

*RAPPORT DE LA FORMATION CST02*

# STRATEGIE DE BIORAFFINERIE

**RESPONSABLE:**

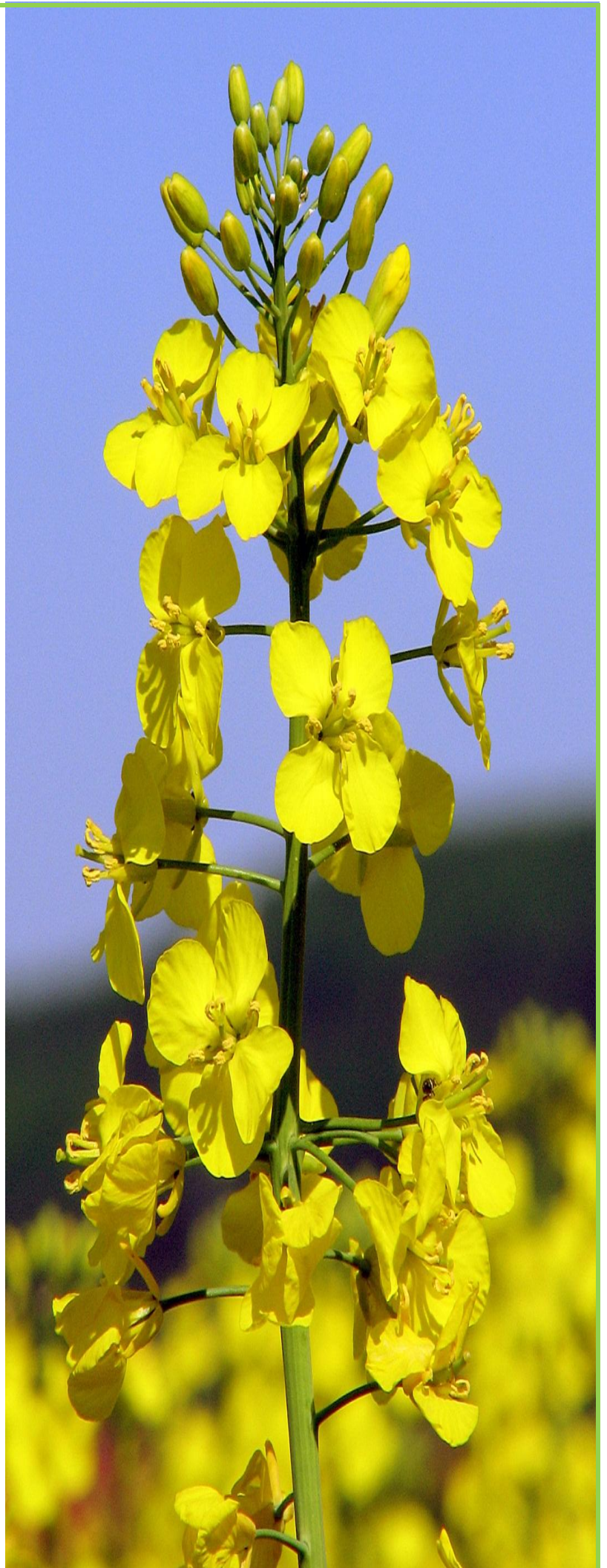
**Daniel THOMAS**

**Réalisé par :**

**Marwa BRAHIM**

**Ansoumane DIEDHIOU**

**Ahmed BELLIL**



# Contenu

<b>I. GENERALITES SUR LA BIOMASSE &amp; SA VALORISATION .....</b>	<b>6</b>
<b>1. BIOMASSE .....</b>	<b>6</b>
<i>LE COLZA</i> .....	7
<b>2. VALORISATION .....</b>	<b>8</b>
<b>II. VALORISATION PAR VOIE BIOLOGIQUE .....</b>	<b>10</b>
<b>1. BIOETHANOL.....</b>	<b>10</b>
<b>2. LES PRODUITS BIOBASES ISSUS DES SUCRES PROVENANT DE LA BIOMASSE .....</b>	<b>13</b>
<b>III. VALORISATION PAR VOIE BIOCHIMIQUE .....</b>	<b>14</b>
<b>1. BIODIESEL .....</b>	<b>14</b>
<b>2. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE DIESEL ET LE BIODIESEL DU POINT DE VUE     COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE.....</b>	<b>16</b>
<b>IV. VALORISATION PAR VOIE THERMO-CHIMIQUE : .....</b>	<b>21</b>
<b>1. VOIE THERMOCHIMIQUE PRIMAIRES .....</b>	<b>21</b>
<b>2. GAZIEFICATION (LIGNINE).....</b>	<b>25</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> Composition biochimique des éléments de la biomasse [4].....	<b>7</b>
<b>Tableau 2</b> Analogies entre la Petro-raffinerie et la Bioraffinerie [5].....	<b>9</b>
<b>Tableau 3</b> Les technologies de production du biodiesel à partir d’huile de Colza.....	<b>15</b>
<b>Tableau 4</b> Comparaison des caractéristiques du Diesel et du Biodiesel .....	<b>14</b>
<b>Tableau 5</b> Pouvoir calorifique massique des principaux constituants de la biomasse [21].....	<b>21</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> Raffinage du pétrole en carburants, molécules plateformes et spécialités.....	<b>8</b>
<b>Figure 2</b> Raffinage de la biomasse en biocarburants, molécules plateformes et spécialités.....	<b>9</b>
<b>Figure 3</b> L'articulation des différentes voies de valorisation du Colza [5] .....	<b>10</b>
<b>Figure 4</b> Procédé typique de Production de Bioethanol .....	<b>11</b>
<b>Figure 5</b> Réaction de transestérification à la base de la production de biodiesel de première génération (FAME).....	<b>14</b>
<b>Figure 6</b> Représentation schématique du procédé de prétraitement des graines de Colza [5]...15	
<b>Figure 7</b> Circuits de gazole entre la pompe à injection et l'injecteur .....	<b>17</b>
<b>Figure 8</b> Les technologies de production du biodiesel à partir d'huile de Colza.....	<b>15</b>
<b>Figure 9</b> Champ de vitesse et comportement de l'écoulement du diesel dans la canalisation...14	
<b>Figure 10</b> Les zones de turbulences du diesel dans la canalisation.....	<b>19</b>
<b>Figure 11</b> Champ de vitesse et comportement de l'écoulement du biodiesel dans la canalisation .....	<b>20</b>
<b>Figure 12</b> Les zones de turbulences du biodiesel dans la canalisation .....	<b>20</b>
<b>Figure 13</b> Voies primaires de conversion thermique de la biomasse.....	<b>21</b>
<b>Figure 14</b> Variation du Pouvoir Calorifique en fonction de l'humidité totale du biocarburant.	<b>24</b>
<b>Figure 15</b> Représentation schématique de la valorisation énergétique de la biomasse.....	<b>25</b>
<b>Figure 16</b> Les voies de la valorisation du Tout Colza abordées dans ce travail.....	<b>27</b>

## **INTRODUCTION**

La bioraffinerie, découverte dès le début du 19ème siècle, connaît un intérêt grandissant depuis les années 1970 dû à la hausse du prix du pétrole, à la volonté d'indépendance énergétique grandissante de certains pays et à la diminution des ressources pétrolières [1,2].

La bioraffinerie peut ainsi être définie comme le processus de transformation durable de la biomasse en une gamme de produits biobasés (incluant les produits alimentaires, les produits chimiques et les biomatériaux) et en bioénergie (biocarburants, électricité, chaleur) commercialisables [3].

Dans une bioraffinerie, une très large gamme de procédés et de technologies de transformation durables sont utilisés. Ceux-ci permettent de fractionner une ou plusieurs ressources végétales (bois, paille, maïs, blé, soja, etc.) en leurs différents composants (carbohydrates, lignines, protéines, triglycérides, etc.) et de convertir ces derniers en produits dérivés, et ceci dans l'optique d'une valorisation la plus élevée possible [3].

Parmi les nombreuses définitions, il est généralement accepté que le but de la bioraffinerie soit de produire une multitude de produits à partir d'un large éventail de différents types de biomasses.

C'est dans cet ordre d'idées que nous abordons ce travail dont l'objectif est d'envisager une plateforme de valorisation de la plante de Colza, biomasse abondante de la région Picardie, dans son ensemble.

