

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Chimique

Mémoire du Master

Thème

Étude des biocarburants dans le monde

Présenté par :

Slimane GHANEM

Dirigé par :

M. C-E CHITOUR

Soutenu le 17 juin 2015 devant le jury suivant :

Président :	T. AHMED-ZAID	Professeur, ENP
Examinatrices :	R. DERRICHE S.HADDOUM	Professeur, ENP MMA, ENP
Invitée	M.A.AZIZA	Docteur, CDER
Rapporteur	C-E CHITOUR	Professeur, ENP

Promotion : Juin 2015

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout Allah le tout puissant de m'avoir donné la foi, la santé et la volonté de mener à bien mon projet.

Je tiens à remercier très vivement monsieur le Professeur Chems Eddine CHITOUR de m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail. Je le remercie pour tous ses aides, apports, remarques, conseils et orientations pour finaliser ce Projet.

Je remercie les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

M T. AHMED-ZAID, qui me fait l'honneur de présider le jury.

M_{me} R.DERRICHE et M_{me} S.HADDOUM qui me font l'honneur de m'accorder de leur précieux temps pour examiner ce travail.

Mme M.A.AZIZA qui me fait l'honneur d'assister à ma soutenance.

Je remercie tous les membres de l'École Nationale Polytechnique, ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce document.

Dédicaces

« Je tiens à dédier ce travail en premier lieu à mes parents, sans lesquels je n'y serai jamais ici, qui me sont d'un grand soutien par leurs sacrifices et leurs encouragements.

À mes chères sœurs Yamina, M'barka, Lila, Rahma et Louiza

À tous mes amis

À la famille BOUNOUA qui m'a accueilli pendant la préparation de ce travail.

Et à tous ceux qui font partie de ma vie »

Slimane

ملخص:

جرد لحالة الوقود الحيوي في العالم:

يعد استعمال الوقود ذي الأصل الاحفوري في قطاع النقل من اهم أسباب التغيرات المناخية التي يشهدها العالم مؤخرا. ان الوعي الدولي بخطورة الوضع والرغبة في تغييره ساهم بقوة في جعل الوقود الحيوي المرشح الأبرز لتحقيق هذا الهدف.

في هذه المذكرة سنقوم بتحليل قطاع الوقود الحيوي في العالم واخر التطورات التكنولوجية التي يشهدها إضافة الى توقعات تطور السوق الدولية والاثار البيئية والسوسيو-اقتصادية للوقود الحيوي.

الكلمات المفاتيح: الوقود الحيوي، طرق التحويل، الجيل الثاني، توقعات، اثار.

Résumé :

État des lieux des biocarburants dans le monde :

Le monde fait face à des changements climatiques intenses et de plus en plus inquiétants, ceci est dû en grande partie à l'utilisation des carburants, ayant comme origine des sources fossiles en plein déclin, dans le secteur des transports. La volonté mondiale de changer cette situation place les biocarburants comme un candidat favorable pour parvenir à cet objectif.

Ce travail consiste à faire une analyse de secteur des biocarburants dans le monde et des progrès technologiques de cette filière, ainsi que les prévisions d'évolution du marché mondial et leurs enjeux environnementaux et socio-économiques.

Mots clés : biocarburants, procédés de conversion, deuxième génération, perspectives, enjeux.

Abstract :

Inventory of biofuels in the world:

The world faces intense and increasingly worrying climatic changes, this is due mainly to the use of the fuels, having as an origin fossil sources which are full decline, in the transport sector. The world will to change this situation places the biofuels like a favorable candidate to arrive to this objective.

This work consists in making an analysis of sector of the biofuels in the world and technological progress of this die, as well as the forecasts of market trends world and their environmental and socio-economic stakes.

Key words: biofuel, conversion processes, second generation, prospective, stakes

Abréviations :

ADEME: Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

BLC: Biomasse lignocellulosique

BTL: Biomass to liquid

CE: Commission Européenne.

CONCAWE: Conservation of Clean Air and Water in Europe.

Cst: centistokes

EEHV: ester éthylique d'huile végétale

EMHV: ester méthylique d'huile végétale

ETBE: éthyl tertio butyl éther

EUCAR: European council for Automotive Research and development

FAO: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

FFV: Fuel Flexible Vehicles

GES: Gaz à Effet de Serre

Gtep: Giga tonne équivalent pétrole

IFP: Institut Français du Pétrole

Mha: millions d'hectares

OCDE: l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques

OGM: Organisme Génétiquement Modifié

tep: tonne équivalent pétrole

USDA: United States Departement of Agriculture

Index des illustrations

Index des figures :

Figure I.1 : Biocarburant de première génération

Figure I.2 : Principe de la trans-estérification

Figure I.3 : Procédé de production de biogaz

Figure I.4 : Biocarburant de deuxième génération

Figure I.5 : Structure de la cellulose

Figure I.6 : Structure de l'hémicellulose

Figure I.7 : Structure de la lignine

Figure I.8 : Principales voies de conversion de la biomasse lignocellulosique

Figure I.9 : Valorisation de la biomasse par la voie biochimique

Figure I.10 : Principaux acteurs de la voie biochimique

Figure I.11 : schéma réactionnel de production de biodiesel par voie thermochimique (pyrolyse)

Figure I.12 : Schéma réactionnel de production de biodiesel par voie thermochimique (liquéfaction)

Figure I.13 : Schéma d'ensemble gazéification + conversion Fischer-Tropsch

Figure I.14 : Chaîne de valorisation globale : voie thermochimique

Figure II.1 : Consommation mondiale d'énergie dans les transports routiers en 2010

Figure II.2 : Répartition de la production de biodiesel et d'éthanol par grandes zones en 2010

Figure II.3 : Import/export en 2011 d'éthanol et biodiesel carburants dans divers pays et zones

Figure II.4 : Evolution des prix de bioéthanol et biodiesel

Figure II.5: Evolution des prix de bioéthanol et biodiesel à l'horizon 2022

Figure II.6 : Evolution de la production mondiale d'éthanol à l'horizon 2022

Figure II.7 : Répartition par pays de la production et de l'utilisation mondiale d'éthanol en 2022

Figure II.8 : Répartition par pays de la production et de l'utilisation mondiale de biodiesel en 2022

Figure II.9 : Schéma de cycle de vie d'un carburant

Index des tableaux :

Tableau I.1 : Comparaison de différentes propriétés physiques

Tableau I.2 : Composition de la biomasse lignocellulosique

Tableau I.3 : Les principaux procédés de prétraitement(en gras, les procédés exploités à l'échelle industrielle

Tableau I.4 : Résumé des étapes de transformation de la lignocellulose en éthanol

Tableau II.1: Statistiques de consommation en Mtep de l'éthanol carburant par zone géographique

Tableau II.2 : Statistiques de taux d'incorporation de l'éthanol carburant par zone géographique

Tableau II.3 : Statistiques de consommation en Mtep du biodiesel carburant par zone géographique

Tableau II.4 : Statistiques de taux d'incorporation du biodiesel carburant par zone géographique

Tableau II.5 : Résultats des bilans GES des filières biocarburants, comparativement au carburant

Tableau II.6 : Résultats des bilans énergies non renouvelables des filières biocarburants,

Tableau II.7 : Synthèse des principaux enjeux technico-environnementaux des différentes générations de biocarburants

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

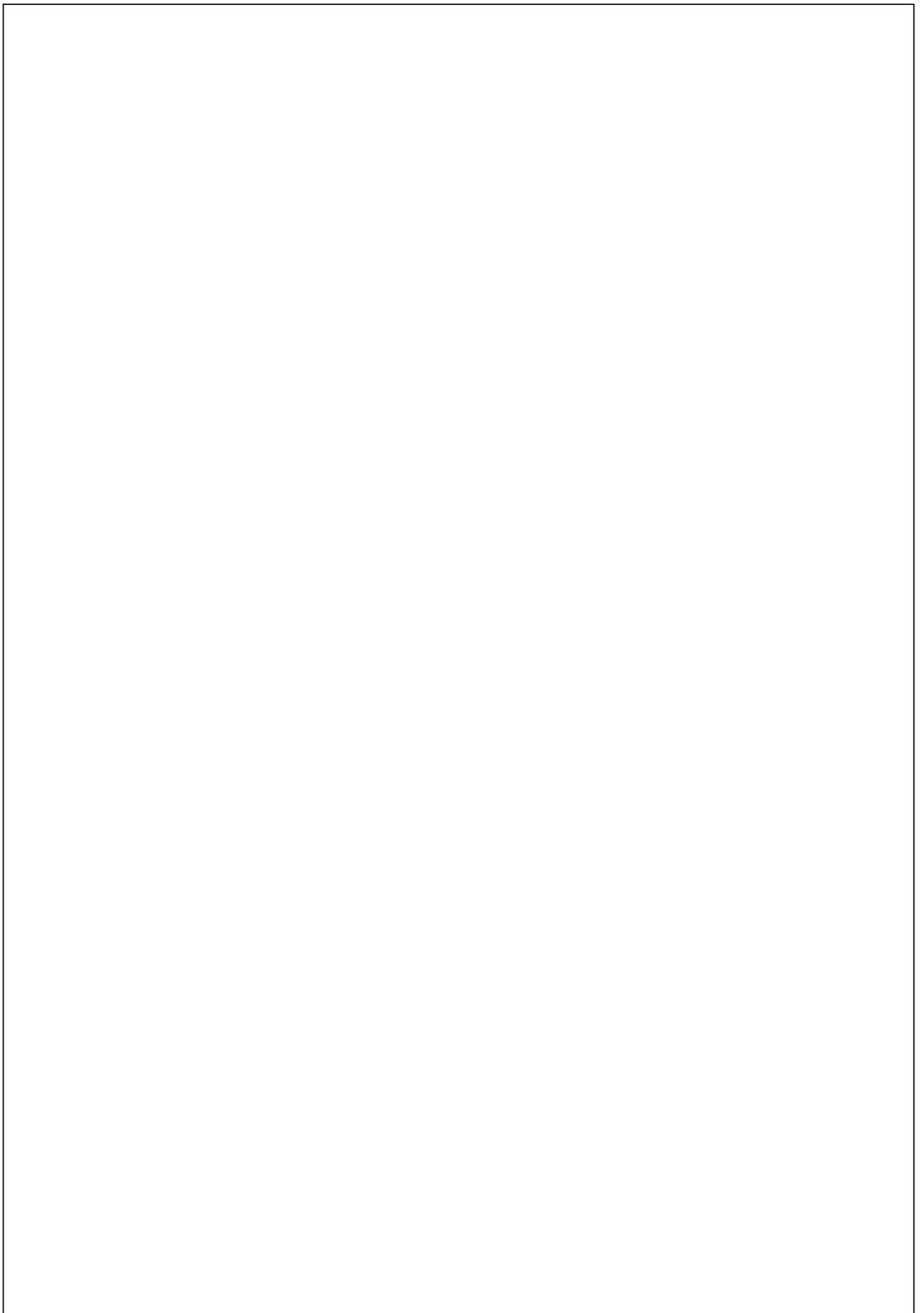
Chapitre I: Généralités sur les biocarburants

I.1. Introduction :.....	3
I.2. Définition	3
I.3. Historique :.....	3
I.4. Différentes générations des biocarburants :.....	4
I.4.1. Les biocarburants de première génération :	4
I.4.1.1. Procédés de conversion :	5
I.4.1.1.1. Bioéthanol :.....	5
I.4.1.1.2. Biodiesel :	6
I.4.1.1.3. Biogaz :.....	7
I.4.2. Les biocarburants de deuxième génération :	8
I.4.2.1. La biomasse lignocellulosique :	8
I.4.2.2. Les voies de valorisation de la biomasse lignocellulosique :	10
I.4.2.2.1. La valorisation par la voie biochimique	11
a- Le prétraitement :.....	12
b- L'hydrolyse de la cellulose :.....	14
c- La fermentation éthanolique et la distillation :	15
d- Séparation de l'éthanol :	15
I.4.2.2.2. La valorisation par la voie thermochimique :.....	16
a- La pyrolyse :	17
b- La liquéfaction directe :.....	18
c- La gazéification :.....	19
I.4.3. Les biocarburants de troisième génération :.....	21
I.4.3.1. Les cultures de microalgues :	22
I.4.3.2. Les applications :	22
I.5. Conclusion :	23

Chapitre II: Etats des lieux des biocarburants dans le monde et leurs enjeux

II.1. Introduction :	25
II.2. Situation mondiale actuelle :	25

II.2.1.Les principaux acteurs :	26
II.2.1.1.Les États-Unis :	27
II.2.1.2.Le Brésil :	27
II.2.1.3.Europe :	28
II.2.1.4. Cuba :	28
II.2.2.Le marché des biocarburants :	29
II.2.2.1.Le bioéthanol carburant :	29
II.2.2.2.Le biodiesel carburant	30
II.2.2.3.Les principaux pays importateurs et exportateurs de biocarburants :	32
II.2.2.4.Les prix :	32
II.3.Prospective sur les biocarburants :	33
II.3.1.Production et utilisation des biocarburants :	34
II.3.2.Évolution du marché mondial de l'éthanol et de biodiesel :	35
II.4.Les enjeux des biocarburants :	37
II.4.1.Enjeux environnementaux :	37
II.4.1.1.Problématique :	37
II.4.1.2.Méthodologie employée :	37
II.4.1.3.Résultats des bilans « du puits à la roue » :	38
II.4.1.4.Interprétation des résultats :	39
II.4.2.Enjeux socio-économiques:	42
II.5.Conclusion :	44
Conclusion générale	45
Références bibliographiques :	46
Annexe 1 :	48



Introduction générale

La sécurité énergétique est un sujet d'actualité, dont toutes les nations du monde se soucient. La recherche de la diversification des sources d'approvisionnement en énergies est au cœur des stratégies énergétiques de ces nations.

De plus, les problèmes de réchauffement climatique et des émissions de CO₂ sont des facteurs qui poussent les états du monde entier à investir dans les énergies dites renouvelables.

Le secteur des transports représente plus du tiers de la consommation énergétique finale mondiale, avec un taux de dépendance de 95 % des produits pétroliers. Cette situation n'est pas rassurante et la recherche des sources alternatives devient de plus en plus une nécessité plutôt qu'un choix.

Parmi les solutions qui présentent un grand intérêt que ce soit économique, environnemental ou social, on trouve les biocarburants.

Dans ce travail, nous allons dans un premier temps, après avoir défini les biocarburants et donné un aperçu historique, présenter les différentes générations des biocarburants qui existent aujourd'hui à l'échelle industrielle et celles qui sont au stade de développement.

Ensuite, nous ferons un bilan sur les biocarburants dans le monde tout en parlant des leaders mondiaux dans ce domaine, de la situation actuelle du marché et des prix de ces derniers.

Après nous donnerons les perspectives mondiales de développement des biocarburants à l'horizon 2030 et l'évolution des marchés.

Enfin, nous aborderons la question des enjeux environnementaux et socio-économiques des biocarburants tout en essayant de montrer leurs avantages et leurs inconvénients.

Chapitre I

Généralités sur les biocarburants

I.1. Introduction :

Le développement des technologies et des systèmes énergétiques plus durable s'impose. Parmi les solutions possibles, celle des biocarburants offre de réelles perspectives, mais qu'est-ce qu'un biocarburant ? Comment sont-ils évolués au fil des années ? Et quelles sont les différentes générations et technologies existantes à l'heure actuelle ?

Dans ce présent chapitre, nous allons essayer de répondre à toutes ces questions.

I.2. Définition

Selon la directive européenne n° 2003/30/CE de mai 2003, la définition des biocarburants est la suivante : « Combustibles liquides ou gazeux utilisés pour le transport et produit à partir de la biomasse », donc obtenus à partir des matières organiques végétales ou animales non fossiles. [1]

Selon l'ADEME « Les biocarburants sont des carburants d'origine agricole. Ils sont obtenus à partir de matières organiques végétales ou animales, appelés encore biomasse et sont utilisés dans les moteurs. »

Un biocarburant est un carburant liquide ou gazeux créé à partir de la transformation de matériaux organiques non fossiles issus de la biomasse, par exemple des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre, etc.) et qui vient en complément ou en substitution du combustible fossile.

Si la langue anglaise n'a retenu qu'une seule appellation « biofuel », plusieurs dénominations coexistent dans la langue française : biocarburant (terme retenu par le Parlement européen), agrocarburant ou carburant végétal.

Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que du CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO_x, SO_x).

I.3. Historique :

En raison des limitations des ressources pétrolières et des préoccupations environnementales, les biocarburants peuvent constituer une alternative aux carburants automobiles traditionnels. Cependant, leur utilisation n'est pas une nouveauté : en 1903, le record mondial de vitesse à 177 km/h est obtenu avec une Gobron-Brillié roulant au bioéthanol.

Aux débuts de l'industrie automobile, à la fin du XIX^e siècle, le pétrole et ses dérivés sont peu employés. Les utilisateurs de carburants se servent plutôt de ce qui n'est pas encore appelé « biocarburant » :

- Nikolaus Otto, inventeur du moteur à combustion interne (1876), a conçu celui-ci pour fonctionner avec de l'éthanol. La Ford T (produite de 1908 à 1927) roule également avec cet alcool.
- Rudolf Diesel, inventeur du moteur portant son nom (1897), se base sur l'huile d'arachide pour faire tourner ses machines.

Au milieu du XX^e siècle, le pétrole devient abondant et bon marché, provoquant un désintérêt des industriels et des consommateurs pour les biocarburants. À la suite des deux chocs pétroliers de 1973 et 1979, le biocarburant devient attractif, mais l'enthousiasme s'estompe en 1986 avec le contre-choc pétrolier, et ceci jusque dans les années 2000.

Mais en 2000, une nouvelle hausse du prix du pétrole, la menace du pic pétrolier, la nécessité de lutter contre l'effet de serre (respect des engagements du protocole de Kyoto en 1997), les menaces sur la sécurité d'approvisionnement et enfin et surtout la surproduction agricole ont conduit les gouvernements à multiplier les discours et les promesses d'aides pour le secteur des biocarburants, la filière bénéficiant d'un régime fiscal particulier avec les États qui financent la majeure partie de leur surcoût d'utilisation. Les États-Unis ont lancé un grand programme de production d'éthanol de maïs. La Commission européenne a souhaité que les pays membres incluent au moins 5,75 % de biocarburants dans l'essence, et, à cet effet, les directives adoptées autorisent les subventions et détaxations, ainsi que l'utilisation des jachères à des fins de production d'agrocultures.

Se basant initialement sur les huiles végétales ou sur les cultures sucrières et céréalières, les modes de production du biocarburant se sont diversifiés. Du charbon de bois aux microalgues en passant par les déchets ménagers, aucune piste n'est négligée. Si l'utilisation du biocarburant n'est pas récente, ce sont les nouvelles voies de production qui pourraient marquer le XXI^e siècle. [2], [3]

I.4. Différentes générations des biocarburants :

On distingue trois générations de biocarburants :

I.4.1. Les biocarburants de première génération :

Ils sont principalement de trois types :

- **le bioéthanol** : il est produit à partir de canne à sucre, de céréales et de betterave sucrière. Il est utilisé dans les moteurs à essence ;
- **le biodiesel** : il est dérivé de différentes sources d'acides gras, notamment les huiles de soja, de colza, de palme et d'autres huiles végétales. Il est utilisé dans les moteurs diesel.
- Le **biogaz** ou **biométhane** qui peut être produit à partir de la digestion du fumier liquide et d'autres types d'alimentations digestes.

