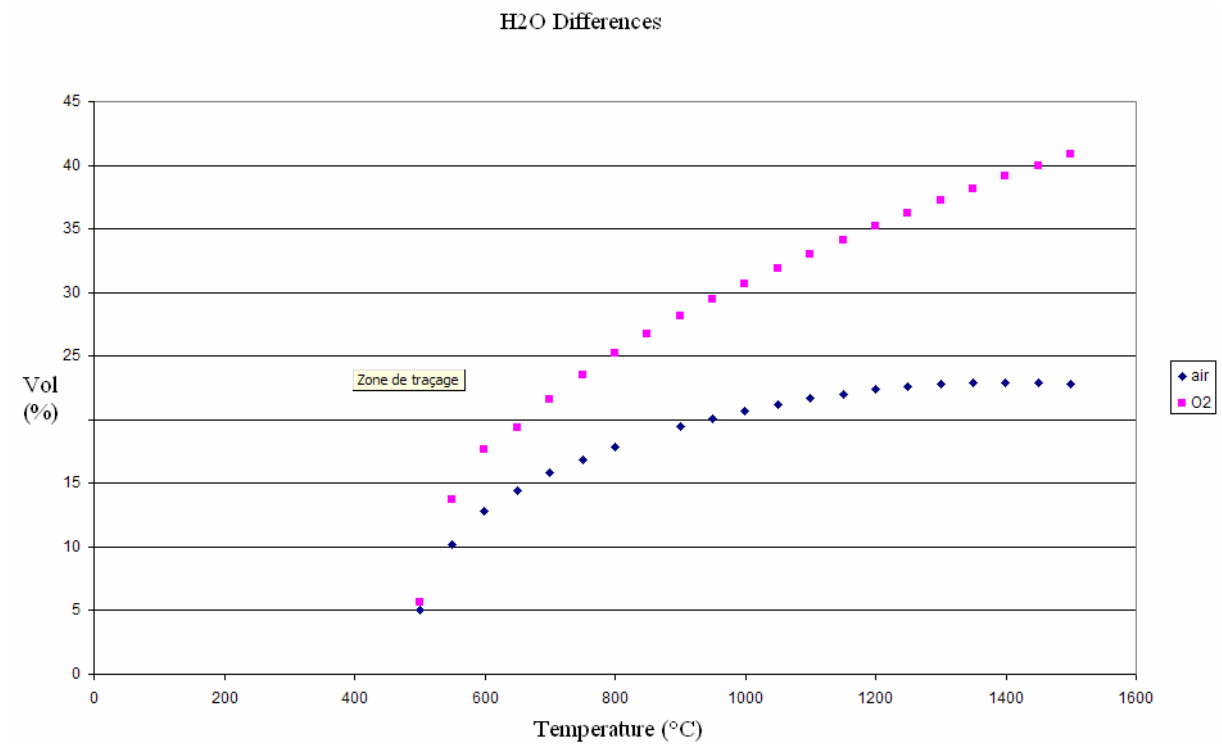


CO Differences



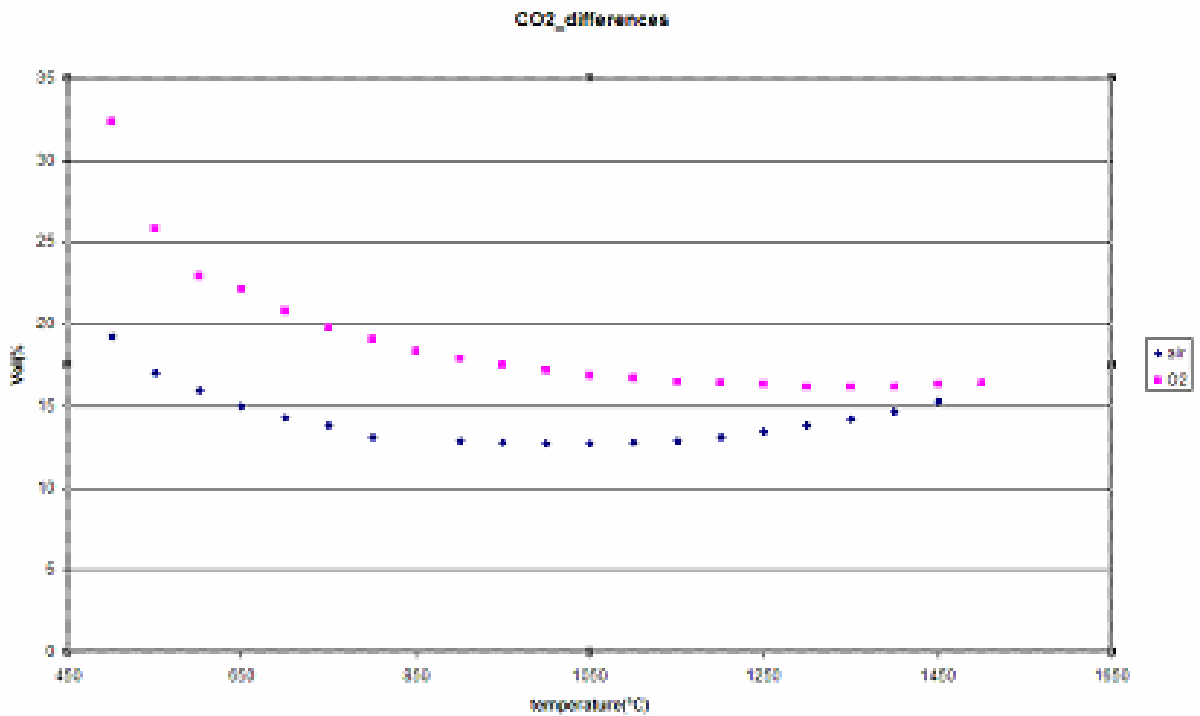
Les produits combustibles de la réaction sont bien plus présents lors de la gazéification à l'oxygène. En outre on remarque que le CO ne fait qu'augmenter, la différence au niveau du H₂ n'est pas flagrante.

Intéressons nous maintenant aux produits qui baissent le *LCV* :



Dans la gazéification à oxygène, on met en évidence une augmentation constante et significative de la concentration massique de H₂O. Cela dépend de l'augmentation de la rapidité de formation de l'eau qui résulte de l'augmentation de la concentration d'oxygène.

Cette réaction, qui consomme de l'hydrogène, justifie également la non augmentation H₂ escompté du fait de la water shift reaction.. Il serait très intéressant d'étudier ce phénomène (c'est à dire l'augmentation de la concentration de H₂O), qui est énergétiquement négatif pour le syngas produit, en fonction de la pression dans le gazéificateur. Cependant le logiciel EES est limité à travailler à pression atmosphérique.



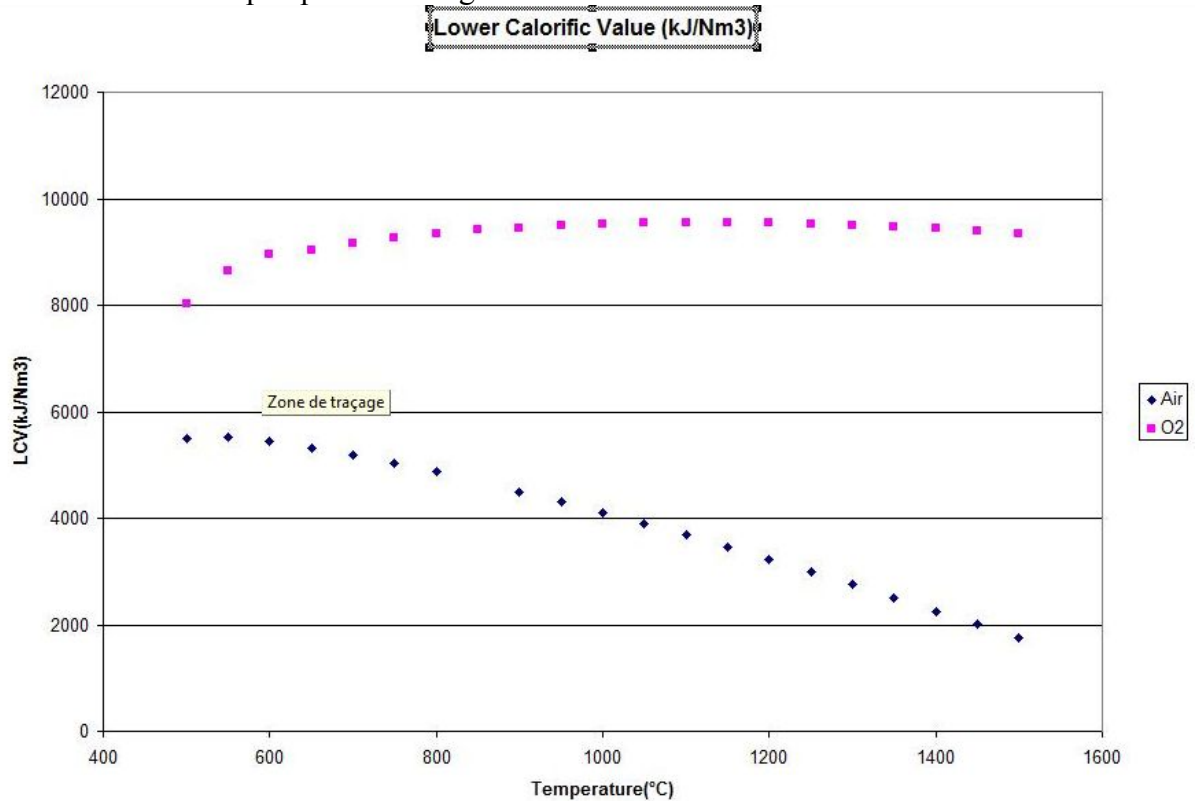
Il est intéressant à noter, en comparaison de la gazéification à l'air, que la masse de CO₂ augmente avec la gazéification à oxygène, contrairement à ce que laisse croire le graphique en volume. En tous cas, l'usage de O₂ ne peut que favoriser (à travers de la loi d'action de masse) les réactions d'oxydation, et donc la production de CO₂. Ici de nouveau il serait très intéressant d'étudier la variation de la production de CO₂ en fonction de la pression de gazéification.

Observations :

Globalement tous les composants sont contenus en plus grande concentration lorsqu'il s'agit de la gazéification à l'oxygène. Ce qui est à priori normal car il n'y a pas d'azote injecté et donc un volume global moindre (voir graphique ci-dessous)

Nous notons que le CO et le CO₂ convergent vers la valeur 2,25 (sur le graphique précédent « difference between air and oxygen gasification ») et qu'ils atteignent cette valeur environ vers 1150°C : si le programme est cohérent nous devrions donc observer un pic d'énergie aux alentours de cette valeur.