Le présent tapuscrit se structure autour des points suivants :

- Etat de l'art : Biomasse & Valorisation
- Valorisation par voie Biologique
- Valorisation par voie Biochimique
- Valorisation par voie Thermochimique
- Conclusion

*Bienvenue dans un monde où « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ».*

**LAVOISIER**

# I. GENERALITES SUR LA BIOMASSE & SA VALORISATION

## 1. BIOMASSE

La biomasse est un terme générique englobant toutes les matières vivantes qui peuvent être utilisées pour des fins énergétiques. Dans le but de faciliter l'étude de cet ensemble, les chercheurs présentent la production de biomasse en huit catégories que sont :

- ❖ Biomasse produite par le surplus des terres agricoles, non utilisé pour l'alimentation humaine ou animale : cultures énergétiques
- ❖ Biomasse produite par le déboisement (entretien de forêt) ou le nettoyage de terres agricoles
- ❖ Résidus agricoles issus des cultures de céréales, vignes, vergers, oliviers, fruits et légumes et résidus de l'agroalimentaire
- ❖ Résidus forestiers issus de la sylviculture et de la transformation du bois
- ❖ Résidus agricoles issus de l'élevage (fumier, lisier, litières...)
- ❖ Déchets organiques des ménages (fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM), papiers, cartons, déchets verts)
- ❖ Biomasse directement utilisée à des fins non alimentaires (bois pour le papier)
- ❖ Déchets organiques des déchets industriels banals (papiers, cartons, bois, déchets putrescibles)

Par ailleurs, la biomasse peut alors être divisée en catégories selon la nature des ressources utilisées et les produits obtenus :

- Biomasse lignocellulosique (bois, pailles, tiges, cultures dédiées...)
- Biomasse alcooligène (betterave, canne à sucre, blé, maïs...)
- Oléagineux (colza, soja, tournesol...)

La biomasse est constituée de (15 à 20%) de lignine, de hémicellulose (20 à 30%) et de cellulose (34 à 50%) (Voir tableau 1). Le tableau 1 montre la composition en éléments biochimiques de la paille et du bois. Le bois représente 41% de cellulose, 31% d'hémicellulose et de 27% de lignine. Quant à la paille, elle présente 33% de cellulose, 23% d'hémicellulose et de 17% de lignine. Les ensembles bois et de résidus agricoles présentent un pourcentage de cellulose largement supérieur à celui de la lignine et au pourcentage de

l'hémicellulose. Ces éléments biochimiques de la biomasse sont plus ou moins intimement liés.

**Tableau 1** : Composition biochimique des éléments de la biomasse [4]

Biomasse	Cellulose (en % sec)	Hémicellulose (en %sec)	Lignine (en %sec)
<b>Herbe</b>	<b>30-50</b>	<b>15-40</b>	<b>5-20</b>
<b>Bagasse</b>	<b>40-55</b>	<b>25-40</b>	<b>5-25</b>
<b>Bois dur</b>	<b>40-50</b>	<b>20-30</b>	<b>15-30</b>
<b>Bois tendre</b>	<b>40-55</b>	<b>10-15</b>	<b>25-30</b>
<b>Résidus agricoles</b>	<b>30-40</b>	<b>10-40</b>	<b>10-30</b>

La biomasse contient des quantités variables de la cellulose, l'hémicellulose, lignine et une petite quantité d'autres matières inorganiques. Les espèces de plantes ligneuses sont généralement caractérisées par une croissance lente et sont composés de fibres étroitement liés, ce qui donne une surface dur externe, tandis que les plantes herbacées sont généralement vivaces, avec plus de fibres lâchement liées, ce qui indique une plus faible proportion de lignine, qui lie les fibres cellulosiques: les deux matériaux sont des exemples de polysaccharides, des polymères naturels à longue chaîne.

### LE COLZA

Le Colza *Brassica napus var.napus* est une plante issue du croisement naturel entre un chou (*Brassica oleracea L.*) et une navette (*Brassica rapa L.*). Le centre de diversification du colza se trouverait à l'intersection des centres de la navette (Europe, Asie) et du chou (Europe de l'Ouest et Afrique du Nord-Ouest).

Le colza fait partie de la classe des dicotylédones et de la famille des brassicacées (crucifères).

Il est cultivé pour sa graine riche en huile et son tourteau riche en protéines. Très bonne tête d'assolement, le colza favorise la rentabilité de la culture suivante. Son système racinaire pivotant améliore la structure des sols et peut mobiliser des quantités importantes d'azote.



Sa résistance au stress, sa capacité de ramification et son cycle de culture long, de 10 à 11 mois, lui donnent un fort pouvoir de récupération et assurent une couverture du sol précoce et longue. Plante herbacée annuelle, pouvant mesurer deux mètres, le colza restitue après récolte de 8 à 12 tonnes de matière sèche et laisse un sol propre. Il est cultivable dans tous les types de sol.

En 2009, 5 millions d'hectares (Miha) ont été cultivés dans l'UE et 21,4 MIT colza et 31,2 MIT paille de colza ont été récoltées.

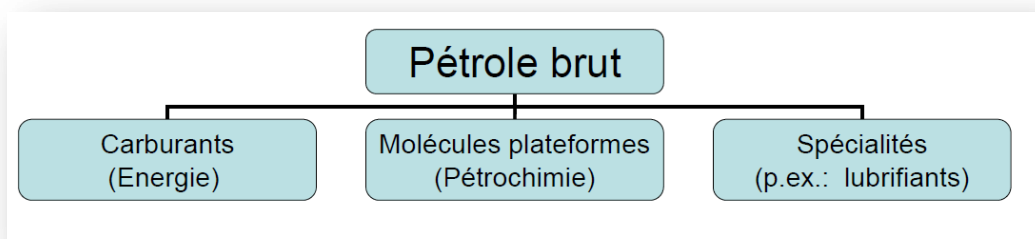
À l'heure actuelle, seul la fraction huile (18% en poids. de la plante entière), est utilisée par la nourriture et le biodiesel, tandis que les résidus de colza, la paille de colza, et de glycérol (à partir de production de biodiesel), n'ont que des applications de bas grade dans le marché, comme par exemple l'alimentation animale, ou la combustion de carburant. [5]

## 2. VALORISATION

Le concept de bioraffinerie est analogue à la raffinerie de pétrole, qui produit différents carburants et produits à partir du pétrole (figures 1 et 2).

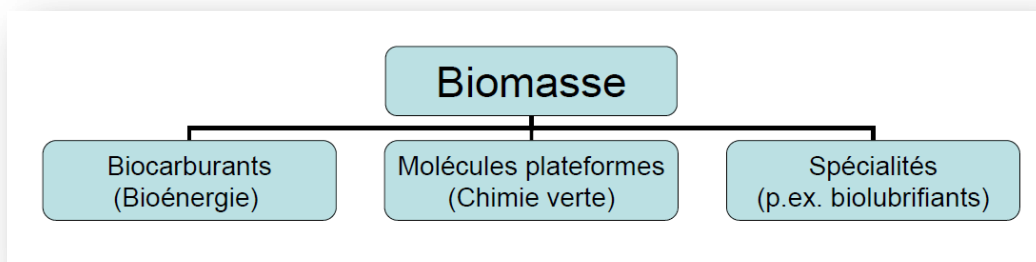
La raffinerie traditionnelle convertit le pétrole en carburants, en molécules plateformes pour la pétrochimie, et en spécialités chimiques telles que les lubrifiants et les solvants.

La raffinerie de la biomasse convertit elle la biomasse en biocarburants, en molécules plateformes pour l'agro-chimie, et en des spécialités chimiques telles que les biolubrifiants et les biosolvants.



**Figure 1** : Raffinage du pétrole en carburants, molécules plateformes et spécialités



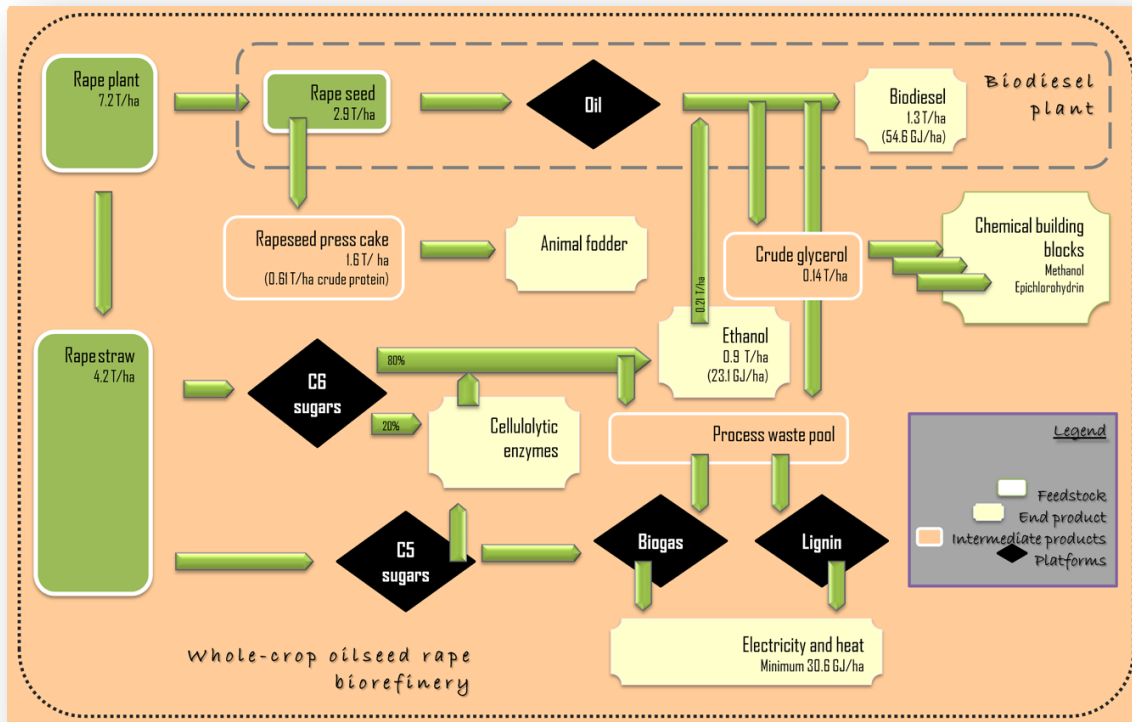


**Figure 2 :** Raffinage de la biomasse en biocarburants, molécules plateformes et spécialités

Une liste des analogies entre pétro-raffineries et les bioraffineries sont énumérés dans le tableau 2. Bien que l'idée générale est la même, les matières de départ et le processus de production varient considérablement. Par exemple, contrairement pétro-raffineries, les bioraffineries donnent la priorité à la durabilité environnementale.