L'exploitation de ces sources d'énergie se fait sur des terres cultivables, et font donc une concurrence directe aux produits destinés à l'alimentation. Afin d'obtenir une rentabilité maximale, ces cultures sont souvent génétiquement modifiées (OGM) car elles ne sont pas soumises aux mêmes restrictions que les composés alimentaires.

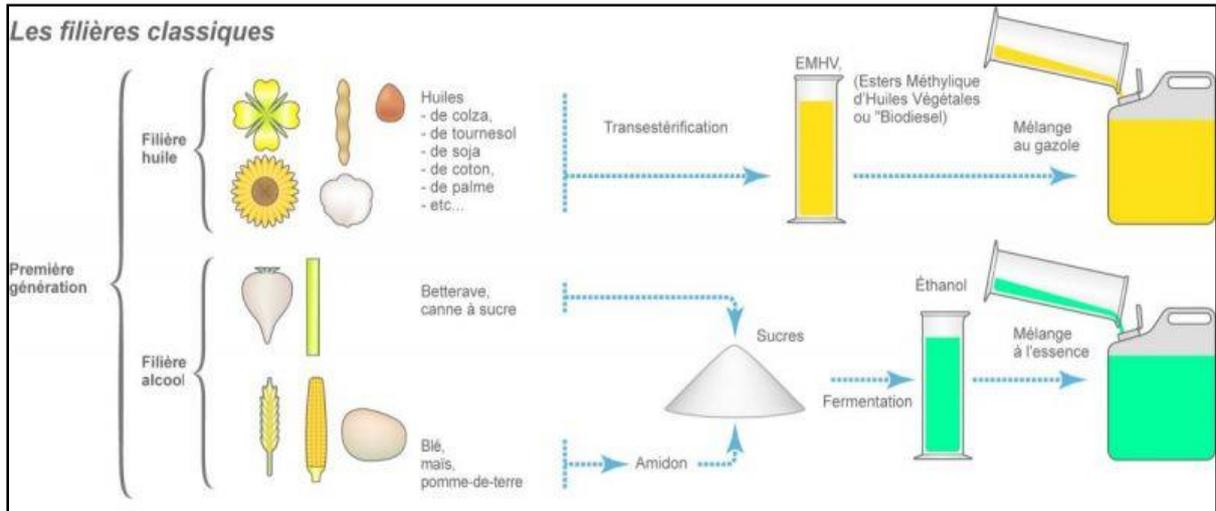


Figure I.1 : biocarburant de première génération

Source : IFP énergies nouvelles

I.4.1.1. Procédés de conversion :

I.4.1.1.1. Bioéthanol :

La majeure partie de l'éthanol est fabriquée par fermentation des matières premières d'origine végétale même s'il existe encore une production industrielle d'éthanol à partir d'éthylène d'origine pétrolière (en Arabie saoudite).

Les matières premières alcooligènes pour la production de bioéthanol de première génération se répartissent en deux grandes catégories : [5]

- Les plantes sucrières comme la betterave, la canne à sucre, dans une moindre mesure, le sorgho sucrier qui renferment des sucres directement fermentescibles en éthanol.
- Les plantes céréalières telles que le maïs, le blé, l'orge et les tubercules comme la pomme de terre et le manioc, dans lesquels les sucres sont présents sous forme d'un polymère, l'amidon, d'où dérive leur autre dénomination de plantes amylicées. L'amidon doit être hydrolysé en monomères de sucres avant d'être transformé en éthanol.

a- Procédé de conversion :

- **La fermentation éthanolique :** [5]

L'éthanol est produit par voie biologique. Les sucres sont convertis en éthanol par l'action fermentaire des micro-organismes, levures et bactéries.

Les processus fermentaires sont exploités par l'homme depuis le sixième millénaire avant Jésus-Christ pour la fabrication des boissons alcoolisées. En 1815, l'équation stœchiométrique de transformation de glucose en éthanol est établie par GAY-LUSSAC.



Le rendement théorique de cette réaction, appelé rendement de GAY-LUSSAC, établit que 51,1 kg d'éthanol peuvent être fabriqués à partir de 100 kg de glucose. (Rendement = 51,1 %)

À l'échelle industrielle, le rendement de la production d'éthanol est généralement compris entre 90 et 92% du rendement théorique, soit un rendement réel d'environ 47 %.

Les micro-organismes utilisés sont surtout les levures appartenant aux genres *saccharomyces*.

- **l'extraction d'éthanol : [1]**

L'extraction d'éthanol obtenue lors de l'étape de fermentation se fait en général par distillation. Cette distillation s'effectue en deux étapes :

- La première est une distillation classique produisant de l'éthanol à une teneur voisine de l'azéotrope.
- La seconde est une distillation azéotropique, qui conduit à l'éthanol anhydre (99,8%) et qui utilise généralement des solvants entraîneur comme le cyclohexane, le di éthyle éther, le n-pentane.

b- du bioéthanol à l'ETBE :

Les pétroliers préfèrent transformer l'éthanol en ETBE qu'est un carburant obtenu par une synthèse chimique effectuant l'addition catalytique d'éthanol sur l'isobutène. Il peut être incorporé à l'essence jusqu'à hauteur de 15 %. [1]

L'ETBE aurait l'avantage d'être mieux adapté aux moteurs. En effet, l'incorporation directe de l'éthanol à l'essence pose certaines difficultés techniques : le mélange essence/éthanol a une pression de vapeur plus élevée et tolère mal la présence de traces d'eau.

I.4.1.1.2. Biodiesel :

Le biodiesel de première génération est obtenu à partir d'huile végétale (triglycéride) par une réaction chimique avec un alcool (méthanol ou éthanol) et en présence d'un catalyseur (par exemple hydroxyde de sodium ou potassium). Ce type de réaction est appelé transestérification. À la fin de cette réaction on aura du EMHV ou du EEHV (selon le réactif utilisé méthanol ou éthanol)

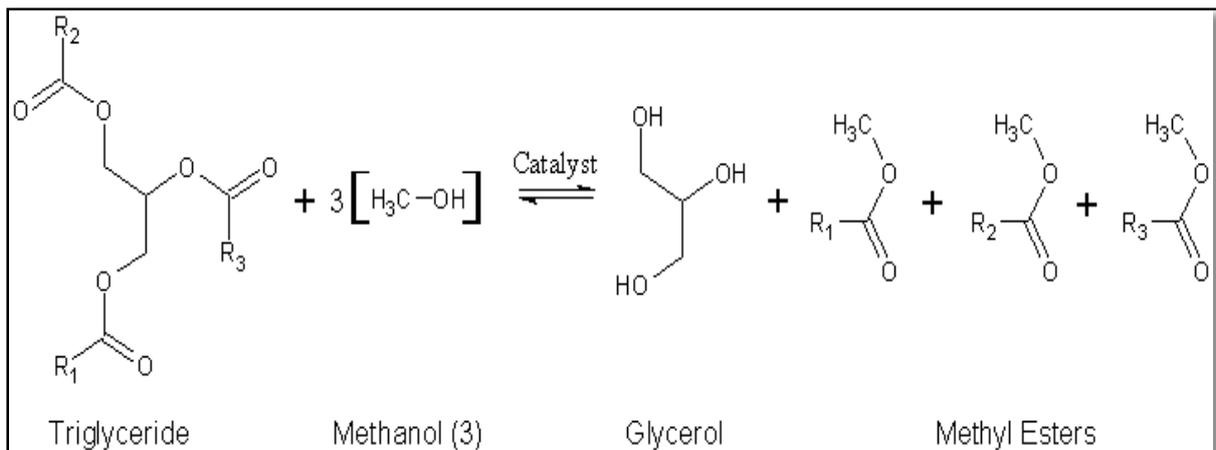


Figure I.2 : Principe de la trans-estérification

Source : [4]

Les propriétés physiques des esters méthyliques ou éthyliques ressemblent fortement à celles du diesel. Le tableau I.1 compare différentes propriétés physiques du diesel et du biodiesel, ainsi que celles de l'huile de colza. [4]

	T de fusion °(C)	Viscosité (cSt) à 50 °C	Densité (g/cm ³) à 15 °C	Indice de cétane
Diesel	-12	4,2	0,83	48-52
EMHV		7	0,83	49-50
Huile de colza	< 2	98	0,91	32-36

Tableau I.1 : Comparaison de différentes propriétés physiques
Source : [4]

I.4.1.1.3. Biogaz :

Le biogaz est obtenu par un processus de digestion anaérobie (sans présence d'oxygène) de matière organique (fumier, lisier, purin) par les micro-organismes qui vivent dans des milieux anaérobies. Le Figure I.3 montre le processus de méthanisation et les différents microorganismes impliqués. [4]

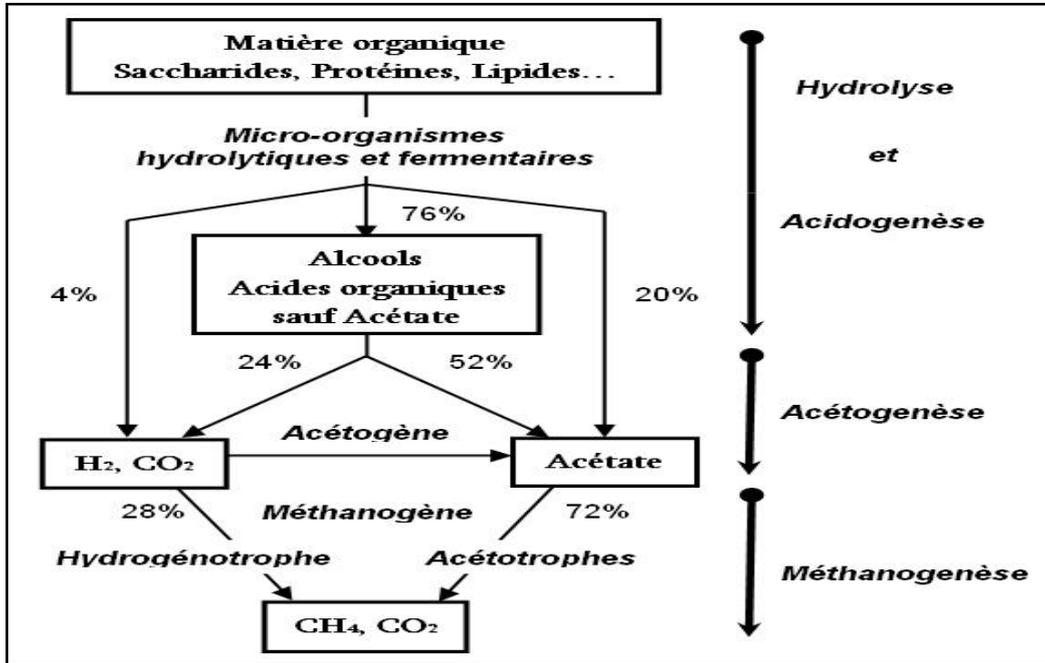


Figure I.3 : Procédé de production de biogaz
Source : [4]

I.4.2. Les biocarburants de deuxième génération :

Des technologies sont actuellement mises au point pour exploiter les matières cellulosiques telles que le bois, les feuilles et les tiges des plantes ou celles issues de déchets. On qualifie ces matières de biomasse lignocellulosique, car elles proviennent de composants ligneux qui ne sont pas directement utilisés dans la production alimentaire. Ces caractéristiques présentent un avantage de disponibilité supérieure et de non-concurrence alimentaire par rapport à la première génération de biocarburants. En effet, un plein d'un 4x4 de bioéthanol de première génération (225 kg de maïs) aux États-Unis suffit pour nourrir un Somalien pendant un an !! Ces technologies permettent de produire du bioéthanol dit de deuxième génération, du biodiesel, du bio hydrogène ou du biogaz.

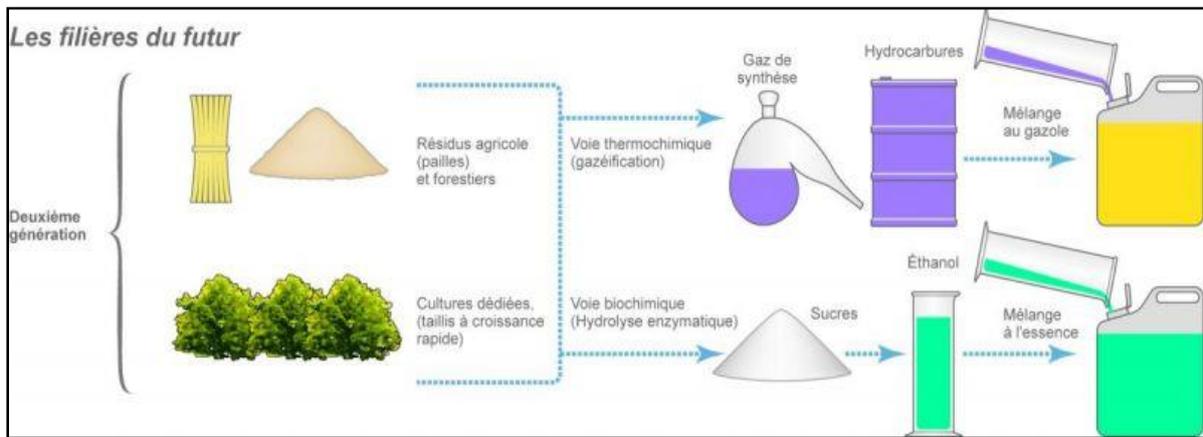


Figure I.4 : Biocarburant de deuxième génération
Source : IFP énergies nouvelles

I.4.2.1. La biomasse lignocellulosique :

a- Définition : matière végétale constituée de lignocellulose : bois, paille, écorces, herbes, feuilles.... Par opposition aux biomasses amylacées et saccharifères, respectivement composées de saccharose et d'amidon. [6]

b- Lignocellulose : La lignocellulose est constituée de trois polymères : *la cellulose*, *l'hémicellulose* et *la lignine*. Ces trois composantes s'entremêlent et forment une structure tridimensionnelle rigide, complexe et très résistante. [8]

La biomasse lignocellulosique est divisée en trois types de structures :

- **La cellulose :**(polymère de glucose cristallin), est composée de chaînes linéaires de glucose. Son hydrolyse donne donc des glucoses facilement fermentables en éthanol. Mais ses fibres sont protégées par l'hémicellulose et la lignine. [6]

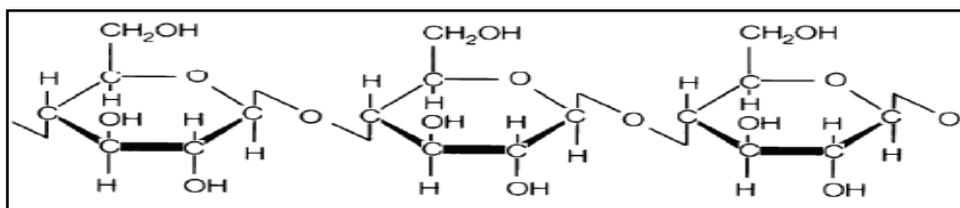


Figure I.5 : Structure de la cellulose
Source : [4]

- **L'hémicellulose** est composée de chaînes de différents sucres à 5 carbones (xylose, arabinose) ou 6 carbones (glucose, galactose, mannose). Elle est facilement hydrolysable. Par contre, les sucres à 5 carbones ne sont pas assimilables par les bactéries habituelles. [6]

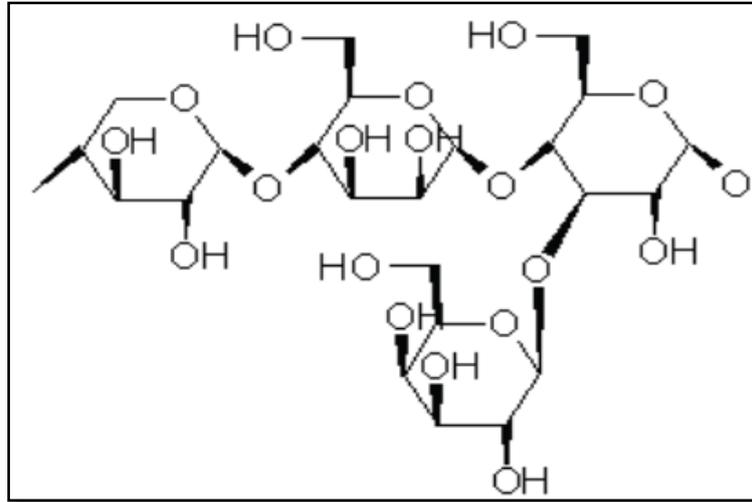


Figure I.6 : Structure de l'hémicellulose

Source : [4]

- **La lignine** (composé de poly-aromatique, diffère en fonction de l'environnement) : est formé d'alcools aromatiques et d'autres molécules organiques liés et fortement réticulés. Ses composants ne sont donc pas fermentables. [6]

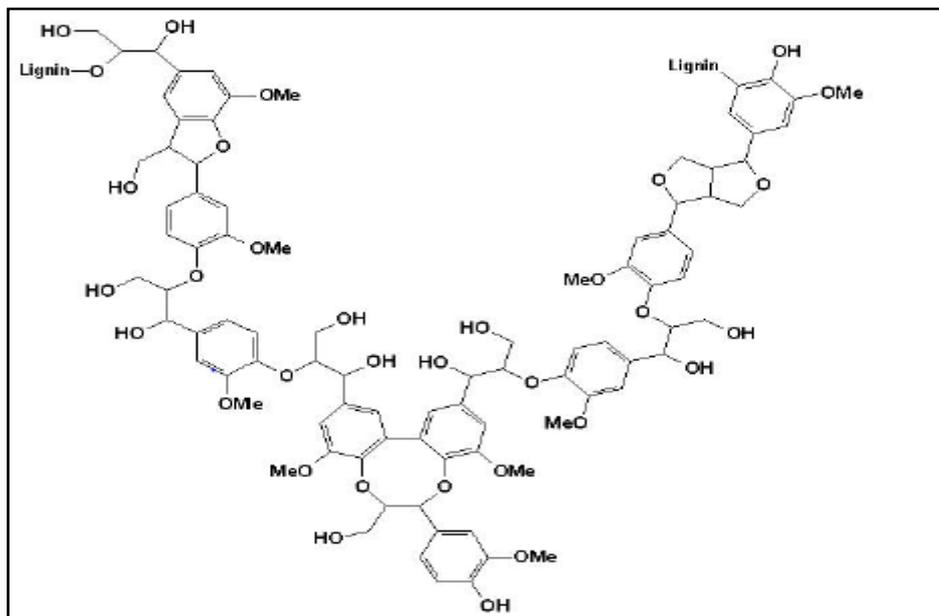


Figure I.7 : Structure de la lignine

Source : [4]

La composition de la biomasse lignocellulosique pouvant être utilisée dans la production de biocarburants de deuxième génération est présentée dans le tableau I.2 :

Biomasse lignocellulosique	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)
Paille de blé	33	23	17
Rafles de maïs	45	35	15
Journaux	40-55	25-40	18-30
Bois dur	40-55	24-40	18-25
Bois tendre	45-50	25-35	25-35
Miscanthus	45	30	21
Bagasse de canne à sucre	42	25	20

Tableau I.2 : Composition de la biomasse lignocellulosique
Source: [7]

Les ressources d'obtention de cette BLC peuvent être réparties en trois catégories :

- les cultures telles que le peuplier, le saule, l'eucalyptus... ;
- les graminées pérennes (miscanthus, herbes...);
- les résidus de l'industrie du bois et de l'agriculture (tiges, tronc d'arbre, paille...).