Intéressons nous un peu plus à l'énergie obtenue :



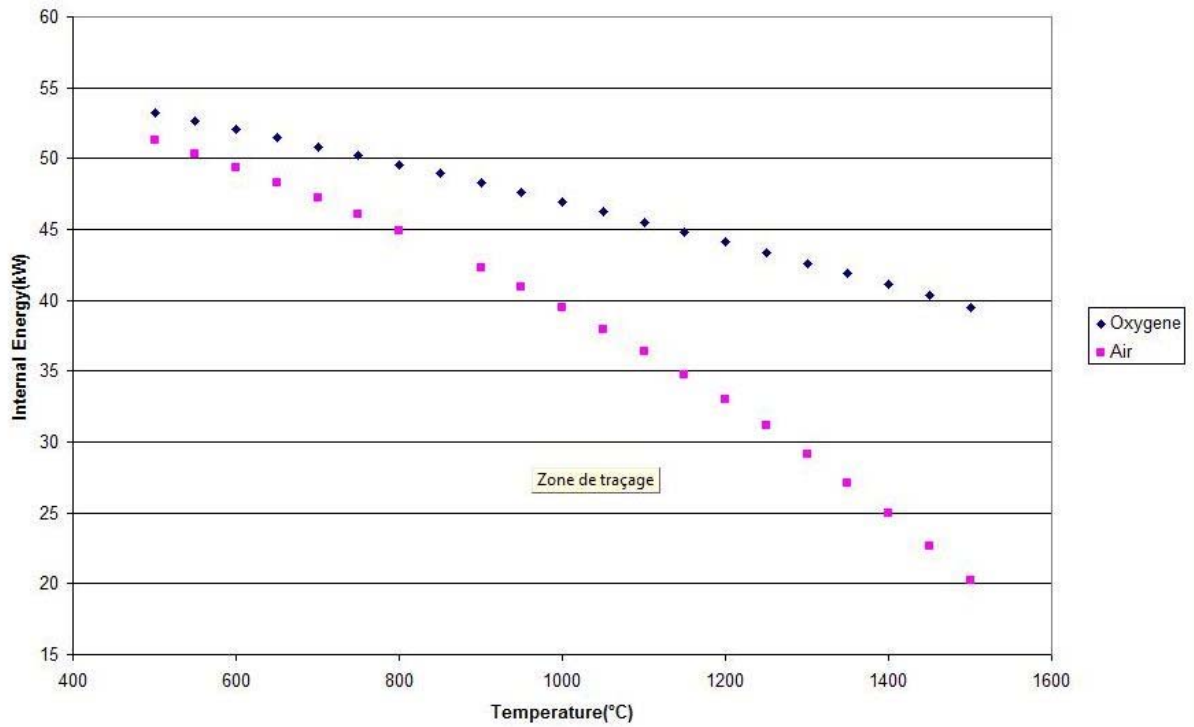
Observations :

- L'énergie récoltée avec ce procédé est plus importante: la courbe rose est constamment au dessus de la bleue
- Par ailleurs si la courbe bleue présente actuellement un pic pour 550°C nous ne pouvons nous y fier car nous ne sommes pas encore assez éloignés de la zone de pyrolyse. Par contre, la courbe rose présente bel et bien un pic là où nous nous y attendions : environ vers 1150°C, cela confirme nos attentes d'autant plus que nous sommes en pleine zone de gazéification à cette température. Nous avons réussi à obtenir ce que nous pensions avoir au début.

Bien que nous obtenons le pic avec le PCI du gaz et non pas avec son énergie en kW.

Quant à l'énergie totale contenue dans le gaz, voilà ce que nous obtenons :

Effects of oxygen gasification

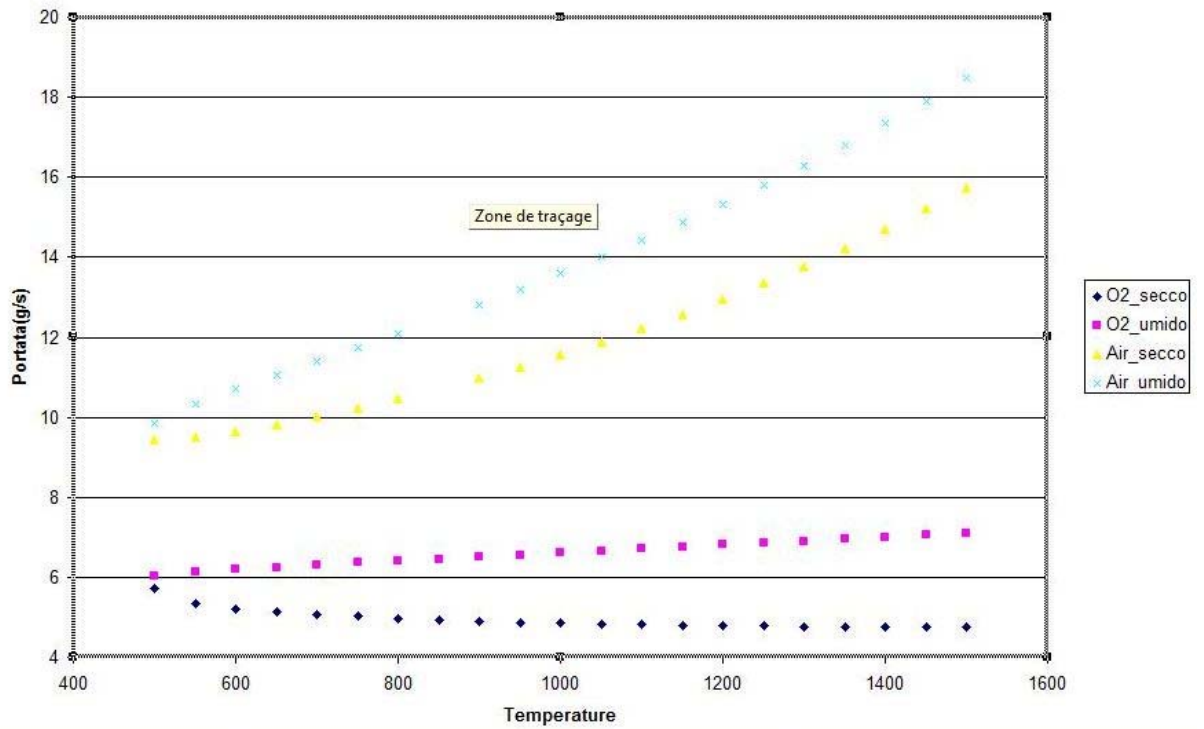


Observations :

Nous sommes incapables d'observer un point d'exploitation optimal pour ce graphique, l'énergie totale décroît constamment, bien sure, pour un débit constant de bois.

Par ailleurs la courbe du LCV présentée au dessus présente un maximum vers 1150°C, la décroissance de la puissance doit venir du débit de syngas :

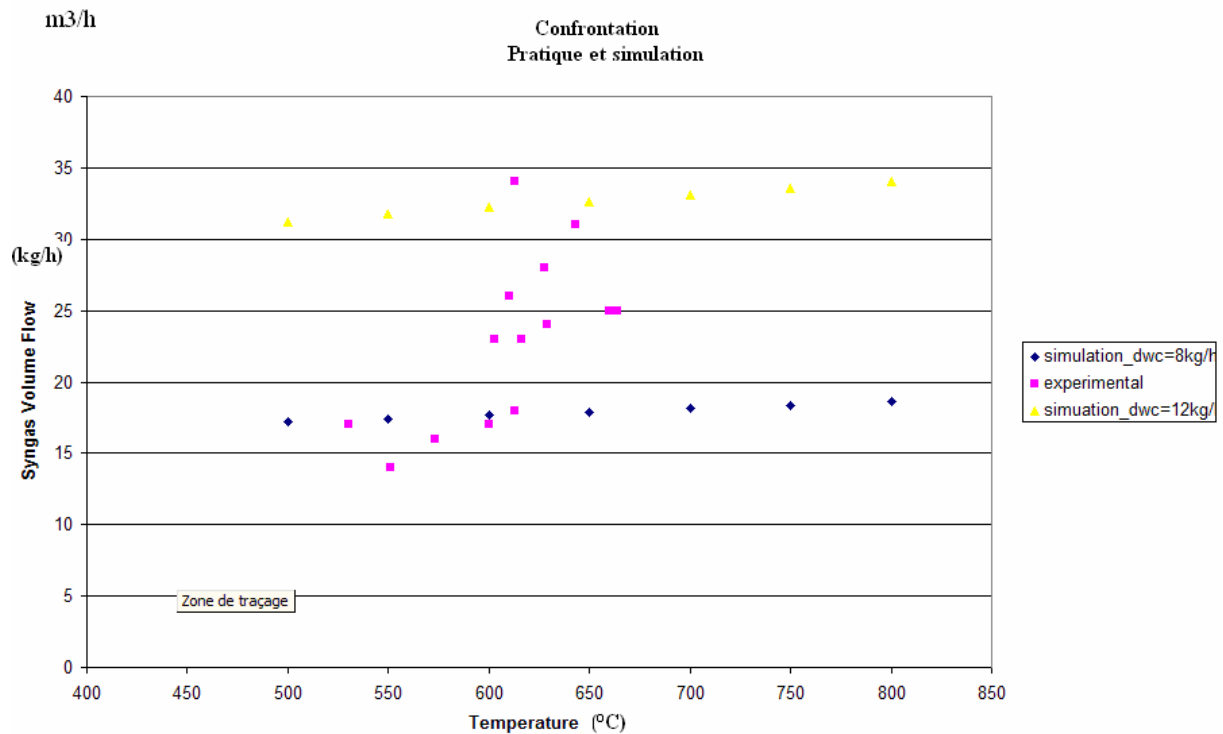
Evoluzione della Portata



Au sujet de la gazéification à l'air, malgré une forte croissance du débit de syngas cela n'est pas suffisant pour contrebalancer la chute du PCI de celui-ci. Par contre, avec une gazéification à l'oxygène, le débit diminue un peu et le PCI varie peu ce qui explique la décroissance de la puissance.

5. Comparaison des résultats et de la théorie

Nous nous sommes basés sur les relevés que nous avons fait durant les trois mois de stage. Les paramètres que nous avons facilement mesuré sont le débit de gaz e la température de gazéification. Sur le graphique ci-dessous nous pouvons voir comment le programme encadre les résultats théoriques :



Points en jaune : Simulation pour un débit de bois théorique de 12 kg/h

Points en bleu : Simulation pour un débit de bois théorique de 8 kg/h

Points en rose : Courbe réelle obtenue par expérimentation dans le laboratoire DIMSET/SCL

Observations :

Les points réels se déplacent effectivement entre les deux débits théoriques. Les prévisions d'EES sont donc à peu près bonnes. Nous constatons aussi que le débit de bois réel est près de celui annoncé par le constructeur :

Gasifier Model	WBG-15
Gas Flow Rate	37.5 Nm ³ /hr
Thermal Output	39,000 kCal/hr
Biomass Consumption	12-15 Kg/hr

Nous voyons bien sur le graphique précédent qu'EES n'est pas capable de localiser le comportement d'un gazéificateur particulier, tout simplement parce qu'il ne prend pas en compte ses dimensions. Tout ce que nous pouvons faire (et que nous avons fait), c'est une analyse paramétrique.

Nous sommes tout de même rassurés de voir que le logiciel prévoit une raisonnable évolution du débit. Malheureusement nous n'avons pas pu effectuer des mesures du PCI du singaz ce qui nous aurait permis de mieux savoir où nous sommes sur nos courbes théoriques.

6. Résumé- Conclusion

- ✓ Concernant la gazéification simple : Nous avons pu mettre en évidence que la zone la plus énergétique pour le singaz se trouve aux températures les plus basses. Cependant, faible température est synonyme de pyrolyse. La pyrolyse étant un procédé producteur de polluants lourds nous ne recommandons pas une utilisation à basse température. L'équipe du laboratoire DIMSET/SCL a déjà réalisé par le passé une caractérisation de la qualité et de la composition des gaz de synthèse produit par le gazéificateur, objet du présent rapport, comme le montre la référence [1]:
Cette référence souligne que le nettoyage des gaz de synthèse augmente précisément avec la température de gazéification, notamment avec l'augmentation du débit d'air et le dépassement progressive de la zone de pyrolyse.
- ✓ Lorsque nous nous sommes penchés sur la gazéification avec injection de vapeur, nous pouvions déjà sentir que rajouter de l'eau ne peut pas être une bonne chose pour gazéifier du bois. Malgré tout ce processus peut intéresser les acteurs de la gazéification du charbon.
- ✓ Par ailleurs cela nous a donné l'occasion de nous pencher sur un système de préchauffage dont nous préconisons l'utilisation lors de la gazéification de biomasse.
- ✓ La dernière phase de notre recherche consiste à évaluer la gazéification à l'oxygène. Cette dernière présente les meilleures caractéristiques : meilleure composition chimique alliée à un point de fonctionnement optimal à 1150°C (c'est-à-dire bien éloigné de la zone de pyrolyse). Le seul défaut de la gazéification à l'oxygène est de demander un apport en O₂ important. Il serait très intéressant de l'obtenir avec l'utilisation de l'énergie solaire.
- ✓ Pour la suite nous recommandons vivement de parler en masse ou en quantité de matières plutôt qu'en %.

