

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Département d'électronique



***ETUDE DE MATIERES PREMIERES LOCALES NON
ALIMENTAIRES POUR LA PRODUCTION DE
BIOCARBURANTS***

ALLOUACHE Amina

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en ***ENERGIES
RENOUVELABLES*** - Option : ***Bioénergies***

Sous la direction de :

Dr Majda Amina AZIZA

Soutenu le 07 / 03 / 2012

2012

Remerciements

En guise de reconnaissance et de gratitude, mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance sont adressés à toutes les personnes qui ont contribué à l'accomplissement de ce projet, je citerai particulièrement:

Ma promotrice M^{lle} A.M. AZIZA, pour m'avoir proposé ce sujet, qui désormais me tient beaucoup à cœur, je la remercie pour son encadrement et sa disponibilité. Ses conseils ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Professeur T.A. ZAID, pour son aide, sa disponibilité et sa gentillesse. Je le remercie également pour avoir bien voulu examiner mon travail.

Mon collègue monsieur M. AMOURI, pour sa serviabilité et sa précieuse aide notamment pour la maîtrise sur logiciel SimaPro.

Monsieur W. ZANNDUCHE, ainsi que tout le personnel de l'INFR. Les informations et les documents qui m'ont procurés m'ont énormément aidé à la finalisation de l'inventaire.

Mon frère Lamine, pour son aide notamment pour la conception de certains schémas.

Le personnel du Jardin d'essai pour leur aide, leur accueil et leur gentillesse.

Je tiens également à remercier

Monsieur M. HADDADI, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Melle A. MEFTI, pour avoir bien voulu examiner et évaluer mon travail.

Melle R. BESSAH, pour sa disponibilité et sa gentillesse. Je la remercie aussi pour avoir bien voulu examiner mon travail.

Dédicaces

À mes chers parents

À mes frères Riad, Mehdi, NacerEddine, Yazid et Lamine

À mes sœurs Lamia et Kahina et toute ma famille.

*Je les remercie pour leur présence, leur
affection, et leur soutien durant
toutes ces années.*

À mes copines Sabrina, Ferial et Meriem.

*Merci pour toutes ces années d'amitié
Merci d'avoir toujours été là pour moi*

Amina

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les filières de valorisation énergétique de la biomasse. (P6)

Figure 1.2 : Production mondiale de biocarburants. (P13)

Figure 1.3 : Production mondiale de bioéthanol en ML. (P14)

Figure 1.4 : Production mondiale de biodiesel en ML. (P14)

Figure 2.1 : Voies de production du bioéthanol. (P22)

Figure 2.2 : Réaction de fermentation alcoolique chez les levures. (P24)

Figure 2.3 : Bilan des émissions CO₂ selon l'origine du carburant. (P27)

Figure 2.4 : diagramme des différentes étapes de fabrication de l'éthanol à base de déchet de dattes. (P31)

Figure 2.5 : Structure de l'amylose et de l'amylopectine.(P31)

Figure 2.6 : Structure de la biomasse lignocellulosique. (P34)

Figure 2.7: Le schéma général de la production du bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique. (P39)

Figure 2.8 : Fermentation des hexoses (cellulose) et des pentoses (xylane) issus de la biomasse lignocellulosique. (P38)

Figure 3.1 : Les étapes de l'ACV et exemples d'applications (adapté de ISO 14040, 2006). (P46)

Figure 3.2 : Structure générale de la méthode IMPACT 2002+ (adapté de Jolliet et al, 2005). (P48)

Figure 6.1: Arborescence des étapes de production du bioéthanol de cardon. (P95)

Figure 6.2: Production du biodiesel à partir des graines du cardon et génération du tourteau. (P96)

Figure 6.3: Déchets générés lors de la fabrication du bioéthanol de cardon. (P96)

Figure 6.4: Arborescence générale. (P97)

Figure 6.4': Arborescence générale détaillée. (P98)

Figure 6.5: Emissions de CO₂ de chaque étape de production du bioéthanol et du biodiesel de cardon. (P99)

Figure 6.6: Emissions en CO₂ de chaque étape de production du bioéthanol de cardon. (P100)

Figure 6.7: Consommation d'énergie durant la production du bioéthanol et du biodiesel à base de carbon. (P102)

figure 6.8: Consommation énergétique de la culture et de la récolte. (P102)

figure 6.9: Consommation énergétique de l'étape de fermentation. (P103)

Figure 6.10: Emissions en CO₂ et consommation énergétique du bioéthanol de carbon, de maïs, de canne à sucre et d'herbe. (P106)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Propriétés du bioéthanol. (P21)

Tableau 2.2 : Productivité moyenne de l'éthanol par surface pour différentes cultures. (P26)

Tableau 2.3: Comparaison du bilan carbone du bioéthanol de première et de seconde génération. (P27)

Tableau 2.4 : Composition des principaux substrats saccharifères utilisés pour la production du bioéthanol. (P29)

Tableau 2.5: Proportion de la cellulose, hémicellulose et lignine dans différentes matières lignocellulosique. (P34)

Tableau 2.6 : Types de prétraitement utilisés pour l'hydrolyse de la biomasse cellulosique. (P35)

Tableau 2.7 : Comparaison des différentes options pour l'hydrolyse de la cellulose. (P37)

Tableau 2.8 : Comparaison des estimations de rendements et des coûts pour la production de bioéthanol au moyen de l'hydrolyse. (P40)

Tableau 4.1 : Données introduites dans le logiciel (intrants). (P54)

Tableau 5.1 : Composition des graines d'*Acacia albida*. (P64)

Tableau 5.2 : Composition de la fétuque. (P67)

Tableau 5.3 : Composition de « *Arundo donax* » (le roseau). (P68)

Tableau 5.4: Composition de *Cynara cardunculus*. (P70)

Tableau 5.5 : Composition du Ray grass. (P71)

Tableau 5.6 : Composition du peuplier. (P75)

Tableau 5.7: Composition du saule. (P77)

Tableau 5.8 : Composition du kenaf. (P78)

Tableau 5.9 : Composition de la partie aérienne du topinambour. (P79)

Tableau 5.10 : Espèces de microalgues locales riches en amidon. (P83)

Tableau 5.11 : Quantité de lactosérum en Algérie. (P87)

Tableau 6.1: Quantité de CO₂ émise par chaque étape de production du bioéthanol et du biodiesel à partir du carbon. (P99)

Tableau 6.2: Energie consommée en (MJ) par chaque étape de production du bioéthanol et du biodiesel à partir du carbon. (P101)

Tableau 6.3: Comparaison des émissions de CO₂, de la consommation énergétique ainsi que du bilan énergétique du bioéthanol de carbon avec ceux des bioéthanol de canne à sucre, d'herbe et de maïs. (P105)

LISTE DES PHOTOS

Photo 2.1 : Les systèmes ouverts. (P43)

Photo 2.2 : Les systèmes fermés (photobioréacteur tubulaire). (P43)

Photos 5.1 : Les fruits du chêne (glands). (P56)

Photos 5.2 : *Quercus suber*. (P57)

Photo 5.3 : Fruit de *Quercus coccifera*. (P58)

Photo 5.4 : *Quercus afares*. (P59)

Photo 5.5 : Fruit (gland) de *Quercus faginea*. (P60)

Photo 5.6 : Les gousses de caroube. (P61)

Photos 5.7 : *Acacia albida* (arbre et gousses). (P63)

Photos 5.8: La féтуque. (P66)

Photos 5.9 : *Arundo Donax* (le roseau). (P68)

Photos 5.10 : *Cynara cardunculus* à l'état spontané. (P69)

Photo 5.11: Le ray Grass. (P71)

Photo 5.12 : Raquettes et fruits du figuier de barbarie. (P72)

Photo 5.13: Tronc et feuilles de l'eucalyptus. (P73)

Photo 5.14: Foret de peupliers. (P75)

Photo 5.15: Le saule. (P76)

- Photo 5.17 :** Le kenaf. (P77)
- Photo 5.18 :** Partie aérienne du topinambour. (P78)
- Photo 5. 19:** Laminaria sp. (P81)
- Photo 5. 20:** Ulva lactuca. (P82)
- Photo 5. 21:** Chlamydomonas sp. (P83)
- Photo 5.22:** Chlorella sp. (P83)
- Photo 5.23:** Scenedesmus sp. (P83)
- Photo 5.24:** Oscillatoria sp. (P84)
- Photo 5.25:** Spirulina sp. (P84)
- Photo 5.26:** Mélasse de betterave sucrière. (P86)
- Photo 5.27:** Pelures de pommes de terre. (P88)
- Photo 5.28:** Pelures d'agrumes. (P89)
- Photo 5.29:** Dattes non commercialisables. (P90)

LISTE DES ABREVIATIONS

- HVB, HVP :** L'huile végétale brute, L'huile végétale pure.
- EMHV :** Esters méthyliques d'Huile Végétale.
- EEHV:** Esters éthyliques d'Huile Végétale.
- ETBE:** Ethyl-tertio-butyl-éther.
- BP:** British Pertolium.
- BTL:** Biomass to liquid.
- FTS:** Fisher-Tropsh synthèse.
- IGCC:** Integrated Gaséification Combined Cycle.
- OGM:** Organisme génétiquement modifié.
- NREL:** National Renewable Energy Laboratory.
- ONU :** Organisation des nations unies.
- GNFA :** Groupement national pour la formation automobile.

ENERS : Energy Sarl (agence suisse de promotion des biocarburants).

TEP : Tonnes équivalent pétrole.

Mtep : Million de tonnes équivalent pétrole.

TIPP : Taxe intérieure sur les produits pétroliers.

AIE : Agence internationale de l'énergie.

UE : Union européenne.

FMI : Font monétaire international.

IFPRI: International Food Policy Research Institute.

FFV : Flexible fuel vehicles.

PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur.

ACV : Analyse de cycle de vie.

ACV-A : Analyse de cycle de vie par attributs.

ACV –C : Analyse de cycle de vie par conséquences.

AICV : Analyse de l'inventaire du cycle de vie.

ÉICV : Evaluation des impacts du cycle de vie.

UF : Unité fonctionnelle.

GES : Gaz à effet de serre.

SSF: Simultaneous saccharification and fermentation.

SSCF: Simultaneous saccharification and co-fermentation.

CBP: Consolidated bioprocessing.

PPM: Parties par million.

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

IFP : Institut France presse.

NAD: Nicotinamide adénine dinucléotide

ISO : Organisation Internationale de Normalisation (International Organization for Standardization).

ML: Millions de litres.

°C: Degré celsius

g/l: Gramme par litre.

v / v : volume par volume.

(p / v) : pourcentage par volume.

W : Watt

ha : hectare.

TABLE DES MATIERES

RESUMES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION.....P1

Chapitre 1 : BIOENERGIE ET BIOCARBURANTS

1. La bioénergie.....	P4
1.1 Fondements de la bioénergie.....	P4
1.2 Technologies de conversion de la biomasse.....	P5
2. Les biocarburants.....	P7
2.1 Approche historique.....	P7
2.2 Types de biocarburants.....	P8
2.2.1 La première génération.....	P9
2.2.2 La deuxième génération.....	P12
2.2.3 La troisième génération.....	P12
2.3 Production mondiale de biocarburants.....	P12
2.4 Aspect économique des biocarburants.....	P15
2.5 Possibilité de remplacement des énergies fossiles.....	P15
2.6 Bilan environnemental.....	P16
2.7 Conséquences sur la hausse des prix agricoles.....	P17

Chapitre 2 : LE BIOETHANOL

1. Généralités sur le bioéthanol.....	P19
1.1 Formes d'utilisation du bioéthanol.....	P19

1.2	Caractéristiques du bioéthanol.....	P21
1.3	Schéma général de la fabrication du bioéthanol.....	P21
1.4	Productivité moyenne de l'éthanol par surface pour différentes cultures.....	P25
1.5	Le bilan CO ₂ du bioéthanol.....	P26
1.6	Avenir de la filière.....	P28
2.	Technologies de production du bioéthanol de première, deuxième et de troisième génération.....	P29
2.1	Bioéthanol de première génération.....	P29
2.1.1	Bioéthanol produit à partir de cultures sucrières.....	P29
2.1.1.1	Types de biomasse saccharifère (jus sucré)	P29
2.1.1.2	Processus de production d'éthanol à partir d'une matière saccharifère non alimentaire : les déchets de dattes.....	P30
2.1.2	Le bioéthanol à base d'amidon.....	P31
2.1.2.1	Hydrolyse de l'amidon.....	P32
2.2	Bioéthanol de deuxième génération.....	P33
2.2.1	Processus de production de bioéthanol lignocellulosique.....	P34
2.2.1.1	Le pretraitement.....	P35
2.2.1.2	L'hydrolyse proprement dite.....	P37
2.2.1.3	La fermentation.....	P38
2.2.1.4	La distillation.....	P40
2.3	Le bioéthanol de troisième génération.....	P40
2.3.1	Atouts des algues pour la production du bioéthanol.....	P41
2.3.2	Le bioéthanol à partir de microalgues.....	P42
2.3.3	Le bioéthanol à partir de macroalgues.....	P42
2.3.4	La culture des algues.....	P43
2.3.5	Les perspectives d'avenir de l'éthanol d'algues.....	P44
Chapitre 3 : ANALYSE DE CYCLE DE VIE		
1.	Définition d'une ACV.....	P45

2. But de l'ACV.....	P45
3. Historique et contexte.....	P46
4. Méthodologie de l'ACV.....	P46
5. Les types d'ACV.....	P48
5.1 L'ACV-A (analyse de cycle de vie par attributs)	P49
5.2 L'ACV-C (analyse de cycle de vie par conséquences)	P49
6. Les perspectives.....	P49

Chapitre 4 : METHODOLOGIE

1. Méthodologie de la réalisation de l'inventaire de quelques matières premières locales non alimentaires pouvant être transformés en bioéthanol.....	P50
2. Méthodologie de la réalisation de l'analyse de cycle de vie.....	P50
2.1 Choix de la plante.....	P51
2.2 Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	P51
2.3 Construction de l'analyse.....	P53
2.4 Calcul du bilan énergétique du bioéthanol.....	P55
2.5 Comparaison des résultats.....	P55

Chapitre 5 : RESULTATS DE L'INVENTAIRE DE QUELQUES MATIERES PREMIERES LOCALES NON ALIMENTAIRES POUVANT ETRE UTILISEES POUR LA PRODUCTION DU BIOETHANOL

1. Inventaire de quelques espèces végétales locales non alimentaires pouvant être transformées en bioéthanol de première génération.....	P56
1.1 Le chêne (<i>Quercus</i>).....	P61
1.2 Les gousses du caroubier (<i>Ceratonia siliqua</i>).....	P61
1.3 L'acacia (<i>Acacia albida</i>).....	P63
2. Discussion des résultats.....	P65
3. Inventaire de quelques espèces végétales locales non alimentaires pouvant être transformées en bioéthanol de deuxième génération.....	P66

3.1 La fétuque (<i>Festuca arundinacea</i>)	P66
3.2 La canne de provence (<i>Arundo donax</i>)	P67
3.3 Le cardon (<i>Cynara cardunculus</i>)	P68
3.4 Le ray grass (<i>lolium multiform</i>)	P70
3.5 Les raquettes du figuier de barbarie (<i>Opuntia ficus indica</i>)	P72
3.6 L'eucalyptus (<i>Eucalyptus sp</i>)	P73
3.7 Le peuplier (<i>Populus sp</i>)	P74
3.8 Le saule (<i>salix sp</i>)	P76
3.9 Le kenaf (<i>Hibiscus Cannabinus L</i>)	P77
3.10 La partie aérienne du topinambour (<i>Helianthus tuberosus L.</i>)	P78
4. Discussion des résultats.....	P80
5. Inventaire de quelques espèces d'algues locales pouvant être transformées en bioéthanol de troisième génération.....	P81
5.1 Les macoalgues.....	P81
5.1.1 Laminaria (<i>Laminaria sp</i>)	P81
5.1.2 La laitue de mer (<i>Ulva lactuca</i>)	P81
5.2 Les microalgues.....	P82
6. Discussion des résultats.....	P85
7. Inventaire de quelques matières sous forme de déchets pouvant être transformées en bioéthanol.....	P86
7.1Mélasse de betterave sucrière.....	P86
7.2Le lactosérum.....	P87
7.3Pommes de terre déclassées et épluchures.....	P88
7.4Pelures d'agrumes.....	P88
7.5Pain ranci et déchets de boulangeries et de pâtisserie.....	P89
7.6Les rebuts de dattes.....	P90
7.7Déchets de papeteries.....	P91
7.8Déchets des industries textiles.....	P92
7.9Déchets de menuiserie : sciure et copeaux de bois.....	P92
7.10 Autres déchets agricoles.....	P93

8. Discussion des résultats.....	P94
----------------------------------	-----

Chapitre 6 : RESULTATS DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

DU BIOETHANOL DE CARDON

1. Les arborescences.....	P95
1.1 Arborescence du produit principal (le bioéthanol)	P95
1.2 Arborescence des coproduits.....	P96
1.3 Arborescence des déchets.....	P96
1.4 Arborescence générale.....	P97
2. Emissions de gaz à effet de serre (Kg de CO2 équivalent)	P99
3. Consommation en énergie fossile.....	P101
4. Le bilan énergétique.....	P104
5. Comparaison des résultats.....	P105
CONCLUSION.....	P109
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	P111

INTRODUCTION

Le pétrole, le gaz naturel et leurs dérivés présentent 55% de la consommation mondiale d'énergie. Ce sont des combustibles qui permettent l'existence de moyens de transport rapides et efficaces dont nous disposons aujourd'hui ainsi que celle d'une bonne partie des activités industrielles.

Hélas ils ne vont pas durer plus que quelques décennies, en tant que combustibles fossiles leurs réserves sont limitées et la sécurité de l'approvisionnement est problématique pour de nombreux pays qui les importent. De plus, leur utilisation est la principale source des gaz à effet de serre qui provoquent le réchauffement climatique.

Il est donc nécessaire de trouver des substituts à ces combustibles. Rien de plus rationnel que de les produire à base de matière organique renouvelable (biomasse) à partir de laquelle dans un passé lointain les combustibles fossiles furent produits par la nature. Une de ces options est les biocarburants.

L'intérêt mondial pour le développement des biocarburants reflète la volonté globale de développer des sources d'énergies renouvelables et propres pour surmonter la dépendance actuelle aux combustibles fossiles.

Dans ce contexte le Brésil et les Etats-Unis se distinguent avec leurs programmes de bioéthanol de canne à sucre et de maïs qui présentent des résultats intéressants. Mais avec l'augmentation des prix des matières premières agricoles et des aliments, ces dernières années, il ya une réelle inquiétude par rapport à la sécurité alimentaire de certains pays notamment ceux du tiers monde.

Si l'on en croit les spécialistes, l'agriculture mondiale commence déjà à faire face à trois objectifs concurrents :

- 1-Assurer l'alimentation,
- 2- Produire des biocarburants,
- 3- Préserver la biodiversité.

Il faut savoir en effet que la production de carburants verts (pour faire face aux pénuries annoncées du pétrole et (un peu plus tard) du gaz) devrait au minimum se quintupler d'ici à

2030 (prévisions de l'Agence internationale de l'énergie AIE). De ce fait, la part des terres arables consacrées aux cultures énergétiques qui est actuellement de 1% passerait à 2,5% ou à 3,5% selon les scénarios. Aussi, pour nourrir 9 milliards de personnes en 2050, il faudra doubler la production agricole mondiale, mais la montée des biocarburants va se traduire par une «compétition pour la terre entre cultures alimentaires et cultures énergétiques. La rareté de l'énergie risque de créer une rareté alimentaire». [1]

Et les prévisionnistes précisent que les grandes firmes pétrolières vont se lancer dans une course à la terre (au foncier agricole) pour créer ex-nihilo des plantations qui produisent les biocarburants. Enfin, et comme pour assombrir encore plus le tableau pour les pays africains, le changement climatique à plus long terme, se traduira pour le continent notamment, par de plus longues périodes de sécheresse. Comme on peut le voir, pour notre pays, l'enjeu agroalimentaire est considérable et les défis à relever sont très sérieux.

L'utilisation de matières non alimentaires pour les transformer en biocarburants (bioéthanol, biodiesel, biogaz) est accélérée par la crise de l'énergie, l'épuisement des ressources et l'augmentation des problèmes environnementaux.

Il existe une large variété d'espèces végétales non alimentaires qui peuvent être exploitées comme carburant de substitution permettant de se diriger doucement vers l'après pétrole notamment en Algérie dont le pourcentage des énergies renouvelables reste un des plus bas dans le monde.

Appréhendant la perspective de l'après pétrole, l'Algérie a lancé un très ambitieux programme dans les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. En effet, le gouvernement ouvre la voie à l'Algérie pour devenir un leader dynamique de l'énergie verte. Pour atteindre ses objectifs, l'Algérie a besoin d'investir jusqu'à 120 milliards de dollars dans les énergies renouvelables d'ici 2030.

Mais si on devait remplacer les énergies fossiles par des énergies renouvelables d'origine biologique cela ne doit pas se faire à partir de matières végétales comme le blé, le maïs, la pomme de terre ou le sucre de canne car ces dernières représentent des matières à large consommation et sont des produits alimentaires de base dans de nombreux pays du tiers monde dont l'Algérie. Les utiliser comme substrat pour la production des biocarburants revient à prendre des risques énormes pouvant mener à des crises alimentaires dont

souffriraient les pays du tiers monde essentiellement. De plus, la consommation d'eau de ces plantes est importante et revient à gaspiller plusieurs mètres cubes d'eau potables pour un produit final non comestible.

Donc si on veut mettre en place une culture énergétique en Algérie dans le but de la transformer en biocarburants, l'idéal serait de choisir un substrat végétal non alimentaire à fort potentiel énergétique dont la culture est possible même dans un climat aride ou semi aride pour limiter la concurrence avec les terres fertiles consacrées à l'alimentation, il est aussi primordial que la culture en question soit peu exigeante en eau surtout dans un pays comme l'Algérie qui peine à approvisionner toute la population en eau potable.