I.4.2.2. Les voies de valorisation de la biomasse lignocellulosique :

Le choix de la voie de valorisation de la biomasse lignocellulosique dépend des caractéristiques de la biomasse d'entrée, de sa disponibilité et du type de carburant souhaité en sortie.

Deux principales voies permettent de transformer la biomasse de seconde génération en biocarburant. Il est possible de passer par un processus thermochimique ou par un processus biochimique, mais il existe une 3^{ème} voie, hybride, qui combine les deux. [8]

La figure I.8 résume les différentes matières premières utilisées et les différentes voies de valorisation.

Les voies de valorisation

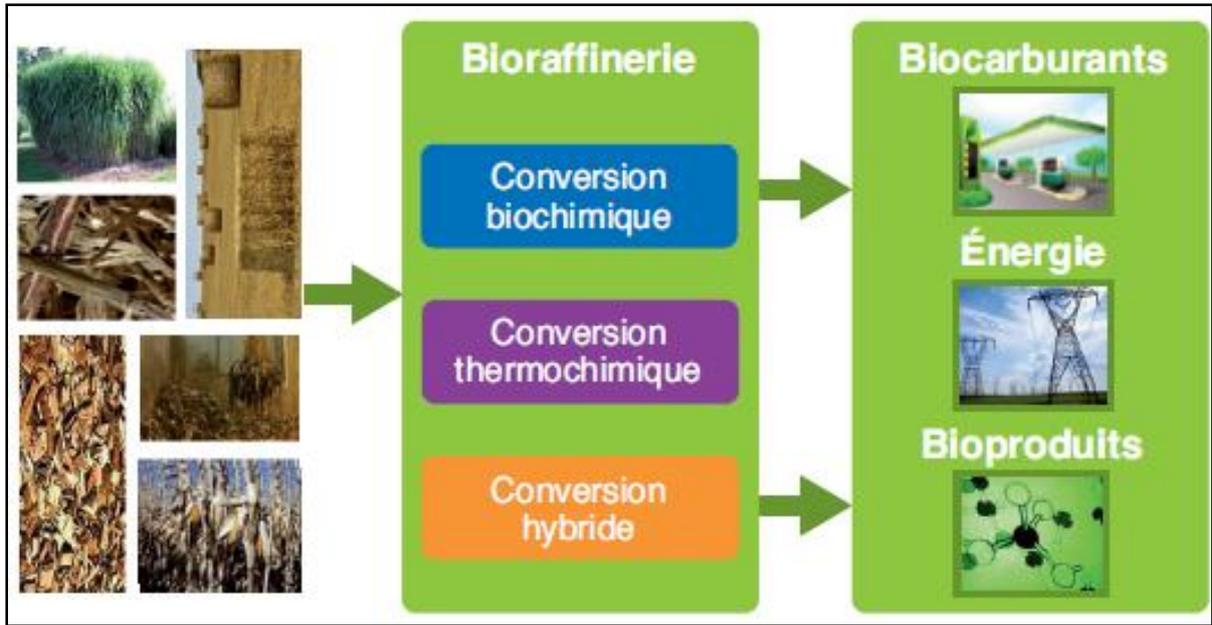


Figure I.8 : Principales voies de conversion de la biomasse lignocellulosique
Source : IFP énergies nouvelles

I.4.2.2.1. La valorisation par la voie biochimique

La voie biochimique consiste à une fermentation des sucres contenus dans la biomasse, mais contrairement à la biomasse utilisée dans les bioéthanol de première génération où les sucres sont directement accessibles, la biomasse lignocellulosique nécessitera une étape de prétraitement pour extraire les sucres qui seront ensuite fermentés

Cette voie pourrait être divisée en quatre étapes :

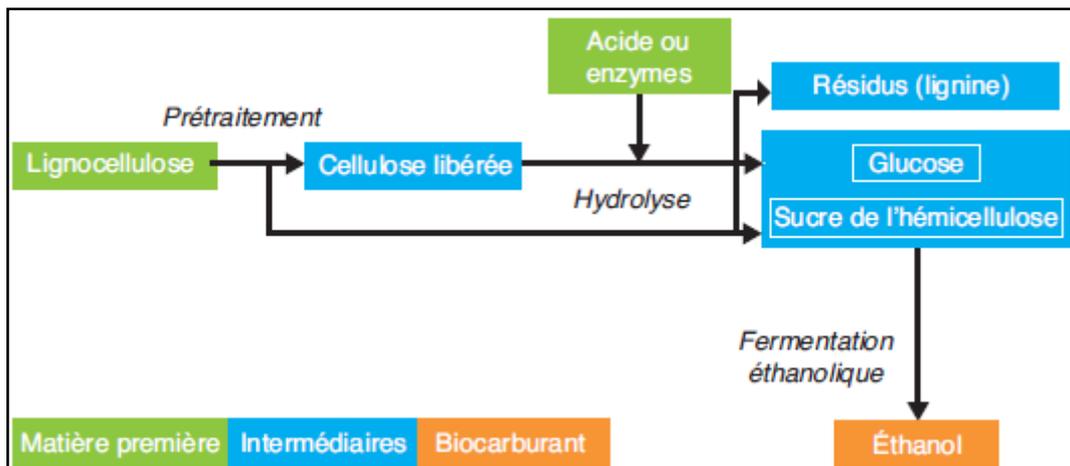


Figure I.9 : Valorisation de la biomasse par la voie biochimique
Source : IFP énergies nouvelles

a- Le prétraitement :

Avant d’être transformée en carburant, la biomasse lignocellulosique doit être décomposée lors d’une étape de prétraitement, par action thermique et/ou chimique, une étape clé des technologies développées par les industriels. **C’est un traitement nécessaire pour rendre la cellulose accessible à l’hydrolyse.**

Le prétraitement vise à séparer et rendre accessible les constituants intimement liés et cristallisés de la BLC : cellulose, hémicellulose et lignine. Par action thermique et/ou chimique, la structure de la lignine est détruite, l’hémicellulose est plus ou moins hydrolysée, et la structure de la cellulose est modifiée. On retrouve ainsi dans la phase liquide la lignine solubilisée et les produits d’hydrolyse de l’hémicellulose, et dans la phase solide la cellulose et les résidus de lignine et d’hémicellulose. Selon le procédé retenu, ces phases sont, ou non, séparées. [6]

Les principales contraintes de cette étape sont d’éviter la perte ou la dégradation des sucres qui conduit à une baisse du rendement et de limiter la formation de produits inhibiteurs de la fermentation tels que le furfural (aldéhyde aromatique de la fermentation $C_5H_4O_2$) ainsi que les rejets comme le glycérol. [9]

Il existe plusieurs procédés, résumés dans le tableau I.3. Le choix dépend en grande partie de la biomasse (paille, bois), mais surtout des impacts qu’elle a sur les coûts et performances des étapes ultérieures d’hydrolyse et de fermentation.

Les procédés qui ont bénéficié des développements les plus prometteurs sont indiqués en gras.

Procédés physiques	Prétraitement mécanique
Procédés physicochimique	Thermohydrolyse Explosion à la vapeur : avec acides ou ammoniacque ou CO_2
Procédés chimiques	Pré hydrolyse à l'acide dilué ou en conditions alcalines Procédé Organosolv, ACOS Oxydation chimique ou biologique

Tableau I.3 : les principaux procédés de prétraitement (en gras, les procédés exploités à l’échelle industrielle
Source : [6]

a-1. Les procédés physiques :

- **Le prétraitement mécanique** consiste au broyage de la BLC en fragments de moins de 2 millimètres. Un broyage suffisamment intense pour rompre la structure de la lignocellulose consommerait trop d’énergie pour une application industrielle, mais un broyage moins poussé peut être effectué avant une hydrolyse acide. [6] [9]

a-2. Les procédés physico-chimiques :

- La **thermohydrolyse** consiste en une cuisson à l’eau (200-230 °C) sous forte pression (50 bar) pendant 15 à 60 minutes. [6] Étudiée essentiellement à l’échelle d’un laboratoire, elle a démontré de bons taux de solubilisation des hémicelluloses (80 à

100 %) et des rendements d'hydrolyse supérieurs à 90 %. Malgré divers attraits tels que l'absence d'inhibiteurs et de faibles rejets, la forte pression rend les applications industrielles difficiles. [9]

- L'**explosion à la vapeur** est l'un des procédés de prétraitement les plus matures à ce jour. Il consiste à chauffer rapidement (180-270 °C pendant quelques minutes) le substrat par injection de vapeur saturée à haute pression (10-50 bar) puis à l'amener à pression atmosphérique par une détente brutale, qui désintègre la matière. Les meilleures efficacités sont obtenues en trouvant un compromis entre température et temps de contact (1 min à 270 °C ou 10 min à 190 °C). Ce procédé a été développé industriellement (procédés Iotech et Stake), mais une partie des pentoses et de la lignine est dégradée, d'où perte de rendement et formation d'inhibiteurs de fermentation. [9] Des variantes ont été développées pour augmenter les rendements et éviter la formation d'inhibiteurs : ajout d'acide, d'ammoniaque ou de CO₂. La plus prometteuse est l'**explosion à la vapeur en condition acide**. L'acide permet une hydrolyse de l'hémicellulose à des conditions moins fortes (150-200 °C, 16 bar, 2,5 minutes, 0,1N d'H₂SO₄) qui évitent la dégradation des sucres. [6]

a-3. Les procédés chimiques : [6] [9]

- **La préhydrolyse à l'acide dilué** vise à déstructurer la matière lignocellulosique. Elle consiste à mettre la matière végétale en contact avec de l'acide dilué (de 0,3 à 2 % par rapport à la matière sèche du substrat) à une température modérée (de l'ordre de 150 °C) pendant 15 à 20 minutes environ. Cette technique permet d'hydrolyser jusqu'à 90 % de l'hémicellulose et de solubiliser partiellement la lignine. Elle présente l'inconvénient de former des produits de dégradation des sucres obtenus tels que le furfural qui inhibe la fermentation ultérieure. Ce prétraitement est bien adapté pour l'hydrolyse enzymatique, il peut constituer la première étape d'une hydrolyse acide. Mais de par la consommation d'acide associée, il est plus coûteux que les prétraitements physico-chimiques.
- Le **prétraitement en condition alcaline** (8-12 % de NaOH à 80-120 °C pendant 30 à 60 minutes) est également efficace sur les résidus agricoles. Cependant, une part importante de la masse sèche est perdue et la récupération des coproduits est assez onéreuse.
- Le **procédé Organosolv** consiste à l'extraction de la lignine et de l'hémicellulose par des solvants organiques (éthanol, acétone). À 150-200 °C et en conditions acides, la cellulose et l'hémicellulose sont également hydrolysées (procédé ACOS (Acid Catalyzed Organosolv Saccharification)). Ce procédé est prometteur, mais son développement est freiné par le coût et les difficultés liés au solvant.
- Des procédés d'oxydation notamment par l'ozone sont également développés, mais restent onéreux.

b- L'hydrolyse de la cellulose :

Un acide ou des micro-organismes (enzymes spécifiques) agissent comme un catalyseur dans cette étape, qui consiste à fractionner en sucres simples et fermentescibles (glucose, pentose, saccharose, etc.), les polysaccharides qui composent la cellulose et l'hémicellulose. [8]



Si l'hémicellulose est facilement hydrolysable, parfois dès le prétraitement, l'hydrolyse de la cellulose en glucose est une opération difficile, qui doit être catalysée soit par un acide, soit par des enzymes.

- **L'hydrolyse à l'acide dilué :** L'hydrolyse à l'acide dilué se fait généralement en deux étapes, la première faisant également office de prétraitement. L'hydrolyse en 2 étapes évite la dégradation des sucres, augmente le rendement et réduit les temps de réaction. Ainsi, on peut hydrolyser successivement l'hémicellulose et la cellulose. Les sucres sont ensuite fermentés séparément ou ensemble. [6] [9]

Conditions	Avantages	Inconvénients
190-215°C 5-10 min H ₂ SO ₄ <1%	Réacteurs simples	Risque de dégradation des sucres

- **L'hydrolyse à l'acide concentré :** L'avantage par rapport à l'acide dilué est le rendement (90%) de la réaction, à des températures moindres. La formation de coproduits nuisibles est aussi réduite. Les inconvénients viennent de la corrosion des réacteurs et de la nécessité de recycler l'acide. [6] [9]

Conditions	Avantages	Inconvénients
50-100°C Quelques min à 4h H ₂ SO ₄ 20-40%	Rapide, conditions Faciles, Peu d'inhibiteurs formés	Corrosion des matériaux Recyclage de l'acide Procédé complexe

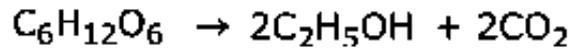
- **L'hydrolyse enzymatique :** L'hydrolyse enzymatique offre des perspectives plus prometteuses, des points de vue technologique et économique, qui dépendent du développement d'enzymes spécifiques, appelées cellulases. Les conditions réactionnelles (50°C, pH 5) sont beaucoup moins rudes qu'en hydrolyse acide, mais les enzymes restent chères et sont difficilement récupérables.

Les cellulases sont produites grâce à la culture de bactéries ou de champignons cellulolytiques, tels *Trichoderma reesi*. Les biotechnologies, telles que les modifications génétiques, promettent des progrès importants dans le coût et l'efficacité des cellulases. [6]

Conditions	Avantages	Inconvénients
50°C; Pression 1 atm Quelques min, pH 4-5	Réacteurs simples Conditions douces	Coût des enzymes

c- La fermentation éthanolique et la distillation : [6] [9]

Le principe de cette étape est le même que celui des bioéthanol de première génération développés auparavant :



Cependant, l'utilisation de la BLC comme substrat initial implique des difficultés spécifiques. D'une part, toutes les levures et bactéries ne peuvent pas convertir les pentoses en éthanol. D'autre part, des inhibiteurs (furfural surtout) de fermentation peuvent être formés lors de l'hydrolyse. Le développement de la filière exige de plus des rendements élevés.

Les biotechnologies génétiques ont permis de créer des micro-organismes capables de convertir à la fois le glucose et les pentoses avec de bons rendements, et de résister aux inhibiteurs. On a par exemple créé des souches efficaces de *Zymomonas mobilis* et d'*Escherichia coli*.

De nombreux développements sont encore attendus, afin de convertir au maximum la BLC, avec de hauts rendements, et des coûts réduits. Une autre voie de progrès est d'effectuer l'hydrolyse enzymatique et la fermentation dans le même réacteur. Il est même envisagé, à plus long terme, d'utiliser des micro-organismes capables de réaliser la fermentation et de produire en même temps les enzymes nécessaires à l'hydrolyse.

d- Séparation de l'éthanol :

Elle se fait de la même manière que le bioéthanol première génération.

Le tableau I.4 résume les différentes étapes de la valorisation de la biomasse par voie biochimique :

Etapes	Objectifs	Difficultés
Prétraitement	Libérer la fraction hydrolysable de la BLC	Rompre la structure de la BLC, sans dégrader les sucres
Hydrolyse	Transformer hémicellulose et cellulose en sucres	Obtenir le meilleur rendement sans dégrader les sucres
Fermentation	Transformer les sucres en Ethanol	Transformer à la fois le glucose et les sucres en C5
Distillation et déshydratation	Séparer l'éthanol du moût	Obtenir la meilleure pureté Traiter les coproduits

Tableau I.4: Résumé des étapes de transformation de la lignocellulose en éthanol

Source : [6]

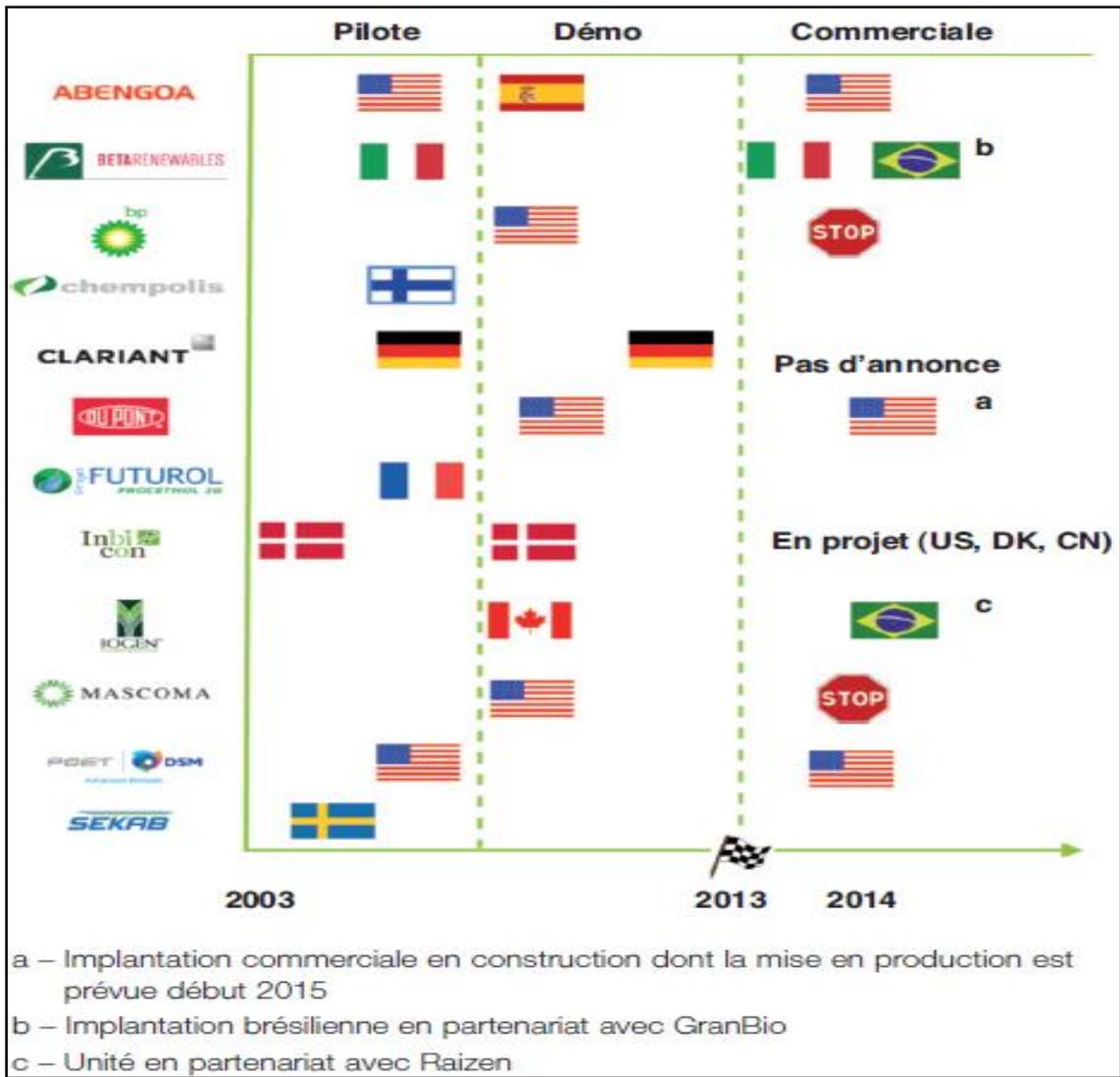


Figure I.10 : Principaux acteurs de la voie biochimique

Source : IFP énergies nouvelles

I.4.2.2.2. La valorisation par la voie thermochimique :