VI. Le gazéificateur d'un point de vue économique

1. Evaluation d'un investissement

Nous allons aborder 4 concepts qui nous permettront d'analyser l'investissement fait sur le gazéificateur. Ce sera en comparant les résultats obtenus par ces diverses méthodes que l'on sera en mesure d'évaluer au mieux le risque encouru par notre investissement.

a. Pay-Back-Period

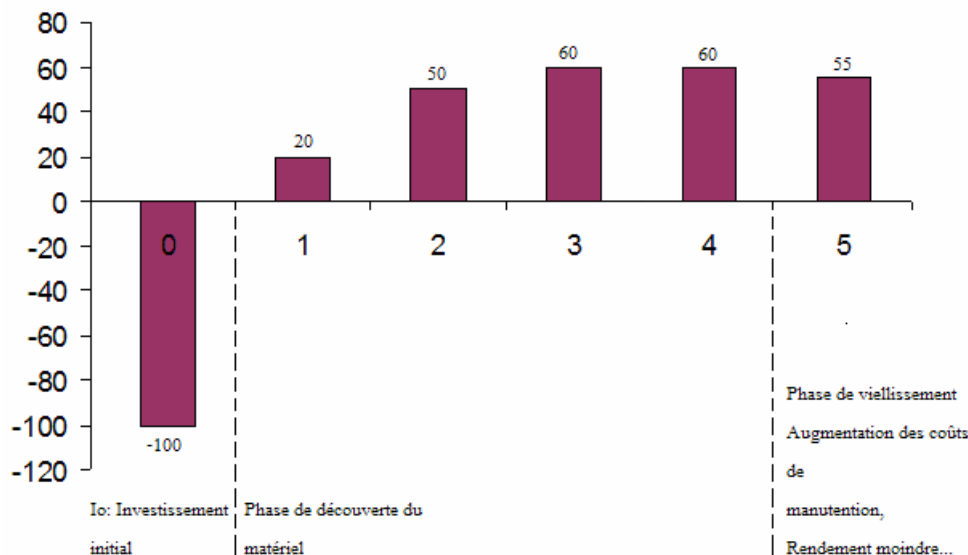
Comme dans toute installation industrielle, le gazéificateur possède un coût d'investissement qui sera amorti au bout d'une certaine période de fonctionnement. Nous appellerons la période au bout de laquelle l'installation a couvert la dépense initiale *le retour sur l'investissement* ou la '*pay-back-period*'.

Soient I_0 le capital investit à $t=t_0$ (instant initial : moment où l'investissement à lieu)
 U_i le profit représentatif de l'année i .

Alors, la Pay-Back-Period sera:

$$PbP = I_0 / U_i$$

Exemple:



En regardant les revenus U_i on atteindra l'investissement initial de 100 de la façon suivante : $20+50+60/2=100$ ce qui correspond en terme d'année à $1+1+0.5= 2$ ans et demi \Leftrightarrow 30 mois.

Dans notre exemple le retour sur l'investissement est de 2 ans et demi.

Toutefois, les profits U_i évoluent dans le temps, nous pouvons donc considérer le PbP comme un modèle de première approximation.

Il convient de dire que l'estimation que nous avons faite est sujette à des changements (inflation, variation du prix du carburant...). Il serait alors opportun de faire une analyse de la situation économique en prenant en compte ces fluctuations.

b. L'actualisation

Nous devons prendre en compte une notion importante : une même somme d'argent n'a pas la même 'valeur' selon l'époque. Par exemple, si on place 1000 € à la banque à l'année 2008, 5 ans plus tard cette valeur aura changé du fait des taux d'intérêt, de l'inflation etc... les 1000€ seront devenus 1276€ (pour un taux d'intérêt de 5%).

C'est pourquoi 1000€ euros en 2013 et 1000€ en 2008 n'ont pas la même 'valeur' : avoir 1276€ en 2013 sera dans ce cas équivalent à avoir 1000€ en 2008.

Pour calculer ce que l'on peut appeler l'actualisation du capital nous appliquons la formule suivante :

$$V_0 = C_n / (1+i)^n$$

Avec : - C_n le capital à l'année n

- i taux d'intérêt, taux d'inflation...

- V_0 le capital à l'année n rapporté à la valeur qu'il aurait actuellement

Exemple:

Combien un capital de 1000€ en 2013 vaut lorsqu'il est rapporté à l'année 2008 ?

Considérons V_0 le capital de 1000€ en 2013 rapporté à sa valeur en 2008 et le taux d'intérêt de la banque de 5 % on a :

$$\Leftrightarrow \begin{aligned} V_0 &= 1000 / (1+0.05)^5 \\ \underline{V_0} &= \underline{783\text{€}} \end{aligned}$$

Il est donc équivalent d'avoir 1000€ en banque en 2013 et avoir 783€ en banque en 2008.

c. Net Present Value : NPV

La NPV (la valeur net actuelle) donne une idée du profit que l'on peut réaliser pour une installation donnée.

La valeur nette actuelle se calcul comme suit :

$$NPV = \sum_{i=1}^n U'_i - I_0 + VAR'$$

Avec $U' = U_{\text{actualisé}} = \text{Profit 'actualisé'}$

$I_0 = \text{Investissement initial}$

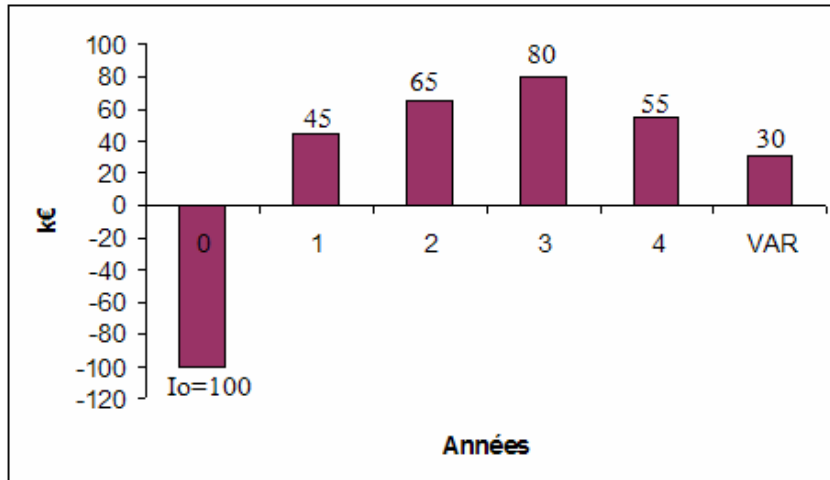
$VAR = \text{Valeur de récupération de l'installation}$

$VAR' = VAR_{\text{actualisé}}$

Exemple: Pour chaque profil d'investissement calculons le NPV.

Considérons les investissements et les profits comme suit :

Investissement n°1 :

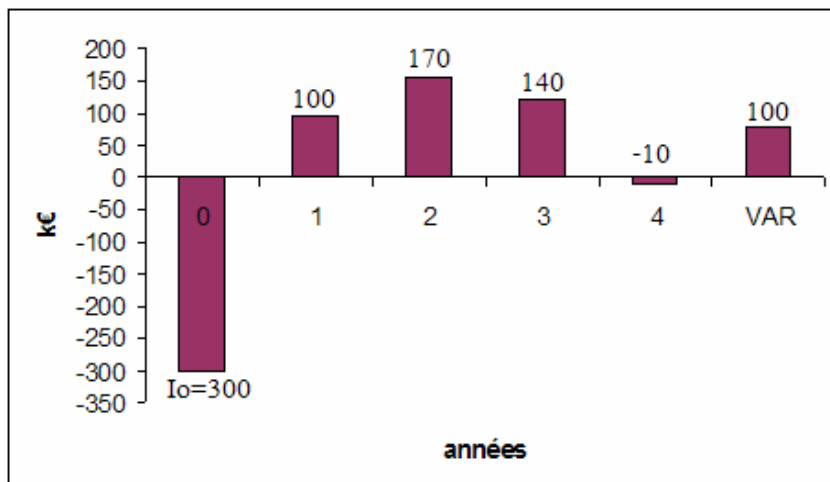


$$NPV_1 = \frac{45}{(1+0.05)^1} + \frac{65}{(1+0.05)^2} + \frac{80}{(1+0.05)^3} + \frac{55}{(1+0.05)^4} + -100 + \frac{30}{(1+0.05)^5}$$

$$\Rightarrow NPV_1 = 140k€$$

Avec cette exploitation c'est comme si, en partant de rien, on avait créé dans les 5 ans 140k€ actualisés.

Investissement n°2 :



$$NPV_2 = \frac{100}{(1+0.05)^1} + \frac{170}{(1+0.05)^2} + \frac{140}{(1+0.05)^3} - \frac{10}{(1+0.05)^4} + -100 + \frac{100}{(1+0.05)^5}$$

$$\Rightarrow NPV_2 = 140k€$$

On remarque qu'avec un investissement différent on peut obtenir le même NPV.

Pour confronter les deux investissements on effectue alors le rapport suivant : $\frac{NPV}{I_0}$.

Ce rapport est un rapport de rentabilité actualisé il donne une idée de la rentabilité de l'investissement.

L'investissement 1 donne : $I_0 = 100\text{k€}$ et $NPV = 140\text{k€} \Rightarrow NPV / I_0 = 140\%$

L'investissement 2 donne : $I_0 = 300\text{k€}$ et $NPV = 140\text{k€} \Rightarrow NPV / I_0 = 46\%$

Grâce au rapport NPV / I_0 on peut constater que l'investissement 1 est le plus rentable car pour une mise de départ moindre le profit net est le même.

d. Internal Rate of Return : IRR

L'IRR est donnée par une équation qui annule la NPV :

$$IRR = \sum_{k=1}^n \frac{U_k}{(1+i)^k} - I_0 = 0$$

La grandeur i est l'inconnue.

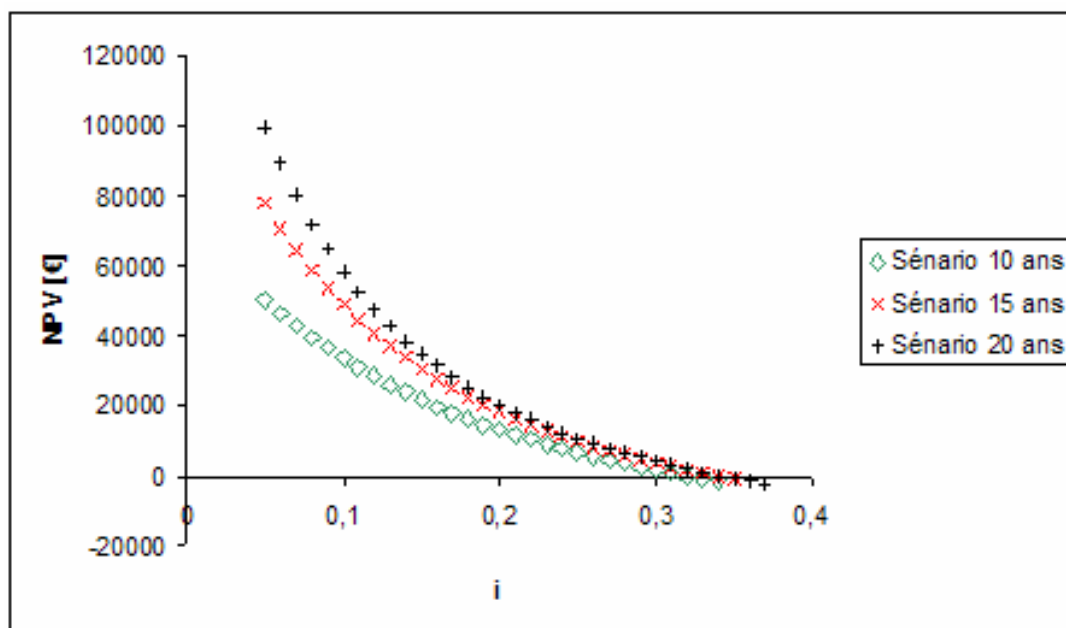
Pour chaque valeur de i on calcule la NPV c'est-à-dire $\sum_{k=1}^n \frac{U_k}{(1+i)^k} - I_0$.