L'objectif de cette étude est d'initier un inventaire des matières premières non alimentaires d'origine locale, à fort potentiel énergétique. Une variété de matières végétales et de déchets pouvant être transformés en biocarburant a été identifiée.

Une analyse de cycle de vie d'un substrat choisi est proposée pour analyser la viabilité de la production d'un biocarburant à partir d'une source locale. Ceci en quantifiant la diminution des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation en énergie durant le processus. Pour cela, un maximum de données a été recueilli pour chaque étape du cycle (consommation en énergie fossile, quantité d'engrais et de pesticides utilisée, consommation d'eau, transport,...) pour une culture locale spontanée : le cardon. Toutes ces données constituent des intrants indispensables pour calculer et quantifier les émissions de CO₂, la consommation d'énergie fossile ainsi que leurs impacts sur l'environnement.

Chapitre 1 : BIOENERGIE ET BIOCARBURANTS

La conservation de l'énergie solaire en énergie chimique qui se réalise dans les végétaux durant la photosynthèse est un des phénomènes les plus fascinants de la nature.

Dans la plante illuminée par le soleil la fugace radiation solaire se transforme en produits stables absolument essentiels pour la vie sur notre planète ; cette énergie solaire s'est fossilisée avec le temps et commença à être utilisée avec voracité sous forme de charbon, de pétrole et de gaz naturel, l'énergie photosynthétique revient peu à peu à l'avant de la scène. Capable d'atténuer les problèmes environnementaux préoccupants, l'énergie photosynthétique apporte une nouvelle dynamique au monde agroindustriel et offre une alternative effective à l'évolution nécessaire de la société industrielle moderne vers un contexte énergétique plus durable et rationnel sans prétendre être la solution exclusive, la captation et le stockage de l'énergie solaire dans les végétaux peuvent jouer un rôle d'avant-garde dans l'avenir énergétique des nations.

De fait, comme le disait Melvin CALVIN (prix Nobel de chimie en 1961 pour ses découvertes sur la photosynthèse) « les feuilles sont de véritables usines silencieuses » [2].

1. LA BIOENERGIE

1.1 Fondements de la bioénergie

L'énergie chimique est la forme d'énergie fournie au moyen de réactions chimiques, et dans laquelle il se produit un changement de composition, en fonction duquel les réactifs se convertissent en produits, généralement avec libération de chaleur. Par exemple, l'énergie chimique se trouve disponible dans les aliments et dans les carburants, et est utilisée dans les processus vitaux des animaux et de l'homme, et pour mouvoir les véhicules, entre autres finalités.

Un cas particulier d'énergie chimique est la *bioénergie*, qui peut être définie comme toute et quelconque forme d'énergie associée à des formes d'énergie chimique accumulée à l'aide de processus photosynthétiques récents. En général, on dénomme *biomasse* les ressources naturelles qui disposent de bioénergie et qui peuvent être traitées pour fournir des formes bioénergétiques plus élaborées et adaptées à l'utilisation finale. Nous pourrions donc citer

comme exemples de sources de bioénergie le bois et les résidus de scieries, le biogaz résultant de la décomposition anaérobique de déchets organiques et d'autres résidus de l'agriculture et de l'élevage, ainsi que les *biocarburants liquides*, comme le bioéthanol et le biodiesel, et la *bioélectricité*, produite par combustion de biomasses telles que la bagasse et le bois.

La production de biomasse, comme résultat de la réaction de photosynthèse, dépend essentiellement de l'énergie solaire et de la présence d'eau et de dioxyde de carbone (CO₂). Elle se développe dans les cellules végétales des stomates des feuilles, selon des cycles complexes qui peuvent être représentés par la formule qui suit où l'eau et le gaz carbonique se combinent pour former une molécule de glucose, un sucre simple et de l'oxygène.



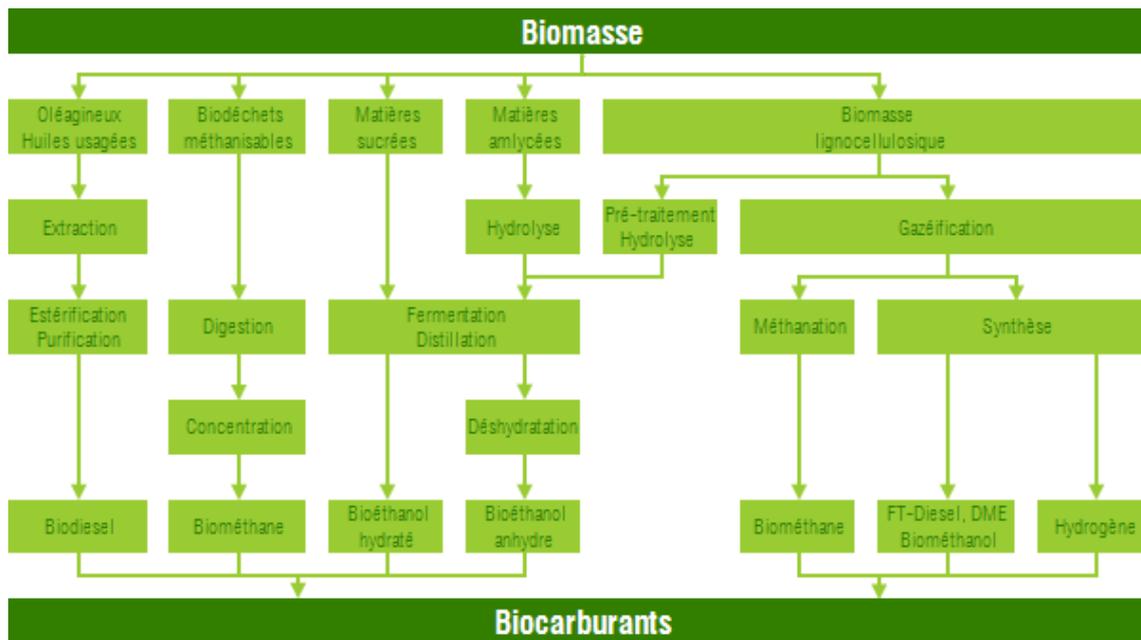
Ainsi, la condition fondamentale pour la production de biomasse, et, par conséquent, de bioénergie, est la disponibilité de *rayons solaires*, d'*eau* et de *dioxyde carbone*. [2]

1.2 Technologies de conversion de la biomasse

La biomasse peut subir différents types de traitements, elle peut générer de la chaleur par simple combustion comme elle peut être un substrat de choix pour des procédés thermochimiques plus complexes tel que la pyrolyse ou la gazéification.

Il existe donc une multitude de solutions envisageables du point de vue technique. A l'échelle commerciale, les trois filières principales au niveau mondial sont le *bioéthanol*, le *biodiesel* et le *biogaz*, même si cette dernière reste encore à l'heure actuelle moins développée que les deux précédentes dans le domaine des transports.

Les *biocarburants de synthèse* (également repris sous la terminologie "biocarburants de deuxième génération") tels que le diesel Fischer-Tropsch, le biométhanol, le diméthyl-éther (DME) ou encore l'hydrogène, font l'objet d'une activité intensive de recherche et développement depuis plusieurs années et représentent pour beaucoup la filière la plus prometteuse à moyen-long terme dans le domaine des biocarburants. Il n'existe toutefois à ce jour aucune installation industrielle de ce type. [3]



R. Beck, plateforme biocarburants. 2009

Figure 1.1 : Les filières de valorisation énergétique de la biomasse

Ces voies peuvent être divisées en trois types de conversion :

- *Voies thermochimiques*

Ce sont les voies les plus complexes et les plus difficiles à maîtriser, il s'agit essentiellement de combustion, pyrolyse et gazéification

- *Voies biologiques*

Appelées aussi conversions biochimiques, elles restent les voies de conversion les plus utilisées et les plus maîtrisées pour obtenir des biocarburants il s'agit essentiellement de la fermentation alcoolique dont résulte le bioéthanol et de la digestion anaérobique dont résulte le biogaz.

- *Voies oléochimiques*

Ce sont les voies d'obtention du biodiesel il s'agit de liquéfaction, transestérification et de raffinage d'huiles et graisses végétales et animales. [4]

Quand au biodiesel, il est obtenu par un procédé chimique appelé transestérification.

2. LES BIOCARBURANTS

Un *biocarburant* (ou *agrocarburant*) est un carburant produit à partir de matériaux organiques non fossiles, provenant de la biomasse. Il existe actuellement trois filières principales :

- filière huile et dérivés (biodiesel),
- filière alcool, à partir de jus sucré, d'amidon, de cellulose ou d'hémicelluloses hydrolysées (bioéthanol),
- filière gaz (le biogaz) issu de la fermentation de déchets organiques à l'abri de l'air.

D'autres formes moins développées voire simplement au stade de la recherche existent aussi : carburant gazeux (dihydrogène) ou encore les carburants solides.

À l'inverse de l'expression qui fait consensus en langue anglaise (*biofuel*), plusieurs expressions concurrentes coexistent en langue française. Parmi celles-ci on retiendra notamment :

L'expression « biocarburant » (du grec *bios*, *vie*, *vivant* et de carburant) indiquant que ce carburant est obtenu à partir de matériaux organiques (biomasse), par opposition aux carburants obtenus de ressources fossiles. On peut trouver aussi des appellations comme : agrocarburant.

Le choix de l'un de ces termes plutôt qu'un autre par un locuteur peut être révélateur du regard que celui-ci porte sur ce carburant. L'expression « biocarburant » est par exemple utilisée par l'ADECA, une association dédiée au développement de ce type de carburant, l'expression « agrocarburant » est le plus utilisé pour marquer la différence avec les produits issus de l'agriculture biologique.

Le terme anglais « biofuel » peut être également retrouvé dans des textes francophones. [5]

2.1 Approche historique

À la naissance de l'industrie automobile, le pétrole et ses dérivés n'étaient pas encore très utilisés ; c'est donc très naturellement que les motoristes se tournaient, entre autres, vers ce qu'on n'appelait pas encore des biocarburants : Nikolaus Otto, inventeur du moteur à explosion, avait conçu celui-ci pour fonctionner avec de l'éthanol. Rudolf Diesel, inventeur du moteur à combustion faisait tourner ses machines à l'huile d'arachide. La Ford T (produite de 1903 à 1926) roulait avec cet alcool.

Lors des deux guerres mondiales, les gazogènes sont rapidement apparus pour parer au manque de gazole ou d'essence.

Au milieu du XXe siècle, quand le pétrole devint abondant et bon marché, les industriels et les consommateurs se désintéressèrent des biocarburants. Les premiers et seconds chocs pétroliers (1973 et 1979) les rendirent à nouveau attractifs, pour des questions stratégiques (sécurité d'un approvisionnement en énergie) et économique (réduction de la facture pétrolière, développement d'une industrie nationale dans un contexte de chômage croissant). De nombreuses études furent ainsi menées au début des années 1980. Le Brésil engagea un vaste programme de production d'éthanol à partir de canne à sucre. Aux États-unis, les travaux du NREL (*National Renewable Energy Laboratory, USA*) sur les énergies renouvelables ont commencé dans les années 1970 dans le contexte du pic pétrolier américain.

Le contre-choc pétrolier de 1986 (baisse des prix du pétrole), et le lobbying des multinationales pétrolières ont fait chuter l'enthousiasme pour les biocarburants. Mais en 2000, une nouvelle hausse du prix du pétrole, l'approche du pic pétrolier, la nécessité de lutter contre l'effet de serre, les menaces sur la sécurité d'approvisionnement et la surproduction agricole ont conduit les gouvernements à multiplier les discours et les promesses d'aides pour le secteur des biocarburants. Les USA lancent un grand programme de production d'éthanol de maïs.

Le contexte change de nouveau au milieu des années 2000 : la surproduction agricole est oubliée et le prix des aliments remonte fortement, d'autre part, s'il y a toujours eu certains milieux écologistes pour s'inquiéter des conséquences environnementales des cultures "industrielles" en général et donc des biocarburants, leur audience s'accroît ; les études environnementales et énergétiques lancées quelques années auparavant commencent à donner

des résultats qui s'avèrent mitigés, avec des éléments pour et des éléments contre, propices à des polémiques.

En avril 2007, un rapport de l'ONU n'arrive pas à quantifier les avantages et inconvénients de ces produits. Il propose aux décideurs d'encourager leur production et utilisation durable ainsi que d'autres *bioénergies*, en cherchant à maximiser les bénéfices pour les pauvres et pour l'environnement. [6]

2.2 Types de biocarburants

On distingue les biocarburants de première et de seconde génération. Cette classification peut servir à séparer les carburants issus de produits alimentaires des carburants issus de source ligno-cellulosique (bois, feuilles, paille, etc.). Une autre interprétation l'utilise pour faire la distinction entre les biocarburants produits à partir de processus techniques simples et ceux produits par des techniques avancées.

Il existe aussi une troisième génération de biocarburant qui n'est encore qu'au stade de la définition. Une des principales pistes de recherche est la production de biodiesel, de bioéthanol ou encore d'hydrogène par des micro-organismes (micro algues et certaines bactéries) sous l'effet de la lumière et d'autres contraintes chimiques. [7]

2.2.1 La première génération

La première génération de biocarburants est issue de produits alimentaires (blé, maïs, betteraves, colza) via des processus techniques simples à partir des plantes oléifères ou à partir des plantes à sucre.

2.2.1.1 La filière huile

De nombreuses espèces végétales sont oléifères comme le palmier à huile, le tournesol, le colza, le jatropha ou le ricin. Les rendements à l'hectare varient d'une espèce à l'autre.

L'huile est extraite par pressage (écrasement) à froid, à chaud, voire (pour un coût plus élevé) avec un solvant organique.

Deux grandes voies d'utilisation sont ouvertes :

- L'huile végétale brute (HVB, ou HVP) peut être utilisée directement, dans les moteurs diesels, pure ou en mélange, mais, notamment à cause de sa viscosité relativement élevée, l'utilisation d'une fraction d'huile importante nécessite l'usage d'un moteur adapté.
- Le biodiesel (appelé aussi *diester*), obtenu par la transformation des triglycérides qui constituent les huiles végétales ; la transestérification de ces huiles, avec du méthanol ou de l'éthanol, produit des Esters d'Huile Végétale, respectivement méthyliques (EMHV) et éthyliques (EEHV), dont les molécules plus petites peuvent alors être utilisées comme carburant (sans soufre, non toxique et hautement biodégradable) dans les moteurs à allumage par compression, sans modification de ce moteur. [8]

2.2.1.2 La Filière alcool

Il s'agit d'une fermentation alcoolique à partir de plantes "à sucre" comme la canne à sucre, la betterave sucrière, le maïs, le blé.

On distingue :

- *Le bio-éthanol* obtenu par fermentation de sucres (sucres simples, amidon hydrolysé) par des levures du genre *Saccharomyces*.
- *L'Ethyl-tertio-butyl-éther* (ETBE) est un dérivé (un éther) de l'éthanol. Il est obtenu par réaction entre l'éthanol et l'isobutène obtenu lors du raffinage du pétrole. [8]
- *Le bio-butanol* (ou alcool butylique) est obtenu grâce à la bactérie *Clostridium acetobutylicum* qui possède un équipement enzymatique lui permettant de transformer les sucres en butanol-1 (fermentation acétonobutylique). Du dihydrogène, et d'autres molécules sont également produites : acide acétique, acide propionique, acétone, isopropanol et éthanol.

Les entreprises BP et DuPont commercialisent actuellement le biobutanol ; il présente de nombreux avantages par rapport à l'éthanol et est de plus en plus souvent évoqué comme biocarburant de substitution au pétrole. [9]

- *Le méthanol* (ou "alcool de bois"), obtenu à partir du méthane est aussi utilisable, en remplacement partiel (sous certaines conditions) de l'essence, comme additif dans le gasoil, ou, à terme, pour certains types de piles à combustible. Le méthanol est cependant très toxique pour l'homme. [10]

2.2.1.3 La filière gaz

Il s'agit de la fermentation méthanique ou méthanisation

- *Le bio-méthane* est le principal constituant du biogaz issu de la fermentation méthanique (ou méthanisation) de matières organiques animales ou végétales riches en sucres (amidon, cellulose, plus difficilement les résidus ligneux) par des bactéries méthanogènes qui vivent dans des milieux anaérobies. Les principales sources sont les boues des stations d'épuration, les lisiers d'élevages, les effluents des industries agroalimentaires et les déchets ménagers. Les gaz issus de la fermentation sont composés en moyenne de 65 % de méthane, 34 % de CO₂ et 1 % d'autres gaz dont le sulfure d'hydrogène et le diazote. Le méthane est un gaz pouvant se substituer au gaz naturel (ce dernier est composé de plus de 95 % de méthane).

Lorsqu'il est produit à petite ou moyenne échelle, le méthane est difficile à stocker. Il doit être donc exploité sur place, en alimentation d'un groupe électrogène par exemple.

Le rendement énergétique de cette filière biocarburant est actuellement bien meilleur que les autres et techniquement plus simple mais elle est très peu médiatisée. [8]

- *le dihydrogène* (bio-hydrogène) : le reformage du bio-méthane permet de produire du dihydrogène. Ce dernier peut également être produit par voie bactérienne ou microalgale. [11]

2.2.1.4 La filière charbon de bois (biocarburant solide)

Le charbon de bois est obtenu par pyrolyse du bois, de la paille ou d'autres matières organiques. Un ingénieur indien a développé un procédé permettant de pyrolyser les feuilles de cannes à sucre, feuilles qui ne sont presque jamais valorisées actuellement. [8]

2.2.1.5 Autres

- *La filière BTL (ou Biomass to liquid)* permet d'obtenir des carburants grâce au procédé

Fischer-Tropsch. Cette voie dite thermochimique contient 3 grandes étapes : le conditionnement de la biomasse et la gazéification, le traitement du gaz de synthèse et la synthèse du carburant.

Le conditionnement permettra de transformer la ressource végétale grâce à deux voies principales : la pyrolyse et la gazéification, en un matériau homogène et injectable dans un gazéifieur. La gazéification est une opération thermique qui s'effectue en présence d'un réactif gazeux (vapeur d'eau, dioxygène), afin de produire un gaz de synthèse contenant principalement du dihydrogène et du monoxyde de carbone avec en plus des impuretés carbonés ou inorganiques et d'autres gaz. C'est le mélange qui est de nos jours utilisé industriellement en combustion dans les centrales électriques au charbon (ou IGCC : Integrated Gaséification Combined Cycle) et qui le fut autrefois également pour la traction automobile pour le gazogène. Pour produire du carburant liquide, les contraintes sont plus exigeantes sur la composition chimique que sur la combustion directe : la gazéification de la biomasse s'effectue à une température très élevée c'est-à-dire 1200°C à 1300°C et est suivie de différentes étapes de purification du gaz de synthèse. Il faut apporter de la chaleur en brûlant une partie de la biomasse d'où provient un faible rendement en masse du procédé au cours de ces opérations.

La réaction de synthèse Fisher-Tropsch permettra ensuite de produire de l'essence, du gazole et du kérosène à partir du gaz de synthèse. [12]

- *Le gazogène*

Inventé par Georges Imbert (1884-1950), le gazogène est un système qui peut remplacer l'essence dans les moteurs à explosion.

Pour que le gazogène soit un biocarburant il doit utiliser du bois ou du charbon de bois. La mise en œuvre est assez complexe, plus de vingt minutes sont nécessaires pour démarrer le moteur, après allumage d'un foyer, une fumée riche en gaz combustibles est produite, après

purification le gaz obtenu est utilisé en carburant. Ce système n'est plus utilisé aujourd'hui que dans quelques véhicules d'époque. En effet, c'est le manque de pétrole durant la Seconde Guerre mondiale qui a conduit à l'utilisation de ce système très contraignant. Abandonné pour les transports, le principe est néanmoins utilisé à nouveau dans quelques petites unités de cogénération, il permet d'utiliser par exemple des déchets de bois dans un groupe électrogène avec un rendement convenable. [13]

2.2.2 La deuxième génération

Il s'agit de biocarburants fabriqués principalement à partir de la cellulose des végétaux et des résidus de ces végétaux, afin de fournir une solution plus écologique, plus équitable et plus durable. D'intenses recherches sont en cours afin de transformer la cellulose des végétaux (paille, bois, déchets divers) en alcool, on parle alors d'éthanol cellulosique. [14]

2.2.3 La troisième génération

Ce sont les biocarburants à partir de microalgues, appelés les "Algocarburants", dits de "troisième génération".

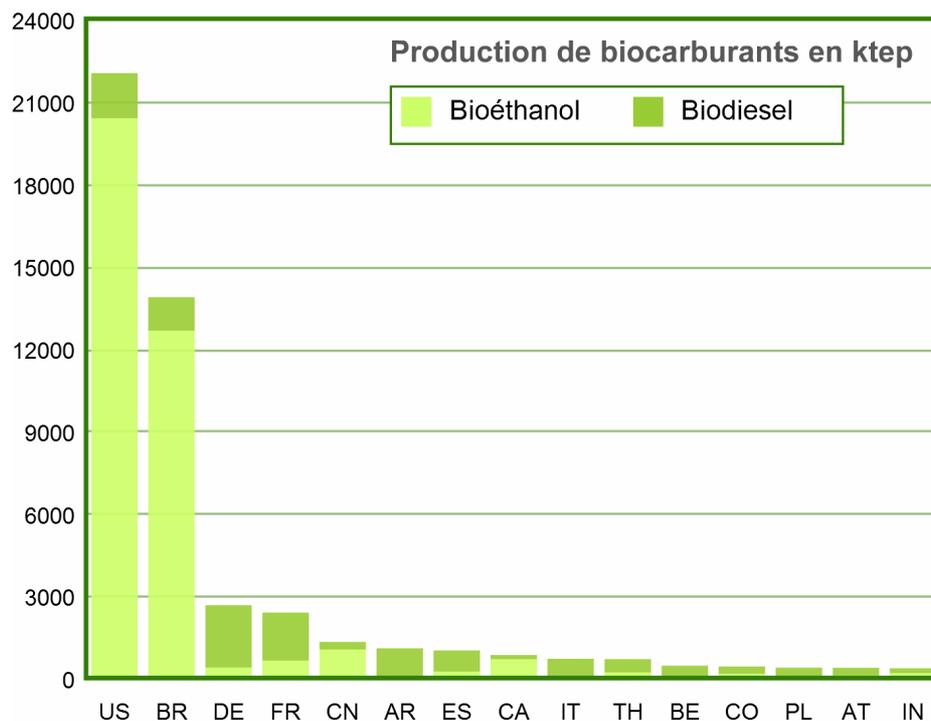
Il existe environ 100 000 espèces de diatomées (microalgues) connues dans le monde - Plus de 400 nouveaux taxons sont décrits chaque année. Certaines espèces sont particulièrement riches en huile ou en amidon.