Les voies thermochimiques (traitement thermique) permettent de décomposer la matrice lignocellulosique et transformer la biomasse solide et hétérogène en combustibles gazeux ou liquides plus faciles à manipuler et à transporter. Ces matériaux (huiles de pyrolyse ou de liquéfaction, gaz de synthèse) sont soit utilisés directement pour la production de chaleur et d'électricité, **soit convertis en biocarburants liquides**. [8]

On distingue trois types de conversions thermochimiques de la biomasse solide:

- Gazéification
- Pyrolyse (rapide)
- Liquéfaction directe (hydrothermale)

Actuellement, des installations de pyrolyse et de gazéification sont exploitées, mais principalement pour la production directe de chaleur ou d'électricité. La conversion en

biocarburant connaît encore des difficultés techniques et économiques, mais fait l'objet de développements prometteurs.

a- La pyrolyse :

Principes :

Prise dans son sens étymologique de pyro (feu) lyse (coupure), la pyrolyse est le processus primaire de décomposition de matières carbonées, par l'action de la chaleur et en l'absence d'oxygène. L'augmentation de température entraîne des réactions chimiques complexes qui dégradent les principaux constituants de la BLC en trois produits principaux : solide (charbon végétal), liquide (huile contenant des composés organiques condensables) et gazeuses (constitué de CO, CO₂, H₂, CH₄...), et ce sont les conditions de chauffage qui l'orientent vers une phase privilégiée. On distingue trois types de pyrolyse : pyrolyse lente, rapide et rapide avec craquage. [5]

La pyrolyse rapide est la plus appliquée car elle offre de bon rendement et la phase liquide est la plus facile à manipuler. **Elle peut être ensuite transformée en biodiesel par hydrotraitements catalytiques ou par gazéification.**

La pyrolyse rapide :

La phase liquide est favorisée par les conditions suivantes, relatives aux paramètres réactionnels et aux caractéristiques de la biomasse : [6]

- chauffage rapide (100-500 °C/s)
- température modérée (500°C)
- temps de séjour des vapeurs court (<2s)
- pression faible (<1bar)

Les caractéristiques de la biomasse sont aussi importantes. Pour obtenir de bons rendements et une bonne qualité d'huile, on préfère une biomasse fine (granulométrie <6 mm) et sèche (humidité <10%). Pour cela, des étapes de broyage et de séchage sont généralement nécessaires.

Le schéma réactionnel général est le suivant :

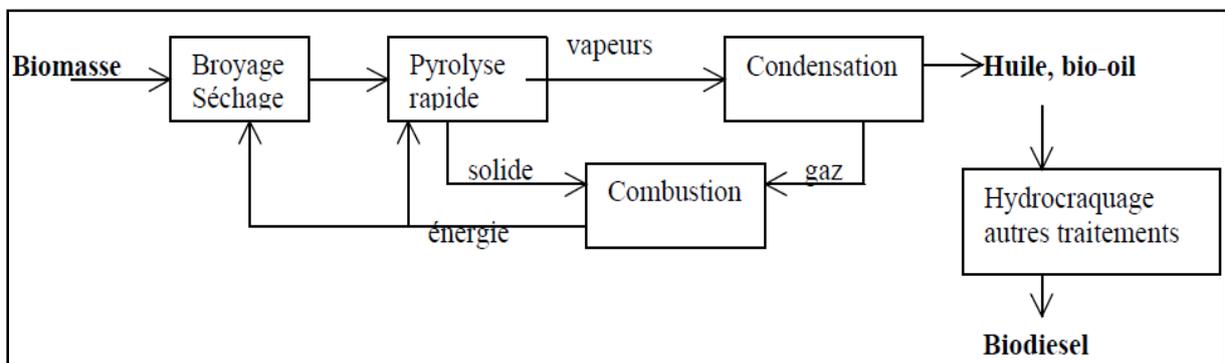


Figure I.11 : schéma réactionnel de production de biodiesel par voie thermochimique (pyrolyse)

Source : [6]

La biomasse, préalablement broyée et séchée, entre dans le réacteur de pyrolyse. Les vapeurs, contenant les gaz et les composés volatils, sont récupérées et condensées. On obtient ainsi **l'huile de pyrolyse**, qui peut être stockée, brûlée ou convertie pour d'autres applications. Les sous-produits que sont les solides (suie et charbon de bois) et les gaz non condensables sont brûlés pour fournir la chaleur nécessaire au procédé, ou valorisée en externe.

Pour transformer l'huile de pyrolyse en biodiesel, il faut une étape supplémentaire qu'est l'hydrotraitement catalytique.

Hydrotraitements catalytiques

L'utilisation des huiles de pyrolyse dans les moteurs d'automobiles n'est aujourd'hui envisagée qu'à long terme. Elle nécessite un hydrotraitement pour éliminer totalement l'oxygène et hydrocraquer les molécules lourdes. Les conditions opératoires sont proches de celles employées pour le raffinage du pétrole (450 °C, haute pression d'H₂, catalyseurs métalliques ou soufrés sur alumine). Cependant, il subsiste des verrous technologiques et économiques et la qualité des biocarburants produits doit être sensiblement améliorée. [6]

On peut aussi utiliser cette huile comme intermédiaire pour la gazéification

L'option qui semble la plus prometteuse reste la gazéification des huiles. Les huiles de pyrolyse résolvent en outre les difficultés d'alimentation des réacteurs de gazéification. La concrétisation de cette idée nécessite encore des efforts pour améliorer la qualité des huiles et une synergie avec les développeurs de procédés de gazéification.

b- La liquéfaction directe : [6]

Les procédés de liquéfaction directe de biomasses humides ont plusieurs avantages :

- utilisation de biomasse humide, sans séchage
- obtention de "biocrude" à haute valeur énergétique (jusqu'à 35 MJ/kg)
- bio-crude peu oxygéné (10-18 %) donc plus stable que bio-oil
- conversion possible en substitut du diesel

Par contre, les pressions sont élevées, pour maintenir l'eau liquide. Les conditions de réaction sont : 120-180 bars, 300-330 °C, 5-15 minutes. L'utilisation de catalyseurs alcalins (carbonate) et/ou de métaux alcalins permet d'augmenter l'efficacité et la qualité.

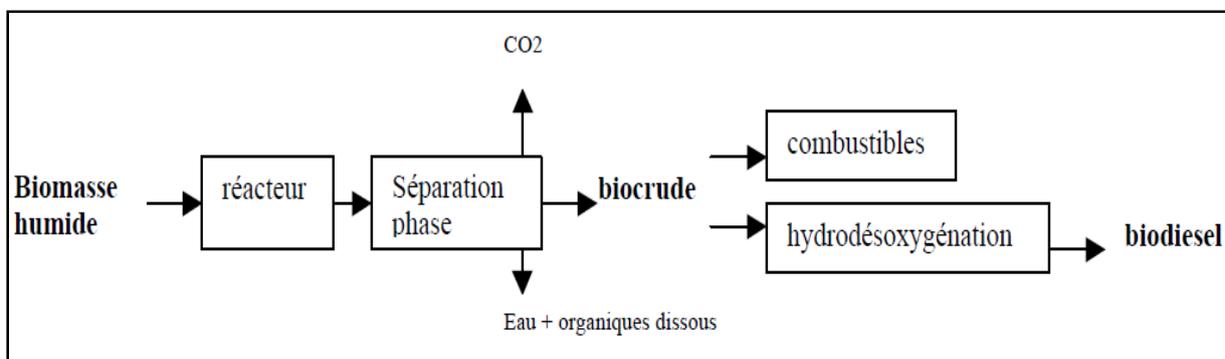


Figure I.12 : schéma réactionnel de production de biodiesel par voie thermochimique (liquéfaction)

Source : [6]

c- La gazéification :

c-1.Principe et objectifs :

La gazéification est la transformation thermique d'un matériau solide (charbon, biomasse ...) en présence d'un réactif gazeux (oxygène, vapeur d'eau...) à la différence de la pyrolyse qui est réalisé en absence de gaz de réaction en vue de la formation d'un gaz, dit de synthèse, formé principalement de CO et de H₂, utilisable comme combustible gazeux ou intermédiaire de réaction. [5]

On distingue trois types d'applications du gaz de synthèse: [6]

- La combustion pour la cogénération de chaleur et d'électricité, dans des turbines à gaz en particulier,
- la conversion catalytique en carburants : méthanol, diméthyléther (DME), hydrocarbures (syndiesel ou BTL par conversion de Fischer-Tropsch) ,
- la production de dihydrogène.

La deuxième application nécessite un degré de pureté supérieur et une composition favorable (rapport H₂/CO = 2), obtenus grâce à des traitements supplémentaires (purification, conversion haute température, réaction de shift).

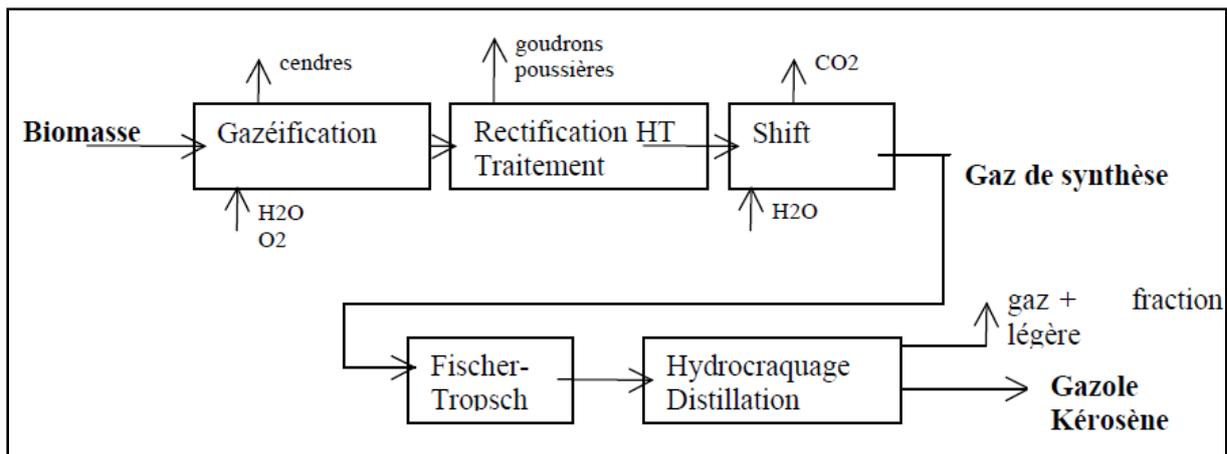


Figure : I.13 : Schéma d'ensemble gazéification + conversion Fischer-Tropsch

Source : [6]

c-2.Le procédé :

La gazéification se fait en trois étapes :

c-2.1. La combustion :

L'apport d'énergie nécessaire à la gazéification se fait le plus souvent par la combustion d'une partie de la biomasse (procédés auto-thermiques). Dans la zone de combustion, la température est de l'ordre de 1000-1300°C, voire plus. Cette gamme de température est favorable car elle favorise la formation de CO et de H₂, au détriment de CH₄ et de goudrons et augmente la vitesse de réaction. L'énergie peut aussi être apportée par une combustion externe. Les procédés dits allo-thermiques sont plus complexes mais offrent de meilleurs rendements.

c-2.2 La gazéification :

Lorsque la température diminue dans le réacteur, la gazéification se fait vers 850-1000°C. Les gaz réactifs, ou oxydants, sont l'air, l'oxygène, la vapeur d'eau, ou un mélange.

c-2.3 La rectification haute température :

Une rectification à haute température (1300°C) permet de convertir les goudrons vaporisés et le méthane en CO et H₂. Elle peut avoir lieu dans le réacteur de gazéification mais aussi en sortie pour des économies d'énergie.

Pour le gaz de synthèse destiné à la conversion, une étape de gaz shift (ou gaz à l'eau) est encore nécessaire. Il s'agit de convertir d'augmenter le ratio H₂/CO (idéalement 2) par ajout de H₂O ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$).

c-3. Les applications du gaz de synthèse : conversion en biocarburant :

Les procédés de conversion catalytique selon Fischer-Tropsch

La conversion de la biomasse gazéifiée en carburants de synthèse (gazole, kérosène) selon le procédé de Fischer-Tropsch est l'application la plus prometteuse et viable économiquement, car le biodiesel, peut être utilisé dans les moteurs diesel habituels, en mélange ou purs, avec les réseaux de distribution existants.

La synthèse d'hydrocarbures à partir du gaz de synthèse se fait selon la réaction :



Les radicaux alkyles CH₂ se forment sur un catalyseur, à base de fer ou de cobalt, puis se lient pour former des chaînes paraffiniques ou oléfiniques plus ou moins longues. Les catalyseurs bénéficient de développements qui visent à :

- adoucir les conditions de réaction (catalyseurs au cobalt dits "basses températures")
- produire sélectivement de longues chaînes paraffiniques (catalyseurs au cobalt)
- augmenter la durée de vie et réduire le coût des catalyseurs

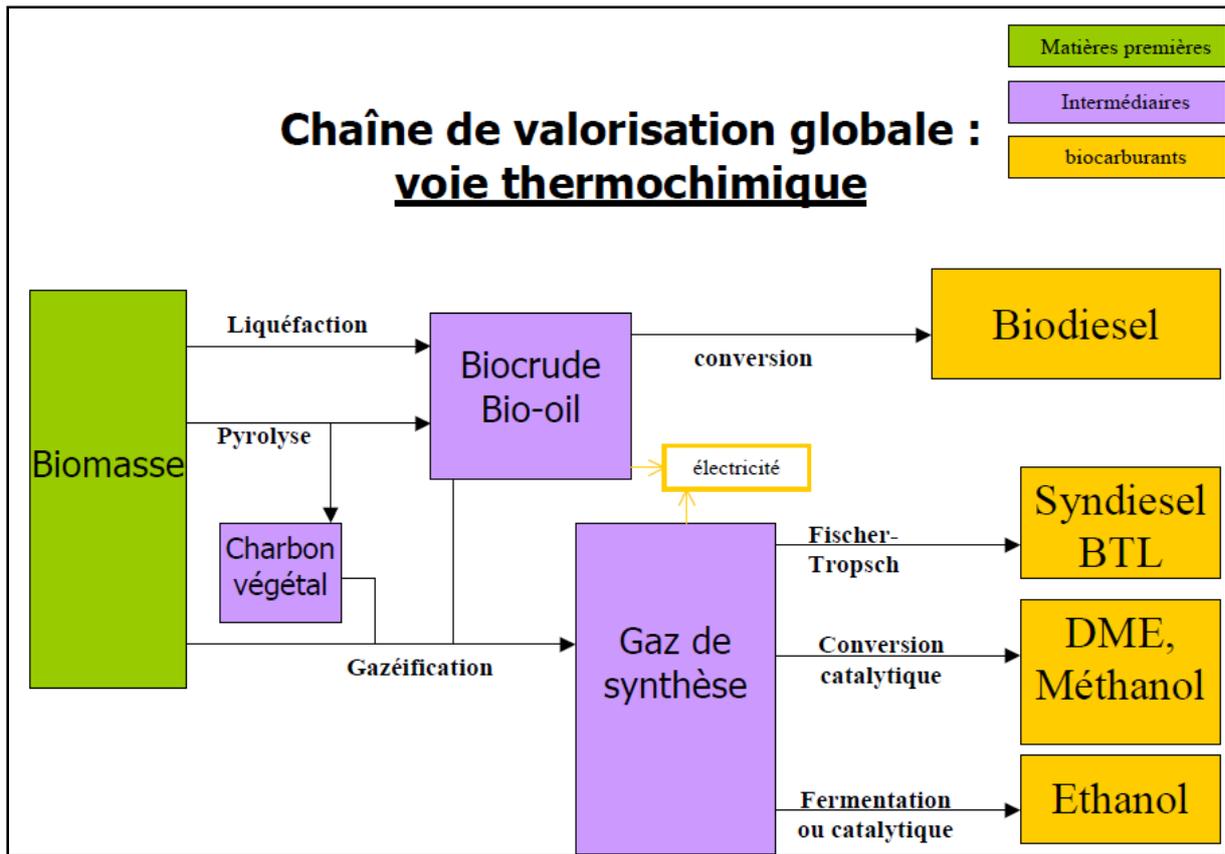


Figure I.14 : chaîne de valorisation globale : voie thermo-chimique

Source : [6]

I.4.2.2.3. La valorisation par la voie hybride :

La voie hybride combine la voie thermo-chimique et la voie bio-chimique. Obtenu par une étape de gazéification de la biomasse, le gaz de synthèse est ensuite fermenté en alcools. La société américaine IneosBio ainsi que la start-up néo-zélandaise LanzaTech sont positionnées sur cette voie. IneosBio a démarré une unité de ce type en Floride. LanzaTech prévoit de démarrer son unité en 2016 aux États-Unis. [8]

I.4.3. Les biocarburants de troisième génération :

Les procédés, encore à l'étude, s'appuient principalement sur l'utilisation de microorganismes tels que les microalgues.

Les microalgues sont des micro-organismes aquatiques. Dotées d'une croissance rapide, elles ont la particularité de pouvoir produire des substances industriellement intéressantes. Toutefois, leur potentiel est encore peu exploré : sur un million d'espèces estimées, seules, 30 000 environ ont été étudiées. [4]

Celles-ci peuvent accumuler des acides gras permettant d'envisager des rendements à l'hectare supérieurs d'un facteur 30 aux espèces oléagineuses terrestres. À partir de ces acides gras, il est possible de générer du biodiesel. Certaines espèces de microalgues peuvent contenir des sucres et ainsi être fermentées en bioéthanol. Enfin, les microalgues peuvent être méthanisées pour produire du biogaz. Certaines d'entre elles peuvent également produire du biohydrogène.

Déjà utilisées dans l'agroalimentaire, les cosmétiques et les fertilisants, les microalgues sont considérées comme une voie alternative aux carburants traditionnels. En effet, certaines espèces ont la capacité de produire des composés ayant un potentiel énergétique comme les lipides (source de biodiesel) ou l'amidon (source de bioéthanol).

Principe :

La majorité des microalgues convertissent l'énergie solaire en utilisant du CO₂ et de l'eau pour produire de l'oxygène et de la biomasse algale (matière organique) par une réaction appelée la photosynthèse. Les microalgues sont caractérisées par un rendement photosynthétique très élevé (rapport entre l'énergie lumineuse incidente et l'énergie stockée dans la plante).