**Tableau 2 :** Analogies entre la Petro-raffinerie et la Bioraffinerie [5]

	Petro-refineries (adapted by [15])	Biorefineries
Primary resource composition and diversity	Standard quality with small variations per batch	Diverse quality and composition of biomass, ranging for species, breed, cropping conditions, year
Platforms	Highly reduced compounds: Hydrocarbons (C1-C50), like olefins, alkanes, cycloalkanes, aromatics	Both reduced and oxidized compounds: Sugars (C5/C6), oils, lignin, Biogas, Syngas, pyrolytic liquid, organic juice, hydrogen, electricity and heat[3]
Production process of platforms	Distillation	Pretreatment of biomass (physical, chemical, thermal, biological, combinations)[16,17]
Working temperatures of the refinery	Medium high temperatures	Diverse: biological processes need mild temperatures, otherwise high temperatures
Current drive	Economical (growth, job development); Societal (Cover market needs, reliability); Technological (Process refinement, well discovery and extraction); Political (Energy security)	Economical (green growth, job development especially in rural areas); Societal (Cover market needs, green ethical products); Environmental (Sustainability, Renewable energy, GHG abatement, new biodegradable bio-products, recycling/effective use of wastes); Technological (opportunity for innovation, education); Political (energy security of supply)
Processing capacity scale	Typically 200,000 bar/day; 10Mibar/y	Pilot/Demo scale
End-products	Myriads (Fuels, commodity chemicals, materials, heat, electricity, etc.)	Constantly developing new products and process routes (biofuels, bio-based chemicals, biomaterials, electricity, heat, etc. [9])
Process development	Little; The technology is mature; Catalytic activities will improve conservatively	Drastically; The technologies are taking off and projects are upscaled; Biocatalysts are expected to improve in terms of efficiency, product yields, productivities, and purchasing costs
Product development	Top down (given the characteristics of oil, products and processes were developed)	Two ways: top-down and bottom-up: Bioproducts need to substitute petro-refinery products, but also new bio-products/markets will develop based on the properties of the biomasses



**Figure 3 :** L’articulation des différentes voies de valorisation du Colza [5]

Donc pour assurer la conformité au concept de bioraffinerie il existe plusieurs voies pouvant être mises en place (figure3) dont trois vont être présentées dans la suite du présent travail.

## II. VALORISATION PAR VOIE BIOLOGIQUE

### 1. BIOETHANOL

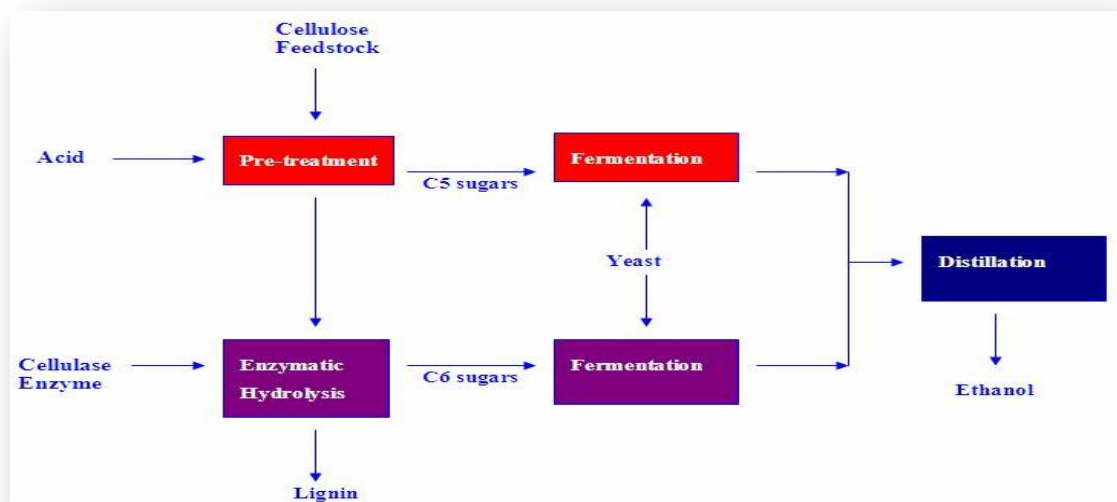
L’exploitation des sucres de ressources de la biomasse lignocellulosiques pour la production durable d’aliments, l’énergie et les fibres dépassant la récalcitrance de la biomasse à des levures de fermentation [6].

Pour ces deux stratégies usages ont été développés au cours des dernières décennies. Tout d’abord, une étape de prétraitement était introduite qui détruit la cohérence de la biomasse et l’amélioration de la digestibilité [7].

En second lieu, les enzymes hydrolytiques (cellulases, hémicellulases) ont été introduites pour hydrolyser les hydrates de carbone de biomasse prétraitée en monosaccharides fermentescibles [8].

Une option attractive pour casser la cellulose en sucres est l'emploi d'enzymes cellulases. Un facteur critique dans la commercialisation de l'éthanol cellulosique par hydrolyse enzymatique est le coût des enzymes [9].

Un procédé enzymatique typique est illustré à la figure 4.



**Figure 4 :** Procédé typique de Production de Bioéthanol

Le procédé comprend typiquement les étapes suivantes:

Prétraitement de la biomasse (tel que explosion à la vapeur, traitement à l'acide, SODA...) dans lequel l'hémicellulose est dégradée en sucres solubles C5 et C6.

- ❖ Hydrolyse enzymatique de la cellulose conduisant à la formation de glucose.
- ❖ Fermentation du glucose et des sucres C5, conduisant à l'éthanol.
- ❖ Distillation de l'éthanol.

Parmi les sociétés actives dans le développement de l'éthanol cellulosique par hydrolyse enzymatique, on peut citer Iogen (partenaire de Shell) au Canada, Inbicon (filiale de Dong Energy) au Danemark et Verenium (partenaire de BP) aux Etats-Unis, Danisco (Danemark) et Novozymes (Danemark) étant les grands fournisseurs d'enzymes.

Les défis rencontrés par la technologie enzymatique sont, en particulier, le prétraitement de la biomasse, le coût et l'efficacité des cellulases, la fermentation efficace des sucres C5 et C6 et la valorisation des lignines.

L'hydrolyse enzymatique s'effectue dans des conditions douces et est efficace. Par contre, le coût des enzymes reste très élevé. De ce fait, beaucoup de travaux ont été conduits pour réduire ce coût : l'augmentation de la production d'enzymes d'abord, en sélectionnant les souches hyperproductrices et en améliorant les procédés de fermentation, la diminution de la quantité d'enzymes en hydrolyse ensuite, en optimisant la phase de prétraitement ou en améliorant l'activité spécifique de ces enzymes. Au cours de la dernière décennie, les principaux travaux se sont attachés à comprendre les mécanismes d'action des cellulases et d'expression des enzymes afin de faire excréter le complexe enzymatique le plus approprié à l'hydrolyse des substrats ligno-cellulosiques en modifiant les souches avec les outils de biologie moléculaire.

Parmi les moisissures cellulolytiques (*Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Myrothecium*, *Penicillium*, *Trichoderma*, *Sporotrichum*) les espèces du genre *Trichoderma* sont le plus fréquemment utilisées pour l'hydrolyse de la cellulose et des produits lignocellulosiques. Au cours de leur croissance ces *Trichoderma* produisent des quantités importantes d'exoenzymes capables d'hydrolyser complètement la cellulose en glucose [10].

Le microorganisme le plus utilisé pour la production de cellulases est le champignon *Trichoderma reesei*. Les souches sauvages ont la faculté d'excréter, en présence d'un substrat inducteur, la cellulose par exemple, le complexe enzymatique considéré comme le mieux adapté à l'hydrolyse de la cellulose. Les enzymes du complexe enzymatique contiennent trois grands types d'activités : les endoglucanases, les exoglucanases et les cellobiases [11].