Les cultures de microalgues, d'un point de vue théorique sont 30 à 100 fois plus efficaces que les oléagineux terrestres d'après certains auteurs, rendant ainsi envisageable une production de masse, sans déforestation massive ni concurrence avec les cultures alimentaires. Pour obtenir un rendement optimal en huile ou en amidon, dans le but de les transformer en biodiesel ou en bioéthanol, la croissance des microalgues doit s'effectuer avec une concentration en CO₂ d'environ 13%. Ceci est possible à un coût très faible grâce à un couplage avec une source de CO₂, par exemple une centrale thermique au charbon, au gaz naturel, au biogaz, ou à une unité de fermentation alcoolique, ou encore une cimenterie. [15]

2.3 Production mondiales de biocarburants :

La production mondiale d'agrocarburants a plus que triplé entre 2000 et 2008 et correspond à plus de 2 % de la consommation mondiale de combustibles pour le transport.

Selon l'agence suisse de promotion des biocarburants ENERS (plateforme biocarburants), la production mondiale de biocarburants a atteint en 2009 le total de **51'769** kilos TEP (1 tep correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole), réparties entre le bioéthanol et le biodiesel ; 43% de cette production soit 22'014 kilos TEP revient au USA, la production brésilienne représente 27% de la production totale soit 13'863 kilos TEP tandis que l'Union européenne produit 19% de la production mondiale ; le reste est reparti entre la Chine, l'Argentine, la Thaïlande, la Colombie, l'Inde et le Canada. [16]

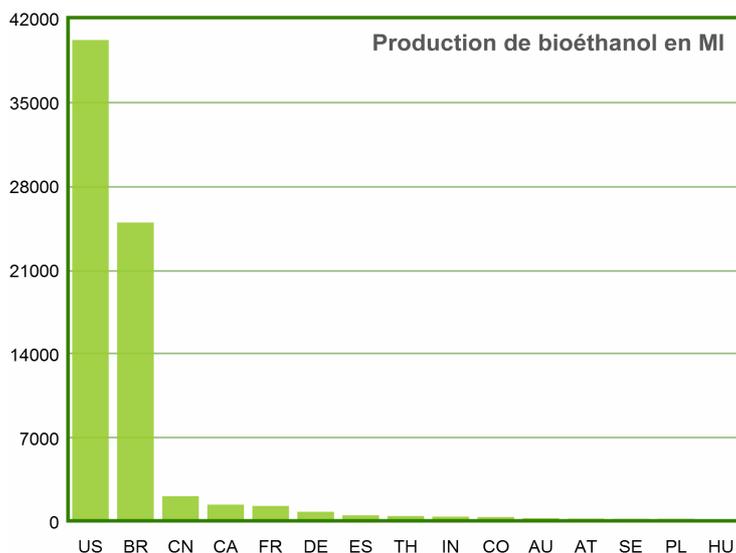


Source: Plateforme Biocarburants · ENERS Energy Concept

Agence de promotion des biocarburants · 2009 Suisse

Figure 1.2 Production mondiale de biocarburants

Selon l'agence suisse ENERS (plateforme biocarburants) la production de bioéthanol a atteint le total de 73'947 millions de litres en 2009, les Etats Unis et le Brésil sont à la tête des producteurs, ils représentent à eux deux près de 88% de la production mondiale de bioéthanol avec 54 % de la production mondiale pour les USA et 34% pour le Brésil. [16]

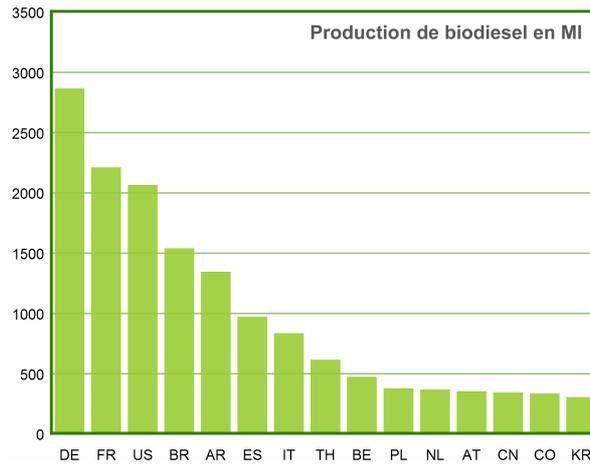


Source : Plateforme Biocarburants ·ENERS Energy Concept

Agence de promotion des biocarburants ·2009 Suisse

Figure 1.3 Production mondiale de bioéthanol en ML

Selon l'agence suisse de promotion des biocarburants ENERS (plateforme biocarburants) La production de biodiesel a atteint le total de 17'929 millions de litres en 2009 ; l'Allemagne est à la tête des producteurs avec 16% de la production mondiale soit 2859 ML, la production française représente 12% de la production mondiale, soit 2206 ML, tandis que les USA ont produit 11% de la production mondiale en 2009 soit 2060 ML. [16]



Source : Plateforme Biocarburants ·ENERS Energy Concept

Agence de promotion des biocarburants ·2009 Suisse

Figure 1.4 Production mondiale de biodiesel en ML

2.4 Aspect économique des biocarburants

Il est intéressant de voir comment se fait l'évaluation des prix des biocarburants dans les conditions du marché. La plus part de ces marchés fonctionnent avec des prix libres évalués par les agents économiques. Dans ce contexte, les prix du bioéthanol au consommateur seront déterminés par les prix au producteur, qui à leur tour, devront être définis en fonction de la matière première et de la complexité du procédé de fabrication et de la logistique adoptées. Cette analyse est essentielle pour évaluer la viabilité effective du bioéthanol et les impacts de son incorporation sur le marché de la consommation.

La production d'un biocarburant peut être réalisée à partir de diverses matières premières, sachant qu'à chacune d'elles correspond un coût de production et une valeur de marché, qui représente le plus grand pourcentage du prix du biocarburant. Ainsi, le prix minimum du biocarburant aux producteurs doit satisfaire ces deux conditions préalables :

a) couvrir les coûts de production, qui, naturellement, incluent les coûts d'obtention de la matière première et du fonctionnement de l'usine de transformation, ainsi que le coût du capital correspondant à l'investissement initial.

b) être égal ou supérieur aux résultats qui seraient obtenus si la matière première était destinée à la fabrication de produits alternatifs (dans le cas du bioéthanol de canne à sucre par exemple, les produits alternatifs à prendre en considération sont, le sucre et la mélasse) [17]

Les différentes filières d'agrocarburants peuvent stimuler l'économie de l'activité agricole. Les périodes de relative surproduction de produits agricoles et de baisse des prix ont conduit les milieux agricoles à promouvoir et demander des mesures gouvernementales en faveur de cette production.

Cette stimulation dépend des conditions du marché des produits agricoles : en sens inverse, la fin de la période de prix anormalement bas est un signal très négatif pour les biocarburants qui sans un certain soutien financier comprenant des aides agricoles et une exonération partielle de la TIPP (taxe intérieure sur les produits pétroliers) sont loin d'être compétitifs. [18]

2.5 Possibilité de remplacement des énergies fossiles

On sait que le pétrole s'épuise et que les biocarburants permettent aux pays qui les produisent de devenir moins dépendants sur le plan énergétique. À l'échelle locale, la production et l'autoconsommation d'agrocarburants (huile végétale carburant par exemple) permet une autonomie énergétique des agriculteurs.

Personne n'estime que les biocarburants peuvent, tous seuls, remplacer complètement le pétrole ni même les carburants d'origine fossiles actuellement utilisés. La question est plutôt de savoir s'ils peuvent représenter une part de la solution. [19]

En 2003, le biologiste Jeffrey Dukes a calculé que les énergies fossiles brûlées en un an (1997) provenaient d'une masse de matière organique préhistorique qui représentait plus de 400 fois l'énergie qui à l'inverse se fixe et s'accumule naturellement dans le même temps sur la planète. Dans le même article, Dukes estime que le remplacement des carburants fossiles par une combustion de végétaux actuels correspondrait au moins à 22 % de la production végétale terrestre (y compris des végétaux marins), augmentant ainsi de 50 % l'appropriation de cette ressource par l'homme.

Pour remplacer *totalemment* la consommation de carburants fossiles actuelle par des agrocarburants de première génération, il faudrait plusieurs fois la surface terrestre.

Ces analyses présentent évidemment des limites, et on peut espérer que les progrès des biocarburants, notamment le passage à la seconde et surtout la troisième génération, augmentent la production nette par unité de surface (végétaux moins exigeants en consommations intermédiaires, plus productives, sur une période plus longue de l'année, etc. ; les algocarburants, notamment, ne nécessitent ni eau douce ni terre cultivable) ou que la valorisation des co-produits suffisent à justifier la culture, mais en l'état actuel les agrocarburants ne peuvent être qu'un appoint.

Il ne faut pas en conclure que ces raisons s'opposent définitivement aux biocarburants ; un monde fonctionnant aux énergies renouvelables devrait consommer bien moins et de façon plus efficace, ce qui leur laisse une place. Des études prenant en compte d'autres cultures et d'autres modes de production agricoles ont conclu que la bioénergie pourrait assurer une part significative de nos besoins en déplacement. Les conditions nécessaires à ce scénario seraient des mesures importantes d'efficacité énergétique et un passage vers une agriculture locale peu consommatrice d'énergie. [20]

2.6 Bilan environnemental

Le bilan environnemental des biocarburants n'est plus à prouver, en effet cette essence verte a bien des atouts. Produite sur un sol local, elle génère des emplois locaux et permet de limiter les rejets de CO₂ responsables du réchauffement climatique. Pourtant, d'un pays à l'autre, un biocarburant est plus ou moins écologique et économique. Car tout est question de ressources végétales et de climat. [21]

Claude Mandil, directeur de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), martèle depuis longtemps que la seule production écologique et économique d'éthanol est celle du Brésil, à partir de canne à sucre. Les réductions des rejets de CO₂ du « puits à la roue » (tenant compte de toutes les étapes de production) atteignent 90 % à 95 % par rapport à l'essence. Pierpaolo Cazzola, analyste de l'énergie de l'AIE, cite les dernières études qui donnent des résultats très contrastés selon les pays : *« L'éthanol américain produit à partir de maïs réduirait les rejets de 13 % en moyenne. Produits à partir de céréales, les réductions d'émissions de CO₂ seraient de 5 % à 25 % dans le meilleur des cas. Le gain serait d'environ 50 % à partir de betteraves. En ce qui concerne le biodiesel, il serait de 40 à 60 % à partir de colza en Europe. »* En outre, si les biocarburants peuvent contribuer à une moindre dépendance au

pétrole, ils peuvent aussi entraîner de graves problèmes environnementaux, comme la déforestation majeure en cours à Sumatra ou Bornéo (pour la culture de l'huile de palme), ou l'utilisation préoccupante des ressources en eau en Inde pour la canne à sucre. Sans parler des conséquences en termes de biodiversité, de l'inévitable concurrence avec les cultures alimentaires, selon les évolutions des subventions aux unes et aux autres, de l'impact sur des cours mondiaux comme ceux du sucre, dont le prix a doublé en 18 mois. [21]

Selon Fatih Birol, responsable économique de l'AIE. En fait, tout le monde espère beaucoup des recherches sur les biocarburants de seconde génération, produits à partir de résidus agricoles (pailles) et forestiers ou de cultures dédiées à croissance rapide comme le peuplier, les taillis. Toutefois, ces biocarburants réellement écologiques, ne seront pas rentables avant une vingtaine d'années.

Cependant, le couplage de la production d'un biocarburant avec la culture d'algues peut être envisagé pour un meilleur bilan CO₂, en effet la production de 50 litres d'éthanol par fermentation alcoolique s'accompagne de la production de 15 litres de CO₂ qui peuvent nourrir les microalgues. Le couplage filière éthanol cellulosique - filière microalgue est une voie d'avenir dans la perspective d'un développement durable. [22]

2.7 Conséquences sur la hausse des prix agricoles

Le prix des aliments est un paramètre spécialement important dans les pays pauvres, et leurs dirigeants veulent que ces prix restent les plus bas possibles. « Les ministres de l'Économie et des Finances des pays africains, réunis à Addis-Abeba les 28, 29 et 30 mars 2008, n'ont pu que constater que "l'augmentation des prix mondiaux des produits alimentaires présente une menace significative pour la croissance, la paix et la sécurité en Afrique". »

Des émeutes de la faim sont amenées à éclater, faisant porter sur le développement des agrocarburants un prix certain, c'est ainsi qu'une controverse au sujet du rôle des biocarburants dans l'augmentation du prix des denrées alimentaires est née. [23]

Un rapport publié par la Banque Mondiale stipule que : "L'augmentation du prix des denrées alimentaires sur le marché international entre janvier 2002 et juin 2008 a été provoquée par un ensemble de facteurs, le plus significatif ayant été la forte progression de la production de

biocarburants à partir de céréales et d'oléagineux, respectivement aux États-Unis et dans l'UE. La hausse des prix de l'énergie, l'augmentation des coûts des fertilisants et du transport et la dévaluation du Dollar U.S. ont globalement contribué à 25-30% de la hausse des prix des denrées alimentaires entre janvier 2002 et juin 2008. Les 70-75% restants s'expliquent par le développement massif des biocarburants et ses effets indirects (stocks de céréales limités, changements significatifs d'utilisation des terres, activité spéculative et interdictions d'exportation)." [24]

Suite à la publication du rapport de la Banque Mondiale, différentes études ont évalué l'influence des biocarburants sur le prix des denrées alimentaires (EuropaBIO (2008)). En particulier, les analyses de la Commission Européenne ont indiqué que la production actuelle de biocarburants dans l'UE a peu d'impact sur le niveau actuel du prix des denrées alimentaires sur le marché mondial dans la mesure où les biocarburants utilisent moins de 1% de la production de céréales de l'UE. EuropaBIO et eBIO montrent également que la demande accrue pour les biocarburants n'a eu qu'un effet marginal sur la hausse du prix des matières agricoles, soutenant ainsi le point de vue de la Commission. [25]

Chapitre 2 : LE BIOETHANOL

1. GENERALITES SUR LE BIOETHANOL

Le bioéthanol, ou alcool éthylique, est une substance de formule moléculaire C_2H_6O , c'est un carburant présenté comme étant une alternative écologique aux carburants actuels. Il n'est ni plus ni moins que la concentration et la déshydratation d'un alcool obtenu principalement à partir de céréales, de betteraves ou de canne à sucre. Il est utilisée comme combustible dans les moteurs à combustion interne à allumage par étincelle de deux manières : dans les mélanges d'essence et d'éthanol anhydre ou comme éthanol pur.

Le principal avantage du bioéthanol est la possibilité de le mélanger en faible proportion à l'essence (5 à 25% de bioéthanol en volume) sans modification significative dans les moteurs à combustion interne.

L'utilisation de l'éthanol comme carburant a une longue histoire, à partir de 1826, quand Samuel Morey a utilisé l'éthanol dans un moteur prototype à combustion interne. Le regain d'intérêt pour le bioéthanol a commencé lorsque le gouvernement brésilien a lancé son programme bio-alcool pour substituer une grande part du pétrole importé.

Aux États-Unis des programmes similaires ont été lancés. Plus tard, un autre programme fédéral américain a été lancé, il consiste à accorder des prêts garantis pour les investissements dans la construction d'usine de fabrication de bioéthanol.

Le Brésil et les États-Unis sont toujours les deux principaux producteurs et les utilisateurs de bioéthanol à travers le monde. [26]

1.1 Formes d'utilisation du bioéthanol

L'usage du bioéthanol pur dans des véhicules de série n'est pas possible pour le moment, les caractéristiques de l'alcool étant trop éloignées de celles de l'essence. Son utilisation nécessite donc certaines précautions et il s'agit d'avoir recours à diverses solutions d'utilisation

(mélange à faible taux de bioéthanol avec de l'essence ou du diesel, usage de véhicules spéciaux, etc.). [27]

1.1.1 Ethanol hydraté

Cette solution offre la possibilité d'utiliser directement du bioéthanol hydraté, plus facile et donc aussi moins cher à produire. Les moteurs (essence ou diesel), dans ce cas, doivent être légèrement modifiés, ou mieux encore, directement conçus à cet effet. [27]

1.1.2 Ethanol anhydre en mélange avec de l'essence conventionnelle

Cette variante dépend essentiellement du pourcentage d'éthanol dans l'essence :

- De 0 à 85%, utilisé dans ce qu'on appelle "flexible fuel vehicles" (FFV) qui peuvent utiliser indifféremment de l'éthanol ou de l'essence, dans le même réservoir.
- 24% utilisé au Brésil.
- De 5-10% utilisé en Suède et aux USA, sans modification de moteur. Afin d'éviter les problèmes de démixtion, le mélange est souvent effectué le plus en aval possible, c'est à dire à la pompe à essence même, ce qu'on appelle le "splash blending". [27]

1.1.3 Ethanol déshydraté en mélange avec du diesel

Cette filière permet d'exploiter également l'utilisation d'éthanol dans des moteurs diesel non modifiés. Compte tenu de l'importance quantitative de ce genre de véhicules, il s'agit de :

- Ethanol mélangé à hauteur de 3%, sans modification moteur ni additif.
- Ethanol mélangé à hauteur de 10-15%, sans modification moteur mais en présence d'un solubilisant permettant d'obtenir un mélange stable et d'empêcher la séparation avec l'eau, Cette variante s'applique donc strictement aux véhicules diesel. [27]

1.1.4 L'éthyl-tertio-butyl-éther (ETBE)

L'éthyl-tertio-butyl-éther (ou ETBE) est obtenu par transformation de l'éthanol déshydraté par voie de réaction chimique avec l'isobutène. L'ETBE contient environ 47% d'éthanol en masse. Ses propriétés (niveau d'octane élevé, faible pression de vapeur, tolérance parfaite à l'eau) en font un carburant particulièrement apprécié par les raffineurs, comparables au MTBE, additif

d'origine fossile et largement utilisé dans le monde. Cette technique a été initiée par la France, à hauteur de 10-15 % d'ETBE dans l'essence. L'ETBE est ainsi actuellement la filière d'utilisation du bioéthanol la plus largement développée en Europe. A sa défaveur, la production d'ETBE nécessite des infrastructures et une matière première (le naphta) que seules les grandes raffineries pétrolières peuvent aujourd'hui s'offrir à un coût acceptable. [27]

1.1.5 Estérol

Il s'agit d'un mélange de bioéthanol et de biodiesel. Ce carburant est prévu pour fonctionner dans des moteurs diesel. Il doit combiner les avantages du bioéthanol et du biodiesel ; moins d'émissions, réduction des gaz à effets de serre, prix compétitif, pas de modification du moteur. Par ailleurs, cette filière devrait permettre de réduire les émissions de manière encore plus sensible en utilisant un catalyseur deux voies. [27]

1.2 Caractéristiques du bioéthanol

Comme le montre le **tableau 2.1** le bioéthanol a de bonnes propriétés pour les moteurs à combustion interne, il a un indice d'octane plus élevé que celui de l'essence, son rapport H/C plus important (plus le rapport H/C est important, plus les émissions de CO₂ sont faibles), ses limites d'inflammabilité sont plus larges, avec des vitesses plus élevées. Ces propriétés permettent un temps de démarrage plus court, qui conduit à des avantages d'efficacité théorique sur l'essence.