On trace ensuite la NPV en fonction de i , la courbe ainsi obtenue coupe l'axe des abscisses à la valeur de l'IRR.

Dans l'exemple qui suit nous avons tracé trois courbes donnant l'IRR du gazéificateur fonctionnant avec 70% de bois et 30% de charbon pour trois hypothèses :

- La durée d'exploitation du gazéificateur est de 10 ans
- La durée d'exploitation du gazéificateur est de 15 ans
- La durée d'exploitation du gazéificateur est de 20 ans

Exemple:



Pour les scénarios suivant on obtient donc :

- Pour 10 ans d'exploitation $32\% < IRR < 33\%$
- Pour 10 ans d'exploitation $33\% < IRR < 34\%$
- Pour 20 ans d'exploitation $34\% < IRR < 35\%$

Remarque : Plus l'IRR est faible plus le risque que comporte l'investissement est élevé.

e. Avantage et inconvénient de chaque méthode

Chacun des critères développés précédemment possède des avantages ainsi que des inconvénients résumés dans le tableau suivant :

Méthode	Avantage	Inconvénient
PBP	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité de calcul • Interprétation immédiate 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne prend pas compte de la notion d'actualisation • Ne tient pas compte de la durée d'exploitation • Peut présenter des difficultés pour l'individualisation de l'année représentative
NPV	<ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte de l'actualisation de la monnaie • Tient compte de la vie de l'installation et des variations de profits 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne donne pas d'idée sur la somme investie • La même valeur de NPV peut être obtenue avec des investissements différents, on ne peut pas confronter ce chiffre seul entre deux investissements différents.
IRR	<ul style="list-style-type: none"> • Tient compte de l'actualisation et de la durée de vie de l'exploitation • Peut être utilisé pour confronter deux investissements différents • Indique le degré de sécurité d'un projet 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut Masquer le projet le plus avantageux dans le cas d'une évolution non parallèle des valeurs actualisées lors d'une comparaison de différents projets.

Toutefois dans les différents critères développés précédemment le problème est simplifié afin d'avoir une idée de la période de retour sur l'investissement de façon relativement bonne et 'rapide'.

En effet, si l'on considère la fluctuation des cours du bois, du charbon et de la manutention le modèle se complique. On peut alors utiliser d'autres méthodes qui permettent de contenir la période de retour sur l'investissement dans une marge qui donnera alors à l'investisseur une idée du risque encouru par son placement.

2. Application au gazéificateur

Les données techniques correspondant à l'exploitation du gazéificateur qui sont fournies ci-dessous vont nous permettre d'évaluer les quatre critères précédant pour différents scénarios d'exploitation (10ans, 15 ans ou 20ans) et deux hypothèses de fonctionnement : 100% bois ou 70%bois et 30%charbon

Coûts fixe		Coûts variables	
Implantation	25000€	Biomasse	4.8€/q
Modification	5500€	Charbon	23.2€/q
Manutention	900€ par an	Rejet de cendres	7.4€/q

Recettes	
Prix du kW électrique	0.3€ les 15 premières années
	0.08€ au bout de 15 ans d'exploitation
Prix du kW thermique	0.07€

Consommation 100% bois		Consommation 70% bois et 30% charbon	
Consommation de biomasse	13kg/h	Consommation de biomasse	6.16kg/h
Production de cendres	1.1kg/h	Consommation de charbon	2.64kg/h
Puissance électrique	7kW	Production de cendres	1.3kW
Puissance thermique	14 kW	Puissance électrique	9.4kW
		Puissance thermique	18kW

Le tableau ci après récapitule la période de retour sur l'investissement, la valeur net actuelle NPV et l'IRR pour différentes utilisations du gazéificateur. Il confronte les résultats obtenus pour différentes hypothèses d'exploitation et différents prix de vente de l'énergie électrique.

La première colonne du tableau tient compte d'une aide versée par le gouvernement Italien durant les 15 premières années d'exploitation du gazéificateur. Cette aide est appelée le « certificat vert », elle est donnée pour une machine fournissant de l'électricité grâce aux énergies renouvelable. La seconde colonne ne tient pas compte de cette aide.

Chacune des deux parties présentent 3 scénarios différents : 10ans, 15ans ou 20ans d'exploitation du gazéificateur et dans chaque scénario deux types de situations sont étudiés : fonctionnement du gazéificateur avec 100% de bois ou 70% de bois et 30% de charbon.

Avec le contrat vert les 15 premières années			Sans le certificat vert		
SCENARIO: 10 ans			SCENARIO: 10 ans		
	Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon		Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon
PBP	1,94	1,22	PBP	6,17	2,92
NPV	90 897,66 €	161 896,23 €	NPV	7 657,36 €	50 116,40 €
IRR	50-51%	52-53%	IRR	9-10%	32-33%
RRA	2,98	5,31	RRA	0,25	1,64
SCENARIO: 15 ans			SCENARIO: 15 ans		
	Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon		Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon
PBP	1,94	1,22	PBP	6,17	2,92
NPV	132 683,56 €	228 120,78 €	NPV	31 080,74 €	99 605,94 €
IRR	51-52%	53-54%	IRR	15-16%	34-35%
RRA	4,35	7,48	RRA	1,02	3,27
SCENARIO: 20 ans			SCENARIO: 20 ans		
	Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon		Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon
PBP	1,94	1,22	PBP	6,17	2,92
NPV	142 973,45 €	249 861,87 €	NPV	20 790,85 €	77 864,85 €
IRR	51-52%	53-54%	IRR	13-14%	33-34%
RRA	4,69	8,19	RRA	0,68	2,55

Il faut préciser que dans l'analyse qui a été effectuée les coûts fixes considérés sont ceux concernant le travail de manutention. Des changements pourraient intervenir sur les résultats obtenus si l'on doit payer un 'loyer' pour le gazéificateur, par exemple.

Il ressort de l'analyse économique que le fonctionnement de l'installation avec un mélange de bois et de charbon donne de meilleurs résultats, et cela indépendamment de la durée de vie du gazéificateur.

3. Estimation de la durée minimale d'exploitation du gazéificateur

La durée minimale d'exploitation du gazéificateur afin de dégager un profit est le moment pour lequel les recettes sont égales aux dépenses : c'est-à-dire quand les profits réalisés sont nuls. Nous appellerons ce 'point' le Break Even Point (BEP) ou seuil de rentabilité. Cette notion sert notamment à définir le nombre d'heures minimum de fonctionnement d'une industrie pour qu'elle soit rentable.

a. Break Even Point: BEP

Soient :

- r : les recettes prévues durant une année d'utilisation de l'installation industrielle.
- f : les coûts fixes (investissements initiaux, assurance, contrat de manutention, main d'œuvre...)
- c : les coûts variables (variation du prix du carburant, de la biomasse...)

Par définition, lorsque l'on se trouve au break even point on a :

$$R=C \Leftrightarrow \text{Recettes}=\text{dépenses}$$

Afin de situer le break even point, en première approximation, nous allons supposer que les recettes et les coûts varient de façon linéaire et que les coûts fixes sont indépendants des coûts de production.

Il vient alors $R = r \cdot x$ et $C=f+c \cdot x$

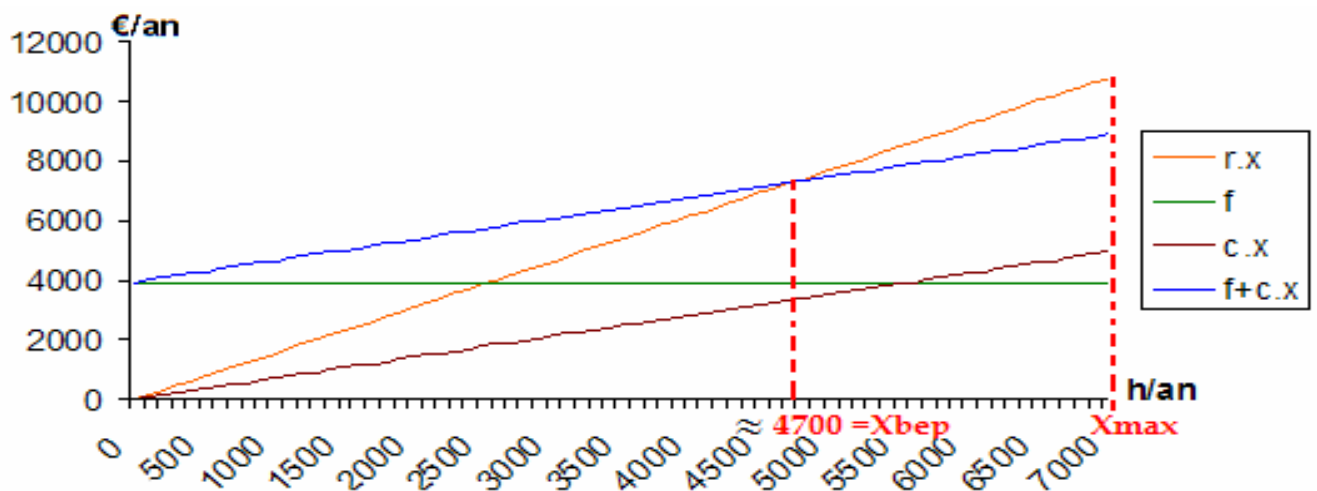
Le break even point sera la valeur de x qui vérifiera l'équation suivante :

$$R = C \Leftrightarrow r \cdot x = f + c \cdot x$$

Par conséquent
$$X_{BEP} = \frac{f}{r - c}$$

Si une entreprise travaille en dessous de X_{BEP} elle perd de l'argent alors que si l'entreprise travail au dessus de celui-ci, elle en gagne.

Nous traçons ci après un graphique explicatif représentant le Break Even Point dans le cas où le gazéificateur est alimenté seulement par du bois et dans l'hypothèse où le certificat vert n'est pas accordé.



avec X_{MAX} = durée de fonctionnement maximum de l'installation

Au plus X_{BEP} se rapproche de X_{MAX} au plus l'installation industrielle est risquée car elle devra fonctionner à régime élevé, proche du régime maximum, pour réaliser un profit.

De plus, si l'exploitation rencontre un problème technique elle pourra moins se permettre de cesser son activité qu'une entreprise fonctionnant avec un break even point moindre, plus loin de la valeur X_{MAX} .

b. Application au gazéificateur

- 1) Calcul du Break Even Point pour un approvisionnement avec 100% de bois et sans le certificat vert.

Dans cette partie les calculs seront effectués avec les caractéristiques techniques du gazéificateur (données dans la partie B. Application au gazéificateur)

- Calcul des coûts fixes

L'investissement initial est de 25000€, du à l'achat du gazéificateur. A cette somme il faut ajouter 5500€ pour diverses modifications. L'investissement initial est donc de 30500€, la répartition de cette somme pour dix ans d'exploitation donne 3050€ par an. Pour calculer les coûts fixes il faut aussi prendre en compte le contrat de manutention de 900€ par an. Au final, les coûts fixes sont de 3950€ par an.

- Calcul de r

Les recettes qui seront offertes par l'installation industrielle seront celles fournies d'une part par la vente de l'énergie électrique et d'autre part par la vente de l'énergie thermique. L'hypothèse de fonctionnement du gazéificateur alimenté par 100% de bois est la suivante : produire 7kWh d'énergie électrique et 14kWh d'énergie thermique ce qui donne la recette r suivante :

$$r = 0.08 * 7 + 0.07 * 14 = 3.08€ \text{ pour chaque heure de fonctionnement}$$

- Calcul de c

Les coûts variables pour une alimentation avec uniquement du bois sont ceux du coût du bois [4.8€/q] et du coût de l'évacuation des cendres [7.4€/q]. Il vient alors :

$$c = \frac{4.8}{100} * 13 + \frac{7.4}{100} * 1.1 = 0.7€$$

- Calcul analytique du break even point

$$X_{BEP} = \frac{f}{r - c} \Rightarrow X_{BEP} = \frac{3950}{3.08 - 0.7}$$

$$\Rightarrow \underline{X_{BEP}=4732h}$$

Ce résultat est fonction des données techniques de l'exploitation.