D'autres protéines possédant des propriétés indispensables à l'hydrolyse des matériaux ligno-cellulosiques sont également produites par *Trichoderma reesei*, les xylanases par exemple.

La présence d'un substrat inducteur est indispensable à l'expression des enzymes cellulolytiques et/ou hémicellulolytiques. La nature du substrat carboné a une forte influence sur la composition du complexe enzymatique. C'est le cas du xylose, qui, associé à un substrat carboné inducteur comme la cellulose ou le lactose, permet d'améliorer significativement l'activité dite xylanase.

Les hémicelluloses également sont effectivement inducteurs de la production de cellulases et conduisent à des mélanges efficaces en hydrolyse de matériaux lignocellulosiques.

L'utilisation de ces résidus présente néanmoins un certain nombre de limitations potentielles:

- ❖ Leur utilisation impose un prétraitement où seront solubilisées les hémicelluloses.
- ❖ Une variation de matière première végétale comme par exemple un simple changement de variété risque d'entraîner une modification dans la composition du résidu, et par là même une modification de la composition en enzymes.
- ❖ La présence d'inhibiteurs, notamment en fonction du végétal et des conditions de prétraitement, risque de poser des problèmes dans la reproductibilité des cultures
- ❖ La forte teneur en xylose des résidus (issus de paille par exemple) induit des hémicellulases qui ne sont pas forcément requises pour hydrolyser un substrat déjà débarrassé de la grande majorité de ses hémicelluloses.

## **2. LES PRODUITS BIOBASES ISSUS DES SUCRES PROVENANT DE LA BIOMASSE**

En 2004, un rapport du Département américain de l'Energie (DOE) a identifié douze molécules plateforme qui peuvent être produites à partir de sucres issus de la biomasse via une conversion biologique ou chimique [12].

Les douze molécules plateforme peuvent être ultérieurement converties en un grand nombre de produits chimiques ou matériaux à haute valeur ajoutée.

Les douze molécules plateforme issus de sucres sont les 1,4-diacides (succinique, fumarique et malique), l'acide 2,5-furane dicarboxylique, l'acide 3-hydroxypropionique, l'acide aspartique, l'acide glucarique, l'acide glutamique, l'acide itaconique, l'acide lévulinique, le 3-hydroxybutyrolactone, le glycérol, le sorbitol et le xylitol/arabinitol.

A titre d'exemple, l'acide succinique peut être produit à partir de biomasse à l'aide de nouvelles bactéries comme biocatalyseur [13].

### III. VALORISATION PAR VOIE BIOCHIMIQUE

#### 1. BIODIESEL

Le biodiesel est un mélange d'alkyl- esters (habituellement méthyle ou éthyle -esters d'acides gras aminés et a montré de bonnes propriétés de carburant pour les transports [15]. La production de biodiesel a été réalisée à grande échelle sur les 20 dernières années et l'industrie est mature.

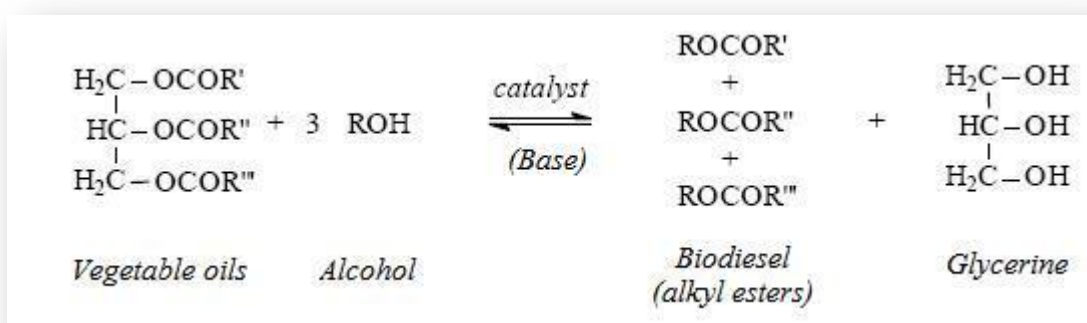
En Europe, il y a environ 245 usines de biodiesel existantes [16], dont la plupart utilise l'huile de colza comme matière première et a une production de capacité entre 10 et 50.000.000 litres/an [17].

Actuellement, le biodiesel est disponible aux stations d'essence dans la plupart des pays de l'UE .

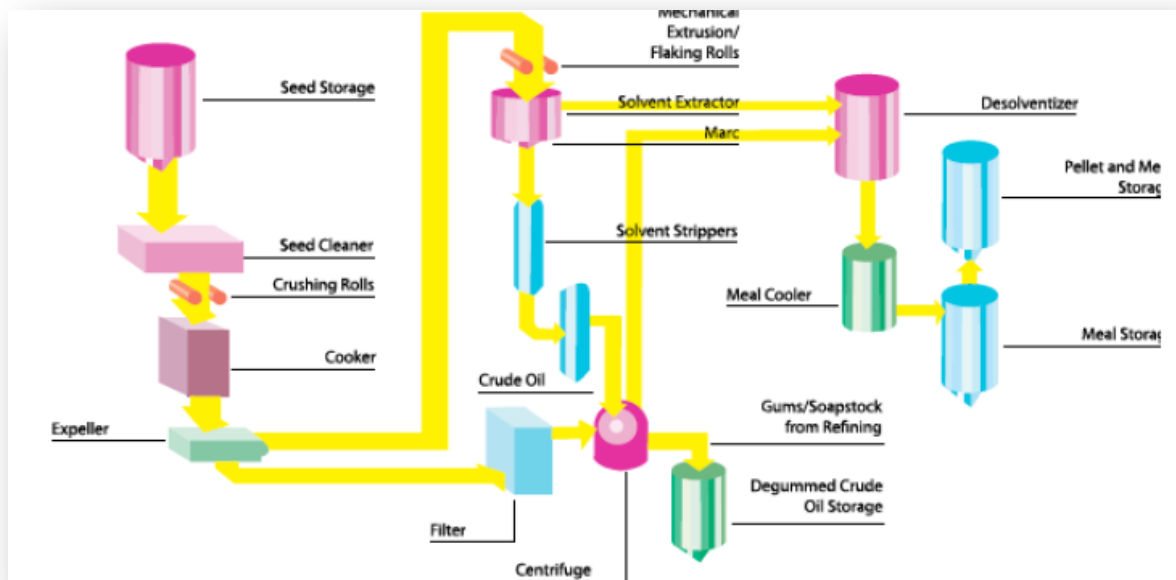
Le biodiesel est produit par transestérification de tri- acyl- glycérides (TAG) de pétrole avec du méthanol ou de l'éthanol , à l'aide d'un catalyseur.

Quatre méthodes de transestérification existent :

1) avec des alcools et les catalyseurs alcalins (figure 5) (homogène ou hétérogène), 2) avec les alcools et les catalyseurs acides (homogène ou hétérogène) , 3) non- catalysée avec méthanol supercritique [18] , et 4) la bio-catalyse utilisant des lipases combinées à des alcools [19] ou au CO2 supercritique [20] .



**Figure 5** : Réaction de transestérification à la base de la production de biodiesel de première génération (FAME)



**Figure 6 :** Représentation schématique du procédé de prétraitement des graines de Colza [5]

L'huile de Colza est un substrat favorable dans la production du biodiesel et plusieurs technologies sont mises en œuvre dans cette optique et qui sont représentées dans le tableau 3.

**Tableau 3 :** Les technologies de production du biodiesel à partir d'huile de Colza [5]

Type of catalysis	Catalyst	Catalyst amount (%)	Alcohol, alcohol to oil ratio	Reaction conditions	Ester yield (%)	Ester conversion (%)
Alkaline soluble catalyst	KOH	1	MeOH, 6:1	65 °C, 2 h	96	-
Solid catalyst	KF/Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	MeOH, 12:1	65 °C, 1 h	-	92.5
Non catalytical	-	-	MeOH, 42:1	350 °C, 45 MPa, 4 min	-	95
Lipase	Source: <i>Candida Antarctica</i> , homogeneous	3	MeOH, 4:1	35 °C, 12 h, t-BiOH solvent	95	95



## 2. ETUDE COMPARATIVE ENTRE LE DIESEL ET LE BIODIESEL DU POINT DE VUE COMPORTEMENT HYDRODYNAMIQUE

Dans ce projet, on a choisi de faire une comparaison, entre le diesel issu du fractionnement du pétrole et le biodiesel, surtout sur le comportement hydrodynamique, dans la conduite d'injecteur d'un moteur à combustion interne. Une étude a été réalisée par des méthodes basées, sur la mécanique des fluides numérique (CFD), pour réaliser des simulations numériques, à l'aide du Code\_Saturne qui est le logiciel généraliste de Mécanique des Fluides Numérique développé par EDF.