Tableau 2.1 : Propriétés du bioéthanol

	Bioéthanol	Essence standard
Formule chimique	C₂H₅OH	C₇H₁₆
Rapport H/C	3	2.29
Masse molaire (g/mol)	46,07	102,5
Densité (kg/m³)	794	735-760
indice d'octane	111	95
PCI (pouvoir calorifique inférieur) massique (kJ/kg)	26805	42690

Source : Frederik et Diop, 2006

Les principaux *inconvénients* de l'éthanol par rapport à l'essence sont :

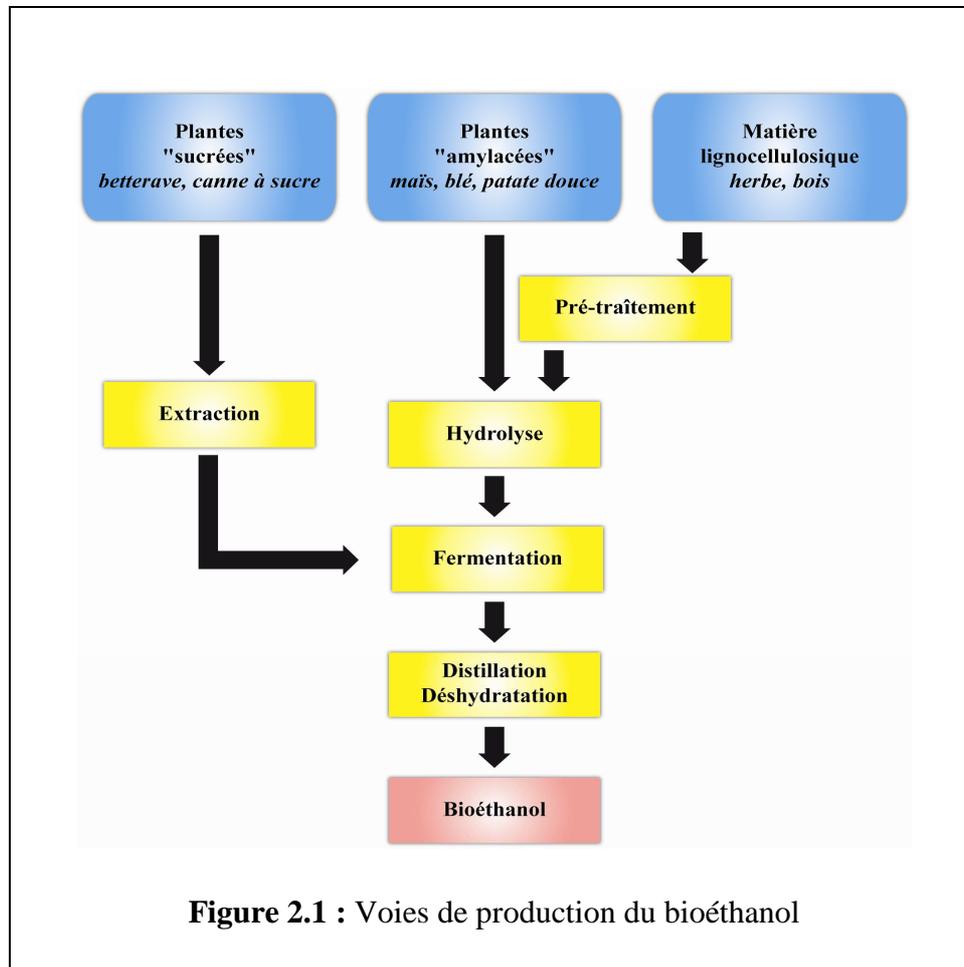
- le PCI de l'éthanol est inférieur de 1/3 par rapport à celui de l'essence,
- les risques de démixtion en présence d'eau (séparation des phases essence et alcool). [28]

1.3 Schéma général de la fabrication du bioéthanol

Le bioéthanol peut être produit à partir d'une grande variété de glucides: les monosaccharides, disaccharides et les polysaccharides. La grande industrie de la biomasse en éthanol utilise principalement des matières premières suivantes: la canne à sucre, la betterave sucrière, ou la mélasse) ou encore l'amidon (par exemple, le maïs, le blé, l'orge, le manioc).

L'éthanol est également produit à partir de la biomasse lignocellulosique ou de sous produits d'industrie comme l'industrie des pâtes et papiers ou encore des résidus forestiers et agricoles, le processus de fabrication diffère selon la matière première utilisée.

La matière première pour la production de bioéthanol est actuellement basée principalement sur les cultures agricoles, ce qui peut être consacré à la fois aux marchés alimentaires et à l'éthanol ou dédié uniquement à l'éthanol. [29]



Maguin Interis, 2002

Une fois que la biomasse récoltée est livrée à l'usine d'éthanol, elle est stockée dans un entrepôt et conditionnée pour empêcher la fermentation précoce et la contamination bactérienne. Elle est lavée, découpée, elle suit les étapes suivantes :

1.3.1. Première étape : L'extraction des sucres

Grâce à un prétraitement, la biomasse va subir une extraction des glucides. Ainsi le sucre présent dans cette biomasse va pouvoir passer dans l'eau. On obtient alors un jus de diffusion aussi appelé jus vert. Au cours de cette étape, ce sont les sucres simples qui sont les

monosaccharides et les disaccharides qui vont être extraits (sucres simples). Les polysaccharides (amidon, cellulose) sont d'abord convertis en sucres simples par le biais de réactions d'hydrolyse. [30]

1.3.2 Deuxième étape : La fermentation

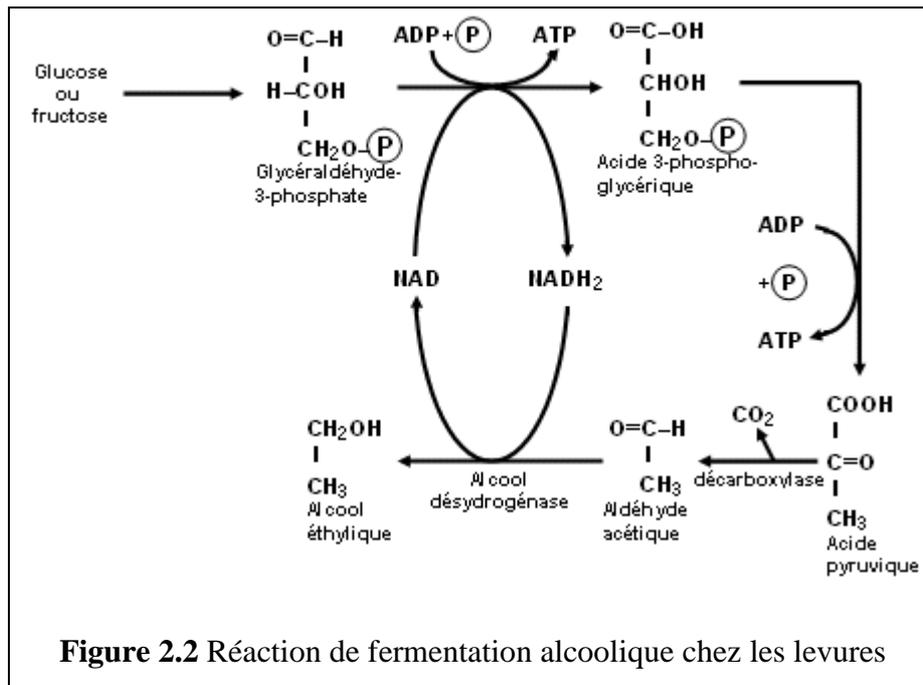
1.3.2.1 Processus de fermentation

La fermentation est le processus qui permet de transformer le glucose en éthanol. Cette transformation se fait à l'aide de levures, *Saccharomyces cerevisiae* ellipsoïdes ou " levures de bière de forme ellipsoïde ", qui transforment en alcool et en gaz carbonique le sucre contenu dans les végétaux. Ceci se fait selon l'équation de Gay-Lussac, ci-dessous :



Glucose \Rightarrow alcool éthylique + gaz carbonique

Toutefois, il y a également d'autres éléments qui apparaissent au cours de la fermentation alcoolique comme le glycérol, des acides succiniques ou encore des acides volatils pour ne citer que les principaux. En fait, la fermentation commence par une " glycolyse " C'est le premier acte de la fermentation alcoolique. L'acide pyruvique qui est alors apparu est décarboxylé sous forme d'aldéhyde acétique (ou acétaldéhyde ou éthanal), lui-même réduit en alcool éthylique. Cette réaction est réalisée par la forme réduite du NAD qui apparaît au cours de l'oxydation du glyceraldéhyde-3 phosphate. Les deux réactions constituent une oxydoréduction.



Source : I. Inspard 2002

On peut remarquer que la transformation du sucre en bioéthanol libère du CO₂. Le CO₂ libéré est en fait capté durant la croissance du végétal. Il n'y a donc pas création de CO₂, mais en quelque sorte rejet du CO₂ absorbé par la plante. La création de l'éthanol ne pollue pas en elle-même. [31]

1.3.2.2 Modes de fermentation

La fermentation est une réaction biochimique qui consiste à libérer de l'énergie à partir de sucre (glucose, amidon, etc.) sous l'action d'enzymes microbiennes et à rejeter des produits. Cette réaction a lieu dans une enceinte appelée bioréacteur ou fermenteur, ce dernier permet de contrôler les conditions de fermentation (température, pH, aération, agitation) et ainsi optimiser les rendements de production. Les fermenteurs sont très diversement utilisés. Il existe différents modes de conduite pour alimenter et soutirer du milieu de culture aux bioréacteurs :

- *Mode d'alimentation par batch*

La cuve est remplie par le milieu de culture stérilisé, puis l'inoculum. La fermentation se déroule ensuite sans addition supplémentaire de milieu. Le volume reste constant et la

productivité est relativement faible. En fin de fermentation, le fermenteur est vidé et son contenu est remplacé. [32]

- *Mode d'alimentation par fed batch*

La croissance démarre plus vite étant donné que le volume de culture peut être réduit. La concentration obtenue peut alors être plus élevée qu'en mode batch. Quand la croissance est en phase stationnaire, du milieu de culture stérile est ajouté. Le volume dans la cuve augmente alors au cours du temps. Le débit est réglé de façon à ce que la concentration en substrat soit constante dans la cuve et que l'effet de dilution ne soit pas inhibiteur de la production de biomasse. Lorsque la cuve est remplie, l'alimentation est coupée : la conduite est alors en mode discontinu. Le fed batch permet en pratique un gain de temps, une augmentation de productivité et une possibilité de modification du milieu en cours de culture. Mais le risque de contamination est élevé. [32]

- *Mode d'alimentation continue*

L'ajout de milieu stérile et le soutirage commencent quand les cellules entrent en phase stationnaire de croissance. La suspension est homogène en tout point de la cuve. L'alimentation et le soutirage se fait au même débit lorsqu'une certaine concentration cellulaire est atteinte dans la cuve. Il n'est pas nécessaire en théorie de vider la cuve. Cependant, des mutations et des contaminations obligent leur vidange. La productivité est beaucoup plus importante qu'en mode discontinu. [32]

1.3.3 Troisième étape : Distillation et déshydratation

Après la fermentation, on obtient un bouillon qui contient 8 à 14% d'éthanol en volume. Au dessus de cette dernière concentration, l'inhibition des levures peut se produire ce qui réduit leur activité. Vient ensuite l'étape de distillation dont le but est de concentrer le taux d'alcool dans le mélange jusqu'à 95,5% d'alcool et de 4,5% d'eau il est appelé "Hydraté d'éthanol", ce dernier est ensuite déshydraté pour obtenir un "anhydre d'éthanol" à 99,6% d'alcool et 0,4% d'eau. [33]

1.4 Productivité moyenne de l'éthanol par surface pour différentes cultures

Une comparaison entre les différentes solutions pour la production de bioéthanol est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 2.2 : Productivité moyenne de l'éthanol par surface pour différentes cultures

Matière végétale	Rendement en bioéthanol (litres/hectare)	Source
<i>Blé</i>	1800	GPC (2008).
<i>Sorgho saccharin</i>	2600	GPC (2008).
<i>Manioc</i>	3000	GPC (2008).
<i>Maïs</i>	4000	GPC (2008).
<i>Betteraves</i>	6700	GPC (2008).
<i>Canne à sucre</i>	Sucre 6800	GPC (2008).
	Bagasse	GPC (2008).
	Total 9200	GPC (2008).
<i>Miscanthus</i>	14000	Christian Hardtke ; INRA Lilles Avril 2007

GPC : Global petroleum club disponible sur : //http : www.globalpetroleumclub.com

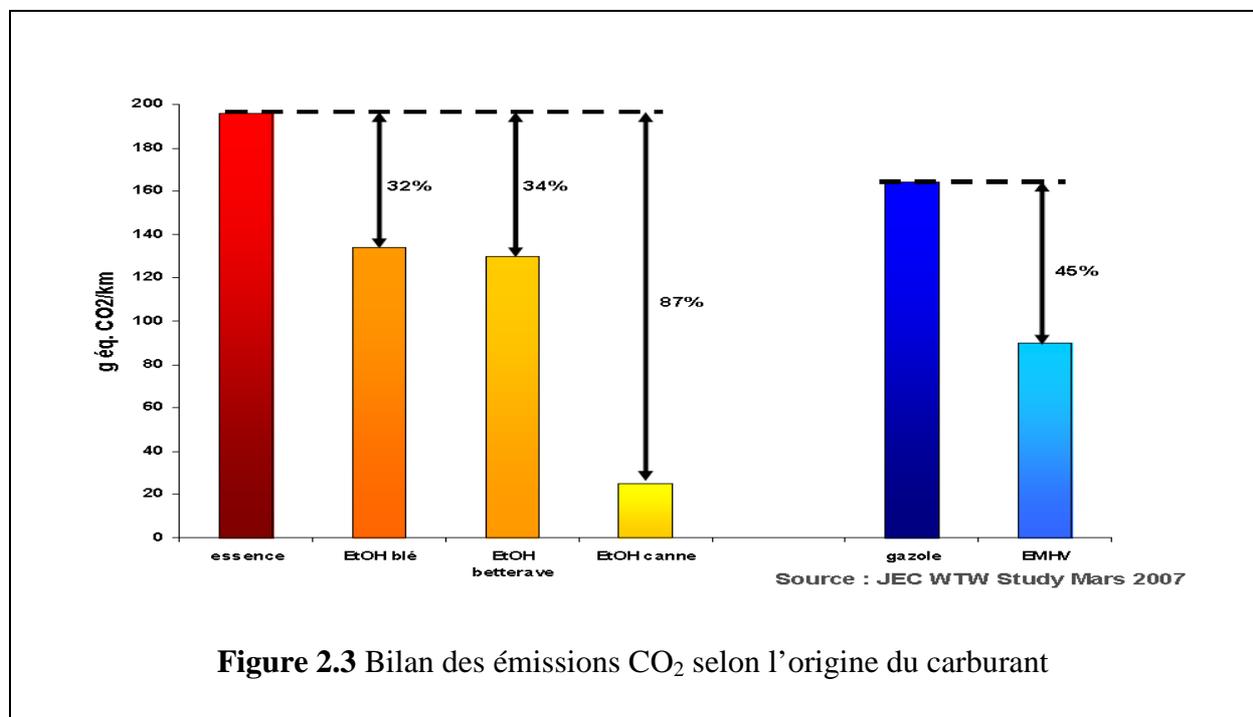
Le miscanthus (plante herbacée vivace non alimentaire) présente le meilleur rendement en litres d'éthanol par hectare, ceci est dû à l'importante quantité de biomasse récoltée par hectare nettement plus importante que le blé ou le maïs par exemple. La canne à sucre présente le deuxième meilleur rendement par hectare, car contrairement aux autres matières la bagasse est également utilisée pour produire du bioéthanol à base de lignocellulose, 30% de la

bagasse et la moitié de la paille disponible ont été convertis en bioéthanol à raison de 400 l par tonne de biomasse cellulosique sèche. [34]

1.5 Le bilan CO₂ du bioéthanol

D'un point de vue des émissions de CO₂, en comparant les émissions de CO₂ à la sortie d'échappement d'un véhicule fonctionnant à l'essence avec celles d'un véhicule fonctionnant au bioéthanol E85, le gain est plutôt faible.

Cependant le calcul est plus complexe car, pour effectuer un bilan CO₂ complet, il faut mesurer les gaz rejetés de la production du carburant jusqu'à sa consommation. Ce bilan est dit « du puits à la roue ». Dans ce cas, et comme le montre la **figure 2.3** les filières de production de biocarburants présentent un gain important par rapport aux filières de carburants fossiles, le biocarburant étant fabriqué à partir de matières premières renouvelables, les émissions nettes de CO₂ ne proviennent que des énergies fossiles utilisées pour la culture et la transformation des matières premières. [35]



Source : Christophe NUNES DASILVA. 2009

Comme le montre le **tableau 2.3** le bilan carbone du bioéthanol de deuxième génération est encore meilleur comparé à celui de la première génération.

Tableau 2.3: Comparaison du bilan carbone du bioéthanol de première et de seconde génération

Biomasse utilisée	Produit final	Emissions de GES(g CO₂eq/Km)
<i>Peupliers (culture à courte rotation)</i>	Bioéthanol de deuxième génération	22
<i>Résidus forestiers</i>	Bioéthanol de deuxième génération	19
<i>Paille de blé</i>	Bioéthanol de deuxième génération	8.9
Canne à sucre	Bioéthanol de première génération	26
blé	Bioéthanol de première génération	132
Betterave	Bioéthanol de première génération	130

Source: WTW JRC. 2007(well to wheels analysis in the european context. Joint research centre)

En effet, les matières végétales lignocellulosiques utilisées pour la fabrication du bioéthanol ont l'avantage de consommer moins d'eau et d'engrais, or on sait que le traitement de l'eau et la fabrication des engrais sont des procédés voraces en énergies, ils émettent donc une importante quantité de CO₂.

On note aussi que le bilan CO₂ du bioéthanol de canne à sucre est bon et est très proche de celui du bioéthanol de seconde génération, cela est dû au fait que l'électricité consommée

pour la transformation du sucre en bioéthanol provient de la bagasse, elle n'émet donc pas de CO₂. [35]

1.6 Avenir de la filière

L'avenir de cette filière bio alcool dépendra surtout de la possibilité de développer des matières premières durables, des technologies efficaces et de prévenir les risques potentiels tels que la concurrence avec les denrées alimentaires.

Il est donc nécessaire de définir des normes de durabilité pour les biocarburants dans un cadre neutre afin de promouvoir les meilleures pratiques et des voies durables de bioéthanol.

Certains spécialistes pensent que le marché du bioéthanol est un marché en développement et sa pérennisation dépend directement du soutien des pouvoirs publics [35]. Pour d'autres il apparaît évident, au vu de ses nombreux inconvénients, que le bioéthanol de première génération est amené à être remplacé d'ici une décennie. En témoignent les paroles du président américain en 2007 : « *Nous devons continuer à investir dans des nouveaux procédés de fabrication d'éthanol, en utilisant tout, des copeaux de bois à l'herbe en passant par les déchets de l'agriculture* ». L'éthanol cellulosique est donc mis en avant. Mais, il subsiste encore des obstacles technico-économiques à franchir qui sont des éléments-clés déterminants l'évolution de ce secteur au sein d'un marché déjà fortement concurrentiel. [36]

L'avenir de la filière passe donc par la disponibilité d'une biomasse non alimentaire à fort potentiel, le savoir technologique, la préservation de la biodiversité ainsi que par la culture de valorisation des co-produits. [36]

2. TECHNOLOGIES DE PRODUCTION DU BIOETHANOL DE PREMIERE, DEUXIEME ET DE TROISIEME GENERATION

2.1 Bioéthanol de première génération

2.1.1 Bioéthanol produit à partir de cultures sucrières :

Le disaccharide le plus couramment utilisé pour la production du bioéthanol est le saccharose, ce dernier est le principal composé des jus sucrés issus de la canne à sucre, la betterave, le sorgho sucré, les mélasses ou encore les caroubes et les dattes.

Le saccharose est composé de glucose et de fructose. Le bioéthanol issu de la transformation du saccharose a représenté 48% de la production d'éthanol dans le monde, en 2006 (F. O. Licht, 2006).

2.1.1.1 Types de biomasse saccharifère (jus sucré)

Dans l'industrie du bioéthanol à base de saccharose les substrats sont principalement la canne à sucre, la betterave sucrière ou a moindre degré le sorgho à sucre, les dattes, les caroubes, les déchets de dattes, les mélasses.

Tableau 2.4 : Composition des principaux substrats saccharifères utilisés pour la production du bioéthanol

Biomasse sucrière	eau	Matière sèche	saccharose	Non saccharose	Matières azotées
Canne à sucre	70%	30%	56%	30%	
Betterave sucrière	75%	25%	72%	28%	5.6%
Sorgho à sucre	65%	35%	20%		
Dattes	70%	30%	40 à 65%		

Mélasses de canne à sucre	25%	75%	46%		
Mélasses de betteraves sucrières	23%	77%	48%		
Caroube			40%	35% (amidon)	

Source: IIRB 1992 – ITB 2001. Caroube : T. Roukas 2008.

2.1.1.2 Processus de production d'éthanol à partir d'une matière saccharifère non alimentaire : les déchets de dattes

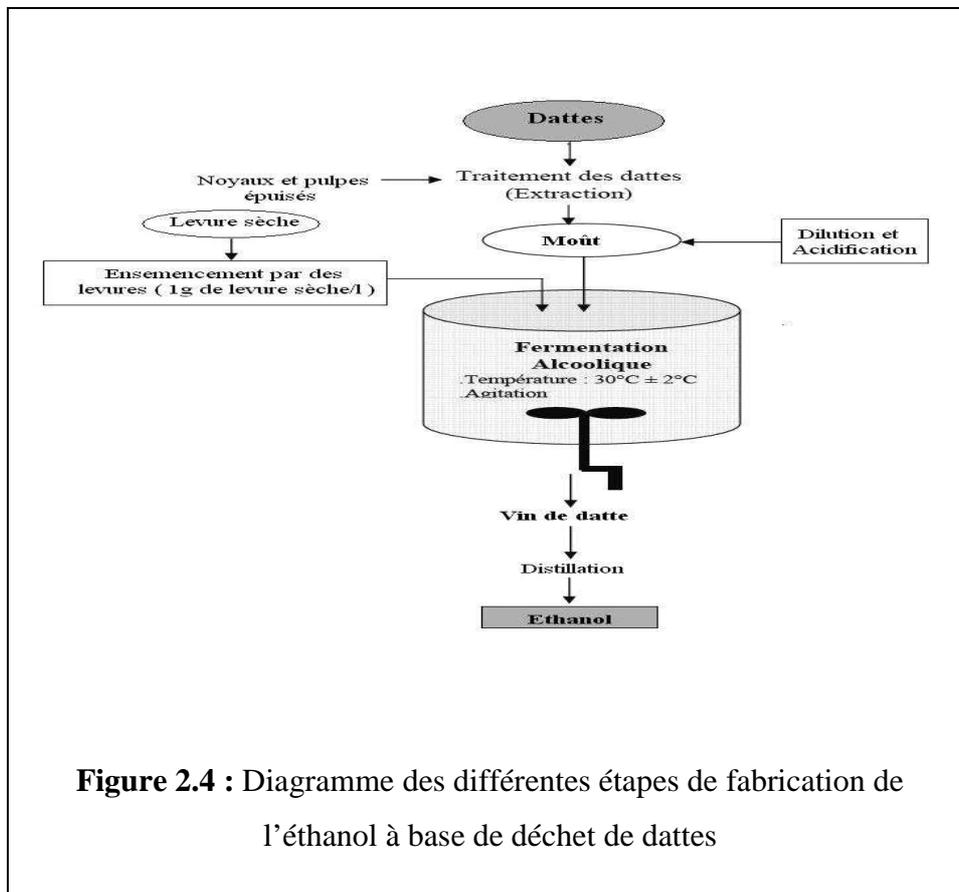
Les dattes représentent un substrat très riche en sucres, elles ont un pouvoir de conservation relativement long, elles peuvent donc constituer un substrat de choix pour produire de nombreuses substances à forte valeur ajoutée tel que l'éthanol.