I.4.3.1. Les cultures de microalgues : [4]

Préalablement sélectionnées, les microalgues sont cultivées de manière contrôlée afin d'obtenir de grandes quantités de biomasses algales.

Habituellement, l'eau de mer enrichie en nutriments (comme les nitrates et les phosphates) est utilisée pour la croissance de ces microorganismes. Toutefois, le recours à de l'eau douce et saumâtre (provenant de lacs ou de rivières) est également possible.

Les principales méthodes de production sont :

- les bassins à ciel ouvert, peu coûteux à faire fonctionner. Néanmoins, ces systèmes ouverts voient leur productivité affectée par des contaminations microbiennes et une perte d'eau par évaporation ;
- les photobioréacteurs, tubes transparents formant un système clos. Leur coût s'avère plus élevé, mais est compensé par des productivités supérieures.

I.4.3.2. Les applications :

a - Production de biodiesel :

Cultivées dans des conditions dites « de stress » (par exemple une carence en nitrates ou une augmentation soudaine de l'intensité lumineuse), certaines espèces augmentent significativement leur production de lipides, pouvant atteindre 80% de leur masse sèche. Toutefois, ces conditions de fortes productivités ne peuvent pas être maintenues sur de longues durées. En effet, elles conduisent à un arrêt de la croissance et à la consommation des réserves lipidiques produites. L'optimisation de la productivité en lipides passe donc par une alternance entre croissance (donc sans carence) et production d'huile (avec un stress ralentissant la croissance). [10]

Les microalgues sont ensuite récoltées et l'huile est extraite selon différentes méthodes (centrifugation, traitement au solvant, etc.) pour être transformées en biodiesel. Les techniques classiques de transestérification, développées pour les huiles végétales, peuvent être appliquées. [10]

b -Production de bioéthanol

Les recherches portant sur la production d'algocarburants s'orientent surtout vers le biodiesel.

Toutefois, ces micro-organismes produisent aussi des glucides (tels que le glucose ou l'amidon) présentant un intérêt pour la production d'un autre biocarburant, l'éthanol. Celui-ci est produit au cours d'une fermentation anaérobie (sans oxygène) en l'absence de lumière à partir de l'amidon. L'alcool obtenu est ensuite concentré et hydraté pour aboutir au bioéthanol. [11]

c -Production de biogaz

La biomasse algale, concentrée et humide, se révèle particulièrement adaptée au processus de méthanisation. Après fermentation en condition anaérobie (absence d'oxygène) dans un digesteur chauffé, elle génère un biogaz composé de 70 à 80% de méthane. Celui-ci peut être utilisé pour la production de chaleur et d'électricité ou directement injecté dans un réseau de gaz.

Une association entre production de biomasse, captage de CO₂ et production de biogaz fait actuellement l'objet d'études. Le CO₂, généré par la combustion de biogaz, pourrait être recyclé directement pour produire de la biomasse micro-algale, celui-ci étant nécessaire à la réaction de photosynthèse.

I.5. Conclusion :

L'analyse des différentes technologies de production des biocarburants nous permet de déduire que :

Les biocarburants de première génération malgré la maîtrise des technologies et leur coût de production relativement bas, ils présentent l'inconvénient de la concurrence avec l'alimentation de l'homme ce qui les rendent moins intéressants.

Par contre, les biocarburants de deuxième génération présentent une source prometteuse, mais il reste à relever les défis technologiques et développer des processus de production moins onéreux.

Enfin, les biocarburants de troisième génération sont une piste à ne pas négliger à condition que la technologie soit encore plus mature et applicable à l'échelle industrielle.

Chapitre II

États des lieux des biocarburants dans le monde et leurs enjeux

II.1.Introduction :

La nécessité pressante de réduire les émissions des GES, du faite de leurs dangers sur l'humanité, a poussé les décideurs de monde entier à s'accorder pour essayer de trouver des solutions efficaces. Les biocarburants se présentent comme une alternative très prometteuse. Depuis quelques années, le marché des biocarburants a connu une croissance exponentielle et plusieurs nations ont opté pour les biocarburants dans leurs futures politiques énergétiques. Mais il ne faut pas se fier aux apparences, car les biocarburants ont certes beaucoup d'avantages, mais n'empêche pas qu'ils aient des inconvénients.

Nous allons d'abord essayer dans ce chapitre d'analyser le marché mondial des biocarburants et ses perspectives à l'horizon 2030 ensuite, nous allons parler des enjeux environnementaux et socio-économiques des biocarburants.

II.2.Situation mondiale actuelle :

Après une très forte croissance jusqu'en 2008, la production mondiale de biocarburants a continué d'augmenter, mais à un rythme moins soutenu. Les investissements se sont faits plus rares, notamment en raison d'un contexte économique et réglementaire assez volatil. Il existe cependant des perspectives de développement, car de nombreuses technologies prometteuses en cours de R&D sont en train de voir le jour, sous réserve des évolutions et changements dans les différentes politiques publiques relatives aux biocarburants

En 2010, environ 43 % de la consommation mondiale de pétrole ont été consommés dans le secteur des transports routiers : essence et gazole, représentant un total d'environ 1,77 Gtep.

La part des biocarburants représentait environ 3 % [12]

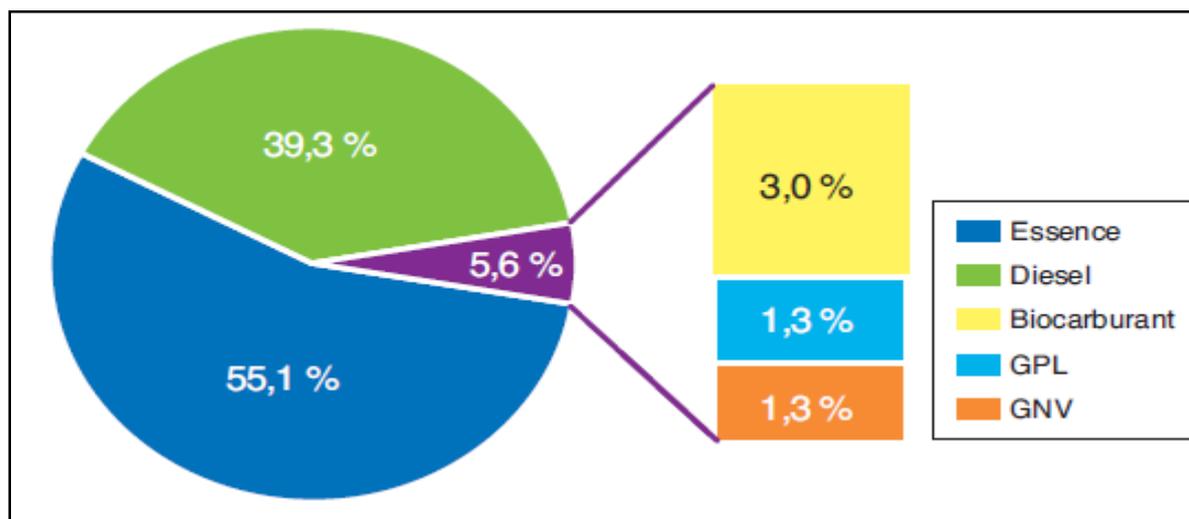


Figure II.1 : Consommation mondiale d'énergie dans les transports routiers en 2010
Source : IFPEN d'après KBC PEL, OCDE, WLPGA, NGV Journal

En 2010 la production des biocarburants était d'environ 57,5 Mtep [12], utilisé majoritairement dans le secteur des transports routiers. On ne compte pas, à ce jour, d'incorporation significative de biocarburants dans les autres formes de transport (aérien et maritime).

Parmi ces biocarburants, le bioéthanol reste le plus utilisé avec une part de 75 %. Le biodiesel représente, quant à lui, environ 25 % des consommations de biocarburant dans le monde en 2010. [12]

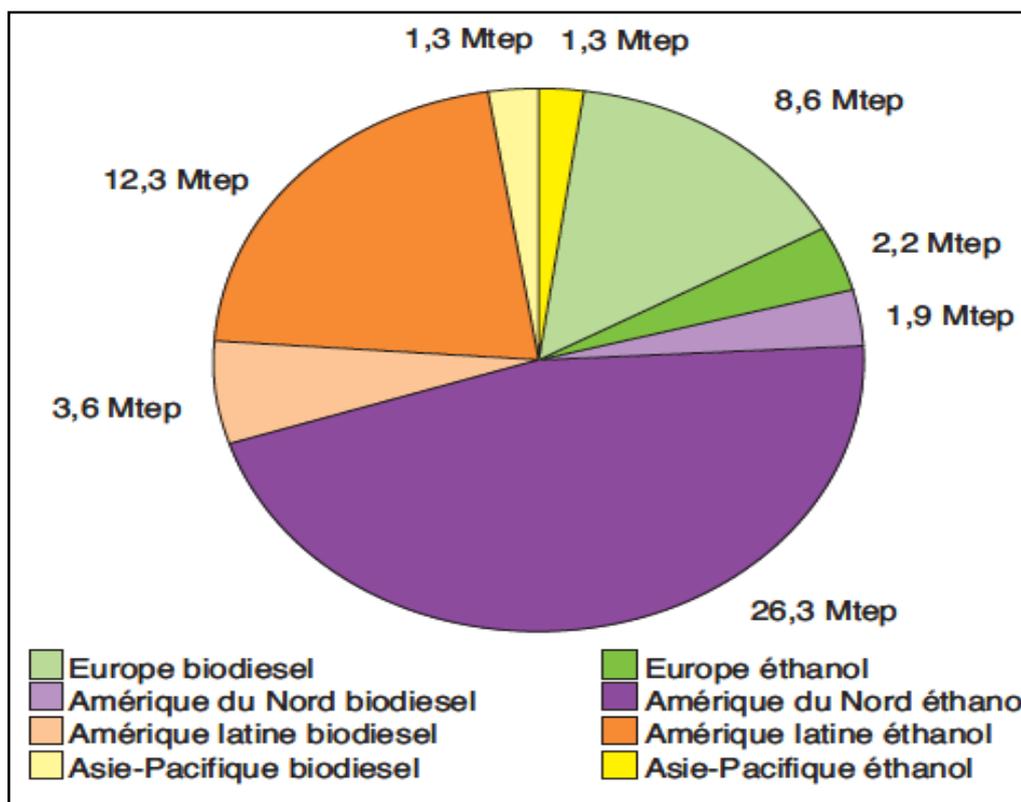


Figure II.2 : Répartition de la production de biodiesel et d'éthanol par grandes zones en 2010

Source : IFP Energies nouvelles

En 2012 cette production s'élève à 58,8 Mtep dont 73% est de l'éthanol et 27% du biodiesel. [13]

II.2.1. Les principaux acteurs :

Il existe trois principales zones productrices qui produisent près de 85% des biocarburants dans le monde.

- Les États-Unis : 27,4 Mtep en 2012 (45,5% de la production mondiale),
- Le Brésil : 13,5 Mtep en 2012 (22,5% de la production mondiale),
- L'Europe : 10,0 Mtep en 2012 (16,6% de la production mondiale). [13]

II.2.1.1. Les États-Unis : [5]

Les États-Unis sont, depuis quelques années, le premier producteur mondial de biocarburants, essentiellement d'éthanol et, à un degré moindre, de biodiesel.

Les États-Unis sont partagés en 5 zones ou PAD. Les quantités d'éthanol introduites dans les essences américaines le sont à plus de 90 % dans la zone correspondant au Midwest ou PAD II.

Comptabilisée sur le mois de juin 2004, la consommation d'éthanol était de 222 000 barils/jours (53 300 m³/j), alors que celle d'essence s'élevait à 9,4 Millions barils/jour, soit un pourcentage de substitution de 2,4 % en volume.

En 2005, 4 milliards de gallons d'éthanol étaient produits **à partir de 13 % de la production américaine de maïs**, soit 2,7 % de la consommation d'essence nationale. Selon l'USDA, les États-Unis n'envisagent pas de dépasser, pour la production d'éthanol, un taux d'utilisation de maïs national de 30 à 35 %. La production de carburants de première génération (éthanol et biodiesel) est estimée atteindre son maximum à 15 milliards de gallons par an. La loi sur la sécurité et l'indépendance énergétiques de décembre 2007 promeut le développement des biocarburants de deuxième génération, qui doivent induire une économie d'au moins 50 % des émissions de gaz à effet de serre.

Les États-Unis souhaitent atteindre une réduction de la consommation d'essence de 20 % en 2020 et de 30 % en 2030, par l'emploi de biocarburants de première et deuxième génération par la réduction de la consommation des véhicules.

II.2.1.2. Le Brésil : [5]

Le Brésil est le deuxième producteur mondial de biocarburants, dont essentiellement l'éthanol.

En plus de ces richesses forestières qui pourraient constituer à l'avenir une source de bioénergie considérable, le Brésil dispose d'importantes superficies cultivables, avec 90 Mha de terres agricoles.

Dans le classement des producteurs de matières premières agricoles, ce pays occupe le premier rang avec 16 % de la production mondiale de sucre, le deuxième rang avec 26 % de celle de soja et le troisième rang avec 7 % de celle de maïs.

La fabrication d'éthanol a régulièrement augmenté depuis le milieu des années 1970 avec le lancement de programme **Proalcool**. Si à cette époque le pourcentage du sucre transformé en éthanol n'était que de 15 %, il n'a cessé de croître pour atteindre 70 % dix ans après alors que, pendant la même période, la fabrication globale du sucre progressait constamment.

Ce pourcentage est resté stable jusqu'au milieu des années 1990, avant de diminuer pour se situer à l'heure actuelle autour de 50 %

Dans les années 1980, c'est l'époque où les voitures fonctionnent à l'éthanol hydraté (92 %). C'est en grande partie le résultat des aides gouvernementales qui subventionnent l'achat de véhicules à l'alcool pur.

Dans les années 1990, l'exportation du sucre devenant plus rémunératrice que sa transformation en éthanol, le programme Proalcool doit être revu à la baisse. Néanmoins, le gouvernement brésilien maintient l'obligation d'incorporation de 20 à 25 % d'éthanol anhydre à 99,7 % dans l'essence.

Il n'existe pas de voitures n'utilisant que de l'essence. Grâce à de nouvelles incitations fiscales, s'est développé un nouveau type de véhicules, les FFV (Fuel Flexible Vehicles) capables d'utiliser l'éthanol mélangé en toutes proportions à l'essence. Ce nouveau type représente actuellement l'essentiel du marché automobile.

Un programme **Prodiesel** a été lancé en 2002. Il regroupe les différents acteurs de la filière, dont les producteurs de la ressource agricole, les organismes de la recherche, la compagnie nationale pétrolière Petrobras, les constructeurs automobiles et le ministère de la Science et la Technologie.

La loi sur l'ajout obligatoire de 2 % de biocarburant au gazole est entrée en vigueur en janvier 2008 ; cette teneur est de 5 % en 2013.

II.2.1.3. Europe : [5]

L'énergie et les transports sont au cœur des préoccupations européennes, qui visent à proposer des mesures garantissant aux Européennes une énergie propre, en quantité suffisante et à un coût raisonnable. Le transport routier, dont la croissance reste forte, fait l'objet d'une attention particulière exprimée dans un document global sur le problème de mobilité des personnes et des marchandises.

En 2003, le conseil et le parlement européen ont validé une proposition de directive (2003/30/CE) qui fixe des objectifs croissants de consommation en biocarburant dans le domaine des transports. Les consommations de carburants d'origine végétale devaient représenter au minimum 2 % en 2005 et 5,75 % en 2010.

Une autre directive votée en décembre 2008, dans le cadre de la réduction des GES, prévoit dans le secteur des transports, une consommation de 20 % d'énergies renouvelables, dont 10 % sont des biocarburants, en 2020.

L'atteinte de l'objectif en 2020 est dépendante de plusieurs variables, dont la mise sur le marché de biocarburant de deuxièmes et de troisièmes générations. Il est aussi prévu de tenir compte des critères de durabilité sur les biocarburants. Pour ces derniers la réduction des émissions de gaz à effet de serre, comparativement aux biocarburants d'origine fossile, est fixée au minimum à 35 % en 2010, 50 % en 2017 et 60 % pour les nouvelles installations après 2017. Des critères sociaux ainsi que ceux liés aux conséquences des changements d'utilisation des sols devront alors être pris en compte.

II.2.1.4. Cuba :

La réussite de la politique brésilienne d'introduction des biocarburants ou plus exactement de bioéthanol dans le mix énergétique a poussé les pays voisins à orienter leurs politiques énergétiques dans le même sens. Parmi ces pays, on trouve le Cuba.

Selon The Association for the Study of Cuban Economy : la canne à sucre a pu apparemment fournir la matière première pour la production des biocarburants. Mais les approvisionnements serrés pourraient être un problème. On s'attend à ce que le Cuba produise seulement 1.2 million de tonnes de sucre brut. C'est une petite quantité une fois comparée à la production de sucre dans les années 90, estimé entre 7 millions et 8 millions de tonnes par an. Avec son rendement actuel de canne à sucre, le Cuba pourrait produire environ 3.2 milliards de gallons d'éthanol par an.

Certains experts disent que des leaders politiques à l'instar de la légende cubaine Fidel Castro opposent et représentent un obstacle pour le développement de bioéthanol dans le pays.

Malgré cela la recherche d'une indépendance énergétique pousse le gouvernement cubain à opter pour ce type de sources. Certaines usines sont déjà en cours de construction telle que l'usine de la province de Matanzas (ouest de pays) pour la production de 20 MW d'électricité à partir des résidus de la canne à sucre. D'autres plantes telles que le Jatropha connaissent un développement pour leurs utilisations comme matières premières pour la production des biocarburants.

II.2.2. Le marché des biocarburants :

II.2.2.1. Le bioéthanol carburant :

Le bioéthanol est majoritairement consommé en Amérique du Nord et en Amérique latine, notamment aux États-Unis et au Brésil, avec respectivement des consommations de 24,6 Mtep et 10,5 Mtep pour l'année 2011. À l'échelle européenne, l'Allemagne reste de loin le premier consommateur de bioéthanol (0,79 Mtep), suivie de la France et du Royaume-Uni. [12]

	2011	2010	2009
Europe	2,98	2,87	2,35
Amérique du Nord	25,77	25,07	20,74
Amérique latine	10,83	12,49	11,48
Asie-Pacifique	1,94	1,75	1,48
Afrique	0,05	0,07	0,05
Monde	41,57	42,25	36,04

Tableau II.1: Statistiques de consommation en Mtep de bioéthanol carburant par zone géographique
Source : IFP énergies nouvelles

Concernant la production de bioéthanol, ce sont également les plus gros consommateurs qui en sont les principaux producteurs, à savoir les États-Unis : près de 26,7 Mtep, et le Brésil : 11,1 Mtep en 2011. [12]

Le tableau II.2 montre que l'Amérique latine et principalement le Brésil est la zone qui détient le taux d'incorporation le plus élevé de bioéthanol dans le transport routier. Ceci grâce à une flotte importante de véhicules adaptés (*Flex Fuel Vehicle*), mais pour la première fois depuis au moins 2005, le Brésil a vu en 2011 son taux d'incorporation d'éthanol reculer. Cette baisse s'explique essentiellement par une mauvaise saison de récolte de la canne, impliquant une baisse significative de la production d'éthanol, face à une demande globale en carburant qui augmente chaque année.