Ce dernier permet de modéliser les écoulements incompressibles ou non, et cela avec ou sans turbulence.

Comme la majorité des codes CFD, il nécessite un logiciel de maillage et de visualisation; pour cela nous avons utilisés la plateforme Salomé développé aussi par EDF.

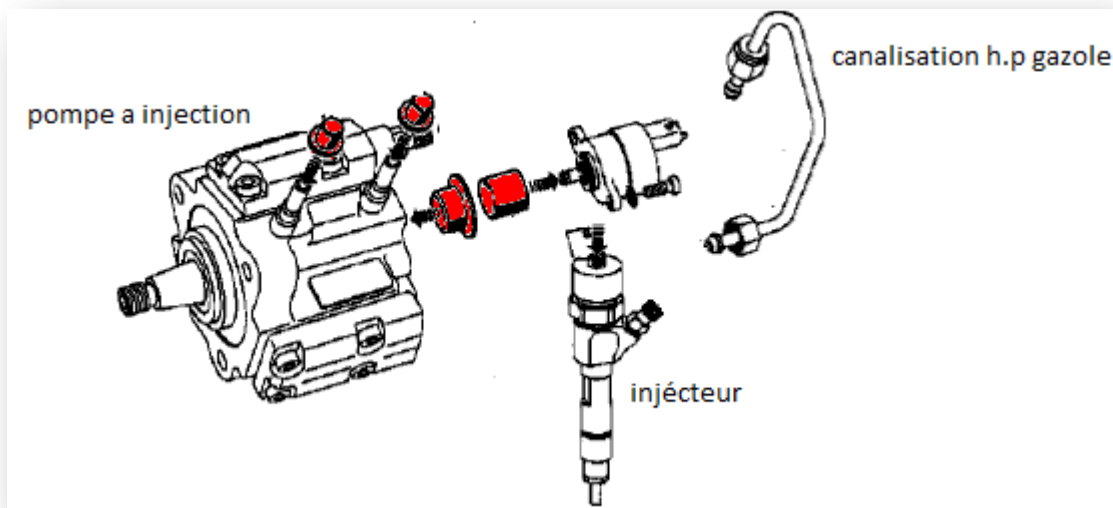
Plusieurs auteurs ont utilisés ce logiciel par exemple : Geoffrey<sup>1</sup> qui a validé le logiciel Code\_Saturne par une étude tridimensionnelle d'un écoulement gaz-solide en montrant qu'il permet de reproduire d'une manière satisfaisante les profils axiaux de gradients de pression. Il a aussi été utilisé dans d'autres travaux de thèse ont utilisés le Code\_Saturne Saulnier<sup>2</sup>.

### COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES

**Tableau 4** : Comparaison des caractéristiques du Diesel et du Biodiesel

Caractéristiques	Diesel	Biodiesel
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> , à 15°C)	830	880
Viscosité à 40°C (mm <sup>2</sup> /s-1)	3-5	4
Indice de cétane	49-52	50-53
PCI Massique à 20°C (KJ/kg-1)	42 300	37 700
PCI Volumique à 20°C (KJ/L-1)	35 000	33 000
Point de trouble en °C	-5	-3
Teneur en soufre (mg/kg-1)	350	<0.1

On va s'intéresser dans ce travail à l'écoulement du fluide (diesel et biodiesel) dans la canalisation haute pression dans un moteur à combustion interne plus précisément moteur diesel. La canalisation se situe entre la pompe à injection et l'injecteur comme montre la figure 8.



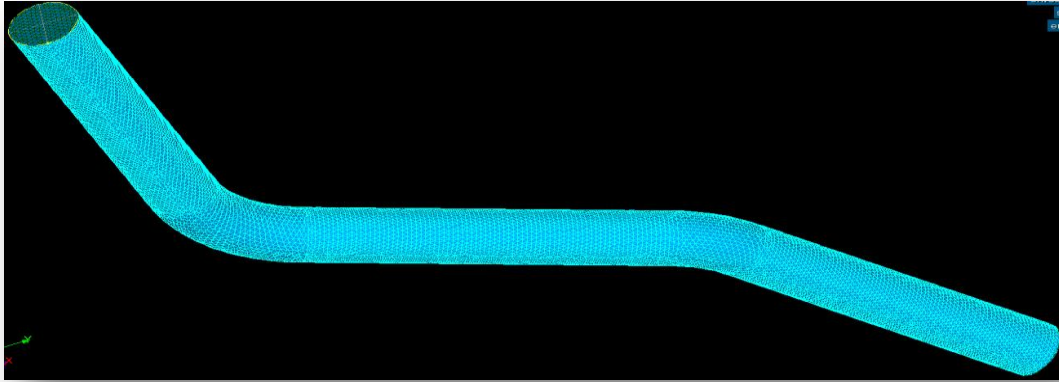
**Figure 7** : Circuits de gazole entre la pompe à injection et l'injecteur

Les conditions opératoires d'utilisation sont :

La vitesse d'injection du gazole est de l'ordre de 300m/s avec une pression de 300 bars. Des simulations de l'écoulement du diesel et du biodiesel dans la canalisation à une vitesse réduite et pression atmosphérique ont été effectuées afin de visualiser et comparer les résultats de l'écoulement. Pour cela l'étude comporte trois étapes importantes : géométrie et maillage, conditions aux limites et calcul, résultats et poste traitement.

### Géométrie et maillage

La figure 8 montre le maillage adopté pour cette étude, on a choisi un maillage tétraédrique suffisamment fin, afin d'avoir accès aux informations les plus exactes possibles, tels que le champ de pression, le champ de vitesse...etc.



**Figure 8 :** Maillage tétraédrique de la canalisation

### Conditions aux limites et calcul

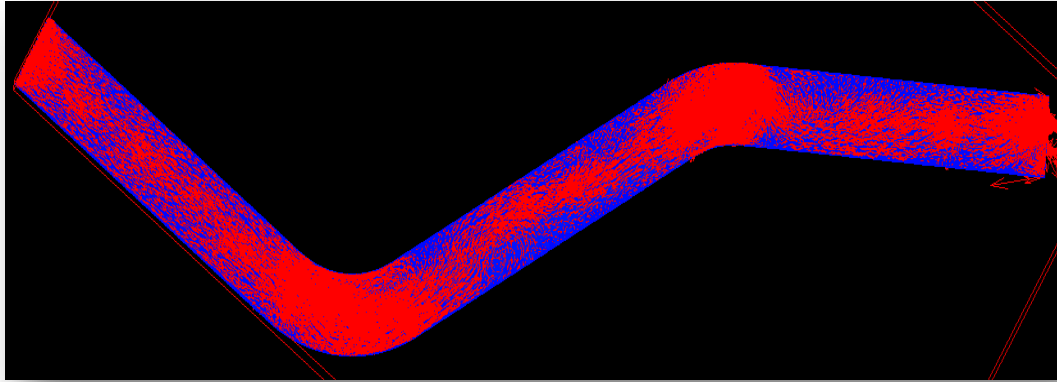
Les conditions aux limites utilisées dans nos calculs sont :

- Condition de non-glissement à la paroi  $V_{(x, y, z)} = 0$ .
- Vitesse d'entrée  $V_x = 5\text{m/s}$ .
- Pression atmosphérique à la sortie.

En ce qui concerne la turbulence nous avons utilisé le modèle K- $\epsilon$  pour simplifier l'étude. De plus deux simulations ont été réalisées pour le diesel et le biodiesel, avec les mêmes conditions aux limites et le même nombre d'itérations.

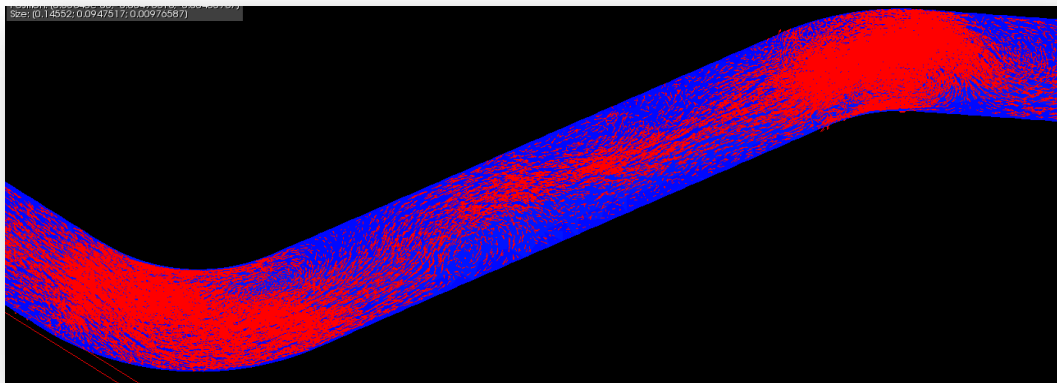
### Résultats et post-traitement

Voici les résultats obtenus pour le cas du diesel. La figure 9 représente le champ de vitesse et le comportement de l'écoulement du diesel dans la canalisation.