Dans un cas similaire où l'énergie thermique ne pourra être vendue le break even point changera : il faudra alors plus d'heures de fonctionnement pour dégager du profit.

2) Comparaison du break even point pour différentes hypothèses de fonctionnement

Après applications numériques les résultats obtenus pour le break even point sont exposés dans le tableau qui suit :

Avec le certificat vert les 15 premières années			Sans le certificat vert		
SCENARIO: 10 ans			SCENARIO: 10 ans		
	Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon		Hypothèse : 100% bois	Hypothèse : 70% bois et 30% charbon
10 ans	1663 h	1284 h	10 ans	4733 h	3920 h
15 ans	1235 h	954 h	15 ans	3515 h	2911 h
20 ans	1021h les 15 premières années	2906h à partir de la 16ème année	20 ans	2906 h	2407 h

- Le premier résultat qui apparaît est que la durée minimum d'exploitation pour du gazéificateur réduit lorsque sa durée d'utilisation s'accroît de 10 ans jusqu'à 20 ans et ceci indépendamment de l'alimentation de l'appareil (bois ou mélange bois charbon). Ce résultat est dû au fait que les coûts fixes réduisent avec le nombre d'années.

Par conséquent, un usage du gazéificateur pour une durée de 20 ans semble préconisé pour garantir une marge de sécurité financière. Il faut toutefois prendre en compte les divers problèmes techniques qui pourraient survenir au fur et à mesure des années. Cette actualisation de la prévision financière peut être effectuée dans une analyse ultérieure, après quelques années de fonctionnement par exemple.

- En observant les résultats exposés dans le tableau pour une exploitation fonctionnant 10 ans, nous remarquons qu'une installation possédant le certificat vert nécessite environ 3 fois moins d'heures d'activité qu'une gazéificateur n'ayant pas droit à cet avantage. L'atout qu'offre le certificat vert se répercute donc non seulement sur la rentabilité de l'installation industrielle mais aussi sur le nombre d'heures de fonctionnement minimum pour dégager du profit. En effet X_{BEP} est 4 à 5 fois inférieur à X_{MAX} , estimé à 7000h/an alors que sans certificat vert, X_{BEP} sera alors de 1.5 fois à 1.8 fois plus faible que X_{MAX} et bien que l'énergie électrique soit rémunérée plus faiblement, la marge de fonctionnement demeure très acceptable.

Nous pouvons ajouter, que tout comme dans l'analyse précédente, avec le NPV et l'IRR, l'hypothèse apportant les meilleurs bénéfices est celle où l'énergie électrique est rétribuée avec le certificat vert

Le gazéificateur possède donc une marge correcte qui pourra permettre de faire face à d'éventuels problèmes techniques sans pour autant créer un déficit dans le profit de l'entreprise.

Il est à noter que le fonctionnement qui paraît optimiser le break even point ainsi que les divers critères que nous avons pu voir précédemment est :

- un approvisionnement avec de la biomasse composée à 70% de bois et 30% de charbon
- une rémunération de l'électricité suivant le contrat vert

VII. Annexes

Point Méthode : Faire des relevés complets

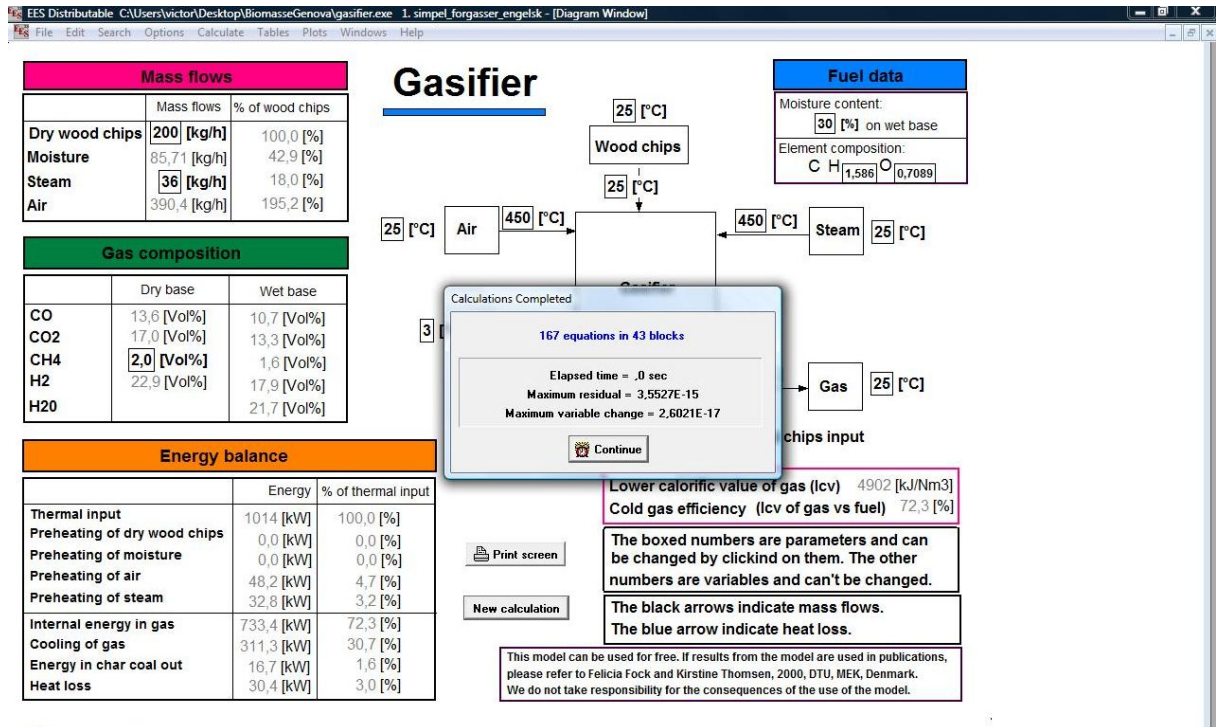
Nous espérons que ce rapport servira à de futurs stagiaires, c'est pourquoi nous faisons ce point méthode. Le but final étant d'avoir des relevés complets et réalisés de manière intelligente.

Vous trouverez en annexe une feuille Open Office Calc nommée « feuille de traitement » qui doit ressembler à ceci :

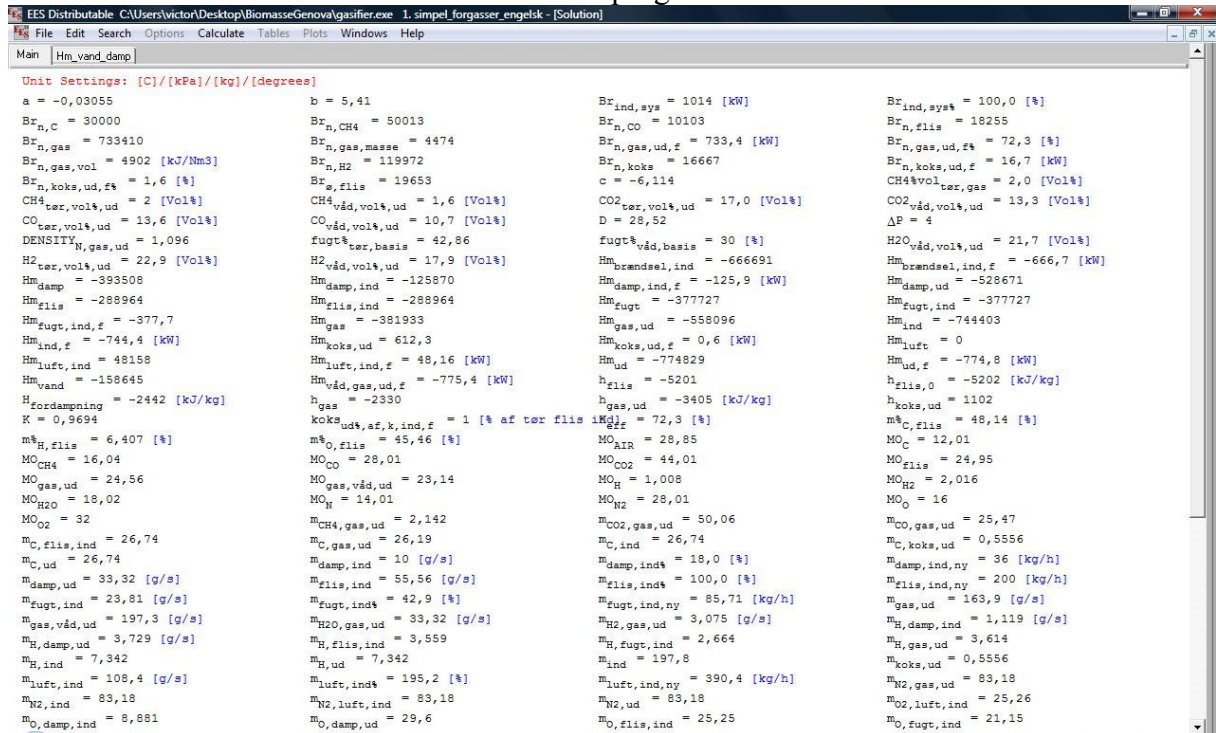
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1																		
2																		
3																		
4	Thermal input(kW)																	
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12	Internal enrgy in gas(kW)																	
13	Internal enrgy in gas(%)																	
14	lcv(kJ/Nm³)																	
15																		
16																		
17	Energry in char coal out(kW)																	
18	Energry in char coal out(%)																	
19																		
20																		
21	CH4%																	
22																		
23	CH4% Wet base																	
24	CO2%																	
25	CO2% Wet base																	
26	CO%																	
27	CO% Wet base																	
28																		
29																		
30	DENSITY																	
31																		
32	Moisture																	
33	H2O% Wet base																	

Où nous avons essayé de répertorié les différentes sorties du logiciel, en effet sous EES vous pouvez lancer votre simulation en appuyant sur la touche F2 il apparaît ceci à

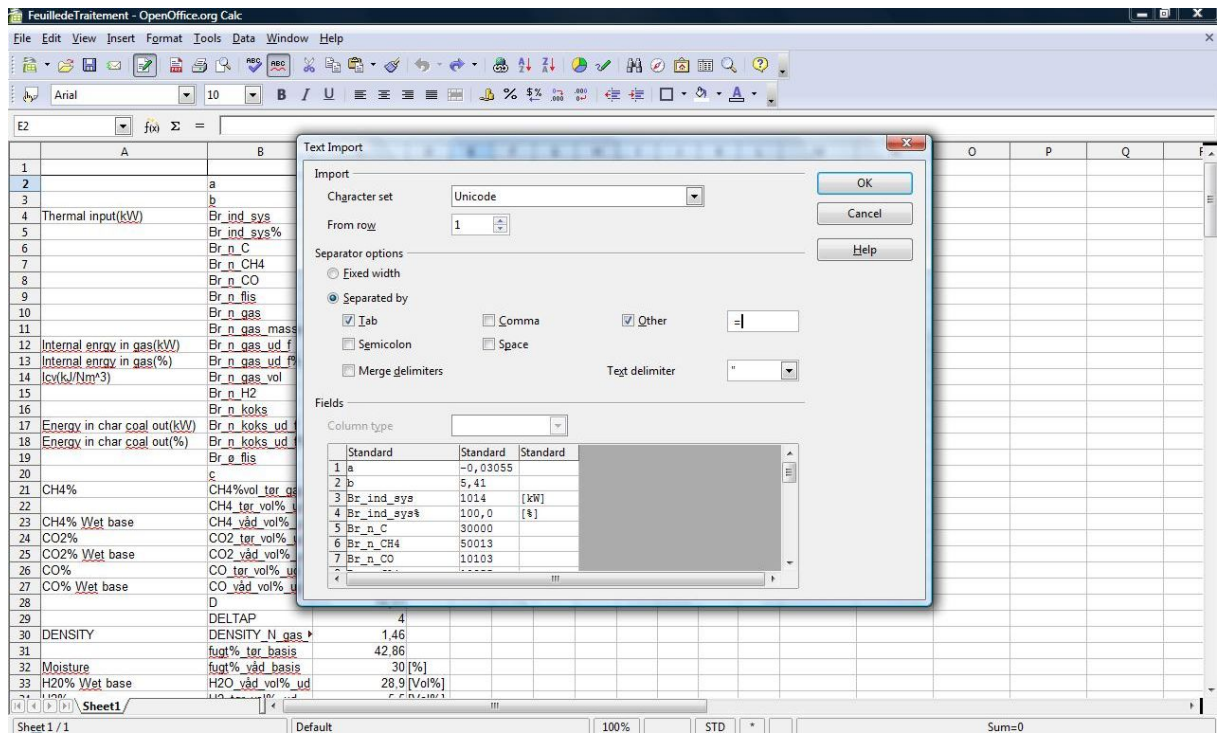
l'écran :