	2011	2010	2009
Europe	3,3 %	3,0 %	2,4 %
Amérique du Nord	5,6 %	5,4 %	4,5 %
Amérique latine	14,9 %	17,7 %	17,0 %
Asie-Pacifique	0,8 %	0,7 %	0,6 %
Afrique	0,1 %	0,2 %	0,2 %
Monde	4,2 %	4,3 %	3,7 %

Tableau II.2 : Statistiques de taux d'incorporation de bioéthanol carburant par zone géographique
Source : IFP énergies nouvelles

II.2.2.2. Le biodiesel carburant

L'Europe est de loin le premier consommateur mondial de biodiesel. Le tableau II.3 montre que la consommation en Europe est presque constante entre 2009 et 2011, par contre la consommation en Amérique du Nord a fortement progressé de 2010 à 2011.

	2011	2010	2009
Europe	10,84	10,72	9,36
Amérique du Nord	2,68	0,75	1,01
Amérique latine	2,94	2,47	1,23
Asie-Pacifique	0,73	0,82	0,68
Afrique	0	0	0
Monde	17,20	14,76	12,28

Tableau II.3 : Statistiques de consommation en Mtep du biodiesel carburant par zone géographique

Source : IFP énergies nouvelles

Concernant la production de biodiesel en Amérique latine (essentiellement à base de soja), elle est largement dominée par l'Argentine et le Brésil : 89 % de la production en 2010, et plus de 97 % en 2011. Cette augmentation est majoritairement liée à une augmentation conséquente de la production en Argentine : + 25 % entre 2010 et 2011 (contre + 11 % au Brésil) avec une orientation forte vers l'exportation. [12]

Parmi ces cinq zones géographiques, c'est en Europe que l'on observe le plus fort taux d'incorporation de biodiesel dans le pool diesel, suivie de près par l'Amérique latine, via notamment un développement actif des réglementations sur les mélanges au Brésil. Concernant l'Europe, 2011 est la première année pour laquelle le taux d'incorporation effectif du biodiesel EMHV n'a pas augmenté. Cela peut s'expliquer par des perspectives à la baisse décidée ou annoncée dans les objectifs nationaux et européens de taux d'incorporation d'énergies renouvelables dans les transports. En effet, le projet de la Commission européenne de plafonnement des biocarburants de première génération entre 5 et 7 % ne constitue pas un contexte très favorable au développement de la filière en Europe. [12]

	2011	2010	2009
Europe	5,4 %	5,4 %	4,8 %
Amérique du Nord	1,4 %	0,4 %	0,5 %
Amérique Latine	4,9 %	4,2 %	2,1 %
Asie-Pacifique	0,2 %	0,2 %	0,2 %
Afrique	0	0	0
Monde	1,4 %	1,2 %	1,0 %

Tableau II.4 : Statistiques de taux d'incorporation du biodiesel carburant par zone géographique

Source : IFP énergies nouvelles

À l'échelle européenne, le premier consommateur de biodiesel est devenu, en 2012, la France (2,3 Mtep) juste devant l'Allemagne (2,2 Mtep), suivies de l'Espagne (1,7 Mtep) et de l'Italie (1,3 Mtep). La Pologne reste depuis 2011 devant le Royaume-Uni, respectivement 5^e et 6^e consommateurs européens. [12]

II .2.2.3.Les principaux pays importateurs et exportateurs de biocarburants :

Les États-Unis sont, depuis 2010, exportateur net de bioéthanol. En 2011, les exportations d'éthanol américain ont d'ailleurs atteint des records, du fait de mauvaises récoltes de canne à sucre au Brésil cette année-là, principale ressource à l'origine de l'éthanol brésilien. Ainsi, le Brésil a été destinataire d'un tiers des exportations d'éthanol américain et les États-Unis sont devenus 1er exportateur de bioéthanol en 2011. En 2012, le Brésil a instauré une taxe spécifique à l'importation d'éthanol des États-Unis, de façon à assurer le retour vers une valorisation prioritaire de la production locale d'éthanol. En 2012, les États-Unis et le Brésil sont quasiment au même niveau d'exportation, mais en 2013 la situation s'est rétablie et le Brésil domine à nouveau le marché de l'exportation de bioéthanol.

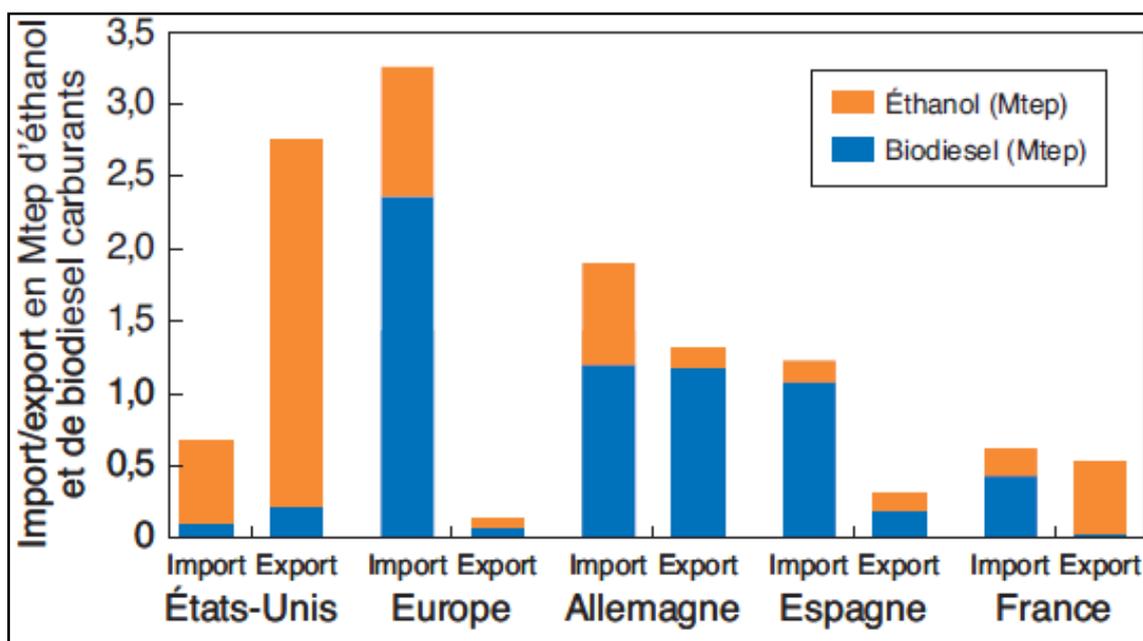


Figure II.3 : Import/export en 2011 d'éthanol et biodiesel carburants dans divers pays et zones géographiques en Mtep

Source : IFP énergies nouvelles

On note également d'importants échanges de biocarburants aux frontières de l'Europe, qui importe majoritairement du biodiesel, malgré des capacités de production non exploitées.

Ces importations proviennent notamment d'Argentine (plus de 50 %), d'Indonésie (39 %) et des États-Unis (moins de 5 %).

II.2.2.4.Les prix :

Les prix mondiaux de bioéthanol ont baissé début 2012, mais les conditions du marché variaient selon les régions. Aux États-Unis, les prix de bioéthanol ont commencé à remonter plus tard

dans l'année à mesure que s'est révélée l'ampleur de la sécheresse dans le pays, qui a fait grimper les prix des matières premières. Au Brésil, une meilleure récolte de canne à sucre au cours du second semestre a permis d'améliorer l'offre et de réduire les prix de l'éthanol à l'échelle nationale. [14]

Les prix mondiaux du biodiesel ont chuté en 2012 après avoir atteint des records en 2011, dans un contexte où les prix des huiles végétales étaient élevés – en partie à cause de la sécheresse aux États-Unis – de même que les prix du pétrole brut. À l'inverse de la production d'éthanol, la production mondiale de biodiesel a augmenté en 2012. Les quatre grands producteurs de biodiesel (Union européenne, États-Unis, Argentine et Brésil) ont accru leur offre et en Malaisie la production est repartie à la hausse après avoir atteint en 2011 le plus bas niveau jamais enregistré. [14]

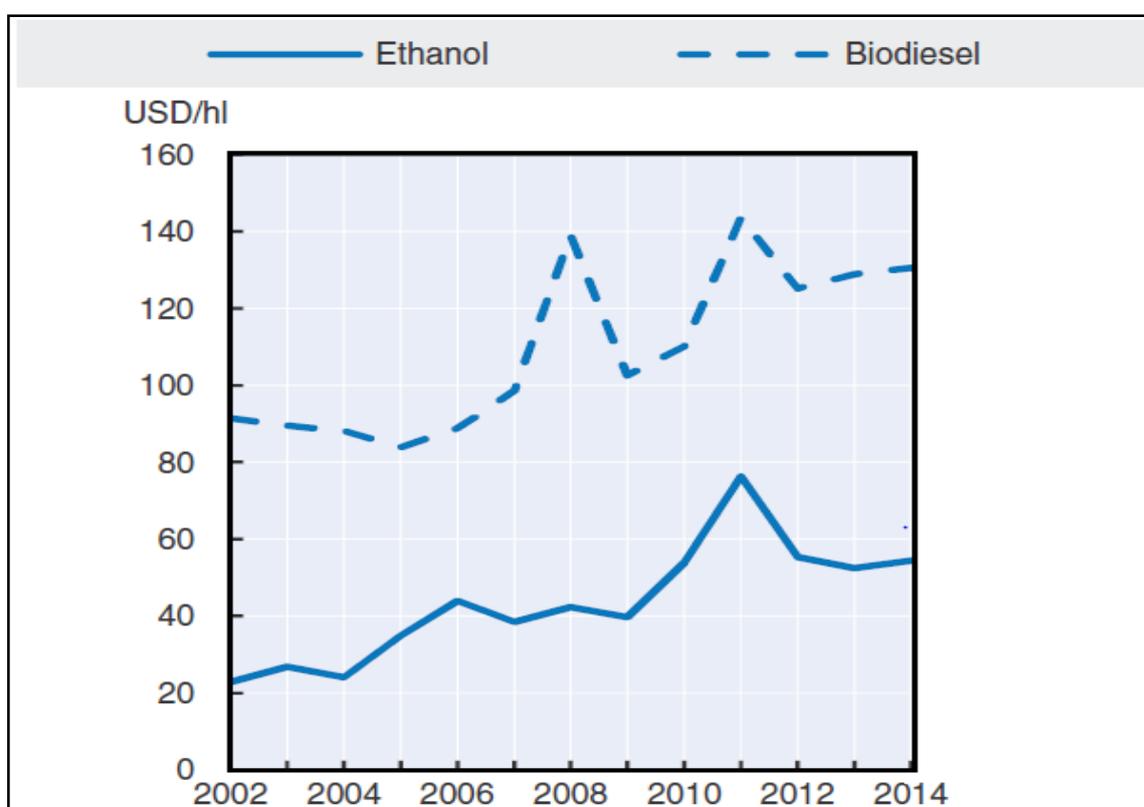


Figure II.4 : Evolution des prix de bioéthanol et biodiesel

Source : FAO et OCDE

II.3. Prospectives sur les biocarburants :

Selon une publication de la FAO et l'OCDE, les prix de l'éthanol et du biodiesel (figure II.5) devraient repartir à la hausse, compte tenu des mesures sur l'utilisation des biocarburants mises en place à travers le monde, qui stimulent la demande de biocarburants. Cependant, des incertitudes manifestes quant à la mise en place de ces mesures continueront à influencer grandement les marchés des biocarburants.

Les productions mondiales d'éthanol et de biodiesel devraient progresser, principalement grâce à des mesures stimulant la demande, pour atteindre respectivement 168 milliards de litres et 41

milliards de litres d'ici 2022. Au niveau mondial, leur fabrication devrait absorber 12 % de la production de céréales secondaires, 29 % de la production de canne à sucre et 15 % de la production d'huiles végétales. Les marchés de l'éthanol sont dominés par les États-Unis, le Brésil et, dans une moindre mesure, l'Union Européenne. Les marchés du biodiesel seront vraisemblablement dominés par l'Union Européenne suivie, de loin, par les États-Unis, l'Argentine et le Brésil. [14]

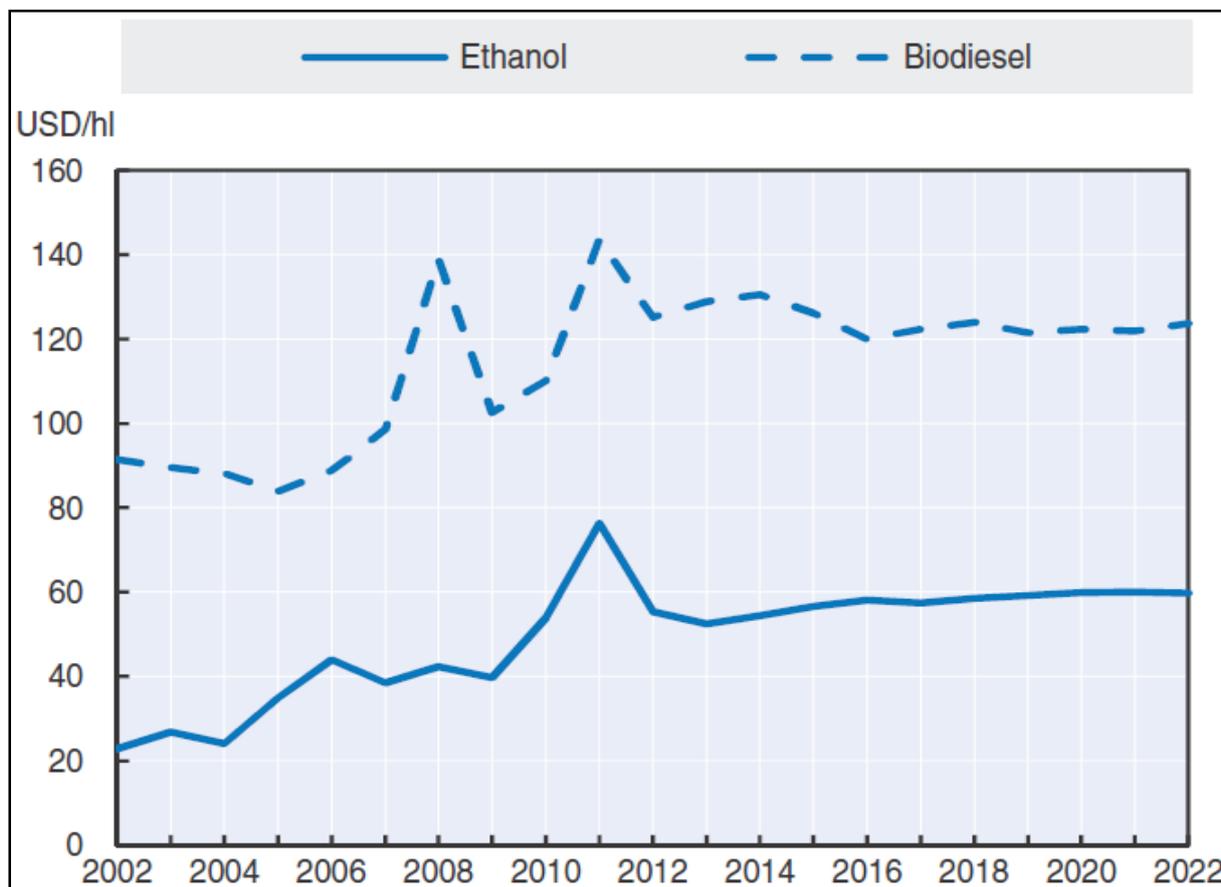


Figure II.5 : Evolution des prix des biocarburants à l'horizon 2022

Source : FAO et OCDE

Selon les mêmes organisations Le Brésil restera aussi un gros consommateur d'éthanol, dans l'hypothèse où Petrobras cesserait de geler le prix de vente de l'essence et puisque le niveau minimum de mélange requis est passé de 20 % à 25 % depuis mai 2012. Dans ce pays, la consommation d'éthanol par les propriétaires de véhicules poly carburant devrait donc augmenter de manière significative, en réponse à la hausse attendue du prix du pétrole brut.

II.3.1. Production et utilisation des biocarburants :

D'ici 2022, la production mondiale d'éthanol devrait avoir augmenté de près de 70 % par rapport à la moyenne de 2010-12 pour atteindre environ 168 milliards de litres à l'horizon 2022 (Figure II.6). Les trois principaux producteurs resteront sans doute les États-Unis, le Brésil et l'Union européenne (Figure II.7). Aux États-Unis et dans l'Union européenne, la production et l'utilisation sont principalement déterminées par les réglementations mises en place – respectivement le RFS2 et la directive sur les énergies renouvelables (DER).