**Figure 9 :** Champ de vitesse et comportement de l'écoulement du diesel dans la canalisation

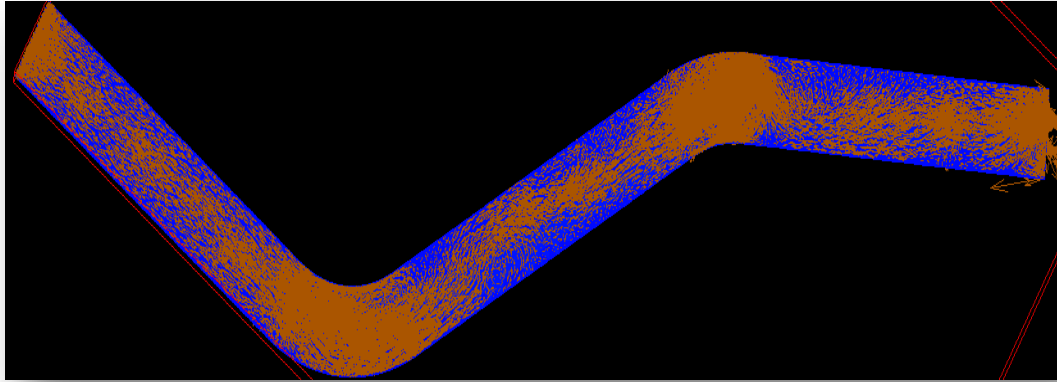
La vitesse  $V_x$  a été relevé sur la distance  $x=0,1m$  de l'entrée de la canalisation, nous avons trouvé que cette vitesse moyenne qui représente le diesel et le biodiesel respectivement qui égale à 4,85 et 4,84 m/s.



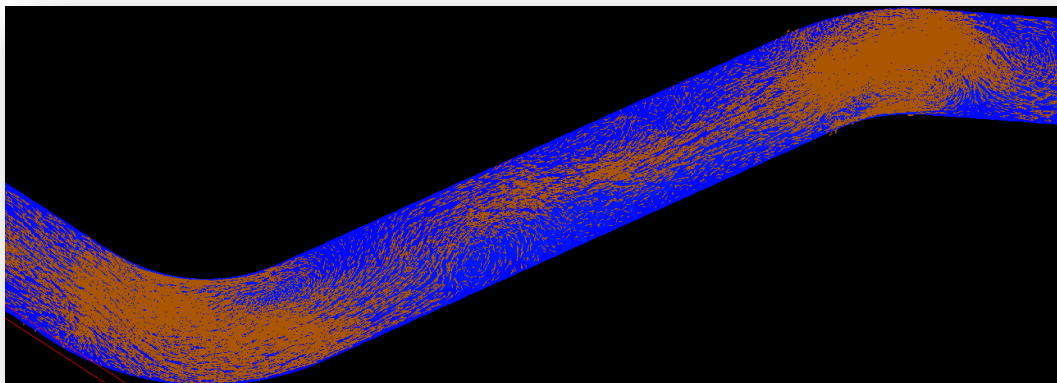
**Figure 10 :** Les zones de turbulences du diesel dans la canalisation

Dans la Figure 10 on observe les zones de turbulence formées dans et après les coudes.

Ce phénomène est tout à fait normal, à cause de la géométrie. Ce qui nous intéresse c'est de comparer l'ordre de grandeur des tourbillons.



**Figure 11 :** Champ de vitesse et comportement de l'écoulement du biodiesel dans la canalisation



**Figure 12 :** Les zones de turbulences du biodiesel dans la canalisation

### Conclusion

D'après les comparaisons effectuées, nous pouvons dire que le biodiesel est un carburant très proche du diesel, tant qu'au niveau des caractéristiques qu'au niveau de l'énergie libérée. Nous avons remarqué également que lors de l'utilisation, la pollution du biodiesel est largement plus faible que celle du diesel normal. Cependant, si nous regardons en amont de la production du biodiesel (culture surtout) nous constatons que la pollution devient importante (érosion, engrais et pesticides).

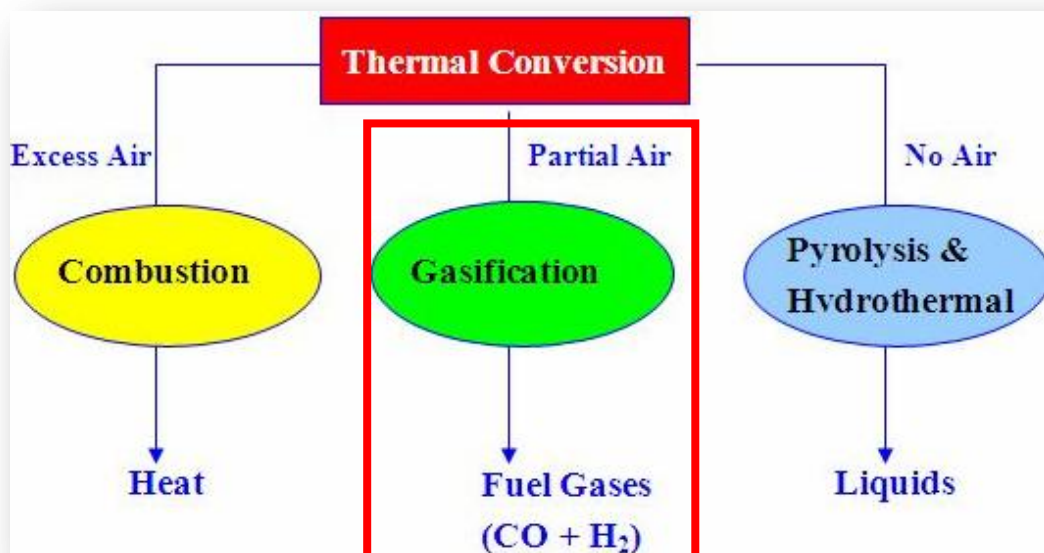
Par la comparaison hydrodynamique, on observe le même ordre de grandeur de la turbulence dans la canalisation, que ce soit pour le diesel ou le biodiesel.

De plus, la différence des vitesses moyennes calculées pour les deux fluides sur la même distance sont quasiment identiques, cette légère différence est due à la différence de la viscosité, cette dernière est à l'origine de la perte de l'énergie cinétique de l'écoulement. Donc on peut conclure que le comportement de l'écoulement du biodiesel et du diesel est le même ce qui en fait un bon remplaçant connaissant ses atouts écologiques.

## IV. VALORISATION PAR VOIE THERMO-CHIMIQUE :

### 1. VOIE THERMOCHIMIQUE PRIMAIRES

Les voies primaires de conversion thermique de la biomasse sont schématisées à la figure 14.



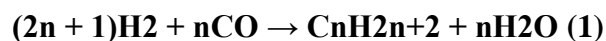
**Figure 13 :** Voies primaires de conversion thermique de la biomasse

La combustion de la biomasse a été un des plus anciens moyens de l'humanité de dériver de l'énergie à partir de la biomasse. La conversion de la biomasse solide en carburant liquide ou gazeux en la chauffant en présence d'une quantité limitée d'oxygène peut cependant, augmenter fortement l'efficacité générale, tout en permettant la conversion de la biomasse en produits utiles. Lorsque la biomasse est chauffée avec environ un tiers de l'oxygène nécessaire

à une combustion efficace, elle gazéifie en un mélange contenant principalement du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, mélange obtenu est appelé gaz de synthèse ou syngas. La biomasse peut être aussi liquéfiée par pyrolyse ou par d'autres technologies telles que la liquéfaction hydrothermale. La gazéification conduisant au syngas et la pyrolyse conduisant à des liquides (bio-huiles) sont des procédés voisins de chauffage en présence d'une quantité limitée d'oxygène. La gazéification permet la présence d'une faible quantité d'oxygène, la pyrolyse n'en permet virtuellement pas.

La gazéification et la pyrolyse sont classiquement suivies par un procédé de synthèse Fischer-Tropsch ou une fermentation. La combinaison de la gazéification de la biomasse et de la synthèse Fischer-Tropsch est considérée comme une des routes les plus prometteuses pour produire des carburants et des produits biobasés.

La synthèse Fischer-Tropsch est une réaction chimique catalysée dans laquelle le gaz de synthèse est converti en hydrocarbures liquides de différents types. Le procédé implique de nombreuses réactions chimiques compétitives. Les réactions les plus importantes sont celles conduisant à la formation d'alcanes suivant l'équation ci-dessous:



Outre la formation d'alcanes, les réactions compétitives conduisent à la formation d'alcènes, d'alcools, et d'autres hydrocarbures oxygénés. Habituellement, seulement des quantités relativement faibles de ces produits non hydrocarbures sont formés, quoique des catalyseurs favorisant certains de ces produits aient été développés. Des catalyseurs Fischer-Tropsch sont ainsi capables de produire un mélange d'alcools qu'il convient de séparer pour isoler l'éthanol.