Lorsque vous voyez la petite fenêtre au centre de l'écran, appuyez sur 'Ctrl+u'.
Vous aurez alors accès à toutes les données du programme :



Faites un copier-coller de ces variables dans la feuille open office et le tour est joué !
L'avantage d'utiliser un feuille open office est que lorsque l'on colle nos données, voilà ce qu'il nous propose :



Mettez « = » (attention à bien mettre un espace avant le =) et vous avez la vos données directement sur une feuille de calcul.

Point Méthode : Gazéification à l'oxygène

Le logiciel EES n'est pas un logiciel à proprement parler de simulation à l'oxygène. Cependant quelques petites modifications permettent de le transformer en simulateur de gazéificateur à oxygène :

The screenshot shows the EES software interface with a process flow diagram for a gasifier. On the left, there are two tables: 'Mass flows' and 'Gas composition'. On the right, there is a 'Fuel data' table. The process flow diagram shows 'Wood chips' entering a 'Gasifier' at 25 °C. 'Steam' enters the gasifier at 450 °C. 'Gas' exits the gasifier at 800 °C. 'Char coal' exits the gasifier at 1% of dry wood chips input. A 'Heat loss' stream is shown leaving the gasifier at 3% of thermal input. The 'Fuel data' table shows a moisture content of 30% on wet base and an element composition of C 1,586 and O 0,7089.

Mass flows		
	Mass flows	% of wood chips
Dry wood chips	200 [kg/h]	100,0 [%]
Moisture	85,71 [kg/h]	42,9 [%]
Steam	36 [kg/h]	18,0 [%]
Air	422,5 [kg/h]	211,3 [%]

Gas composition		
	Dry base	Wet base
CO	12,5 [Vol%]	9,8 [Vol%]
CO2	17,4 [Vol%]	13,6 [Vol%]
CH4	2,0 [Vol%]	1,6 [Vol%]
H2	21,0 [Vol%]	16,4 [Vol%]
H2O		22,1 [Vol%]

Fuel data	
Moisture content:	30 [%] on wet base
Element composition:	
C	1,586
O	0,7089

Puis nous voyons enfin les équations qui se cachent derrière le logiciel, dans cette fenêtre il faut alors cliquer sur *Search* puis *Replace*. Pour remplacer l'air par de l'oxygène pur :

- rechercher 0,21 et le remplacer par 1
- rechercher 0,79 et le remplacer par 0

The screenshot shows the EES software interface with the equations window open. A 'Replace' dialog box is overlaid on the equations, showing 'Find what: 0,79' and 'Replace with: 0'. The dialog box also has options for 'Match whole word only', 'Match case', 'Start at', and 'Replace All'. The equations window shows the following code:

```

FUNCTION Hm_vand_damp (T: m_vand_damp;H_fordampning)
IF (T<(373-273,15)) THEN
Hm = (ENTHALPY(H2O; T=T)+ H_fordampning)*m_vand_damp
ELSE
Hm = ENTHALPY(H2O; T=T)*m_vand_damp
ENDIF
Hm_vand_damp = Hm
END

{FUNCTION Q_tilfert (T_ind; T_ud; Hm_ind; Hm_ud)
if T_ind = T_ud then
Q = 0
else
Q = Hm_ind - Hm_ud
endif
Q_tilfert = Q
END}

{INDFYRET EFFEKT}
Br_ind_sys = Br_n_flis*m_flis_ind/1000

{flisforvarmer}
{Q_flis = Q_tilfert (T_ind; T_fugt; Hm_flis_ind; Hm_fugt)}
Hm_flis (+ Q_flis )+ Q_pyrolyse= Hm_flis_ind
Hm_flis = h_flis*m_flis_ind
{Hm_flis_ind = h_flis_ind*m_flis_ind}

h_flis_0=Br_n_flis + ENTHALPY(CO2;T=(298-273,15)) *1*MO_CO2/MO_flis + ENTHALPY(H2O;T=(298-273,15)) *H_n_flis/2*MO_H2O/MO_flis
h_flis = h_flis_0 + 0,003867*((T_fugt+273,15)^2-298^2)/2 + 0,1031*((T_fugt+273,15)-298)
{h_flis_ind = h_flis_0 + 0,003867*((T_ind+273,15)^2-298^2)/2 + 0,1031*((T_ind+273,15)-298)}

Q_pyrolyse = (Q*p_ind/100-Q*p_fugt/100)*Br_ind_sys*1000
Q*p_ind = 0,008192*T_ind
Q*p_fugt = 0,008192*T_fugt

{fugtforvarmer}
{Q_fugt = Q_tilfert (T_ind; T_fugt; Hm_fugt_ind; Hm_ind)}
Hm_fugt + Q_fugt = Hm_fugt_ind
Hm_fugt = Hm_vand_damp (T_fugt; m_fugt_ind;H_fordampning)
Hm_fugt_ind = Hm_vand_damp (T_ind; m_fugt_ind;H_fordampning)

{DAMPGENERATOR}
m_vand = m_damp_ind
    
```

Attention à bien cliquer sur *Replace All*

Une fois cette opération effectuée il est nécessaire de vérifier que tous les changements ont bien été pris en compte notamment la masse d'azote doit être voisine de 0.

EES Distributable CAUsers\Victor\Desktop\BiomasseGenova\gasifier.exe 1. simpel forgasser_engelsk - [Solution]			
Main Hm_vand_damp			
Hm_vand = -158645	Hm_vad_gas_ud,f = -819,6 [kW]	h_flis = -5201	h_flis,0 = -5202 [kJ/kg]
H_fordampning = -2442 [kJ/kg]	h_gas = -5427	h_gas_ud = -6754 [kJ/kg]	h_koks_ud = 1102
K = 0,9694	koko_udt,af,k,ind,f = 1 [% af tør flis i kg]	h_gg = 74,9 [%]	m_c_flis = 48,14 [%]
m_h_flis = 6,407 [%]	m_o_flis = 45,46 [%]	MO_AIR = 32	MO_c = 12,01
MO_CH4 = 16,04	MO_CO = 28,01	MO_CO2 = 44,01	MO_flis = 24,95
MO_gas_ud = 20,88	MO_gas_vad_ud = 19,98	MO_H = 1,008	MO_H2 = 2,016
MO_H2O = 18,02	MO_N = 14,01	MO_N2 = 28,01	MO_O = 16
MO_O2 = 32	m_CH4_gas_ud = 1,246	MO_CO2_gas_ud = 48,08	MO_CO_gas_ud = 28,29
m_c_flis_ind = 26,74	m_c_gas_ud = 26,19	m_c_ind = 26,74	m_c_koks_ud = 0,5556
m_c_ud = 26,74	m_damp_ind = 10 [g/s]	m_damp_indt = 18,0 [%]	m_damp_ind_ny = 36 [kg/h]
m_fugt_ud = 32,16 [g/s]	m_flis_ind = 55,56 [g/s]	m_flis_indt = 100,0 [%]	m_flis_ind_ny = 200 [kg/h]
m_fugt_ind = 29,81 [g/s]	m_fugt_indt = 42,9 [%]	m_fugt_ind_ny = 85,71 [kg/h]	m_gas_ud = 81,05 [g/s]
m_gas_vad_ud = 113,2 [g/s]	m_H2O_gas_ud = 32,16 [g/s]	m_H2_gas_ud = 3,431 [g/s]	m_H_damp_ind = 1,119 [g/s]
m_H_damp_ud = 3,598 [g/s]	m_H_flis_ind = 3,559	m_H_fugt_ind = 2,664	m_H_gas_ud = 3,744
m_H_ind = 7,342	m_H_ud = 7,342	m_ind = 113,8	m_koks_ud = 0,5556
m_luft_ind = 24,4 [g/s]	m_luft_indt = 43,92 [%]	m_luft_ind_ny = 87,8 [kg/h]	m_N2_gas_ud = -2,465E-32
m_N2_ind = -2,465E-32	m_N2_luft_ind = -2,465E-32	m_N2_ud = -2,465E-32	MO2_luft_ind = 24,4
MO_damp_ind = 8,881	MO_damp_ud = 28,56	MO_flis_ind = 25,25	MO_fugt_ind = 21,15
MO_gas_ud = 51,12	MO_ind = 79,68	MO_ud = 79,68	mud = 113,8
m_vand = 10	N2_tor_vol_ud = 0,0 [Vol%]	N2_vad_vol_ud = 0,0 [Vol%]	n_CH4_gas_ud = 0,07765
n_CO2_gas_ud = 1,093	n_CO_gas_ud = 1,01	n_c_g_d_uCH4_ud = 2,103	n_gas_ud = 3,882
n_gas_vad_ud = 5,667	n_H2O_gas_ud = 1,785	n_H2_gas_ud = 1,702	n_H_c_flis = 1,586
n_H_g_d_uCH4_ud = 6,974	n_N2_gas_ud = -7,704E-34	n_o_c_flis = 0,7089	n_o_g_d_uCH4_ud = 4,98
P_ind = 101,3	P_ud = 97,3	Q_f_fugt = 0,2048	Q_f_ind = 0,2048
Q_damp = 32775	Q_damp,f = 32,8 [kW]	Q_damp,f% = 3,2 [%]	Q_damp_ud = 130429
Q_damp_ud,f = 130,4 [kW]	Q_fugt = 0,0	Q_fugt,f = 0,0 [kW]	Q_damp,f% = 0,0 [%]
Q_gas = 107540	Q_gas,f = 107,5 [kW]	Q_gas,f% = 23,5 [%]	Q_luft = 4004
Q_luft,f = 4,0 [kW]	Q_luft,f% = 0,4 [%]	Q_pyrolyse = 0	Q_pyrolyse,f = 0,0 [kW]
Q_pyrolyse,f% = 0,0 [%]	Q_tab = 30425 [W]	Q_tab,f = 30,4 [kW]	Q_tab,f% = 3,0 [%]
Q_vad_gas,f = 238 [kW]	tab% = 3 [%]	T_damp_ind = 450 [°C]	T_fugt = 25 [°C]
T_gas_ud = 25 [°C]	T_ind = 25 [°C]	T_luft = 25 [°C]	T_luft_ind = 200 [°C]
T_ud = 800 [°C]	T_vand = 25 [°C]	x = 1,093	

Bien que ce ne soit pas très clair sur la capture d'écran, nous devrions voir une quantité de matière de N2 égale à $-7,7 \cdot 10^{-34}$ c'est-à-dire une proportion quasi nulle.