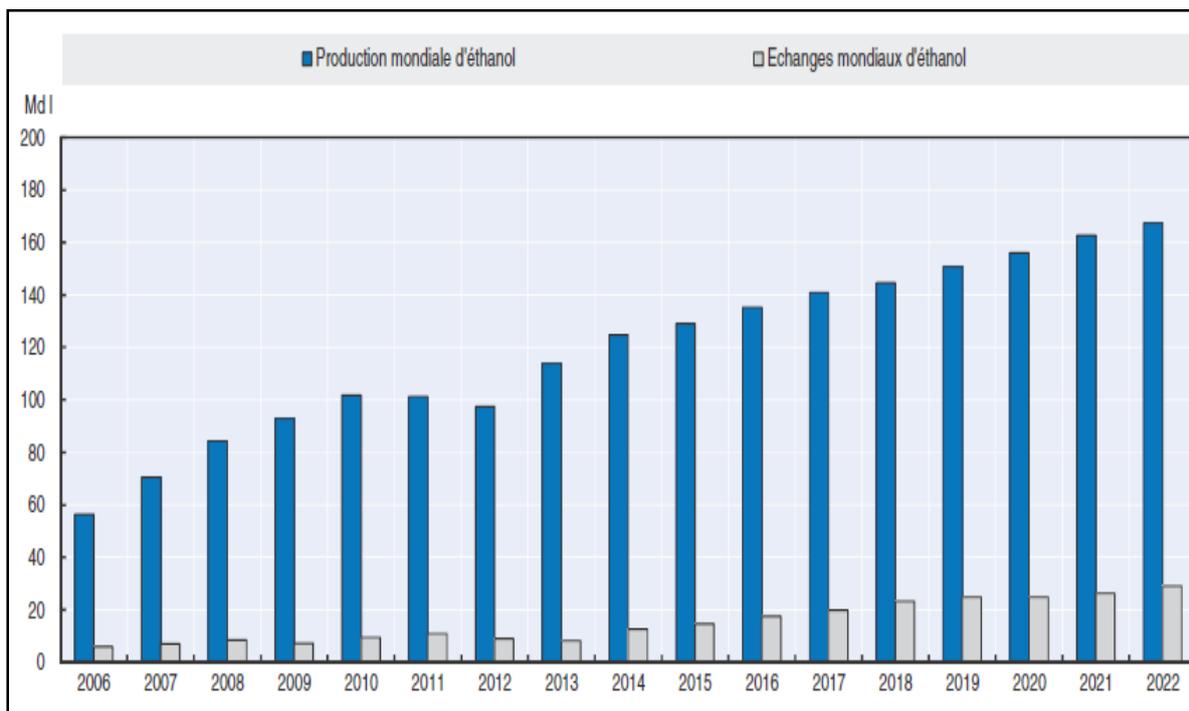


Figure II.6 : Evolution de la production mondiale d'éthanol à l'horizon 2022

Source : FAO et OCDE

II.3.2.Évolution du marché mondial de l'éthanol et de biodiesel :

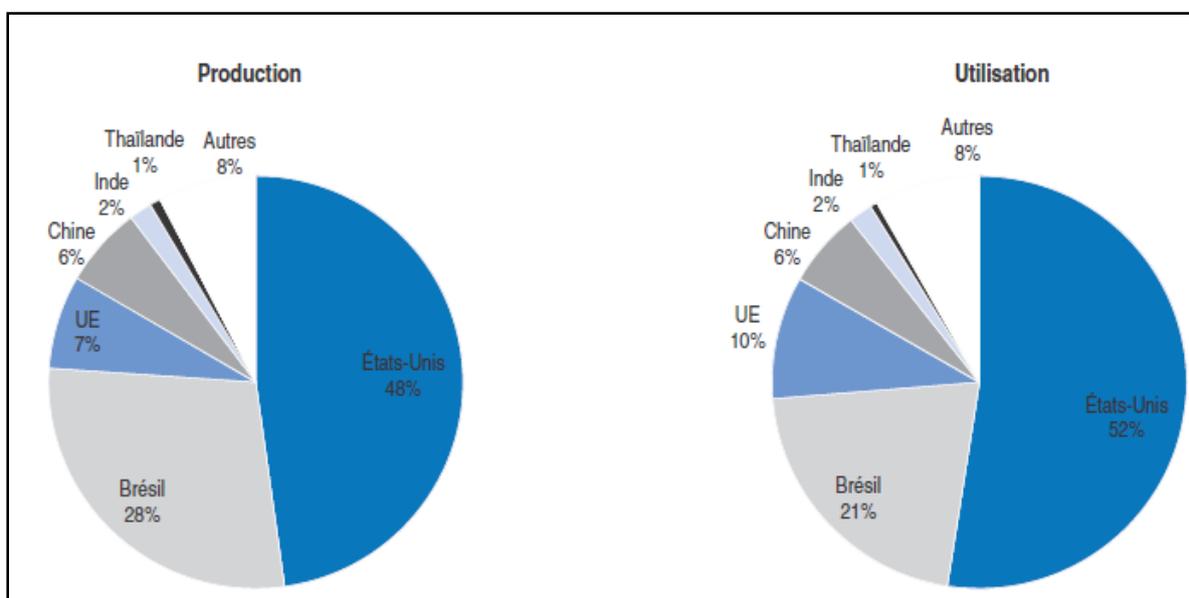


Figure II.7 : Répartition par pays de la production et de l'utilisation mondiale d'éthanol en 2022

Source : FAO et OCDE

En 2022, on assistera probablement à la rentrée de la chine dans le marché des bioéthanol.

La production d'éthanol dans les pays en développement devrait passer de 42 milliards de litres en 2012 à 72 milliards de litres en 2022 et la production brésilienne devrait compter pour 80 % de cette augmentation de l'offre. Une grande partie du reste viendra de la Chine, où moins de la moitié de la production d'éthanol est consommée sur le marché des carburants, le reste étant utilisé comme alcool dans de nombreuses préparations alimentaires ou non alimentaires. La croissance de la production chinoise devrait provenir du manioc et du sorgho puisqu'il n'est plus permis d'augmenter l'utilisation de maïs pour la production d'éthanol.

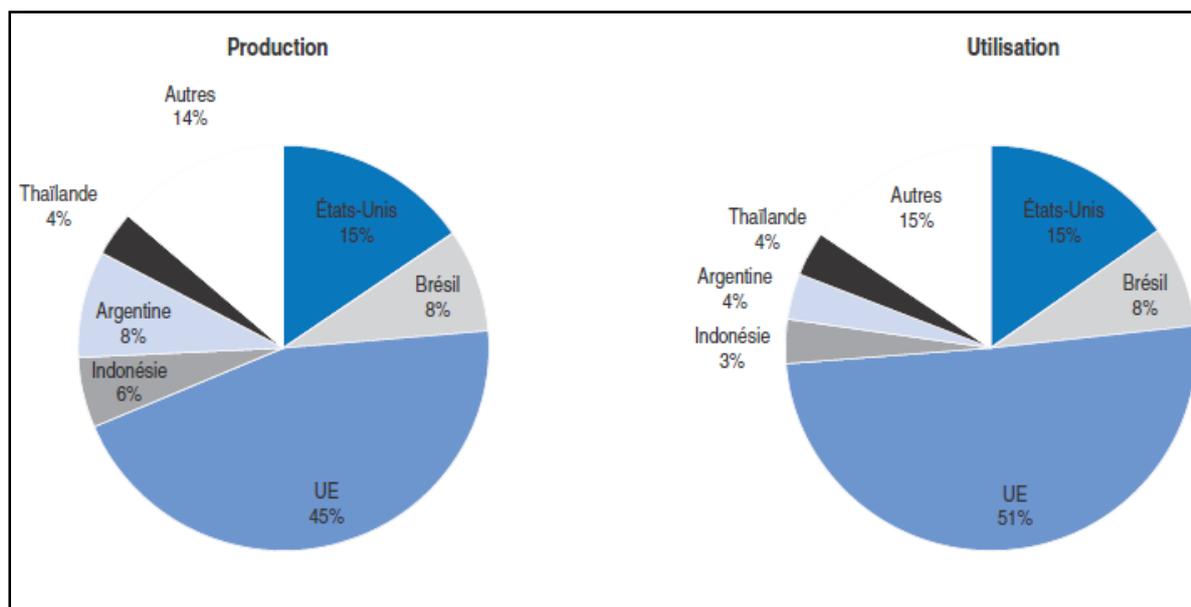


Figure II.8 : Répartition par pays de la production et de l'utilisation mondiale de biodiesel en 2022

Source : FAO et OCDE

La production mondiale de biodiesel devrait atteindre 41 milliards de litres en 2022. L'Union européenne restera vraisemblablement de loin le premier producteur et utilisateur de biodiesel (Figure II.8). Parmi les autres acteurs importants figurent l'Argentine, les États-Unis et le Brésil ainsi que la Thaïlande et l'Indonésie. Dans presque tous les pays, la consommation sera dictée par les mesures gouvernementales en vigueur.

II.4. Les enjeux des biocarburants :

II.4.1. Enjeux environnementaux :

Le développement des filières biocarburants est aujourd'hui associé dans une large mesure aux objectifs de réduction des émissions des Gaz à effet de serre dans le secteur des transports. Les études réalisées sur les bilans « du champs à la roue » s'accordent sur le fait que l'utilisation de ces carburants d'origines végétales permet un gain certain en termes d'émissions de GES et de consommation d'énergies fossiles, comparativement à leurs équivalents issus du pétrole.

La consommation énergétique et les émissions de GES sont les enjeux environnementaux des biocarburants qui sont les plus intensément étudiés.

II.4.1.1. Problématique :

La controverse autour des **bilans GES et consommations d'énergies non renouvelables des filières biocarburants** est alimentée par la publication de plusieurs dizaines d'études mentionnant quasiment chacune des résultats différents. Le champ de ces études est identique : il s'agit de dresser un inventaire des consommations et émissions de la filière complète de production et utilisation du biocarburant en prenant donc en compte l'ensemble des étapes de son cycle de vie : on parle de bilans « du puits à la roue » (*Well to Wheels*).

Toutefois, d'un point de vue qualitatif, les différents résultats de ces études vont dans le même sens, et s'accordent à dire que l'usage des biocarburants permet une réduction significative des émissions de GES et des consommations d'énergies non renouvelables, par rapport aux solutions conventionnelles (carburants pétroliers). Autrement dit, ces carburants induisent des gains certains sur ces deux types de bilans mais ces gains restent difficiles à quantifier avec précision. [15]

II.4.1.2. Méthodologie employée :

La méthodologie employée pour établir les bilans « du puits à la roue » des différentes filières carburants est basée sur le concept de **l'analyse de cycle de vie (ACV)**, seule méthode d'analyse environnementale ayant fait l'objet de normes internationales (normes ISO 14040 à 43). Cette méthode repose sur l'étude de l'ensemble des étapes élémentaires d'une filière reliées entre elles et conduisant à l'élaboration d'un produit. Est pris en compte l'ensemble des étapes allant de l'obtention des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit étudié (recyclage, valorisation thermique ou encore mise en décharge).

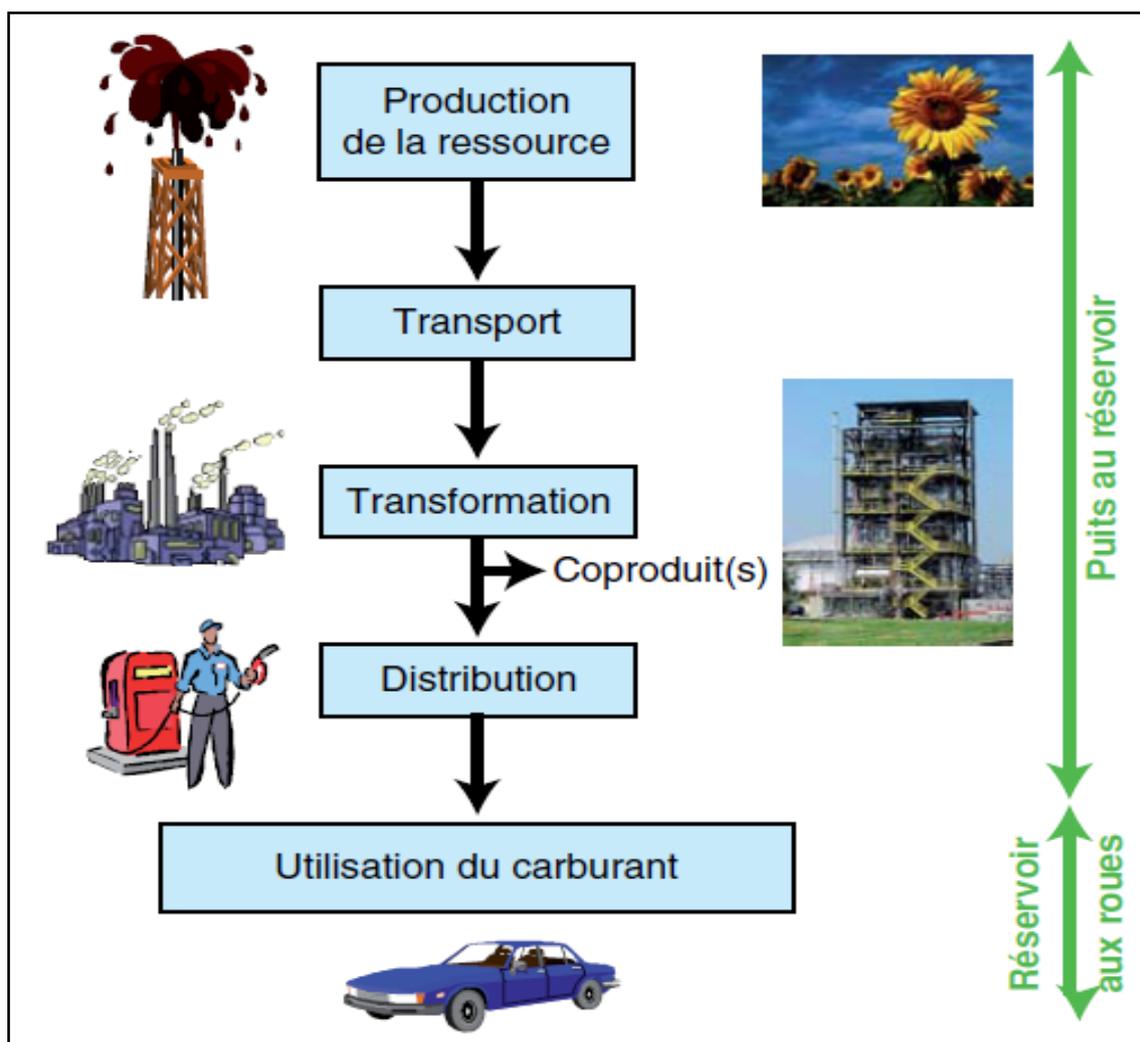


Figure II.9 : Schéma de cycle de vie d'un carburant

Source : IFP énergies nouvelles

II.4.1.3. Résultats des bilans « du puits à la roue » :

Les résultats des bilans « du puits à la roue » présentés dans les tableaux II.5 et II.6 sont issus de deux études de référence, très souvent citées et comparées :

- l'étude réalisée en France en 2002 pour le compte de l'ADEME et la DIREM (Direction des ressources énergétiques et minérales),
- l'étude européenne réalisée en 2004 (et mise à jour en mai 2006), en collaboration par le Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC), le CONCAWE qui est l'association européenne des compagnies pétrolières traitant des questions liées à l'environnement, et EUCAR qui coordonne les actions de recherche et développement de l'Association européenne des constructeurs automobiles.

Ces deux études présentent des résultats assez différents. Une analyse de ces travaux met en évidence que les écarts sont liés aux méthodes d'affectation différentes retenues. L'étude ADEME/DIREM utilise le prorata massique alors que l'étude JRC/EUCAR/CONCAWE adopte la méthode des impacts évités (voir Annexe 1).

	Émissions de GES					
	Résultats de l'étude ADEME/DIREM (décembre 2002)			Résultats de l'étude JRC/EUCAR/CONCAWE (mai 2006)		
	gCO ₂ éq/MJ	Référence gCO ₂ éq/MJ	Gain par rapport au carburant pétrolier de référence	gCO ₂ éq/km	Référence (gCO ₂ éq/km)	Gain par rapport au carburant pétrolier de référence
Éthanol ex-blé	34,4	85,9	60 %	114	164	30 %
Éthanol ex-betterave	33,6	85,9	61 %	111	164	32 %
Éthanol ex-lignocellulosique	nd	–	–	36	164	78 %
Éthanol ex-canne à sucre	nd	–	–	19	164	88 %
EMHV colza	23,7	79,3	70 %	73	156	53 %
EMHV tournesol	20,1	79,3	75 %	34	156	78 %
Huile végétale pure colza	17,8	79,3	78 %	nd	–	–
Huile végétale pure tournesol	13,2	79,3	83 %	nd	–	–
BtL (à partir de déchets forestiers et agricoles)	nd	–	–	10	156	94 %

Tableau II.5 : Résultats des bilans GES des filières biocarburants, comparativement au carburant pétrolier de référence

Source : IFP énergies nouvelles

	Consommations d'énergies non renouvelables					
	Résultats de l'étude ADEME/DIREM (décembre 2002)			Résultats de l'étude JRC/EUCAR/CONCAWE (mai 2006)		
	MJ _{ex} /MJ	Référence MJ _{ex} /MJ	Gain par rapport au carburant pétrolier de référence	MJ _{ex} /km	Référence (MJ _{ex} /km)	Gain par rapport au carburant pétrolier de référence
Éthanol ex-blé	0,489	1,15	57 %	1,68	2,16	22 %
Éthanol ex-betterave	0,488	1,15	58 %	1,65	2,16	24 %
Éthanol ex-lignocellulosique	nd	–	–	0,51	2,16	76 %
Éthanol ex-canne à sucre	nd	–	–	0,2	2,16	91 %
EMHV colza	0,334	1,09	69 %	0,73	2,05	64 %
EMHV tournesol	0,316	1,09	71 %	0,54	2,05	74 %
Huile végétale pure colza	0,214	1,09	80 %	nd	–	–
Huile végétale pure tournesol	0,183	1,09	83 %	nd	–	–
BtL (à partir de déchets forestiers et agricoles)	nd	–	–	0,12	2,05	94 %

Tableau II.6 : Résultats des bilans énergies non renouvelables des filières biocarburants, comparativement au carburant pétrolier de référence

Source : IFP énergies nouvelles

II.4.1.4. Interprétation des résultats :

Plusieurs commentaires peuvent être faits sur la base de ces résultats. Tout d'abord, d'une manière générale, les biocarburants permettent bien une réduction significative des émissions de GES comparativement aux carburants pétroliers, allant de 30 % à 94 % lorsqu'ils sont utilisés purs. On notera que les gains les plus importants en termes d'émissions de GES sont obtenus lors de la transformation de matières lignocellulosiques en biocarburants (filières de deuxième génération). En effet, dans cette valorisation du bois ou de la paille, une partie de la matière

première est souvent utilisée pour produire les utilités (chaleur, électricité) nécessaires aux procédés, permettant ainsi des gains substantiels en termes d'émissions. Ceci explique notamment que pour les filières de production d'éthanol, le meilleur résultat soit obtenu à partir de la canne à sucre, la bagasse (résidu fibreux de la canne à sucre) étant utilisée pour générer la chaleur nécessaire à l'étape de distillation. Par ailleurs, on remarquera que la méthodologie retenue pour l'étude JRC/EUCAR/ CONCAWE est plus défavorable puisque les gains calculés pour une même filière sont généralement plus faibles. **Cette différence réside dans la méthodologie utilisée.**

De l'analyse des résultats des bilans énergétiques présentés dans le tableau II.6, plusieurs éléments ressortent. Tout d'abord, la production de biocarburant s'accompagne d'une consommation de quantités non négligeables d'énergie fossile. Ceci a pour conséquence que le gain final par rapport à la solution « carburants pétroliers » ne sera jamais de 100 %. Suivant les hypothèses faites et les filières étudiées, ce gain peut aller de 22 % à plus de 90 %. L'étendue de cette fourchette de valeurs indique qu'il convient d'être prudent lorsque le sujet du gain en termes de consommation d'énergie lié à l'usage des biocarburants est abordé. On notera encore une fois que les gains obtenus avec les résultats de l'étude JRC/EUCAR/ CONCAWE sont généralement plus faibles. Tout comme pour les émissions de GES, les gains les plus importants en termes de consommations d'énergies non renouvelables sont obtenus avec les filières de deuxième génération, à base de matières lignocellulosiques et de canne à sucre pour la filière de production d'éthanol.

Les deux études convergent dans l'ensemble sur l'intérêt de l'utilisation des EMHV et divergent à propos de l'éthanol. En effet, elles montrent que la filière EMHV est plus favorable en termes de consommations d'énergie fossile et d'émissions de GES que les filières éthanol ex-blé ou ex-betterave. En revanche, alors que l'étude ADEME/DIREM avance un avantage relativement important lié à l'emploi de l'éthanol (de l'ordre de 60 %, aussi bien sur les émissions de GES que sur les consommations d'énergies non renouvelables), l'étude JRC/EUCAR/ CONCAWE aboutit à un résultat nettement moins favorable (gain de l'ordre de 30 % sur les émissions de GES et de 20 % seulement sur les consommations d'énergies fossiles).