Parmi les sociétés actives dans la voie thermochimique comportant une synthèse catalytique, on peut citer Range Fuels aux Etats-Unis et CHOREN en Allemagne.

Des microorganismes tels que des bactéries anaérobies sont aussi utilisées pour fermenter le gaz de synthèse ou les bio-huiles en carburants tels que l'éthanol.

Les proportions relatives de cellulose et de la lignine est un des facteurs déterminants dans l'identification de la pertinence d'espèces de plantes pour le traitement ultérieur en cultures énergétiques.



En général, pour le charbon, deux types d'analyse du solide sont faites : une analyse immédiate qui donne l'humidité, la teneur en matières volatiles, la teneur en cendres et en carbone fixe et une analyse élémentaire donnant sa composition en C, H, O, N et S exprimée sur base sèche.

Sans doute, il existe diverses façons de subdiviser la biomasse, cependant nous nous intéresserons plus particulièrement à la biomasse sèche encore appelée biomasse lignocellulosique. Cette dernière peut être utilisée comme combustible.

Elle est utilisée dans plusieurs secteurs pour satisfaire les besoins énergétiques (production de chaleur et d'électricité par le biais des traitements thermo-chimiques dans notre cas). La biomasse peut également servir à la production de biodiesel (par traitement biochimique). Cependant, l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques et industrielles ne peut se réaliser qu'à condition que les besoins (nature, caractéristiques, évolution), les ressources (nature, volumes disponibles, caractéristiques, qualité, lieu...) et les moyens technologiques associés (valorisation énergétique par voie humide et voie sèche...) soient bien identifiés.

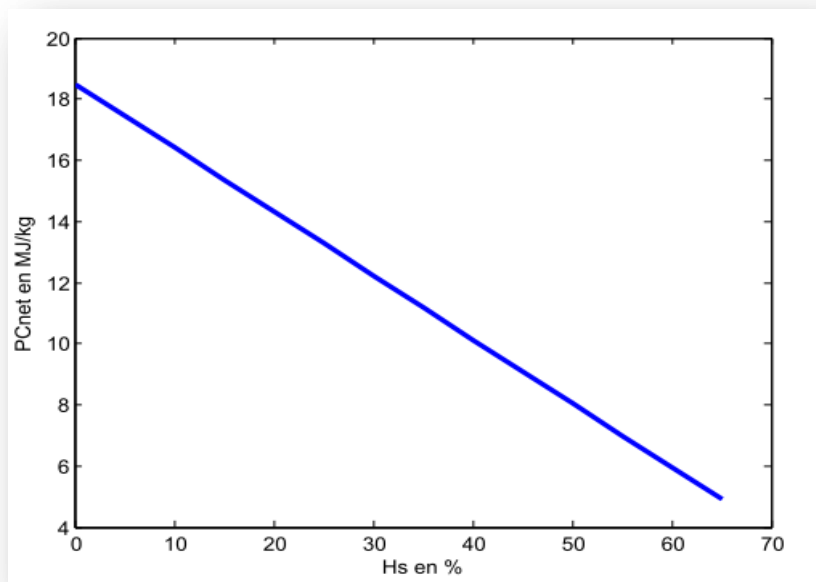
La biomasse présente diverses propriétés inter-liées, dont certaines ont une influence sur la conversion de thermo-physico-chimique de la biomasse :

- ✓ Le pouvoir calorifique : c'est la quantité de chaleur libérée lors de la combustion complète.
- ✓ Le taux d'humidité : exprimé généralement en pourcentage, représente un facteur déterminant du rendement thermique du système mais aussi de ses rejets dans l'atmosphère.
- ✓ La densité (masse volumique) : c'est le rapport de la quantité de matière (masse) d'un corps sur l'unité de volume.
- ✓ Le taux de cendres : on définit le taux de cendres comme un sous-produit de la combustion qu'il faut stocker, valoriser ou éliminer.
- ✓ La granulométrie : elle est définie comme étant la mesure des dimensions des particules qui constituent un échantillon de la matière.

On va s'intéresser à la définition de ces propriétés caractéristiques de la biomasse.

L'humidité est un facteur qui est en interaction avec l'aération. Elle est proportionnelle à l'espace lacunaire occupé par l'air, riche en vapeur d'eau. L'humidité est un paramètre important qui influe sur l'évaluation du pouvoir calorifique inférieur (PCI) du combustible, car plus le taux d'humidité est grand plus son PCI est petit (voir la figure 15).

Dans ce tableau, pour une valeur de taux d'humidité de 18,5% de bois broyé, le PCI est de 14 616 kJ/kg et pour une humidité de 26,7%, le pouvoir calorifique inférieur a une valeur de 11 489 kJ/kg. Donc, quand le taux d'humidité est grand, le PCI devient petit. L'humidité influe aussi bien sur le paramètre température de combustion et sur la densité du déchet de la biomasse.



**Figure 14 :** Variation du Pouvoir Calorifique en fonction de l'humidité totale du biocarburant

$$PC_{net} = \frac{[PC_{net\text{biomasse anhydre}}(100-H_s) - 2,44*H_s]}{100} \text{ (en MJ/kg)} \quad (2)$$

Avec :

$H_s$  : l'humidité totale du biocombustible (en %)

**2,44** : correspond à l'énergie d'évaporation de l'eau

$PC_{net}$  (Pouvoir Calorifique net) qui est une fonction gradient de l'humidité.

En terme économique de transport et de transformation le choix de résidus de biomasse est primordiale.

## 2. GAZIEFICATION (LIGNINE)

Dans ce projet, on se propose de valoriser la lignine issue des résidus de colza en terme énergétique par gazéification.

Après avoir caractérisé la biomasse il existe plusieurs techniques de transformation illustrées dans la figure 16 ;

- les procédés de conversion thermo-chimique (voie sèche) : ils regroupent trois types de conversion : la combustion, la pyrolyse et la gazéification.
- les procédés de conversion physico-chimique (voie humide) : fermentation, extraction mécanique, méthanisation.

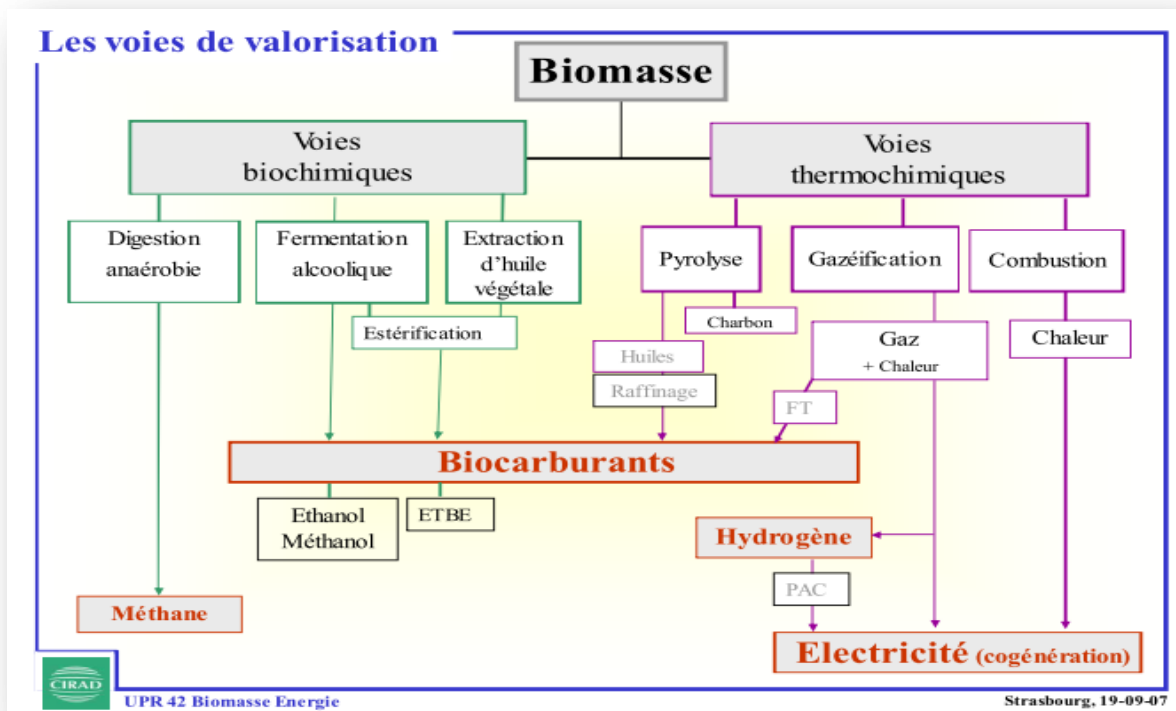


Figure 15 : Représentation schématique de la valorisation énergétique de la biomasse

La figure 16 montre deux grandes voies de conversion énergétique de la biomasse :

Les voies biochimiques regroupent trois ensembles de décomposition par action bactérienne : la digestion anaérobie, la fermentation alcoolique et la mécanique d'extraction d'huile végétale.