Lexique

- AMF : Air Mass Flow (kg/h)
- WMF: Wood Mass Flow (kg/h)
- SMF: Syngas Mass Flow (kg/h)
- IE: Internal energy (kW)
- LCV: Lower Calorific Value of gas (kJ/ Nm³)
ou Pouvoir Calorifique inférieur en français

Bibliographie

- [1] F.Pittaluga:” Sviluppo di una tecnologia di produzione energetica cogenerativa a piccola taglia tramite gassificazione di biomasse, anche di rifiuto, additivate con clean-coke” – Parco Scientifico Tecnologico della Liguria – III Report Quadrimestrale – 21 maggio 2008
- [2] “Wood gas as engine fuel” –Food and Agriculture Organization of the United Nations
FAO Forestry Paper n.72 - 2008
- [3] Cours de Monsieur Seguin sur la biomasse - Polytech’ Marseille 2007/2008
- [4] Société Ankur- <http://www.ankurscientific.com/whatisgasification.htm>

Pouvoir calorifique inférieur des produits de la gazéification

Les données suivantes sont directement tirées du logiciel EES :

C.....	3000 kJ/kg
CH4.....	50013 kJ/kg
CO.....	10103 kJ/kg
H2.....	119972 kJ/kg

Mesure du PCI de la biomasse pouvant être utilisée dans le gazéificateur

Nous voulons mesurer le pouvoir énergétique des différents types de biomasse dont nous disposons dans le laboratoire de gazéification afin de pouvoir observer la relation expérimentale entre le pouvoir calorifique de la biomasse et le pouvoir énergétique du biogaz. C'est grâce à une bombe calorimétrique que nous pourrions mesurer le pouvoir calorifique de l'échantillon.

Nous développerons dans une première partie la théorie liée à la bombe de Mahler et dans une seconde partie nous exposerons la procédure expérimentale qui nous permettra d'obtenir le PCI de l'élément mis dans la bombe de Mahler.

1) La bombe de Mahler

Pour déterminer les pouvoirs calorifiques des différents types de biomasse nous disposons d'une bombe de Mahler semi automatique. Cette bombe calorimétrique : The C 200 calorimeter, développée par la société **IKA**, se présente sous la forme suivante :

The C 200 Calorimeter



L'interaction entre le manipulateur et le C 200 se fait par l'intermédiaire de la fenêtre suivante :



a) Principe de fonctionnement

Une bombe calorimétrique permet de mesurer la quantité de chaleur dégagée par un échantillon et détermine par conséquent le pouvoir calorifique de l'élément placé dans la bombe.

Lors d'une mesure à volume constant ou à pression constante, la quantité de chaleur est égale à une fonction d'état : ce qui signifie que le résultat obtenu ne dépend pas de la façon de procéder (transformation réversible ou irréversible). Les contraintes techniques sont donc enlevées lorsque les mesures sont faites à volume ou à pression constante.

Pour une mesure effectuée à volume constant nous avons $\Delta U = Q_v$ et pour une mesure faite à pression constante la relation est: $\Delta H = Q_p$.

Nous déterminons la chaleur dégagée par l'échantillon lors d'une réaction complète unique et rapide. Pour prendre en compte toute la chaleur dégagée par l'échantillon, il faut éviter que les réactions secondaires ne viennent perturber les mesures et aussi éviter les pertes de chaleur. La combustion de l'échantillon produit un dégagement de chaleur qui va se propager à l'eau entourant la bombe. C'est en mesurant la variation de la température de l'eau que l'on pourra alors déterminer le pouvoir calorifique de l'échantillon.

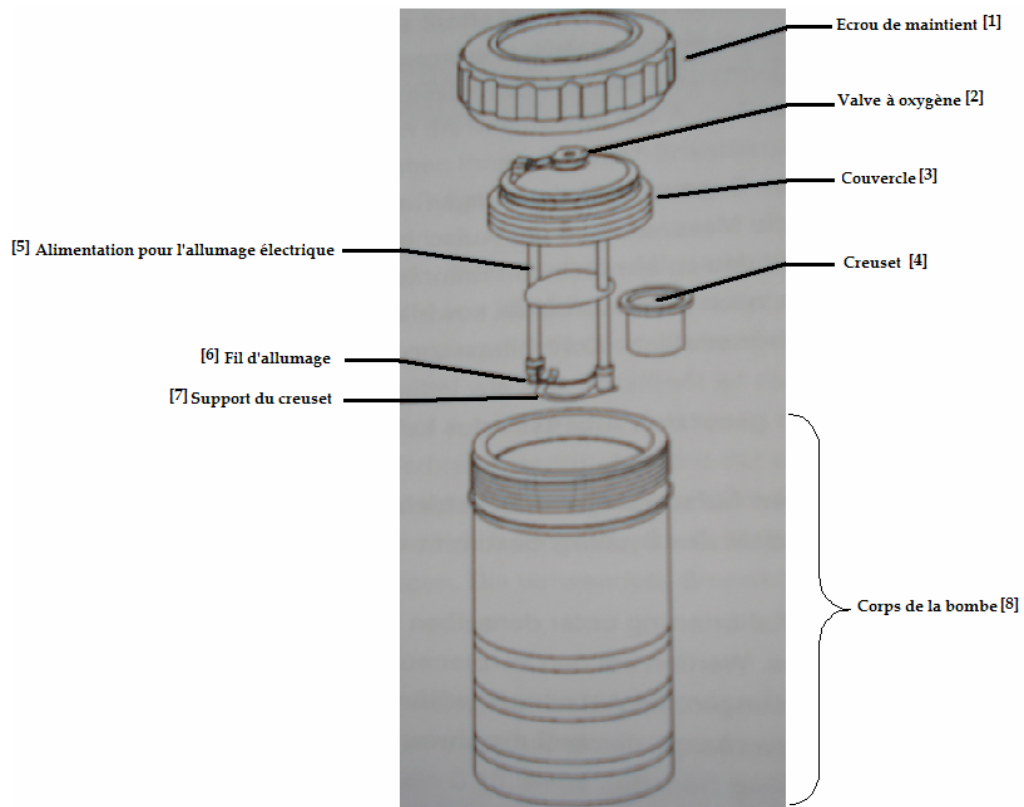
b) Matériel

On se sert donc d'une bombe faite d'un matériau pouvant résister aux pressions élevées et bon conducteur de chaleur. Dans cette bombe, entourée d'une grande quantité d'eau, on dispose d'un creuset où l'on place l'élément dont on veut mesurer le pouvoir calorifique.

La combustion de l'échantillon se fait au moyen d'un fil métallique qui conduit l'électricité et qui touche l'échantillon par l'intermédiaire d'un fil en coton, dans le cas de notre bombe calorimétrique. Une grande quantité d'oxygène nous assure que la combustion sera complète car l'oxygène y sera en excès. Ce sera un courant de forte intensité qui traversera les fils et qui déclanchera la combustion de l'échantillon.

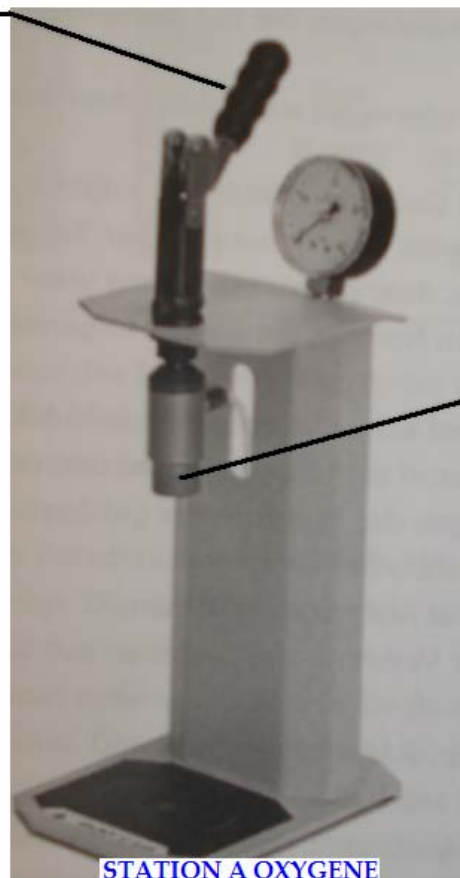
Etant donné que le système est semi automatique, nous n'avons pas à mesurer les variations de températures sur un thermomètre. Le C 200 nous donne le pouvoir calorifique de l'échantillon quelques minutes après son introduction.

➤ Eléments composants la bombe



- Oxygen Station C248 : elle sert à remplir la bombe d'oxygène

Levier



Valve de pressurisation

STATION A OXYGENE

2) Procédé expérimental

Lors de la première utilisation de la bombe de Mahler semi automatique ou lors d'une période où la bombe n'a pas été utilisée depuis plus d'un mois, il est recommandé d'étalonner la bombe calorimétrique avec une substance à pouvoir calorifique contrôlée. Nous allons nous servir de pastilles d'acide benzoïque comme matériel de combustion standard. Ces pastilles sont fournies par le fabricant de la bombe de Mahler.

a) Calibrage de la bombe de Mahler.

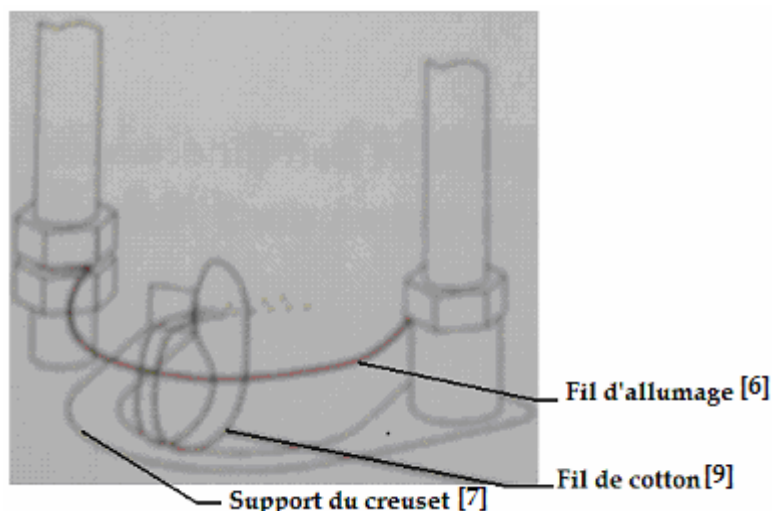
Préparation de l'eau

- Remplir un récipient d'environ 2l d'eau distillée mélangée à un peu d'eau du robinet.
- Mettre dans l'eau quelques gouttes d'un colorant bleu (fourni avec l'appareil) afin de pouvoir visualiser le niveau d'eau : l'eau doit devenir légèrement bleutée.
- La bombe de Mahler semi automatique utilisée nécessite une eau possédant une température homogène comprise entre $18 \text{ et } 25^\circ\text{C} [\pm 1^\circ\text{C}]$.

Pour obtenir l'eau à la température souhaitée nous pouvons la placer au frigidaire si la température ambiante est trop élevée. L'idéal est de préparer l'eau un peu avant d'utiliser la bombe de Mahler pour que la température soit correcte et homogène.