Les cultivars de dattes sont très nombreux, ils sont pour la plupart très mal exploités à l'exception de *Deglet Nour* et à degré moindre le *Ghars*, *Degla Beida* et *Mech Degla* qui présentent une importance économique majeure. Le secteur phoénicicole notamment en Algérie fournit un tonnage très élevé de déchets de dattes qui sont les dattes communes non alimentaires (hmira, tinacer, takarbouch...), les dattes mal fécondées (kaciene), les rebuts de dattes tel que les noyaux. [37]

Pour produire du bioéthanol, ces dattes doivent être imbibées d'eau chaude (90 à 95 °C), ensuite broyées, puis diluées à raison de 200 g de pulpes pour 800 ml d'eau. Le pH du moût doit être ajusté entre 4.3 et 4.7 par l'acide sulfurique (H₂SO₄). Ce pH acide préjudiciable au développement des bactéries s'avère propice à la prolifération des levures *Saccharomyces cerevisiae*. [38]. Ces dernières doivent êtreensemencées à raison d'1 g/l, la température du bio réacteur doit être maintenue à 30 ± 2 °C. La fermentation est conduite en anaérobiose pendant 72 heures environ. Toutefois, la fermentation est favorisée par une agitation due au mouvement des bulles du CO₂ dégagé. [39]

A la fin de la fermentation, le vin de dattes obtenu est distillé afin d'extraire l'éthanol. La température de distillation est de l'ordre de 78 °C. [40]

La figure 2.4 représente le diagramme des différentes étapes de fabrication de l'éthanol



Source : A. Boulal, Adrar 2010

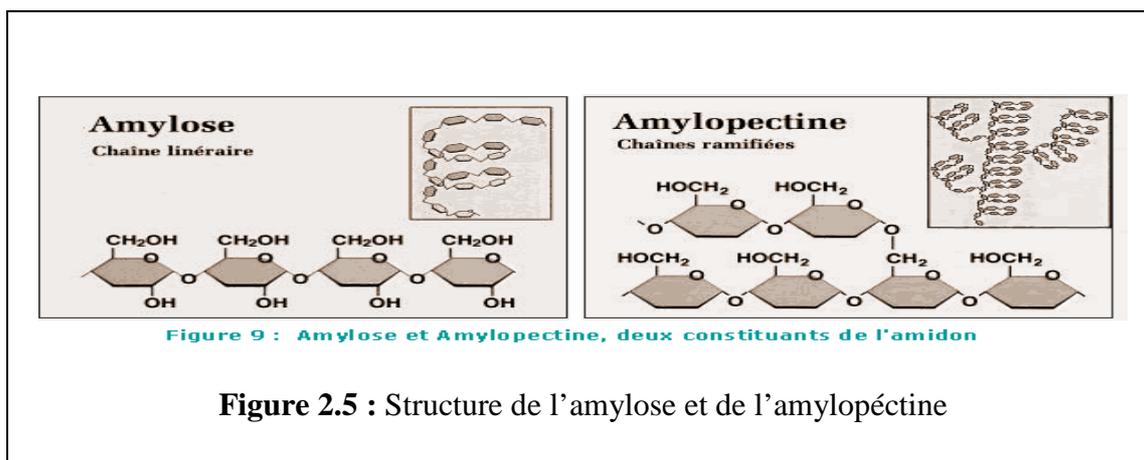
2.1.2 Le bioéthanol à base d'amidon

Il ya eu un changement majeur dans la perception globale de la production du bioéthanol quand la biomasse saccharifère a été remplacée par des féculents riches en amidon.

D'un point de vue chimique l'amidon est composé de deux types de polymères de glucose : l'amylose et l'amylopectine.

L'amylose est formé de deux chaînes linéaires de glucose unis en $\alpha-1,4$ alors que l'amylopectine est formée de chaînes ramifiées faites de glucose unis en $\alpha-1,6$

Chaque molécule d'amidon peut contenir 100 à 20000 glucoses, la proportion amylose/amylopectine varie de 1/4 à 1/5 pour l'amylose.



Source M. Alatiki. 2010

Les matières amidonnées nécessitent une étape d'hydrolyse pour produire des sucres fermentescibles qui ensuite peuvent être fermentés en bioéthanol.

L'hydrolyse est une réaction de dégradation des osides en molécules de plus petit poids moléculaire : oses, disaccharides, dextrans, etc. Cette réaction est catalysée par la chaleur, les acides, les alcalis ou par les enzymes, mais on préfère souvent l'hydrolyse enzymatique en raison des nombreux avantages qu'elle offre. [41]

Les enzymes impliquées dans l'hydrolyse comprennent : α -amylase, β -amylase, glucoamylase et pullulanase. Ces enzymes peuvent être obtenues à partir de sources végétales ou microbiennes. [42]

2.1.2.1 Hydrolyse de l'amidon

Il existe deux principales méthodes d'hydrolyser l'amidon : l'hydrolyse enzymatique et l'hydrolyse acide :

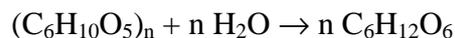
L'*hydrolyse enzymatique* est la méthode la plus précise et la plus couramment utilisée, il s'agit d'utiliser des enzymes biologiques qui catalysent la décomposition de l'amidon en unités de glucose. Selon la nature des liaisons osidiques on peut trouver des enzymes qui hydrolysent les liaisons α -1,4-glucosidiques (α -amylases et β -amylases), des enzymes qui hydrolysent les liaisons α -1,6-glucosidiques (*pullulanases* et *isoamylases*), ou encore des

enzymes qui hydrolysent les deux liaisons α -1, 4 – et α -1,6-glucosidiques (*glucoamylases*). [43]

L'hydrolyse acide de l'amidon est une réaction entre l'amidon et l'eau, elle est facilitée par un catalyseur : l'acide chlorhydrique (d'où le nom hydrolyse acide), suite à ça l'amidon « se coupe » en plusieurs oses.

Les acides minéraux catalysent la fixation d'une molécule d'eau entre deux molécules de D-glucose et provoquent ainsi la rupture du pont osidique ; au début ce sont les chaînes les plus longues qui sont libérées mais plus la durée de l'hydrolyse est longue plus le nombre des molécules de glucose libérées est important.

L'hydrolyse acide n'est pas spécifique, si elle est conduite jusqu'à la fin, elle rompt toutes les liaisons osidiques et conduit au glucose (avec comme intermédiaires des dextrans et du maltose). [44]



Une fois l'hydrolyse terminée, la production du bioéthanol suit les étapes classiques c'est-à-dire : fermentation des molécules de glucose libérées par *Saccharomyces cerevisiae*, puis distillation. [45]

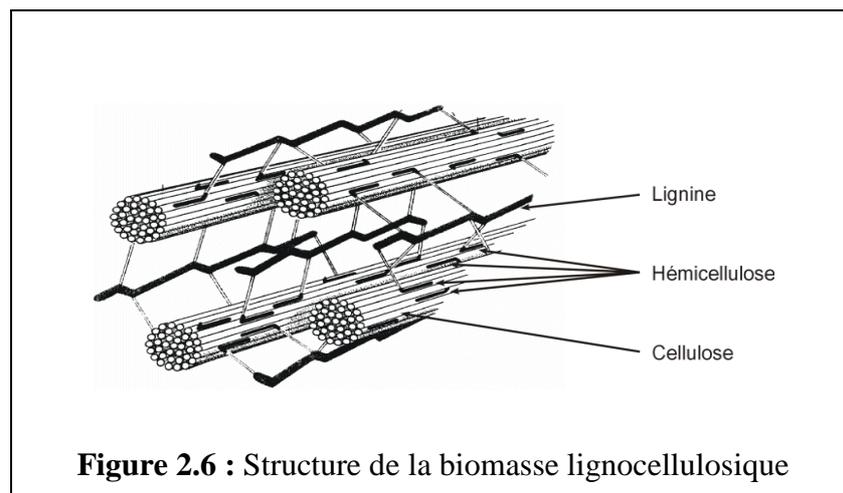
2.2 Bioéthanol de deuxième génération

Le bioéthanol de seconde génération est un carburant basé sur la transformation de la matière première lignocellulosique (le composé le plus abondant sur terre dans la biomasse) en bioéthanol. La matière première peut être issue de plantes poussant sur des sols pauvres ou de déchets de productions agricoles ou sylvicoles. Par rapport à l'éthanol de la 1ère génération, les avantages du bioéthanol lignocellulosique sont notamment:

- Un potentiel de matières premières plus vaste et plus varié,
- L'absence de concurrence avec l'alimentation,

- Des rendements à l'hectare plus importants, notamment par l'utilisation de plantes lignocellulosiques à croissance rapide (type cardon) ou une conversion plus complète de plantes déjà utilisées,
- Des interventions en champs et des besoins en engrais et produits phytosanitaires très réduits. [46]

Pour la grande majorité des espèces végétales, la biomasse est composée essentiellement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les molécules de cellulose, constituant majoritaire des parois cellulaires chez la plupart des plantes, se présente comme le montre la **figure 2.8** sous forme de longues chaînes de molécules de glucose (un monosaccharide à 6 atomes de carbone ou hexose), organisées en faisceaux cristallins. Ces molécules de cellulose sont reliées entre elles au moyen d'une autre molécule, l'hémicellulose, qui se présente quant à elle sous la forme d'une chaîne de sucres à 5 atomes de carbone ou pentose (principalement du xylose).



Source : R. Shleser, 1994

La lignine, enfin, effectue la liaison entre les faisceaux de cellulose et confère à la plante sa structure particulière. Cette dernière n'est pas convertie en éthanol. [27]

Comme le montre le **tableau 2.6** les proportions de chacun de ces constituants peuvent varier de manière considérable selon le type de biomasse envisagé.

Tableau 2.5: Proportion de la cellulose, hémicellulose et lignine dans différentes matières lignocellulosiques

	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Herbe	30-50 %	15-40 %	05-20 %
Bagasse	40-55 %	25-40 %	05-25 %
Bois dur	40-50 %	20-30 %	15-30 %
Bois tendre	40-55 %	10-15 %	25-30 %
Résidus agricoles	30-40 %	10-40 %	10-30 %
Moyenne	40-60 %	20-40 %	10-25 %

E. Gnansounou et A. Dauriat , 2009

2.2.1 Processus de production de bioéthanol lignocellulosique

Les technologies pour l'obtention du bioéthanol à base de matériaux lignocellulosiques impliquent 4 étapes [47] :

1. Le prétraitement (l'hydrolyse)
2. L'hydrolyse proprement dite (saccharification)
3. La fermentation
4. La distillation

2.2.1.1 Le prétraitement

D'une manière générale, la première étape de transformation consiste en un pré-traitement de la matière première, qui vise le nettoyage et la « cassure » du matériau, afin de causer la destruction de sa structure cellulaire et de le rendre plus sensible aux traitements chimiques ou biologiques postérieurs. L'étape suivante consiste au retrait de la lignine et à l'hydrolyse de l'hémicellulose ; elle peut également être nommée « pré-traitement ». Pour cette étape, il existe divers types de process, avec des rendements différents et des effets distincts sur la biomasse, et qui ont, en conséquence, un impact sur les étapes suivantes. Le tableau 2.7 présente les méthodes les plus utilisées.

Tableau 2.6 : Types de prétraitement utilisés pour l'hydrolyse de la biomasse cellulosique

Processus	Description	Temps de réaction	Rendement de xylose	coût
Physiques				
Explosion de vapeur	La biomasse triturée est traitée avec la vapeur (saturée, 160°-260° C) suivie d'une rapide décompression	1-10 min	45%-65%	-
Thermohydrolyse	Utilise l'eau chaude à haute pression (pressions supérieures au point de saturation) pour hydrolyser l'hémicellulose	30 min	88%-98%	-
Chimiques				
Hydrolyse acide	Au moyen de l'utilisation d'acides sulfurique, chlorhydrique ou nitrique, concentrés ou dilués	2-10 min	75%-90%	+
Hydrolyse alcaline	Par l'utilisation de bases, comme les	2 min	60%-75%	++

	hydroxydes de sodium ou de calcium			
Solvant organique	Un mélange d'un solvant organique (méthanol, bioéthanol et acétone, par exemple) avec un catalyseur acide (H ₂ SO ₄ , HCl) est utilisé pour casser les liaisons internes de la lignine et de l'hémicellulose	40-60 min	70%-80%	
Biologique				
Biologique	Utilisation de champignons pour rendre soluble la lignine. Généralement, il est utilisé en combinaison avec d'autres processus.			
combinés				
Explosion de vapeur catalysée	L'addition de H ₂ SO ₄ (ou SO ₄) ou CO ₂ dans l'explosion de vapeur peut augmenter l'efficacité de l'hydrolyse enzymatique, diminuer la production de composés inhibiteurs et promouvoir un retrait plus complet de l'hémicellulose	1-4 min	88%	-

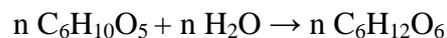
Afex (ammonia fiber explosion)	Exposition à l'ammonium liquide à haute température et pression pour une certaine période de temps, suivie d'une rapide décompression		50%-90%	
Explosion de CO2	Similaire à l'explosion de vapeur		75%	

Source : Elaboré sur base de Hamelinck et al. (2005).

* Le signe + indique l'effet avantageux (moindre coût).

2.2.1.2 L'hydrolyse proprement dite

Dans l'étape de l'hydrolyse proprement dite, la cellulose est convertie en glucose, suivant une réaction catalysée par un acide (dilué ou concentré) ou par des enzymes (cellulase).



L'hydrolyse acide (acide concentré ou dilué) est effectuée en deux étapes pour tirer profit des différences entre l'hémicellulose et la cellulose. La première comprend essentiellement l'hydrolyse de l'hémicellulose, conduite suivant les conditions du pré-traitement.

Dans la seconde étape, des températures plus élevées sont appliquées dans le but d'optimiser l'hydrolyse de la fraction cellulosique. Le processus avec l'acide dilué requiert des températures et des pressions élevées, avec des temps de réaction allant de quelques secondes à quelques minutes, ce qui facilite l'utilisation de processus continus.

Les process avec acide concentré, par contre, sont conduits sous des conditions moins extrêmes, mais avec des temps de réaction typiquement plus longs. [48]

Le **tableau 2.7** présente une comparaison entre les différents processus d'hydrolyse :

Tableau 2.7 : Comparaison des différentes options pour l'hydrolyse de la cellulose

Processus	Intrant	Température	Temps	Saccharification
Acide dilué	< 1% H ₂ SO ₄	215° C	3 min	50%-70%
Acide concentré	30%-70% H ₂ SO ₄	40° C	2-6 h	90%
Enzymatique	Cellulase	70° C	1,5 jour	75%-95%

Source : Elaboré sur base de Hamelinck et al. (2005).

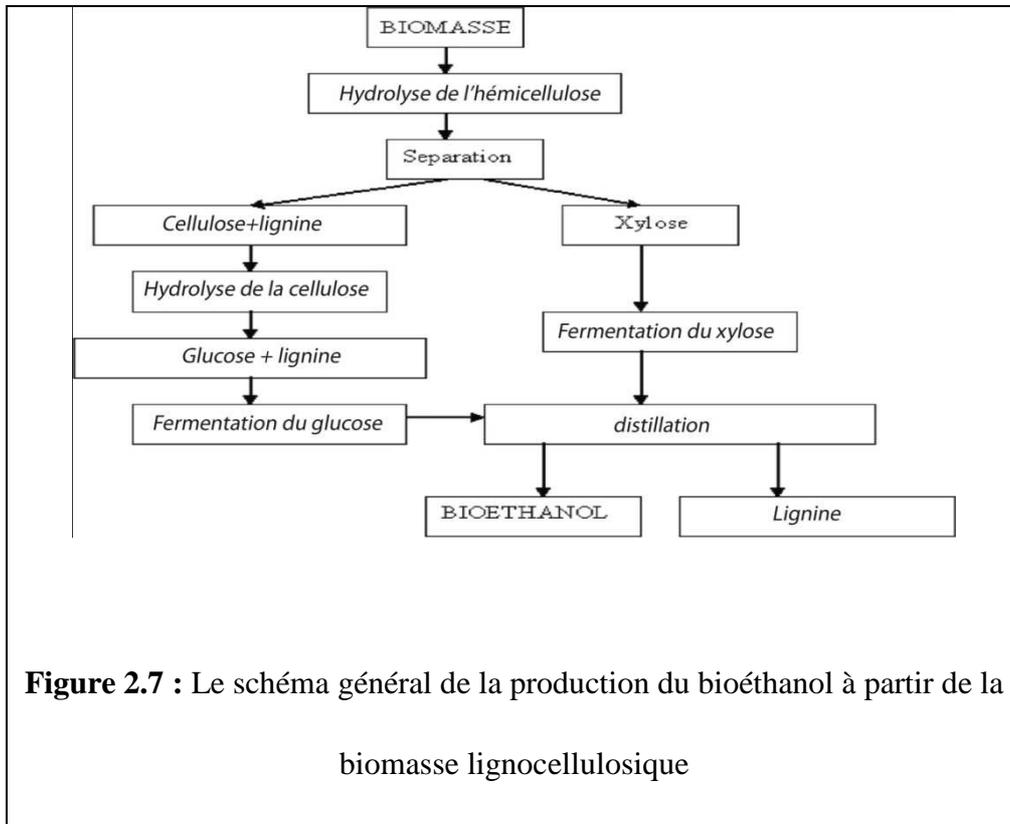
Dans le processus enzymatique, l'hydrolyse est catalysée par des enzymes appelées génériquement cellulases ; en réalité, il s'agit d'un complexe enzymatique composé d'endoglucanases (qui attaquent les chaînes de cellulose pour produire des polysaccharides plus courts), d'exoglucanases (qui attaquent les terminaux non-réducteurs de ces chaînes plus courtes et enlèvent la cellobiose (produit de la dégradation de la cellulose, c'est un *diholoside* dont la formule brute est $C_{12}H_{22}O_{11}$ comme le saccharose mais différent par sa configuration spatiale) et de β -glucosidases (qui hydrolysent la cellobiose et d'autres oligomères au glucose). En comparaison, l'hydrolyse avec acide dilué est à un stade de développement plus avancé que les autres processus, avec des limites de rendement (50%-70%).

L'hydrolyse avec acide concentré présente de meilleurs rendements et moins de problèmes quant à la production d'inhibiteurs. L'hydrolyse enzymatique, par contre, présente déjà des rendements élevés (75%-85%), et de grandes améliorations sont encore attendues (85%-95%).
[47]

2.2.1.3 La fermentation

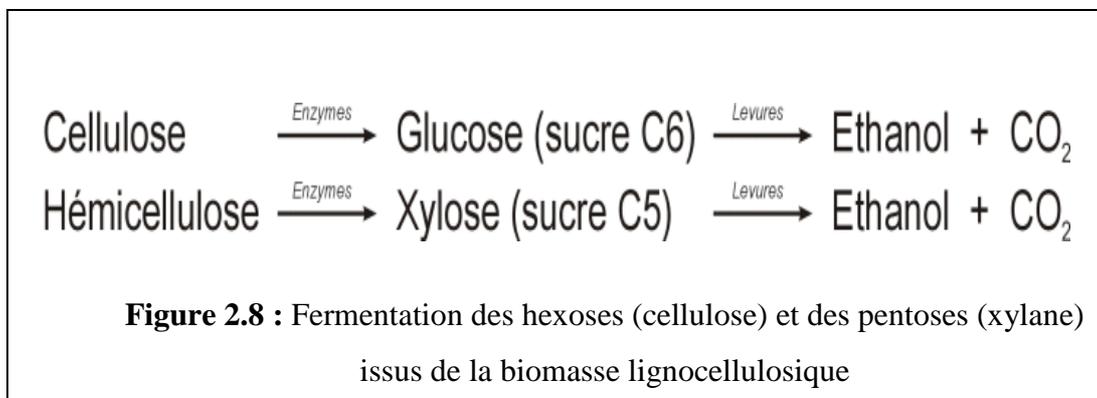
Indépendamment de la méthode, la fermentation des sucres issus de l'hydrolyse pour donner du bioéthanol suit les mêmes principes que ceux observés dans le cas de la production à base d'amidon ou de sucres, mais dans le cas de la biomasse lignocellulosique la fermentation se fait selon deux voies : la fermentation des hexoses (cellulose) et la fermentation de pentoses (les xyloses).

Le schéma général de la production du bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique est représenté dans le schéma suivant :



Source : M. Balat (2008)

Ainsi la cellulose est hydrolysée en glucose qui suit la voie de fermentation des hexoses pour donner le bioéthanol, tandis que l'hémicellulose est hydrolysée en xylose qui suit la voie de fermentation des pentoses pour donner le bioéthanol.