Par ailleurs, seule l'étude ADEME/DIREM évalue les filières de production d'huiles végétales pures (HVP) et mentionne des gains de l'ordre de 80 % par rapport au diesel conventionnel, tant au niveau des émissions de GES que des consommations d'énergies non renouvelables. Ces gains sont à peu près de 10 % supérieurs à ceux obtenus pour les filières EMHV. Mais en utilisant la méthode des impacts évités et non le prorata massique, on trouve des valeurs légèrement meilleures pour l'EMHV, avec des données de base équivalentes (consommations et émissions pour chaque étape identiques à celles utilisées dans l'étude ADEME/DIREM). La hiérarchisation de ces filières en termes d'émissions de GES et de consommations d'énergies non renouvelables s'inverse donc au profit des filières EMHV. Ceci est dû au fait que le crédit alloué au biodiesel pour tenir compte de la coproduction de glycérine (se substituant à de la glycérine produite dans l'industrie chimique) fait plus que compenser les émissions de GES et les consommations d'énergies non renouvelables liées aux étapes supplémentaires (semi-raffinage et estérification) peu consommatrices d'énergie.

Il faut souligner que les deux études ne tiennent pas compte dans leurs méthodologies de calcul ce qu'on appelle le changement d'affectation des sols (CAS). En effet ces dernières années plusieurs chercheurs et organisations se penchent sur la question, car l'introduction de ce paramètre dans les méthodologies de calcul affectera les bilans des biocarburants.

Chaque hectare de terre (cultivé ou non) est en effet caractérisé par un niveau de stock de carbone (qui dépend en particulier du type de sol, du climat, des usages précédents et des pratiques culturales adoptées). Tout changement d'affectation ou d'usage du sol induit par conséquent une variation de ce stock qui peut conduire à réduire ou à accroître les GES. Les biocarburants peuvent être cultivés sur des milieux naturels auparavant non cultivés (CAS direct) ou sur des terres déjà cultivées et repousser ailleurs la production alimentaire (CAS indirect).

L'article de Searchinger et al. (2008) montre que lorsque ce CAS est considéré, l'écart entre le bilan GES des biocarburants de **première génération** et celui des carburants fossiles est significativement réduit. En effet, la conversion des terres entraîne en moyenne des émissions de 350 tonnes de CO₂ par hectare converti (avec de fortes variations). Les auteurs calculent alors la « dette carbone », c'est-à-dire le nombre d'années nécessaire pour que les émissions évitées par la production de biocarburant compensent le déstockage initial. Ce dernier s'élèverait à 167 ans pour l'éthanol de maïs américain et à 86 ans pour les palmiers à huile malaisiens. Les résultats annoncés par les différentes études sont parfois très divergents et pour certaines filières, il y a de fortes incertitudes sur l'existence d'un réel gain environnemental. Seule la production d'éthanol de canne à sucre brésilien présente un bilan environnemental positif rarement contesté (environ 80 % d'émissions évitées (FAO, 2008) ; (OCDE, 2008)), sous réserve qu'elle n'engendre pas de changement d'affectation des terres (déforestation). [18]

Le bilan environnemental des biocarburants est un point très discuté ces dernières années, il semble nécessaire de s'accorder sur une méthodologie complète et fiable d'évaluation afin de pouvoir faire les bons choix pour les pays qui sont sur le point de développer leurs ressources en biocarburants.

Le tableau II.7 résume les principaux avantages et inconvénients des différentes générations des biocarburants.

Types de biocarburants	Filières	Ressources	Principaux atouts	Principales limites
Première génération	Éthanol	Cultures sucrières, céréales	Technologies matures. Bilans énergie et GES globalement inférieurs à ceux de l'essence et du diesel.	Forte emprise au sol, effet majeur des CAS. Impacts locaux liés à la phase agricole, inexistant dans le cas des filières pétrolières.
	Huiles végétales et EMHV	Cultures oléagineuses		
Deuxième génération	Éthanol cellulosique BTL	Éléments non spécifiques aux résidus ou aux cultures	Bilans énergie/GES et impacts locaux plus réduits que pour la première génération.	Technologies en développement (pilotes de démonstration industrielle), encore coûteuses.
		Résidus forestiers ou de culture	Impacts limités de la mobilisation de résidus. Pas d'emprise au sol.	Potentiel limité de la ressource.
		Cultures dédiées (TCR, herbacés)	Emprise au sol réduite par rapport à la première génération.	Possibilité d'effets négatifs liés au CAS.
Troisième génération	Huiles végétales et EMHV	Micro-algues	Emprise au sol réduite par rapport aux première et deuxième générations, avec possibilité de mobiliser des terres non fertiles. Capacité de capture biologique du CO ₂ industriel.	Technologies immatures. Forts besoins énergétiques liés à la production des micro-algues et l'extraction de l'huile.

Tableau II.7 : Synthèse des principaux enjeux technico-environnementaux des différentes générations de biocarburants

Source : Sciences Eaux & Territoires N°07 -2012

II.4.2. Enjeux socio-économiques:

Les biocarburants représentent une source supplémentaire de carburant et une activité agro-industrielle nouvelle. Ils permettent aux pays qui les produisent de réduire leur dépendance énergétique vis-à-vis des carburants d'origine fossile. Cependant, l'utilisation de biocarburants de première génération peut entraîner l'augmentation de la demande et la hausse des prix des produits agricoles. Celle-ci peut créer l'instabilité sociale dans les pays pauvres. [17]

Des politiques de soutien coûteuses

D'une manière générale, les biocarburants, comme les autres énergies renouvelables, ne sont pas encore assez compétitifs pour pouvoir concurrencer les carburants fossiles, sans un soutien des pouvoirs publics. **Dans certains contextes de prix du pétrole, seul le bioéthanol brésilien est en mesure d'y parvenir.** La plupart des pays producteurs ont mis en place des politiques de soutien à la production et/ou à l'utilisation de biocarburants, suivant des dispositifs au demeurant variés ; ces politiques s'appliquent à tous les stades de la filière, à savoir au niveau de la production (prime à l'implantation de cultures dédiées aux biocarburants), de la transformation (aides aux investissements), de la commercialisation (crédits d'impôts,

obligations d'incorporation, etc.) et de la consommation (exonérations fiscales, aides à l'achat de véhicules utilisant les mélanges).

Même s'il est difficile d'isoler les effets propres de l'ensemble de ces mesures des effets d'autres facteurs, il semble que celles-ci aient été incitatives puisque la production communautaire de biodiesel a été multipliée par six entre 2003 et 2010 (et par huit pour le bioéthanol). L'intervention publique dans ce secteur peut également être justifiée par le fait que les biocarburants génèrent des gains pour la société (indépendance énergétique et de réduction des GES). [16]

De nouvelles tensions sur les marchés alimentaires :

La montée en puissance du marché des biocarburants crée une nouvelle demande de produits agricoles, particulièrement forte pour le maïs, le sucre et les oléagineux. Au cours de la période 2008-2010, le secteur des biocarburants a utilisé 11% de la production mondiale de céréales secondaires, 21% de la production de sucre et 11% de la production d'huiles végétales (OCDE-FAO, 2011). Aux Etats-Unis, 30% de la production de maïs a été utilisée pour la production d'éthanol, tandis que le Brésil utilisait 50% de sa production de canne à sucre pour ses biocarburants (FAO, 2009). Dans l'UE, 60% de la production d'huile de colza a été transformée en biodiesel. Compte tenu de la dynamique actuelle des secteurs des biocarburants et des dispositifs réglementaires prévus par les différents pays producteurs à l'horizon 2020, cette augmentation de la demande de matières premières pour la production de biocarburants devrait se poursuivre au cours des dix prochaines années.

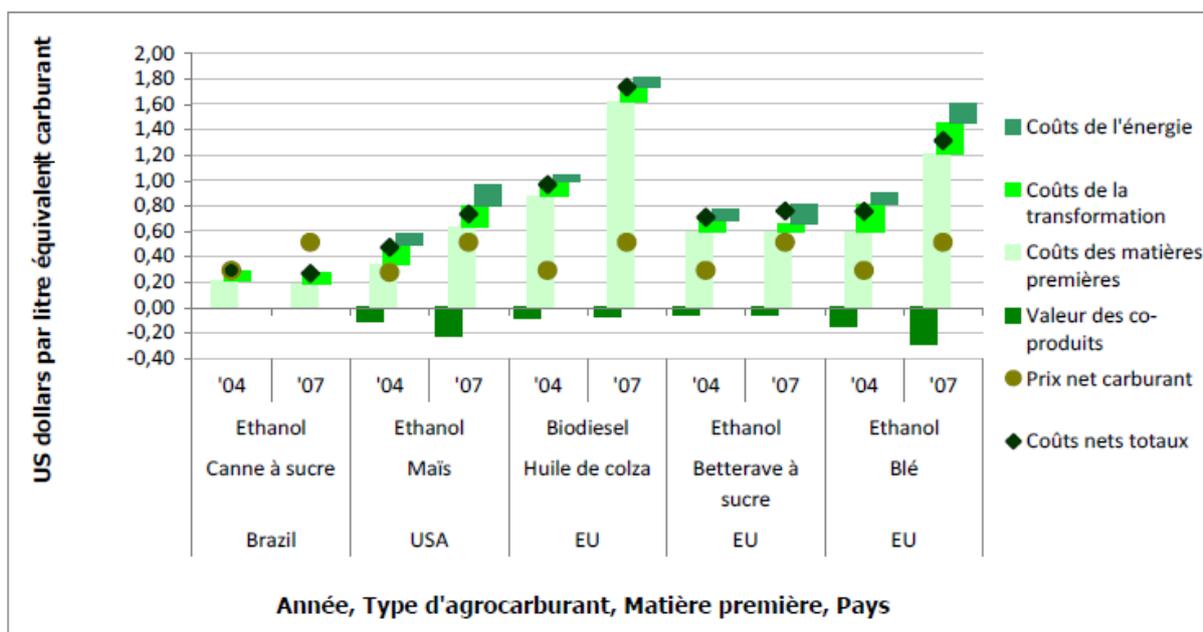


Figure II.10 : Coût de production des principales filières de biocarburants dans le monde (2004-2007)
Source: OECD-FAO Agricultural Outlook 2008-2017

On remarque bien que les prix des matières premières sont augmentés de 2004 à 2007 à cause de l'augmentation d'utilisation de ces matières pour les biocarburants.

La sécurité alimentaire en question

L'essor démographique, le changement des régimes alimentaires (donnant plus de place aux protéines animales) et l'augmentation du pouvoir d'achat des ménages dans de nombreux pays émergents constituent trois facteurs clés qui se cumulent pour peser dans le sens d'une augmentation soutenue de la demande mondiale en bien alimentaires (OCDE/FAO, 2011). Dans ce cadre, le développement des biocarburants constituent un facteur supplémentaire, avec d'autres (dont la spéculation sur les marchés agricoles, le climat, etc.), qui tend à peser sur l'évolution des prix internationaux.

La flambée actuelle du prix des produits alimentaires observée dans les statistiques de la FAO fragilise la situation des populations dans une trentaine de pays Africains, notamment ceux importateurs nets de produits agricoles. Cela concerne tout particulièrement les populations rurales et les agriculteurs les plus pauvres. Certains de ces pays ont la faiblesse d'être à la fois dépendants en céréales et en produits pétroliers. Parmi ces pays africains, treize couvrant une population totale de 242 millions d'habitants, sont considérés par la FAO comme faiblement dotés en énergie ; ceux-ci ont en effet enregistré, en 2010, un déficit commercial au titre des combustibles supérieur à 5% de leur PIB. Cette situation deviendra encore plus délicate à l'avenir compte tenu des liens d'interdépendance entre le prix des denrées alimentaires et celui de l'énergie.

La production de biocarburants de deuxième génération n'éliminera pas forcément la concurrence existante sur le mode d'utilisation du foncier entre des cultures destinées à des fins alimentaires ou celles destinées à des fins énergétiques. Cette concurrence dépendra des possibilités d'extension des surfaces cultivables au niveau mondial et des gains de productivité, points sur lesquels il n'existe pas de consensus quant aux évolutions à long terme.

Certains experts disent que la vraie raison de ce qu'on a appelé le printemps arabe (Tunisie et Égypt) n'est pas la soif à la liberté (comme disait les médias) mais c'est l'augmentation des prix des produits alimentaires de base (blé, maïs...) en 2008-2010. En effet, l'utilisation de ces produits pour la production des biocarburants a provoqué une augmentation des leurs prix internationaux et comme ces pays dépendent fortement de l'importation de ces produits les gouvernements respectifs de ces pays ne trouvaient de solution que d'augmenter les prix (manque de ressource), le résultat était la révolution dans ces pays. [19]

II.5. Conclusion :

Le marché mondial des biocarburants est en pleine expansion. La rentrée en jeu des nouvelles générations va certainement permettre l'augmentation d'utilisation des biocarburants et de nouveaux acteurs vont rentrer sur marché.

Malgré leurs impacts environnementaux et socio-économiques contestés, il est évident que les biocarburants offrent en générale plus d'avantages que d'inconvénients surtout avec le développement intéressant des biocarburants de deuxième génération.

Conclusion générale

Dans un monde où la température a augmenté de 0,8 °C depuis la révolution industrielle à cause de l'ignorance de l'homme et de son recours à des sources d'énergie très polluantes tout en sachant le risque qu'il court et toutes les catastrophes que cette augmentation peut engendrer, la recherche des solutions alternatives, propres et durables est nécessaire.

Les biocarburants peuvent offrir l'alternative. L'analyse des différentes générations a montré que les progrès scientifiques vont dans la bonne direction : assurer des biocarburants avec des bilans environnementaux, économiques et sociaux très favorables. L'évolution des technologies de production des biocarburants a pour souci majeur d'offrir des sources d'énergie avec les moindres coûts et applicables dans toutes les régions de monde.

Avec les biocarburants de deuxième génération, certaines régions de monde, tel que l'Afrique où cette source d'énergie n'est quasiment pas exploitée, peuvent avoir leur part du marché même si d'après les experts, ce marché sera toujours dominé par les mêmes acteurs au moins dans un futur proche.

L'Algérie peut investir dans ces nouvelles sources à condition de choisir la technique la plus adaptée, cela peut contribuer au renforcement de notre sécurité énergétique et offrir de nouvelles pistes de réflexion pour la résolution de certains problèmes rencontrés aujourd'hui surtout dans le domaine des transports.

Références bibliographiques :

- [1] Etienne POITRAT, 2009, Biocarburants be 8550, techniques de l'ingénieur, Paris.
- [2] Amina ALLOUACHE, mars 2012, « Etude de matières premières locales non alimentaires pour la production de biocarburants » Magister en Energies renouvelables, Département d'électronique, Alger, page21 22.
- [3] www.etudier.com/dissertations/Historique-Biocarburant/72176.html
- [4] Florian Paillet, 2013, « les biocarburants » Master énergie, université Montpellier 2, Montpellier.
- [5] Daniel Ballerini, 2011, Les biocarburant : répondre aux défis énergétiques et environnementaux des transports. IFP énergies nouvelles.
- [6] Vincent GRAMMONT, 2006, les biocarburants à partir de ressources lignocellulosiques : Présentation des filières et identification des risques, INERIS
- [7] Advances in Valorization of Lignocellulosic Materials by Biotechnology: An overview. BioResources, 2013.
- [8] Charlène Sagnes et Marie-Françoise Chabrelie, 2015, Biocarburants de deuxième génération : une nouvelle étape est franchie, panorama 2015, IFP énergies nouvelles
- [9] BROUST F, PERSYST C, GIRARD P, 2013, Biocarburants de seconde génération et bioraffinerie, re110, techniques de l'ingénieur ,Paris]
- [10] des biocarburants à partir des algues, IFP Energies Nouvelles 2011
- [11] third generation biofuels from microalgae, institute for biotechnology and bioengineering , center of biological engineering , university of Minho ,2010
- [12] Anne Bouter, Daphné Lorne, 2013, Tour d'horizon des filières biocarburants dans le monde, panorama 2014, IFP énergies nouvelles.
- [13] Planetoscope - Statistiques Production mondiale de biocarburants.html
- [14] Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2013-2022, 2013, FAO.
- [15] Anne PRIEUR-VERNAT, Stéphane HIS, 2006, Biocarburants : quels bilans sur l'environnement ? Panorama 2007, IFP énergies nouvelles.
- [16] Bertrand Schmitt, Vanessa Persillet, 2012, Les biocarburants de première génération : un bilan mondial mitigé, INRA Sciences sociales.
- [17] www.Connaissances des énergies.com/ biocarburant
- [18] Alba DEPARTE, étude prospective sur la seconde génération de biocarburant, Direction Générale du Trésor du Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (France), septembre 2010
- [19] Jean-Marc Jancovici, février 2012, Gérer la contrainte carbone, un jeu d'enfant ? conférence à l'école Normale Supérieure, Paris.

Références bibliographiques

-C.E.CHITOUR, 13/06/2011, Quand un plein de voiture peut nourrir un africain pendant un an : L'anomie du monde

<http://commentjevoislemonde.blogs.nouvelobs.com/archive/2011/06/13/quand-un-plein-de-voiture-peut-nourrir-un-africain-pendant-u.html>

-C.E.CHITOUR, 25 janvier 2010, Biocarburants ou nérocarburants ?

<http://meteopolitique.com/Fiches/ecologie/22/a022.htm>

-19ème Journée de l'Energie : Les ressources pétrolières au service du développement durable de l'Algérie, Avril 2015

Annexe 1 :

Méthodes d'allocation : lors la production des biocarburants, certains coproduits sont également générés. S'ils sont valorisés, il paraît légitime qu'une part des impacts environnementaux (et des coûts de production) leur soit attribuée. Il existe différentes méthodes pour déterminer la part des impacts qui sera allouée aux coproduits. La méthode choisie influence fortement l'impact global de la filière de production du biocarburant. Les principales méthodes d'allocation sont les suivantes :

- **la méthode dite « de substitution » :** Si ces coproduits sont valorisés, on évalue les impacts environnementaux (et les coûts) de leurs filières classiques de production. Pour une quantité donnée de coproduit générée par la filière biocarburant, on définit la part d'impacts qui lui sera affectée à hauteur des impacts évités grâce à la moindre production d'une même quantité de coproduits par la filière classique. Même si cette méthode semble la plus proche de la réalité, elle est souvent difficile à appliquer, car elle demande une très bonne connaissance des filières de valorisation alternatives.
- **les méthodes d'allocation au prorata :**
 - **allocation massique :** affectation des impacts au prorata de la masse des différents coproduits. Par exemple, lors de la phase finale de distillation du bioéthanol de blé, on récupère 43 % (en masse) de bioéthanol et 57 % de vinasses qui peuvent être méthanisées (valorisation énergétique). Si on applique les règles de l'allocation massique, 57 % des impacts environnementaux de cette étape sont affectés aux vinasses, ce qui améliore nettement le bilan environnemental du bioéthanol, qui présente pourtant un contenu énergétique largement supérieur à celui des vinasses.
 - **allocation économique :** affectation des impacts au prorata des prix de marché des différents coproduits. Cette méthode nécessite de connaître les prix de marché des coproduits et que ces derniers soient relativement stables dans le temps.
 - **allocation énergétique :** affectation des impacts au prorata du contenu énergétique des différents coproduits. Cette méthode semble intéressante pour les filières de production de biocarburants puisque leur but est de générer des produits de contenu énergétique élevé.