Mise en place de l'échantillon dans la bombe

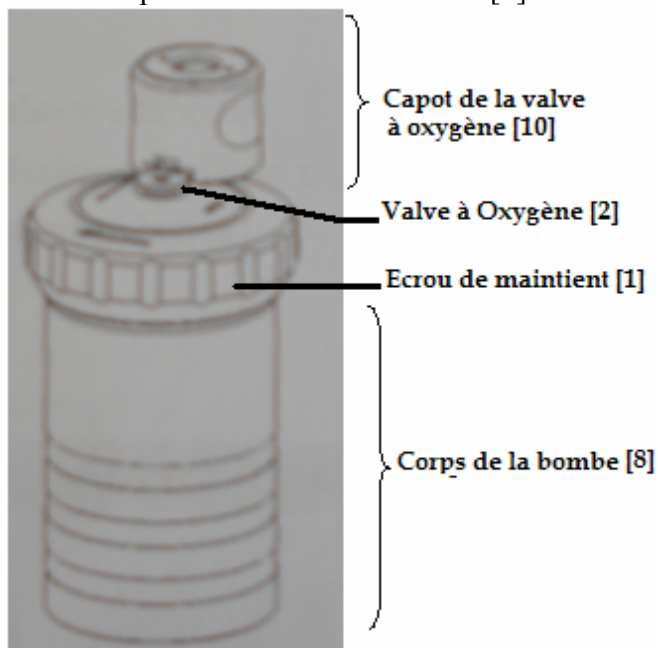
- Peser l'échantillon avec une balance possédant une précision de 0.0001g.
 - Pour cela peser le creuset vide [4], faire la tare : la balance affiche alors un poids nul.
 - Mettre l'échantillon dans le creuset
 - Relever la masse m_1 de l'échantillon
- Entourer un fil de coton, fourni par le fabricant de la bombe, autour du fil métallique servant à l'allumage [6] de la manière suivante :



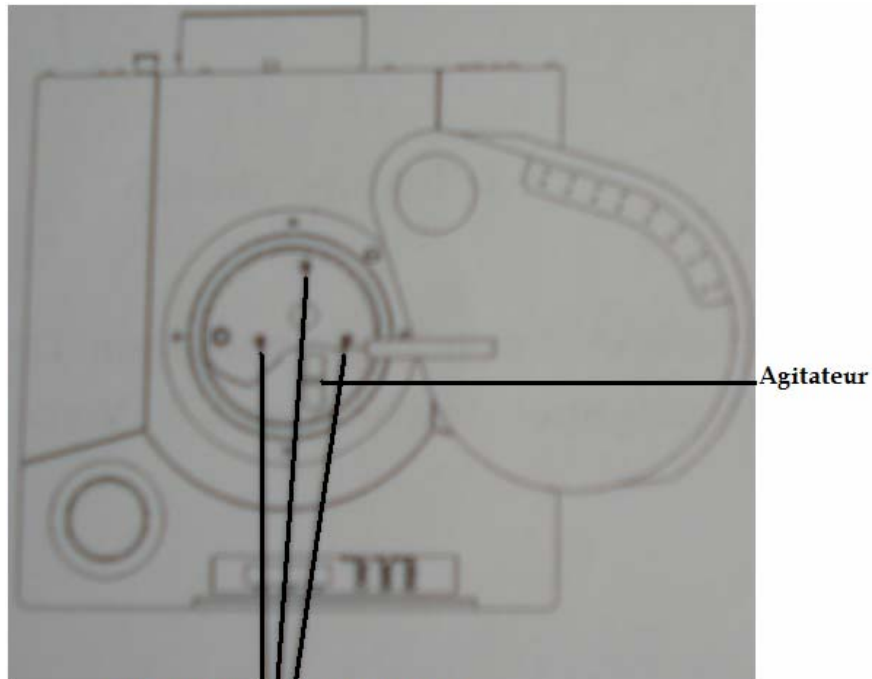
Remarque : La quantité de chaleur délivrée par la combustion du fil de coton est automatiquement enlevée du résultat fourni par la bombe de Mahler C 200. C'est pourquoi le fabricant nous fournit les fils servant au déclenchement de la combustion.

- Placer alors le creuset [1] contenant l'échantillon préalablement pesé sur son support [7]
- Faire toucher le fil de coton [9] à l'échantillon.
- Mettre le couvercle [3] sur le corps de la bombe.
- Placer l'écrou de maintien [1] de sorte à rendre solidaire le couvercle de la bombe [3] et le corps de la bombe [8].
- Pressuriser la bombe de Mahler à 20 bar avec de l'oxygène.
 Cette action se fait grâce à la valve à oxygène [2] présente dans la bombe de Malher et la station à oxygène C248.

- Mettre le capot [10] sur la valve de pressurisation de la bombe [2]



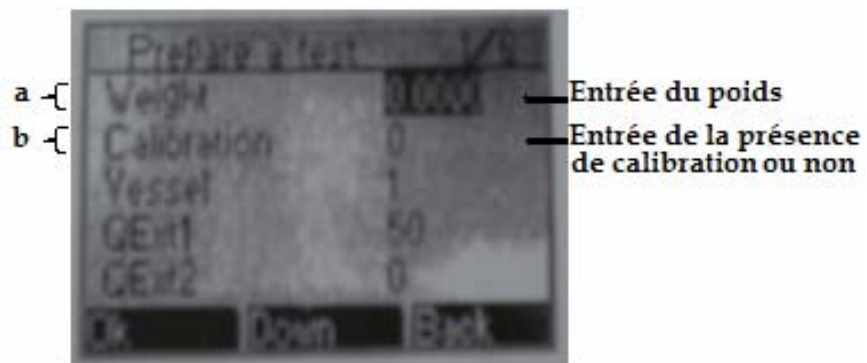
- Placer la bombe de Mahler dans l'emplacement réservé : entre les trois butées.



Emplacements de stabilisation

- Vérifier que l'agitateur soit bien en place
- Fermer l'appareil expérimental.
- Remplir l'appareil avec l'eau préparée précédemment
Le réservoir qui doit être rempli d'eau se situe à la gauche de la fenêtre d'interaction.
Le niveau d'eau doit être compris entre les niveaux qui indiquent le minimum et le maximum d'eau.
- Procéder maintenant à l'interaction avec la bombe de Mahler semi automatique.
 - 3) Interaction avec la bombe de Mahler semi automatique pour la mesure du pouvoir calorifique de l'échantillon

Nous pouvons rentrer différentes données afin de procéder à la mesure du pouvoir calorifique grâce à l'intermédiaire d'une fenêtre disposée sur le C 200 :

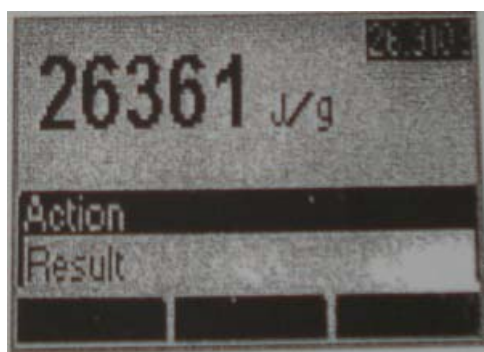


- Dans la fenêtre précédente nous allons rentrer, grâce au clavier :
-le poids, dans la fenêtre [a].

- le nombre 1 dans la fenêtre [b] si nous procédons à un étalonnage.
- le nombre 0 dans la fenêtre [b] si nous voulons mesurer le pouvoir calorifique d'un élément.

- Confirmer les données entrées en sélectionnant ok.

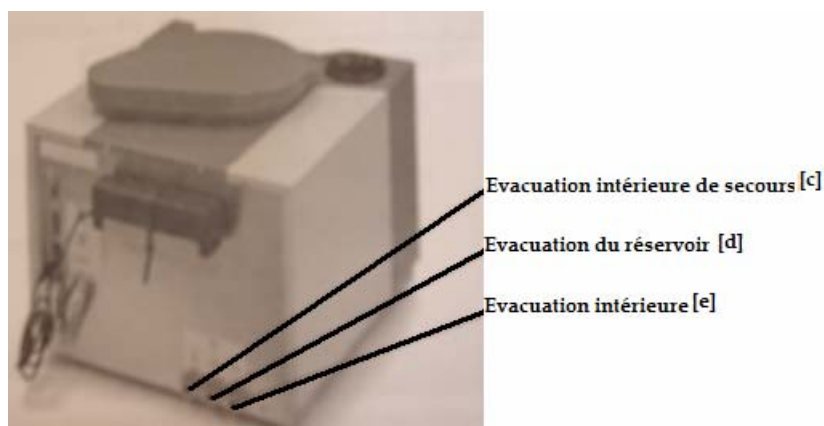
La bombe de Mahler semi automatique s'occupe à présent du processus aboutissant à la mesure du pouvoir calorifique. Elle doit fournir au bout de quelques minutes le pouvoir calorifique de l'échantillon en J/g ou en Cal/g, selon l'unité que l'on a préalablement choisie.



Remarque : Si à un moment donné il s'affiche sur l'écran un message anormal, il faut se référer à la notice fournie avec l'appareil. Dans ce cas, il faut être très attentif sur le processus à entreprendre car une mauvaise manipulation peut conduire l'appareil semi automatique à fournir un résultat erroné. En effet, si la personne qui manipule l'appareil ne tient pas compte des informations données, l'expérience peut alors ne pas se produire dans des conditions standard d'utilisation et finalement fournir une mauvaise évaluation du pouvoir calorifique.

Retrait de la bombe après mesure du pouvoir calorifique de l'échantillon

- Vidanger le C 200 par un tuyau fourni avec la bombe de Mahler semi automatique
La Vidange se fait par la sortie [1].



- Mettre l'eau ainsi récupérée dans le récipient où l'on avait mis l'eau avec le colorant

- Une fois la vidange effectuée, ouvrir le couvercle de l'appareil par une poussée verticale et laisser le couvercle tourner de lui-même.
- Sortir la bombe de Mahler de l'appareil.
- Ouvrir la bombe de Mahler de la façon suivante :
 - Dévisser l'écrou de maintien et l'enlever de la bombe
 - Placer alors la valve à oxygène sous la station à oxygène.
 - Mettre un peu d'oxygène dans la bombe en tenant le couvercle.
(la pression va alors faire soulever le couvercle : il sera plus facile à enlever)
- Enlever les éléments [1] , [3], [4] et [5] et les laver à l'eau distillée
- Sécher les éléments avec du papier

L'appareil est alors prêt pour effectuer de nouvelles mesures.

S'il n'est pas prévu d'utiliser l'appareil durant une certaine période il est préférable de vidanger tous les réservoirs.

Mesure des échantillons après étalonnage de la bombe de Mahler semi automatique C 200

Pour effectuer des mesures du pouvoir calorifique de l'échantillon de biomasse il faut tout d'abord vérifier qu'il a été étalonné récemment. Lorsque cette vérification est effectuée, il suffit de procéder comme pour les mesures servant pour l'étalonnage de la bombe de Mahler. La seule différence consiste à mettre un 0 au lieu d'un 1 pour la 'calibration' [b], dans la fenêtre où l'on doit entrer la masse de l'échantillon.

4) Résultats expérimentaux

a. Choix des échantillons

Pour chaque type de biomasse, nous avons choisi de mesurer le PCI de trois échantillons provenant d'un même stock. Ces échantillons ont été choisis au hasard, après avoir mélangé le stock : nous avons prélevé chaque échantillon à des endroits différents du stock (au dessus, au milieu et en dessous du stock après mélange).

Nous reportons dans le tableau ci après le pouvoir calorifique moyen des différents échantillons de biomasse présents dans le laboratoire.

Type de biomasse	Pouvoir calorifique moyen des échantillons
Copeaux de bois	4018 Cal/g
Biomasse compacte	4646 Cal/g
Charbon	6023 Cal/g

b. Les différents types de biomasse utilisés.

- Copeaux de bois

Les copeaux de bois utilisés pour alimenter le gazéificateur proviennent de la scierie Benarco située dans le village de Bormida.

- Biomasse compacte

Cette biomasse provient de la compaction de l'herbe.

- Charbon

On peut utiliser du charbon en mélange avec de la biomasse pour augmenter le pouvoir calorifique du biogaz. Ce charbon est celui acheté dans le commerce pour les barbecues.

Remerciements

Nous remercions Monsieur le professeur Pittaluga ainsi que toute son équipe de l'Università degli studi di Genova, au pôle de Savone, de nous avoir accueillis et encadrés durant ce stage très intéressant.

Nous leur sommes reconnaissants pour leurs conseils et leur aide tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Nous remercions également Madame Dalloz et Monsieur Sierra, de l'école polytechnique universitaire de Marseille. Leur aide nous a été précieuse.

A tous nous adressons toute notre reconnaissance et notre profonde gratitude.