Source : From Shleser, R. 1994

Comme le montre la figure, une bonne partie de l'hydrolysats est composée de sucres à cinq carbones, qui ne peuvent être fermentés par des souches sauvages de *S. cerevisiae*. A ce jour, la majorité des processus rejette cette fraction des sucres, ou réalise la fermentation en deux étapes, mettant sérieusement en balance sa viabilité économique. Comme le processus enzymatique est conduit sous des conditions non extrêmes (pH 4,8 et température entre 45° et 50° C), le coût en charges variables est relativement bas, il permet aussi d'obtenir de meilleurs rendements, de réaliser la fermentation en même temps que la saccharification (processus SSF – *simultaneous saccharification and fermentation*) et de présenter un bas coût d'entretien (aucun problème de corrosion). En raison de son grand potentiel d'évolution et de réduction de coûts, de nombreux spécialistes voient l'hydrolyse enzymatique comme la clé pour la production de bioéthanol à un coût compétitif à long terme. [48]

Une évolution de ce processus est d'inclure la co-fermentation de substrats ayant de multiples applications, permettant la consommation de pentoses et d'hexoses dans le même réacteur. Mais pour le moment, cette procédure (SSCF – *simultaneous saccharification and co-fermentation*) est encore testée à une échelle pilote. L'aboutissement de cette évolution technologique semble être l'établissement du « bioprocessus consolidé » (CBP – *consolidated bioprocessing*), dans lequel les quatre transformations biologiques intervenant dans la production du bioéthanol (production d'enzymes, saccharification, fermentation d'hexoses et fermentation de pentoses) se passent au cours d'une unique étape. Dans ce cas, des microorganismes thermophiles produiraient, en condition anaérobique, des complexes enzymatiques dont l'activité cellulolytique serait meilleure que celle des enzymes typiques des champignons et qui fermenteraient dans un même réacteur tous les sucres libérés. Ce procédé comme le montre le **tableau 2.8** présente le meilleur rendement en comparaison avec la SSF avec différents prétraitements avec 400 litres de bioéthanol par tonne de biomasse sèche. [49]

Tableau 2.8 : Comparaison des estimations de rendements et des coûts pour la production de bioéthanol au moyen de l'hydrolyse

Référence	Processus	Rendement (litre/t)	Coût de la biomasse	Coût de l'éthanol
Hamelinck et al. (2005)	SSF avec prétraitement à l'acide dilué	300	3 €/GJ	0,98 €/litre
	SSCF avec prétraitement Avec explosion de vapeur	340	2,5 €/GJ	0,58 €/litre
	CBP avec thermohydrolyse	400	2 €/GJ	0,39 €/litre
Aden et al. (2002)	SSCF avec prétraitement A l'acide dilué.	374	33 US\$/t	0,28 US\$/ litre (prix minimum)
Wooley et al. (1999)	SSCF, avec prétraitement A l'acide dilué	283	44 US\$/t	0,38 US\$/ litre

Source : Seabra (2008).

2.2.1.4 La distillation

Après fermentation à l'aide de micro-organismes (levures, bactéries, etc.), l'éthanol est récupéré par distillation tout d'abord (éthanol hydraté à 96% vol.), puis par déshydratation (éthanol anhydre à 99.7% vol.)

2.3 Le bioéthanol de troisième génération

Les algues représentent un vrai réservoir de ressources énergétiques végétales, elles ont un taux de fixation de carbone supérieur à celui des plantes terrestres (17,5 t/ha/an contre 5 à 10 t/ha/an pour la canne à sucre) et leur prix de production est plus faible que celui des cultures agraires.

Les algocarburants désignent les biocarburants issus des transformations d'algues comme les algues microscopiques vivant dans les marais, dans les rivières et les océans capables de fixer le CO₂. Les algocarburants sont dits de troisième génération puisqu'ils ne proviennent pas des végétaux alimentaires (filiales de première génération) ni de la biomasse lignocellulosique (filiales de deuxième génération) mais plutôt des algues. Les algocarburants peuvent être fabriqués à partir des algues dites chlorophycées comme le closterium, la chlamydomonas, ... ou d'algues diatomées comme le phaeodactylum, le melosira ou encore de macroalgues comme la laitue de mer. Alors que les premiers efforts pour produire des biocarburants à partir d'algues sont axés sur le biodiesel comme produit final, les chercheurs ont commencé à explorer la production de l'éthanol à partir d'algues. Les investissements importants réalisés dans la production d'éthanol et les innovations technologiques en conséquence pourraient rendre la production d'éthanol à partir de l'amidon et de la cellulose des algues une alternative viable via différents processus. [50]

Les algues représentent une vaste variété d'espèces vivant de la photosynthèse dans des environnements divers. Ils peuvent être autotrophes ou hétérotrophes. Les autotrophes exploitent la lumière du soleil et fixent le CO₂ atmosphérique qui est ensuite assimilé sous forme de glucides. Les hétérotrophes sont capables d'utiliser de petites molécules organiques présentes dans l'environnement, de les transformer et de les stocker sous forme de graisse ou de protéines. Ainsi les algues peuvent produire des hydrates de carbone, des lipides et des protéines, rapidement, qui peuvent être ensuite traitées pour générer des biocarburants. En se basant sur leur morphologie et leur taille, les algues sont regroupées en deux catégories - les microalgues et macroalgues -. Comme leur nom l'indique, les microalgues sont des organismes photosynthétiques microscopiques, dont beaucoup sont unicellulaires. Au contraire, les macroalgues, sont composées de plusieurs cellules dont la structure ressemble à des racines, tiges et feuilles de plantes supérieures. [51]

2.3.1 Atouts des algues pour la production du bioéthanol

Il ya plusieurs traits marquants qui font des algues un excellent candidat pour la production du bioéthanol renouvelable. Les algues ont un rendement de conversion élevé et sont capables de synthétiser et d'accumuler de grandes quantités de glucides (14 fois plus que les plantes terrestres), elles peuvent également tolérer et utiliser des niveaux sensiblement élevés de CO₂. Par conséquent, ils peuvent utiliser le CO₂ émis provenant des centrales électriques à base de pétrole ou d'autres industries réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre. Aussi, les algues stockent la cellulose et ne produisent pas de lignine ou d'hémicellulose principales barrières de la production de l'éthanol lignocellulosique. Par ailleurs, des cellules d'algues peuvent être récoltées dans un court laps de temps par rapport aux plantes terrestres et peuvent donc répondre aux demandes croissantes de la production d'éthanol. La croissance des algues est simple, elle peut atteindre des densités élevées, et utilise la lumière, le dioxyde de carbone, et d'autres matières inorganiques de façon efficace, ainsi elles peuvent produire 6000 gallons d'éthanol par année quand le maïs produit seulement 400 gallons d'éthanol par an. [52]

Les algues peuvent être facilement cultivées dans différents milieux aquatiques tels que des eaux usées, salées ou municipales, ce qui permettrait une production de bioéthanol durable, car cela diminue la concurrence avec les cultures alimentaires, qui ont besoin d'eau douce pour l'irrigation. De plus, les algues peuvent apporter une bioremédiation durable des eaux usées grâce à l'utilisation des molécules polluantes comme nutriments pour leur croissance tels que l'azote et le phosphore. En plus de la production du bioéthanol, les algues offrent de précieux co-produits comme les déchets riches en protéines qui peuvent servir d'aliments pour bétail [53]

2.3.2 Le bioéthanol à partir de microalgues

Des microalgues comme *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas*, *Scenedesmus*, et la spiruline, sont connues pour contenir une grande quantité (> 50% du poids sec) d'amidon et de glycogène, utiles en tant que matières premières pour la production d'éthanol. Les microalgues peuvent aussi assimiler la cellulose qui peut également être fermentée en bioéthanol. [54]

2.3.3 Le bioéthanol à partir de macroalgues

Comme les microalgues, les macroalgues peuvent également être utilisées pour la production d'éthanol en convertissant la cellulose en sucres fermentescibles, l'absence absolue ou la quasi-absence de lignine rend l'hydrolyse enzymatique plus simple. On peut trouver des algues macroscopiques brunes, tels que, *Laminaria*, *Saccorhiza*, *Alaria* qui stockent de la laminarine et du mannitol et des algues rouges comme *Gelidium amansii*, qui stockent la cellulose, du glucane et du galactane, qui peuvent également servir de matière première potentielle pour la bioconversion en éthanol. [53]

2.3.4 La culture des algues

Les cultures des algues est relativement simple vu qu'elles ne sont pas très exigeantes et qu'elles ont besoin essentiellement de CO₂ et de lumière, la culture peut se faire dans 2 types de photobioréacteurs : les systèmes clos - tubulaire et les systèmes ouverts. La structure fermée est relativement contrôlable (le pH, l'oxygène dissous le long des tubes, l'encrassement, la surcharge des cellules algales dans le haut), avec moins de problèmes de contamination.



Photo 2.1 : Les systèmes ouverts

Source : Algosud 2003



Photo 2.2 : Les systèmes fermés
(photobioréacteur tubulaire)

Source : BFS Alicante. 2011

Récemment, des systèmes hybrides combinant les caractéristiques des deux systèmes ouvert et clos ont été testés ; dans ces systèmes, les algues sont d'abord cultivées dans un photobioréacteur où le risque de contamination est réduit ensuite, elles sont transférées dans des étangs où elles sont soumises à des conditions contrôlées en nutriments qui stimulent la production du produit désiré. [55]

2.3.5 Les perspectives d'avenir de l'éthanol d'algues

A l'heure actuelle, la production du bioéthanol algal nécessite des enzymes qui sont produites par voie microbienne. Les méthodes d'ingénierie génétique doivent modifier certaines souches d'algues pour produire elles même toutes les enzymes nécessaires telles que les amylases et les cellulases pour faciliter et diminuer le coût du process. Par ailleurs, les recherches futures porteront sur la production d'éthanol simultanément avec la photosynthèse pour éviter l'accumulation d'amidon et le retour à la conversion du sucre en éthanol. Aussi, l'objectif dans les années à venir serait de cultiver les algues dans une eau salée ou usée et diminuer ainsi l'utilisation d'eau douce. [56]

Chapitre 3 : ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

Avoir recourt à une analyse de cycle de vie peut s'avérer primordial surtout dans un domaine aussi sensible que la production de biocarburants. En effet, elle a le pouvoir de valider ou pas les procédés de fabrication du biocarburant en étudiant les aspects environnementaux ainsi que la consommation d'énergie primaire de ce dernier, et cela de l'acquisition de la matière primaire à sa production, de son utilisation et à sa destruction, elle contribue par ses résultats à déterminer les étapes les plus polluantes et les voraces en énergie et aide à apporter les améliorations nécessaires à ces dernières. Ce chapitre explique les étapes nécessaires à la construction d'une analyse de cycle de vie.

1. Définition de l'ACV

L'ACV «*Analyse de cycle de vie* » est une méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un produit (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé) sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation. Outil normalisé et reconnu, l'ACV est la méthode la plus aboutie en termes d'évaluation globale et multicritère. Elle résulte de l'interprétation du bilan quantifié des flux de matières et énergies liés à chaque étape du cycle de vie des produits, exprimée en impacts potentiels sur l'environnement. [71]

2. But de l'ACV

L'enjeu majeur de l'utilisation de l'ACV est d'identifier les principales sources d'impacts environnementaux pour mieux les éviter. Cette meilleure connaissance des impacts associés aux produits peut permettre de hiérarchiser les priorités d'amélioration et éclairer les choix techniques et organisationnels. La conduite d'une telle évaluation peut également permettre de repérer et valoriser les produits présentant les impacts les plus faibles dans une démarche d'information des consommateurs, et participer au développement de l'offre de produits de meilleure qualité écologique.

Favorisant une vision globale des impacts générés par les produits ou procédés, déclinée selon différentes simulations, l'ACV fournit ainsi des éléments d'aide à la décision aux politiques industrielles (choix de conception, d'amélioration de produits, choix de procédés). [72]

3. Historique et contexte

Suite aux préoccupations environnementales de plus en plus manifestes ces dernières années, les scientifiques aussi bien que les organismes gouvernementaux cherchent de nouveaux moyens pour évaluer les impacts environnementaux de différents produits, de procédés, de systèmes, d'habitudes de vie ou encore de services. Devenue de plus en plus populaire ces dernières années, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV, aussi appelée écobilan) est une forme d'analyse des impacts environnementaux qui considère toutes les étapes du cycle de vie d'un produit. L'ACV permet d'identifier les points sur lesquels un produit peut être amélioré et vise à prévenir les impacts liés aux activités humaines.

C'est suite aux premiers bilans énergétiques des années 70 que les méthodologies pour les ACV ont vu le jour. Des groupes de travail se sont formés, puis dans les années 1997-2000, la série de normes ISO 14040 a été mise en place afin de guider les nouvelles analyses (ISO 14040, 2006).

Les ACV peuvent avoir plusieurs utilités, comme par exemple, aider à la prise de décisions aussi bien qu'à l'amélioration des performances environnementales d'un produit.

Afin de bien comprendre par la suite l'importance des travaux de recherche pour le développement d'analyses plus complètes il est important de bien saisir les notions élémentaires de l'ACV. [72]

4. Méthodologie de l'ACV

D'après les normes ISO, une ACV doit se réaliser suivant 4 grandes étapes, à savoir : la définition des objectifs et du champ de l'étude, une analyse de l'inventaire (AICV) des émissions et des extractions, l'évaluation des impacts (ÉICV) utilisant diverses méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie et, pour finir, l'interprétation des résultats (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). Ces quatre étapes sont schématisées par la Figure 3.1 ci-dessous. [72]

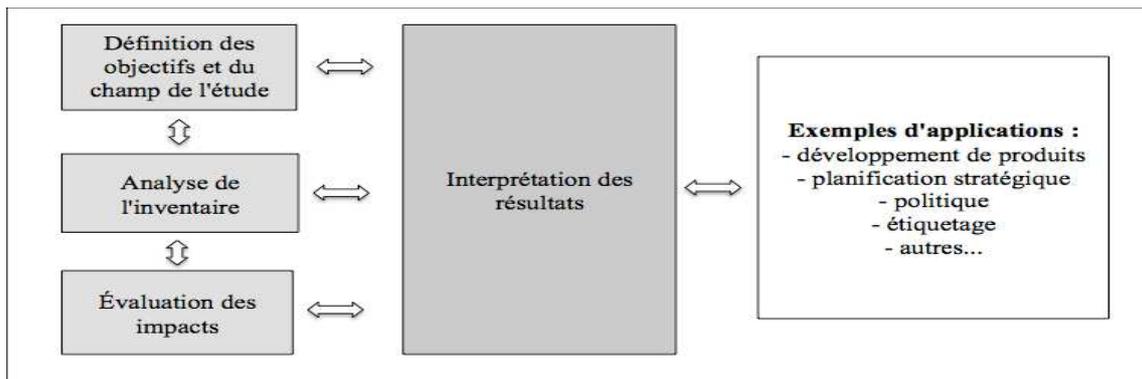


Figure 3.1 : Les étapes de l'ACV et exemples d'applications (adapté de ISO 14040, 2006)

4.1 La définition du champ de l'étude

Cette étape a pour but principal la mise en évidence des fonctions du système et la définition de l'unité fonctionnelle (UF) servant de base à l'étude. Cette UF est choisie selon la fonction principale du produit à l'étude. Les frontières du système constituent la délimitation de l'étude. Seuls certains processus vont être alors étudiés. Le système de produits, ainsi que ses frontières, sont représentés par l'arbre des processus et sont définis en fonction des objectifs de l'étude.

La première valeur importante est le *flux de référence*. Ce flux est la quantité de produits nécessaire pour répondre aux besoins de l'unité fonctionnelle. A titre d'exemple, pour une unité fonctionnelle de x km parcourus en voiture, le flux de référence sera la quantité de carburant nécessaire pour faire avancer la voiture. [72]

4.2 L'analyse de l'inventaire (intrants)

L'AICV permet de faire un bilan des entrants et sortants des flux élémentaires (reliant le produit avec l'environnement : matières premières, émissions). Les flux économiques (reliant deux processus) ou élémentaires seront donc mis à l'échelle du flux de référence.

Une collecte de données permet de construire les processus de l'analyse. Bien qu'il soit mieux d'avoir des données collectées sur le terrain, appelées données primaires, il n'est pas toujours possible d'en disposer. La littérature ou des données provenant de bases de données peuvent

venir compléter cette quantification des flux entrants. Ces données sont appelées données secondaires. Une base de données souvent utilisée, est la base ecoinvent, qui regroupe de nombreuses données construites principalement à partir de données européennes. [72]

4.3 Evaluation des impacts

Une méthode d'évaluation des impacts est nécessaire pour passer à la troisième phase de l'ACV. On en dénombre plusieurs : IMPACT 2002+, EcoIndicator 99, ReCiPe, TRACI, LUCAS etc. Le choix dépend encore une fois des objectifs et des catégories d'impacts que l'on souhaite étudier. Utilisant des valeurs moyennes européennes, une méthode souvent utilisée est IMPACT 2002+, elle propose une approche combinée problèmes/dommages comprenant 14 catégories de problèmes et 4 catégories de dommages, présentées à la Figure 3.2. [72]

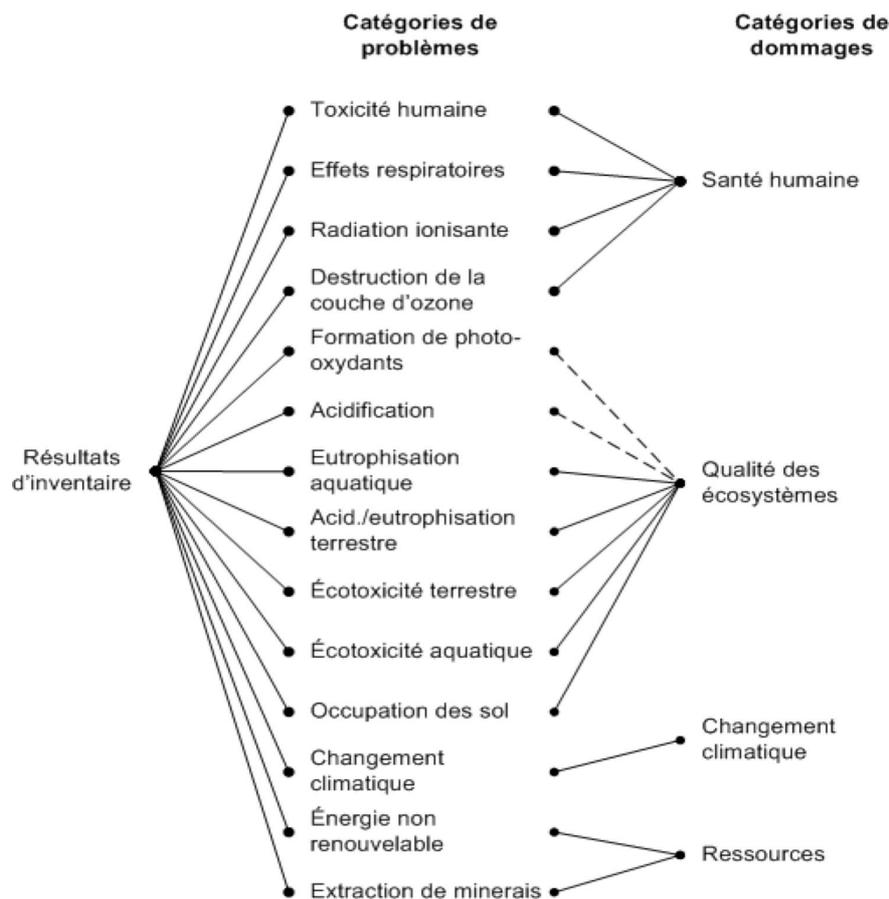


Figure 3.2 : Structure générale de la méthode IMPACT 2002+ (adapté de Jolliet et al. 2005)

Lors de la phase d'ÉICV, une étape de normalisation mettant sur une même unité les résultats des catégories de dommages peut être envisagée. La pondération consiste à attribuer un poids différent selon l'importance accordée à chaque catégorie de dommages. Les résultats peuvent être au final agrégés en un score unique. Les poids se basent sur un système de valeurs.

Cependant, la normalisation et la pondération ne sont pas des étapes obligatoires d'après la norme ISO.

4.4 Interprétation des résultats

L'interprétation de résultats est la dernière phase obligatoire selon les normes ISO. Elle permet d'analyser les résultats, de faire les comparaisons entre les produits, et d'en tirer des conclusions. [73]

5. Les types d'ACV

On distingue deux types d'ACV : l'ACV-A, ou analyse par *attributs*, et l'ACV -C, ou analyse par *conséquences* :

5.1 L'ACV-A (analyse de cycle de vie par attributs)

Ce type d'ACV consiste à prédire les impacts environnementaux dont un produit peut être tenu responsable. Pour Ekvall et Weidema (2004), ce type d'ACV sert à décrire les flux physiques environnementaux pertinents du système de production. Weidema, 2003 donne le terme d'analyse de cycle de vie *prospectives* pour les ACV-A puisque elles portent sur les développements futurs.

5.2 L'ACV-C (analyse de cycle de vie par conséquences)

Ce second type d'ACV a pour but d'analyser les conséquences d'un changement. C'est une *analyse rétrospective* car elle porte sur des impacts déjà passés.

L'ACV-C procure des analyses plus complètes puisqu'elle prend en compte plus de processus dans le système de production, le champ de l'étude est large il n'y a donc pas de délimitations de frontières. [74]

6. Les perspectives

Il est aujourd'hui bien démontré que l'usage des biocarburants en substitution aux carburants conventionnels permet de réduire les émissions de GES et les consommations d'énergies non renouvelables. Il s'agit d'ailleurs de l'un des principaux arguments en faveur de leur usage à grande échelle : utilisés purs, ils peuvent induire un gain en termes de rejet de GES pouvant aller au-delà de 90 % pour les filières les plus efficaces (filière éthanol via la canne à sucre ou biodiesel de 2e génération). Ce gain est d'ailleurs du même ordre de grandeur en termes de consommation d'énergie fossile.