- Digestion anaérobie : Par action bactérienne en absence d'air sur la biomasse liquide (exemple des algues), cela permet de produire du méthane.
- La fermentation alcoolique et l'extraction d'huiles végétales conduisent à l'obtention d'esters qui par une succession de réactions chimiques aboutissent à la production d'Ethanol, de Méthanol et d'Ethyl-Tertio-Butyl-Ether (ETBE).

Les voies thermochimiques : elles conduisent à la pyrolyse, gazéification, et la combustion des substances organiques et végétales.

On s'intéresse ici à la technique de gazéification, qui consiste en une transformation thermochimique de la biomasse en présence d'un réactif ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , et de  $\text{O}_2$ ) pour obtenir un mélange gazeux riche en  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ . Mais aussi à l'extraction de la lignine qui sera ensuite gazéifiée pour la production de l'énergie. Les proportions de chaque produit de gaz sont très sensible aux conditions opératoires (température, vitesse de chauffe, temps de séjour) et aux types de réacteurs. Il est aussi important de souligner que les compositions biochimiques de la biomasse se dégradent à différents niveaux de température : Hémicelluloses entre 200 et 350°C, Cellulose entre 250 et 400°C et Lignine 200 et 500°C.

L'objectif visé ici est d'optimiser la production des gaz de synthèse riche en pouvoir calorifique inférieur, en utilisant la technique d'extraction de la lignine dont le pouvoir calorifique est de 26,63 MJ/Kg (tableau 5).

**Tableau 5** : Pouvoir calorifique massique des principaux constituants de la biomasse [21]

COMPOSANT	POUVOIR CALORIFIQUE (MJ/Kg)
Cellulose et hémicelluloses	17,46
Lignine	26,63

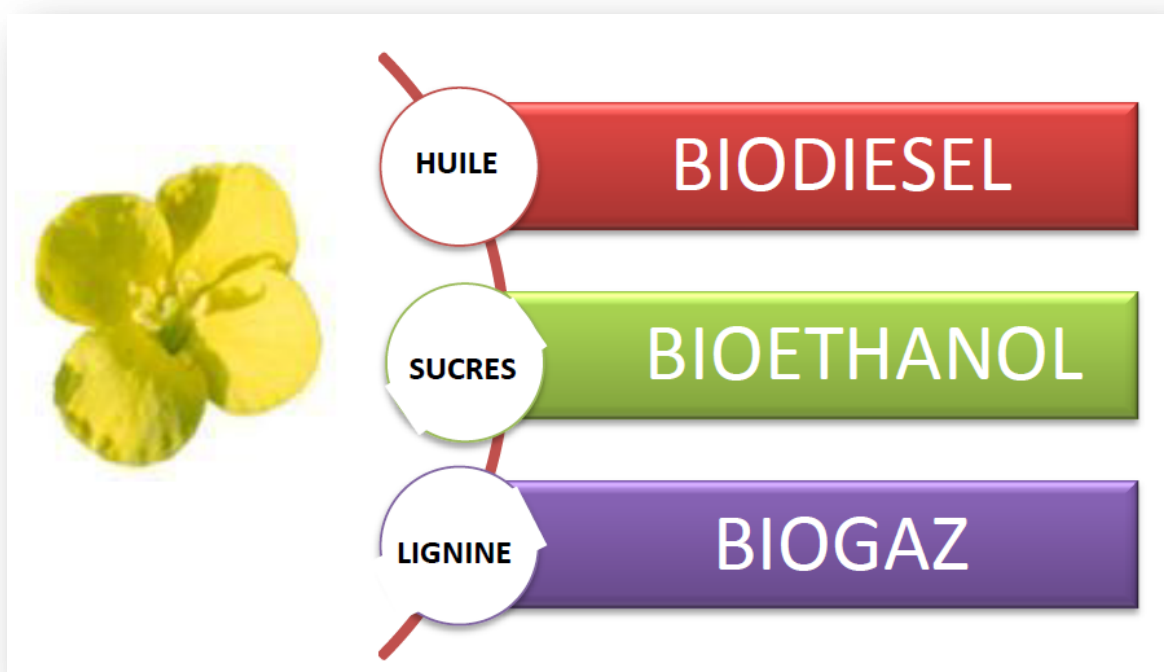
## CONCLUSION

Dans le travail présenté dans ce rapport, on a étudié la possibilité de la mise à jour d'une bioraffinerie de colza, et le mettre à niveau en intégrant traitement des résidus de colza pour la production de la valeur ajoutée produits.

Un intérêt particulier a été accordé à la production de l'éthanol cellulosique, biodiesel et biogaz.

Une étude de faisabilité, un scénario d'expansion et de modernisation d'une usine de biodiesel déjà existante à une bioraffinerie du tout colza serait intéressante à réaliser dans l'optique de concrétiser la proposition faite dans le présent travail.

Il existe actuellement une maturité technologique et scientifique qui permettrait d'intégrer les flux de production de l'éthanol, du biogaz, et du biodiesel de qualité supérieure, utilisant à la fois les voies chimiques et les voies biologiques.



**Figure16 :** Les voies de la valorisation du Tout Colza abordées dans ce travail

## ***BIBLIOGRAPHIE***

- [1] Solomon B.D. Barnes J.R., et Halvorsen K.E. (2007). « Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy». *Biomass and Bioenergy*, 31(6), 416-425.
- [2] Cherubini F. (2010). « The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals ». *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412-1421.
- [3] Kamm B., Kamm M., Gruber P.R et Kromus S. (2006). « Biorefinery systems». An overview. In: Kamm B., Gruber P.R. & Kamm M., eds. *Biorefineries. Industrial processes and products. Statu quo and future directions. Vol.1.* Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 3-40.
- [4] Gnansounou, E., et Dauriat, A., [lasen.epfl.ch/webdav/site/lasen/shared/bioethanol.pdf](http://lasen.epfl.ch/webdav/site/lasen/shared/bioethanol.pdf), (dernière visite le 2008).
- [5] Ethanol Production From Rape Straw: Part Of An Oilseed Rape Biorefinery ; These ; Ethalia Arvaniti ;2010
- [6] Himmel ME, Ding S, Johnson DK, Adney WS, Nimlos MR, Brady JW, et al. Biomass recalcitrance: Engineering plants and enzymes for biofuels production. *Science* 2007; 315: 804-7.
- [7] Chandra RP, Bura R, Mabee WE, Berlin A, Pan X, Saddler JN. Substrate pretreatment: The key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics?. *Biofuels* 2007; 108: 67-93.
- [8] Rosgaard L, Pedersen S, Langston J, Akerhielm D, Cherry JR, Meyer AS. Evaluation of minimal *Trichoderma reesei* cellulose
- [9] [http://www1.energy.gov/biomass/abcs\\_biofuels.html](http://www1.energy.gov/biomass/abcs_biofuels.html)
- [10] S. Roussos et M. Raimbault, Hydrolyse de la cellulose par les moisissures 1. - screening des souches cellulolytiques, *ann. Microbiol. (inst. Pasteur)* 1982, 133 b, 455-464]

[11] MARGEOT Antoine et MONOT Frédéric. Procédé de production d'alcool dans un contexte de bioraffinerie. WO 2009/098365. 04.05.2011.

[12] T. Werpy and G. Petersen .Top Value Added Chemicals from Biomass Volume I— Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas. 2004.

[13] <http://www1.eere.energy.gov/industry/chemicals/pdfs/succinic.pdf>

[14] D. I. BRANSBY, Cellulosic Biofuels Technologies, Auburn University, 2007.

[15] Pinto AC, Guarieiro LLN, Rezende MJC, Ribeiro NM, Torres EA, Lopes WA et al. Biodiesel : An overview. Journal of the Brazilian Chemical Society. 2005, 16(6B): 1313-30.

[16] European Biodiesel Board. 2010. 20-9-2010. Ref Type: Internet Communication

[17] Larsen R. Rapeseed varieties and state of the art of rapeseed cultivations in Europe. 2010. 8-11-2010. Ref Type: Personal Communication

[18]Saka S, Kusdiana D. Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol. Fuel 2001, 80(2):225-31.

[19] Marchetti JM, Miguel VU, Errazu AF. Possible methods for biodiesel production. Renewable & Sustainable Energy Reviews 2007, 11(6):1300-11.

[20] Jackson MA, King JW. Methanolysis of seed oils in flowing supercritical carbon dioxide. Journal of the American Oil Chemists Society. 1996, 73(3):353-6.

[21] G. Sarlos, P.A. Haldi et P. Verstraete. Traité de Génie civil de l'EPFL. Systèmes énergétiques, 2003, Volume 21.