Il est intéressant de rappeler que l'ACV permet d'évaluer d'autres impacts tels que l'acidification, l'eutrophisation, la déplétion des ressources naturelles ou encore de l'ozone atmosphérique qui sont beaucoup plus rarement abordés à l'heure actuelle. Des études visant à élargir l'évaluation des filières biocarburants qui ne devrait pas se limiter aux seuls bilans des émissions de GES et des consommations d'énergies non renouvelables, elle devrait inclure également l'étude de l'impact d'un développement massif de ces filières sur les ressources naturelles, notamment en eau. [74]

Chapitre 4 : METHODOLOGIE

1. METHODOLOGIE DE LA REALISATION DE L'INVENTAIRE DE QUELQUES MATIERES PREMIERES LOCALES NON ALIMENTAIRES POUVANT ETRE TRANSFORMEES EN BIOETHANOL

Pour la réalisation de cette étude dont le but est de dresser un inventaire de quelques matières premières pouvant être transformées en bioéthanol, plus de 60 espèces ont été étudiées. Une vingtaine seulement a été sélectionnée, car ces matières doivent répondre à certains critères, elles doivent être :

- Non alimentaires (non comestibles, non incluses dans les habitudes alimentaires), ainsi tout produit à grande consommation est exclu.
- Riches en saccharose, lactose, amidon ou en cellulose.
- Bon marché.
- Disponibles en Algérie
- Disponibles en quantité suffisante.
- Pousser sur des terres non fertiles voir hostiles, s'il s'agit de cultures, pour éviter toute concurrence avec les terrains agricole fertiles réservés aux cultures alimentaires.
- Peu exigeantes, en termes d'irrigation, s'il s'agit de cultures.

2. METHODOLOGIE DE LA REALISATION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Dans cette étude, on a effectué une analyse de cycle de vie de la production de bioéthanol cellulosique à partir d'une plante locale spontanée : le cardon (*Cynara cardunculus*), cette plante est très riche en cellulose (28.7%) et donne un rendement de 25 tonnes de matières sèche par hectare. L'analyse est axée sur les attributs. Ce type d'analyse précède généralement tout projet de production de biocarburant dans le but de modéliser les étapes de production et d'éviter d'éventuels problèmes liés à la consommation d'énergie ou d'importantes émissions de gaz à effet de serre.

Les étapes de culture du cardon, d'extraction du substrat fermentescible, de transport, de raffinage, et de production du bioéthanol sont prises en compte. Les résultats sont interprétés

et comparés à ceux obtenus pour d'autres biocarburants afin d'apprécier les avantages de cette nouvelle ressource. Dans ce travail le champ de l'étude est défini, les hypothèses sont posées, la collecte de données est faite et l'analyse est construite.

2.1 Choix de la plante

Le choix de la plante pour la réalisation de l'analyse de cycle de vie s'est porté sur le cardon *Cynara cardunculus* L, cette dernière est une espèce non utilisée pour l'alimentation locale, qui a une très grande productivité et un haut pouvoir calorifique nécessitant peu d'intrants agricoles, elle peut même être considérée comme une espèce envahissante pouvant donner entre 20 et 30 tonnes de biomasse sèche par hectare. La culture du cardon se fait sans difficultés même sur des terres hostiles non irrigués évitant ainsi toute concurrence avec les terres fertiles réservées aux cultures alimentaires.

Aussi, la plante a l'avantage d'offrir une multitude de coproduits allant des graines qu'on peut transformer en biodiesel aux déchets utilisables comme combustible. De plus, la teneur en cellulose du cardon dépasse les 28% faisant de lui un sérieux candidat pour la production de l'éthanol cellulosique. Le cardon peut regagner de la popularité et pourrait alors constituer une nouvelle source d'éthanol prometteuse et durable à l'heure où les recherches se tournent vers de nouvelles sources de carburant.

2.2 Définition des objectifs et du champ de l'étude

2.2.1 Objectifs

Cette ACV axée sur les attributs a pour objectifs de :

- Donner un schéma général modélisant la production du bioéthanol de cardon dans les conditions algériennes.
- Réaliser une première évaluation environnementale directement reliée au système de production.
- Identifier les étapes les plus polluantes et les plus voraces en énergie dans le but d'apporter des améliorations.
- Comparer les résultats avec d'autres carburants afin d'avoir un point de vue objectif et de déterminer si ce nouvel éthanol est une alternative intéressante pour remplacer le pétrole.

2.2.2 *Fonction, unité fonctionnelle*

L'unité de référence considérée dans cette analyse est la quantité de bioéthanol produite à partir du cardon récolté dans **1 hectare**.

2.2.3 *Logiciel utilisé*

Grâce au logiciel Sima Pro 7.1, les cycles de vie peuvent être modélisés. Ce logiciel permet le calcul de l'ensemble des intrants (données collectées) et l'évaluation de la consommation d'énergie ainsi que les impacts potentiels associés aux émissions de gaz à effet de serre inventoriées grâce à sa très riche base de données ecoinvent 2.0.

2.2.4 *Méthodes d'évaluation des impacts*

La méthode IMPACT 2002+ a été choisie ici comme méthode d'évaluation des impacts. Cette méthode développée en 2002 est la plus utilisée, elle est reconnue dans le monde entier dans le domaine de l'ACV.

2.2.5 *Collecte de données*

Afin de réaliser cette étude, il a fallu procéder à des collectes de données. Les produits servant de comparaison n'ont pas bénéficié de construction particulière, les données disponibles dans la base de données ecoinvent 2.0 utilisée dans Sima Pro 7.1 ont été considérées.

La part la plus importante de cette analyse a été la construction du processus de culture et de transformation du cardon en Algérie. Ces données sont théoriques trouvées dans différentes littératures, d'autres données nécessaires sont tirées de la base de données ecoinvent 2.0.

2.2.6 *Hypothèses*

Pour réaliser cette analyse plusieurs hypothèses ont du être posées. Tout d'abord, il est important de rappeler que le produit principal à l'étude est le bioéthanol cellulosique à base de cardon. Les processus qui ont servi à modéliser la fabrication du bioéthanol ont été en grande partie construits ou adaptés à partir de processus existants.

Les suppositions faites pour la réalisation de l'analyse sont les suivantes :

- La culture du cardon *cynara cardunculus* a lieu sur une terre non arable, dans une région aride ou semi aride de l'Algérie. La parcelle considérée n'est pas irriguée, le

seul apport d'eau étant la pluviométrie, il est nécessaire que la région considérée ait une pluviométrie supérieure à 300 mm par an pour être en accord avec le rendement de matière sèche considéré dans cette analyse (25 tonnes de matière sèche par hectare).

- Bien que la culture du cardon existe, il n'y a pas d'usine de conversion du bioéthanol en Algérie. On suppose que la culture va fournir la biomasse nécessaire à la conversion et que cette conversion se ferait à proximité du terrain agricole afin de minimiser au maximum la consommation d'énergie liée au transport.
- Le bioéthanol produit est supposé contenir 5% d'eau, c'est donc un éthanol hydraté, l'opération de déshydratation n'est pas prise en compte faute d'absence de données liées aux besoins énergétiques de cette opération.
- Le prétraitement est réalisé avec un acide sulfurique dilué avec un apport de chaleur, l'hydrolyse est supposée être réalisée par des cellulases.
- La saccharification et la fermentation des C5 ainsi que celle des C6 sont réalisées en même temps (technique SSCF) donnant un rendement de 374 litres de bioéthanol par tonne de matière sèche, ce qui nous permet de supposer que le rendement d'un hectare de cardon est de 9350 litres de bioéthanol par hectare.
- Les déchets de la fermentation (lignine) sont réutilisés comme combustible.
- Les effluents de la distillation sont dirigés vers une station de traitement des eaux usées.
- Les graines contenues dans la fleur (capitule) du cardon sont utilisées pour produire un biodiesel à usage local, le tourteau qui en résulte est utilisé pour alimenter le bétail.
- La consommation énergétique relative au transport du bioéthanol aux pompes ainsi que le mélange avec l'essence ne sont pas pris en considération.

2.3 Construction de l'analyse

Pour construire l'analyse, 3 types de produits ont été pris en considération, il s'agit :

- **Du produit principal** : qui est le bioéthanol 95% produit à partir du cardon, pour cela des données relatives à la culture et la récolte du cardon, le prétraitement, la fermentation et la distillation ont été introduites pour donner un rendement théorique de 9350 litres de bioéthanol cellulosique par hectare.

- **Des coproduits** : il s'agit des produits issus de la transformation de la quantité de graines récoltées (25 quintaux) et qui sont le biodiesel et le tourteau qui en résulte.
- **Des déchets** : il s'agit de la lignine résiduelle utilisable comme combustible, des effluents de distillation dirigés vers une station d'épuration des eaux usées.

L'ensemble des données introduites dans le logiciel sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 4.1 : Données introduites dans le logiciel (intrants)

		Processus	Données introduites	Quantité nécessaire pour 1ha	Référence
Produit principal	Bioéthanol de cardon (9350 l/ha)	Culture et récolte	Fertilisant (N)	210 Kg	[60]
			Fertilisant (P ₂ O ₅)	56 Kg	[60]
			Fertilisant (K ₂ O)	230 Kg	[60]
			Herbicide glyphosate	5 Kg	[60]
			Diesel utilisé dans la culture	130 l	[61]
			Prétraitement	Acide sulfurique	777 Kg
		Energie consommée		15.4 MJ	[63]

		Fermentation	cardon	25 t	[64]
			Eau utilisée	70592.5 l	[65]
			Energie consommée	2428.4 KWh	[63]
		Distillation	Energie consommée	4242.6 KWh	[63]
Coproduits	Biodiesel (625 l)	Trans estérification	Graines de cardon	25 qt	[64]
			Energie consommée	0.41 KWh	[66]
	Tourteau			1875 Kg	[64]
Déchets	Effluents de distillation	Traitement	Quantité d'eau traitée	61242.5 l	Estimation
	lignine résiduelle (combustible)			43.6 tonnes	[60]

2.4 Calcul du bilan énergétique du bioéthanol

Le bilan énergétique a été calculé selon la relation suivante :

*** bilan énergétique = énergie produite sous forme de biocarburant / énergie consommée**

L'énergie produite sous forme de carburant a été calculée à partir du PCI (pouvoir calorifique inférieur du bioéthanol) donné en MJ par litre.

L'énergie consommée est donnée par le logiciel SimaPro après construction de l'analyse.

2.5 Comparaison des résultats

Pour évaluer l'analyse du cycle de vie du bioéthanol de cardon, les émissions de CO₂, la consommation en énergie fossile ainsi que le bilan énergétique ont été comparés à ceux du bioéthanol de canne à sucre, bioéthanol de switch grass (herbe) ainsi qu'au bioéthanol de maïs, ces données ont été prises de la base de données du logiciel SimaPro.

Chapitre 5 : RESULTATS DE L'INVENTAIRE DE QUELQUES MATIERES PREMIERES LOCALES NON ALIMENTAIRES POUVANT ETRE UTILISEES POUR LA PRODUCTION DU BIOETHANOL

1. INVENTAIRE DE QUELQUES ESPECES VEGETALES LOCALES POUVANT ETRE TRANSFORMEES EN BIOETHANOL DE PREMIERE GENERATION

1.1 Le chêne

Le chêne est le nom vernaculaire de nombreuses espèces d'arbres et d'arbustes appartenant au genre *Quercus*, et à certains genres apparentés, notamment *Cyclobalanopsis* et *Lithocarpus* de la famille des Fagacées. [67]



Source : INRA France

Photos 5.1 : Les fruits du chêne (glands)

Le chêne est un arbre très abondant en Algérie il s'étend sur une superficie de **300 000 hectares** il présente l'avantage de protéger le sol et de le stabiliser. Un chêne peut produire jusqu'à 600 kg/ha/an. [67]. Les chênes locaux à glands non comestibles sont : *Quercus suber*, *Quercus coccifera*, *Quercus faginea* et *Quercus afares*.

* *Quercus suber*

*Description

Arbre monoïque à feuilles persistantes de la famille des Fagacées, exploité pour son écorce qui fournit le liège. Il peut aller de 5 à 20 mètres il vit environ 150 ans en culture mais jusqu'à 500 ans à l'état naturel. On le trouve souvent associé au chêne vert, au chêne pédonculé et au pin maritime. Ses feuilles simples de 3 à 5 cm sont persistantes sur l'arbre pendant deux à trois ans. Il est cultivé dans des exploitations appelées "subéraie".[68]



Source : Association Parlons Bonsai(2011)

Photos 5.2 : Quercus suber

*Culture

Culture facile et rapide, elle ne supporte absolument pas le calcaire. Elle requiert une exposition très lumineuse au soleil, un milieu aéré, une hygrométrie assez élevée en été et une plage de température supérieures à -5°C. [68]

*Localisation

Littoral EST (Boumerdes, Tizi Ouzou, Bejaia, Jijel, Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma),

Tell Central (Chlef, Tipaza, Ain Defla, Chlef, Relizane, Ain Defla, Tissemsilt, Médéa, Blida, Bouira).

Région forestière Ouest (Tell Oranais, Ain Témouchent, Mostaganem Dahra, Mont de Traras (Wilaya de Tlemcen), Beni Saf, El Amria (Wilaya de Ain Témouchent), Massif côtiers d'Oran. [69]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Les fruits sont très riches en amidon 20.28%.

La subéraie mondiale serait d'environ **2 687 000 ha** (Institut Méditerranéen du Liège) ; l'Algérie en possède plus de **14 %**, c'est le chêne le plus abondant en Algérie.

** Quercus coccifera*

**Description*

Arbuste méditerranéen, Ses petites feuilles piquantes sont coriaces et persistantes, il fleurit en avril-mai et peut atteindre 1 à 3 m de long, son fruit est strié, il est de couleur brune à maturité. [70]



Source : 123RF USA

Photo 5.3 : Fuit de *Quercus coccifera*

**Culture*

Croît sur sol calcaire, dans la garrigue et dans les bois clairs. Il pousse très bien dans la région méditerranéenne, les lieux secs et arides même calcaire. [70]

**Localisation*

Littoral est, tell Central, Région forestière Ouest. [69]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Le fruit contient 20.28% d'amidon, et est non comestible à cause de la présence de hautes teneurs de tanins.

**Quercus afares*

**Description*

Quercus afares est une espèce indigène du chêne en Algérie et en Tunisie . [71]



Source: altervista.org.

Photo 5.4 : *Quercus afares*

**Culture*

Il pousse dans les peuplements denses, associé au chêne-liège, à des altitudes aussi basses que 200 mètres ; il peut même pousser sur des sols endommagés par le feu. [71]

**Localisation*

Zones côtières avec des hivers doux comme les montagnes côtières de l'est de l'Atlas Tellien en Algérie. [71]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Les fruits très riches en amidon mais aussi en tanin ils sont donc non comestibles.

**Quercus faginea*

**Description*

Le Chêne faginé, appelé aussi chêne du Portugal ou plus rarement Chêne à feuilles de hêtre (*Quercus faginea*) est un arbre à feuillage caduc de la famille des Fagacées, typique du climat méditerranéen poussant en Algérie. C'est un arbre buissonnant. Ses fleurs sont unisexuées. Le fruit (gland) assez cylindrique à pétiole court, arrivant à maturité de septembre à octobre. [72]



Source : topwalks.net

Photo 5.5 : Fruit (gland) de *Quercus faginea*

**Culture*

Thermophile mais résistant au froid, héliophile, présent sur différents types de sol, xérophile.

Idéal pour la restauration des sols. [72]

**Localisation*

Littoral est, tell Central, Région forestière Ouest.

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Ses fruits (glands) sont non comestibles mais peuvent toutes fois être utilisés pour l'alimentation du bétail ou être valorisés en biocarburant (bioéthanol).

1.2 Les gousses du caroubier (*Ceratonia siliqua*)

**Description du caroubier*

Le caroubier est un arbre de la famille des légumineuses, (césalpiniacées) c'est un arbre à feuilles persistantes atteignant 10 m de haut, à écorce lisse de couleur grise. Aujourd'hui cultivé essentiellement dans le bassin méditerranéen, mais qui est originaire d'Asie mineure. Les gousses sont brunes, en général rectilignes, et ont 10 à 20 cm de long. Les graines sont incrustées dans les parois épaisses et charnues des gousses riches en sucre. Le caroubier est cultivé pour ses gousses, abondantes et riches en sucre à maturité. Un caroubier peut produire jusqu'à 800kg de caroubes par an. La caroube algérienne est connue pour ses vertus et sa couleur très caractéristique (un marron qui tire vers le foncé). [73]



Source : H. de Monfreid 2007

Photo 5.6 : Les gousses de caroube

**Culture du caroubier*

Le caroubier est peu exigeant en termes de qualité du sol, d'eau et d'engrais, il a une grande tolérance vis-à-vis des sols pauvres, le caroubier est de plus en plus recommandé pour la

reboisement des zones côtières dégradées sous l'effet d'érosion ou de désertification. Actuellement, il est considéré comme l'un des arbres fruitiers et forestiers le plus performant puisque toutes ses parties (feuilles, fleurs, fruits, bois, écorces et racines) sont utiles. [73]

**localisation*

Le caroubier est un arbre très fréquent en Algérie du Nord, spécialement dans le tel.

** Atouts des gousses du caroubier pour la production du bioéthanol :*

Chaque caroube pèse une quinzaine de grammes et contient de la pulpe charnue constituée de 40 % de sucres (glucose et du saccharose), 35 % d'amidon, 7 % de protéines. [74]

L'Algérie a un important potentiel de production en caroubes (4600 tonnes en 2004), plusieurs arbres sont utilisés pour l'ornementation donc des tonnes de caroubes tombent par terre et sont perdues. De plus, le relief accidenté du pays rend difficile la récolte de la caroube, ceci explique le taux faible des exportations. Ces dernières années un travail de sensibilisation et une logistique importante ont été mises en œuvre pour récolter ce produit et l'exporter vers l'étranger ou le transformer localement.

La caroube représente un énorme potentiel pour le bioéthanol puisque 100g de caroubes contiennent un total de 88g de glucides pouvant être fermentés en éthanol. D'autant plus que la consommation des algériens en caroubes a beaucoup diminué, ces dernières années, et qu'il n'existe aucune industrie de transformation de ce produit. Seulement 2.3% des gousses et 2.5% des graines sont exploités dans tout le territoire algérien. [73]

Il est important de préciser qu'une éventuelle production de bioéthanol à base de caroubes ne pourra pas se faire à partir des graines vu leur valeur alimentaire et leurs nombreuses utilisations dans l'industrie (chocolateries, gâteaux, additifs alimentaire...), par contre la gousse peut être utilisée pour produire du bioéthanol car elle aussi est très riche en sucre et est moins utilisée dans l'alimentation humaine à cause de sa haute teneur en tannins qui réduit sa digestibilité. [73]. Ces gousses indigestes (sans les graines) peuvent donner un éthanol à 99.5% après fermentation du sucre qu'elles contiennent. [75]

1.3 *Acacia albida*

**Description*

Acacia albida est un arbre de grande taille très fréquent en Afrique. Il est peut-être le plus connu des « arbres utiles » du Sahel, que les paysans conservent dans leurs champs en agroforesterie. Résistant à la sécheresse, C'est le seul arbre du Sahel à perdre ses feuilles en saison des pluies et à reverdir pendant la saison sèche. [76]



Africaciel (hoggar Oued Tanguet)2005

Photos 5.7 : *Acacia albida* (arbre et gousses)

**Culture*

Il s'alimente dans les nappes phréatiques profondes et ne concurrence pas les cultures, sa litière améliore les sols. [77]

**Localisation*

Cet arbre se rencontre dans pratiquement toute l'Afrique notamment dans le sud algérien dans le Sahara méridional jusqu'au Hoggar, au Tassili des Ajjers, au Téfedest. [76]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Dans plusieurs régions d'Afrique, on consomme les *graines* de plusieurs espèces d'acacia, on en sait fort peu sur leur potentiel à donner du bioéthanol, le peu de données disponibles

semblent indiquer que les graines d'acacia pourraient constituer une source non négligeable – et jusqu'ici négligée – de glucides pouvant être fermentés. En revanche on sait que les variétés australiennes sont riches en protéines (de 17 à 25 %) et en hydrates de carbones (de 30 à 40 %) et soutiennent favorablement la comparaison avec des céréales comme le blé et le riz. [78]

Tableau 5.1 : composition des graines d'*Acacia albida*

<u><i>Acacia albida</i></u>	eau	Cendres	Protéines	graisse	Fibres	Glucides	Energie KJ/100g
Composition des graines (g)	6.5	3.9	24.8	2.2	6.8	55.8	1437

Source G. E. Seifeddine 2004

On peut trouver plus de 50 arbres par hectare dont le rendement est de 5398 Kg de gousses par hectare et par an. [79]

2. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats montrent que les matières utilisables comme substrat pour une production de bioéthanol de première génération en Algérie ne sont pas nombreuses. En effet, il est très difficile de trouver des espèces végétales non alimentaires riches en sucre ou en amidon (substance de base de la fermentation alcoolique). Toute plante riche en saccharose ou en amidon est prioritairement destinée à l'alimentation humaine comme c'est le cas pour la pomme de terre ou la betterave sucrière. Néanmoins, certaines plantes ne rentrent plus dans les habitudes alimentaires des algériens, offrant une autre voie de valorisation : la valorisation énergétique comme c'est le cas des gousses de caroubes et des graines d'acacia et des glands.

Qualitativement, les gousses de caroubes semblent être le meilleur substrat pour produire le bioéthanol vu sa haute teneur en glucides (40% de sucre et 35% d'amidon) ce qui donne une teneur extraordinaire de 75% de glucides fermentescibles et cela sans utiliser les graines (destinées à l'industrie agroalimentaire).

Si on compare le rendement par hectare, l'acacia dépasse de loin le caroubier et le chêne avec une récolte de 5398 Kg de gousses par an et par hectare contre seulement 600Kg pour le chêne et 800Kg pour le caroubier, mais si on compare les quantités réellement récoltées le chêne sera en haut de la liste car ce dernier (*Quercus suber* spécialement) représente la deuxième espèce prédominante dans les forêts algériennes avec plus de 700000 hectares offrant ainsi un substrat riche en amidon, bon marché et disponible en quantité.

Les espèces proposées dans cet inventaire sont complémentaires, chacune peut être destinée à une production de bioéthanol dans une région précise, ainsi le chêne peut servir au reboisement des forêts du nord algérien dont le taux de reboisement de 16,4% reste insuffisant. L'acacia pourrait être planté dans les régions sahariennes arides, il pourrait même apporter une solution à l'échec de reboisement du barrage vert. Le caroubier quant à lui pourra être planté dans les nombreux bassins versants afin d'éviter les glissements de terrain et maintenir le sol.

3. INVENTAIRE DE QUELQUES ESPECES VEGETALES LOCALES NON ALIMENTAIRES POUVANT ETRE TRANSFORMEES EN BIOETHANOL DE DEUXIEME GENERATION

3.1 La fétuque (*Festuca arundinacea*)

*Description

La fétuque (*Festuca arundinacea*) est une espèce de fétuque communément appelé **fétuque élevée**. C'est une espèce graminée vivace de saison fraîche originaire d' Europe, elle représente un important fourrage d'herbe dans toute l'Europe, et de nombreux cultivars ont été utilisés dans l'agriculture, c'est aussi une herbe ornementale dans les jardins, utilisée aussi dans la phytoremédiation. [80]



Source : Forest & Kim Starr, 2003

Photos 5.8: La fétuque

*Culture

La fétuque élevée est sans doute la graminée la plus pérenne, la plus productive et l'une des plus capables de pousser en été. Elle supporte aussi bien la chaleur, le froid la sécheresse et l'excès d'eau. Cette espèce présente une grande variabilité physiologique mais aussi phénotypique.

En Algérie, c'est la variété *lunibelle* qui donne le meilleur rendement avec 16.79 tonnes par hectare avec 3 à 5 coupes par an et une pérennité de 6 à 15 ans. [80]

**Localisation*

La fétuque existe en Algérie, à l'état spontané dans différents terroirs. Dans les prairies naturelles situées le long des oueds ou dans les bas fonds, la fétuque constitue le peuplement de base. Quezel et Santa (1962) mentionne environ 17 espèces et sous-espèces de fétuque. [81]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Cette dernière a un grand potentiel, elle peut être utilisée pour produire du bioéthanol puisque elle est riche en cellulose et pauvre en lignine.

Tableau 5.2 : composition de la fétuque

	Cellulose (Kg/100Kg Ms)	Hémicellulose (Kg/100Kg Ms)	Lignine (Kg/100Kg Ms)
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb	33.33 ±2.7	30.4 ±1.8	6.5 ±2.2

Source : Bruno Godin et al 2009

3.2 La canne de provence (*Arundo donax*)

**Description*

Arundo Donax - Roseau de Mauritanie ou canne de Provence – est une plante rhizomateuse formant des touffes composées de tiges ou chaumes, souvent hauts de 5 m, avec des feuilles assez longues, presque coupantes. Les inflorescences au sommet des tiges sont en panache, presque laineux. [81]

**Localisation*

Il est très répandu en Algérie surtout aux abords des rivières, des ruisseaux et dans les lieux humides. [81]



Source : Bouba 2004

Photos 5.9 : Arundo Donax (le roseau)

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Sa richesse en cellulose fait de lui un bon candidat pour la production du bioéthanol de deuxième génération :

Tableau 5.3 : Composition de « Arundo donax » (le roseau)

Composition (%)	Cellulose	Hémicellulose	lignine
Arundo donax	31.1	30.3	21.1

Source: 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry, 2000

3.3 Le cardon (*Cynara cardunculus*)

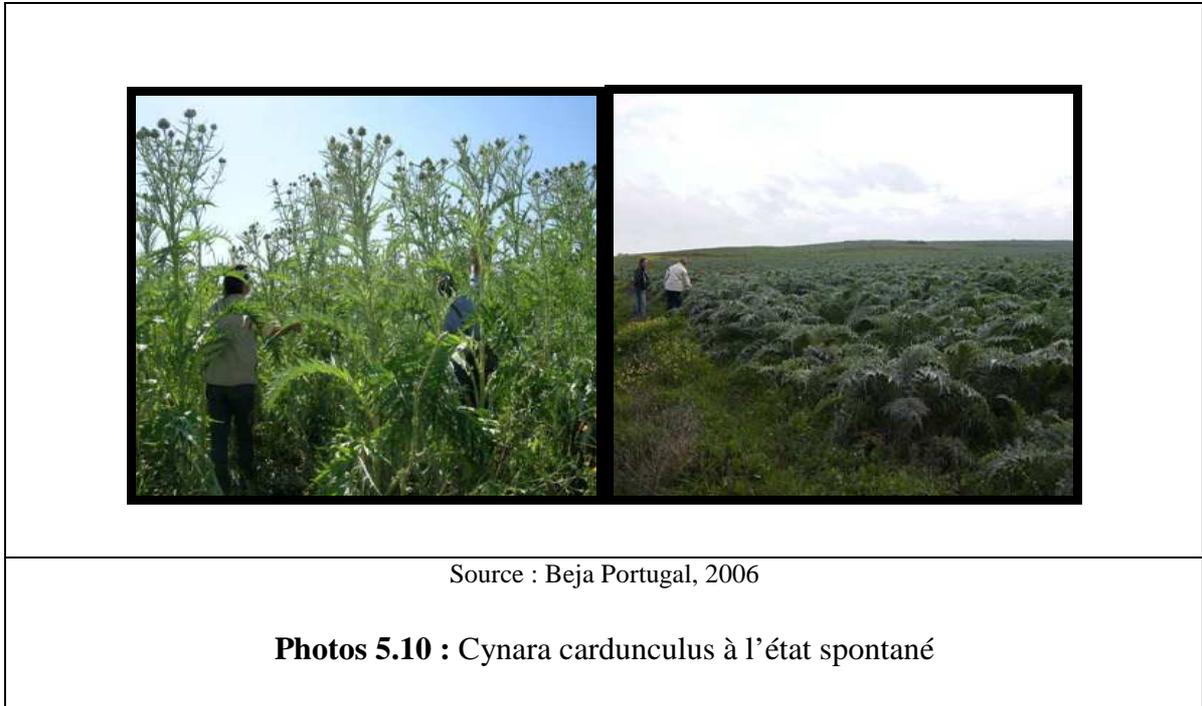
**Description*

Le Cardon (*Cynara cardunculus*) est une plante appartenant à la famille des Astéracées, Composées, elle est originaire du bassin méditerranéen.

Les variétés de Cardon et d'artichauts sont issues de sélections de *Cynara cardunculus* qui est un chardon sauvage épineux, originaire du sud du bassin méditerranéen. [82]

**Culture*

Le cardon se cultive sans difficulté. Un sol bien travaillé même pauvre en matières organiques lui conviendra parfaitement même en période de sécheresse. [82]



**Localisation*

En Algérie, *Cynara cardunculus* L. est rencontrée dans le secteur tell Constantinois principalement dans la région de Meskiana à Tebessa, le sous secteur de l'atlas tellien, notamment à Oran et Mascara. [83]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

La teneur en cellulose de cette plante, son adaptation à la sécheresse ainsi que sa sensibilité à l'excès d'eau font d'elle un candidat sérieux pour la production de l'éthanol de deuxième génération. [82]

Le tableau suivant montre la composition des différentes parties de la plante en pourcentage du poids sec.

Tableau 5.4: composition de *Cynara cardunculus*

Partie de la plante	Répartition de la MS	hémicellulose	cellulose	Lignine
Feuilles	25%	11.6	28.3	8.9
Tige	40.1%	17.9	34.2	13.3
Capitule	34.1	12.7	22.7	9.7
Plante entière	100%	14.5	28.7	10.9

Source : Fernandez J et Manzanres , 1989

3.4 Le ray grass (*lolium multiform*)

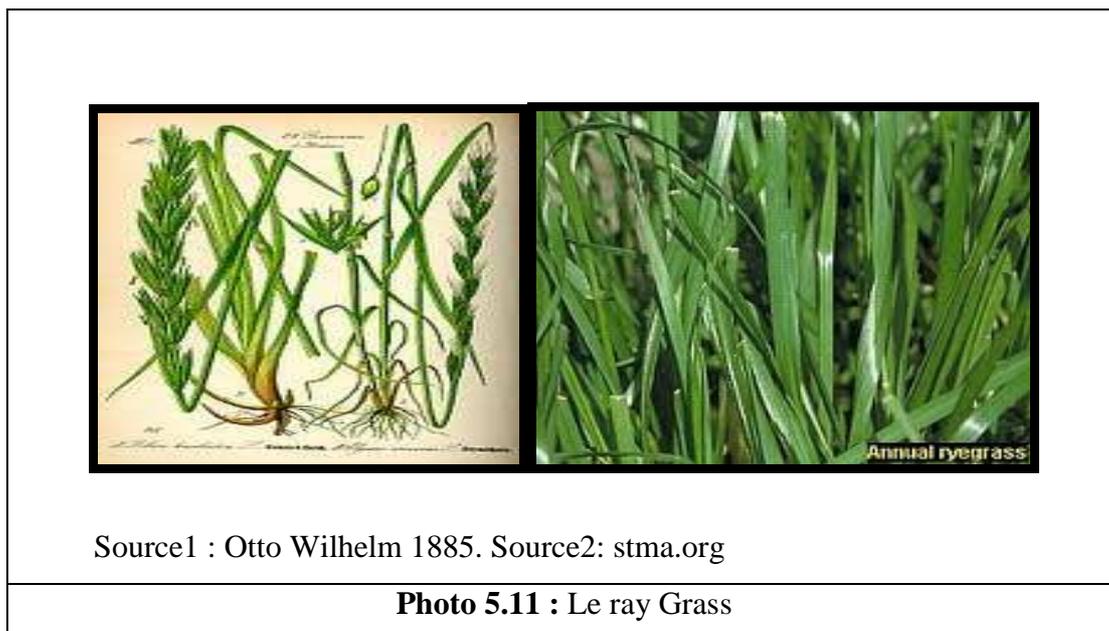
**Description*

Le ray-grass est une graminée fourragère. Elle se distingue par ses feuilles enroulées dans la gaine au stade jeune et par ses épis barbus. Sa pérennité peut aller jusqu'à 3 ans en bonnes conditions. [84]

**Culture*

Un ray-grass semé à l'automne peut produire entre 8 et 14 tonnes de matière sèche à l'hectare en deux coupes dès le printemps suivant. Il permet de constituer des réserves importantes sous forme d'ensilage ou de foin.

Semé en fin d'été dès les premières pluies, un ray-grass produit 50 à 80 jours plus tard, 2 à 3 tonnes de matière sèche à l'hectare selon les conditions climatiques. [84]



**Localisation*

Le genre *lolium* est représenté en Algérie par six espèces et sous-espèces (Quezel et Santa, 1962). Les espèces fourragères les plus intéressantes sont *Lolium perenne* L., *Lolium rigidum* Grand et *Lolium multiflorum* Lamk ssp.*italicum* (A.Br.) Schinz et Keller. Cette dernière, très cultivée en Europe, est considérée comme une mauvaise herbe des céréales dans les régions humides et subhumides en Algérie. Très récemment avec l'avènement du 'Programme lait', quelques lots de semences sont introduits. [81]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

La richesse en cellulose ainsi que la basse teneur en lignine font du Ray Grass une matière idéale pour le bioéthanol.

Tableau 5.5 : composition du Ray grass

	Cellulose (Kg/100Kg Ms)	Hémicellulose (Kg/100Kg Ms)	Lignine (Kg/100Kg Ms)
<i>lolium multiflorum</i>	23.1 ±4.8	18.7 ±6.3	4.3 ±2.4

Source : Bruno Godin et al, 2009

3.5 Les raquettes du figuier de barbarie (*Opuntia ficus indica*)

**Description*

Le Fiquier de Barbarie (*Opuntia ficus-indica*) est une espèce de plante de la famille des Cactaceae, originaire du Mexique, qui s'est naturalisée dans d'autres continents, notamment le pourtour méditerranéen et l'Afrique du Sud. Il produit un fruit comestible appelé figue de Barbarie. Cette espèce appartient à la sous-famille des *Opuntioideae*, tribu des *Opuntieae*.
[81]



Source : V. Korniyenko(2010).

Photo 5.12 : Raquettes et fruits du figuier de barbarie

**Culture*

L'*Opuntia Ficus Indica* est une espèce peu exigeante en eau et en engrais ; elle peut pousser sur des terres très hostiles, pendant des années sans irrigation. [81]

**Localisation*

Durant l'époque coloniale, les premières réalisations à base de cactus ont été menées dans le cadre des périmètres de défense et restauration des sols dans la région de Nédroma(Tlemcen). Une intéressante collection a été créée dans le périmètre de rénovation rurale à Zériba(Grande Kabylie) en 1974, et une a été installée à Chebli (Alger). Le cactus a fait l'objet de plusieurs études par la FAO en Algérie. Les vergers et les collections installés dans des régions comme

Berrouaguia semblent avoir disparu. L'*Opuntia ficus indica* fait l'objet d'une importante utilisation dans la région steppique où elle est très demandée. [81]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

L'*Opuntia ficus indica* représente un excellent substrat pour produire de l'éthanol en Algérie. En effet cette plante pousse dans des conditions climatiques extrêmes, dans les climats aride et semi aride, où il n'y a pas de concurrence pour l'utilisation de matières premières à des fins alimentaires ou pour les terres agricoles. L'éthanol est issu de la transformation de ses raquettes riches en cellulose qui représentent 15 % de son poids. [85]

3.6 L'eucalyptus (*Eucalyptus sp*)

**Description*

Il existe de nombreuses espèces d'Eucalyptus en Algérie parmi elles : *E accidentalis*, *E astringens*, *E spatula*, *E forrestiana*, *Eucalyptus globulus*.

Le gommier bleu (*Eucalyptus globulus*) est un arbre sempervirent de la famille des *Myrtaceae* originaire d'Australie. Il est largement cultivé et peut croître jusqu'à 30-55 m de haut. [86]



Source : plantesdusud.com2008

Photo 5.13: Tronc et feuilles de l'eucalyptus

**Culture*

L'eucalyptus est un arbre à croissance rapide, il a besoin de grandes quantités d'eau ; mais dans un climat méditerranéen. Il s'adapte très bien avec seulement l'eau de pluie, il peut même être envahissant comme c'est le cas dans la forêt de Bainem.

- *Localisation*

Les campagnes de plantations menées en Algérie, se sont faites dans le but de développer des papeteries qui ont pour la plupart fermé laissant des eucalyptus envahir les forêts du nord algérien.

On recense pour les eucalyptus une superficie de 43 235 ha avec une possibilité annuelle récoltable de 144 800 m³/an. Des reboisements ont été effectués dans le nord du pays et surtout à l'est (Annaba;16 310 ha, Guelma: 3 940 ha, Skikda: 2 845 ha, Tizi Ouzou: 6 070 ha). Les espèces principalement utilisées sont *E. camaldulensis*, et *E. globulus*, et à moindre degré *E. grandis*, *E. gomphocephala*, *E. leucoxyton*. En Algérie bien que des eucalyptus aient été installés dans le semi-aride, les meilleurs résultats sont obtenus dans l'humide et le sub-humide doux et chaud. [86]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Le bois de *E. globulus* est employé principalement pour la production de pâte à papier. On l'utilise parfois localement comme bois rond d'œuvre et d'industrie et comme bois de feu.

Cet arbre et comme tous les eucalyptus pourrait être un excellent substrat pour la production de bioéthanol de deuxième génération puisque il est riche en cellulose ; en effet il contient près de 40.4% de cellulose avec écorce et près de 46.7 % de cellulose sans écorce. [87]

3.7 Le peuplier (*Populus sp*)

**Description*

Ce sont de grands arbres, à l'écorce fréquemment fissurée, du genre *Populus* de la famille des *Salicacées*

**Culture*

Le climat méditerranéen est adéquat au peuplier mais les jeunes plants craignent les gelées tardives (peu fréquentes au nord algérien) et l'excès d'eau du aux inondations tardives en mai - juin. Par contre, cet arbre exige des terrains bien alimentés en eau en période estivale. Il craint les sols avec une nappe d'eau trop proche de la surface en été (moins de 50 cm), ainsi que les sols compacts et séchants. Il exige une bonne richesse minérale (pH >6). [88]



Source : P. Igor (2008)

Photo 5.14: Plantation de peupliers

**Localisation*

Plusieurs espèces de peupliers poussent en Algérie. Le parc national de Taza de Jijel en est riche notamment en peupliers noirs.

Il existe en Algérie, quatre espèces de peupliers : *Populus nigra*, *Populus alba*, *Populus tremula*, *Populus euphratica*. [88]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Les peupliers ont prouvé leur efficacité en matière de production de bioéthanol ; en effet ils sont riches en cellulose :

Tableau 5.6 : composition du peuplier

	Cellulose (Kg /100Kg Ms)	hémicellulose (Kg /100Kg Ms)	Lignine (Kg /100Kg Ms)
<i>Populus sp</i>	42 ± 2.9	22 ± 6.2	24.8 ± 3.8

Source : Bruno Godin et al, 2009

Le peuplier présente l'avantage de pousser rapidement. Si on élague les arbrisseaux plantés après un an, de nouvelles tiges poussent sur le tronc. On peut les récolter après trois ans.

Pour la culture du peuplier il faut bien moins d'énergie que, par exemple, pour le blé ou le colza. 'On peut même tirer des arbres de 2 à 36 fois plus d'énergie que l'énergie qu'on y a

investie. Pour le blé ce rapport n'est que de 1,3. En plus le blé occupe de la terre cultivable précieuse. Le peuplier pousse aussi sur les parcelles maigres. Selon (l'auteur), il faudra toutefois patienter pendant dix années au moins avant de pouvoir faire le plein d'éthanol de peuplier. Et ceci ne constituera vraiment pas la fin du récit des biocarburants. [89]

3.8 Le saule (*salix sp*)

**Description*

Le saule (*Salix*) est un genre d'arbres, d'arbustes, d'arbrisseaux de la famille des Salicacées (*Salicaceae*). Il comprend 350 espèces environ, réparties à travers le monde.



Source : Benssedik, 2006

Photo 5.15: Le saule

**Culture*

Le saule pousse sur des terrains nus très exposés à la lumière, l'eau est un caractère important pour son développement. Il préfère les sols légers et humides tels que les alluvions des bords de cours d'eau.

**Localisation*

Le saule pousse dans les zones fraîches et humides du nord algérien. On distingue 5 espèces de saule en Algérie: *Salix alba*, *Salix pedicelata*, *Salix purpura*, *Salix cinerea*, *Salix triandra*. [81]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Le saule est un arbre idéal pour la production du bioéthanol de deuxième génération à cause de sa haute teneur en cellulose:

Tableau 5.7: composition du saule

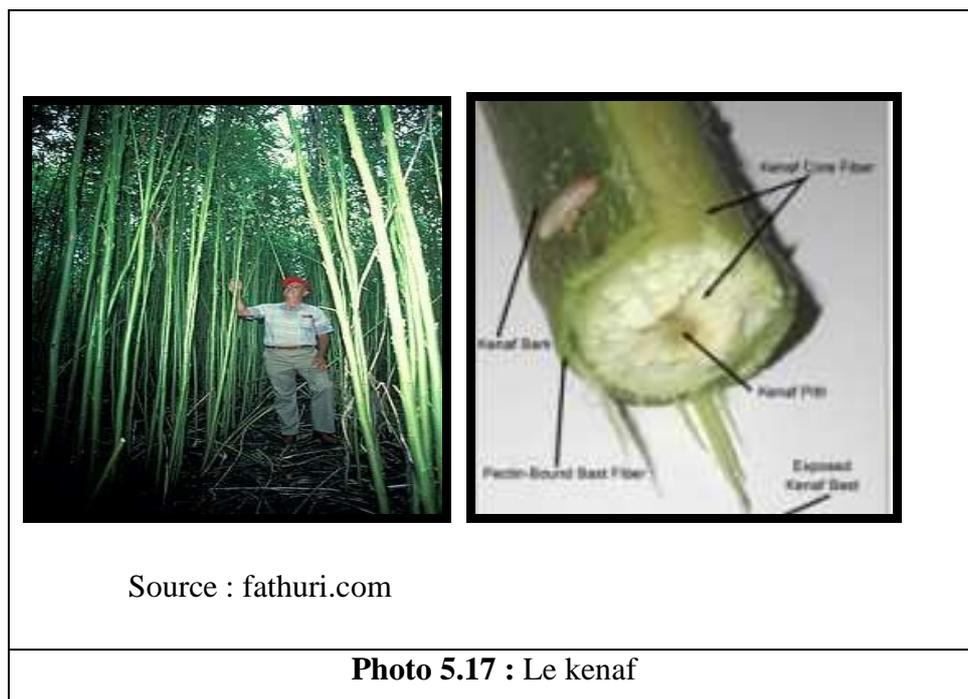
	Cellulose (Kg/100 Kg Ms)	hémicellulose(Kg/100 Kg Ms)	Lignine (Kg/100 Kg Ms)
<i>Salix sp</i>	46.5 ±13.5	18.5±6.4	20.0±1.4

Source : Bruno Godin, et al ; 2009

3.9 Le kenaf (*Hibiscus Cannabinus L*)

*Description

Aussi appelé chanvre de Deccan, le kenaf est une plante annuelle de la famille des Malvaceae. Il est apparenté au coton. Ces tiges épineuses d'1 à 2 cm de diamètre sont souvent, mais pas toujours ramifiées. Les feuilles de 10 à 15 cm de longueur sont de forme variable, celles de la base sont lobées et celles du sommet lancéolées. Les fleurs de 8 à 15 cm de diamètre sont blanches, jaunes ou pourpres. Le fruit est une capsule contenant plusieurs graines. [90]



Selon Quezel et Santa le genre *Hibiscus L* est représenté en Algérie par 6 espèces dont *hibiscus cannabinus L*. [90]

**Atouts pour la production du bioéthanol*

Le kenaf est l'une des espèces les plus intéressantes pour produire du bioéthanol de part sa composition en cellulose, en effet sa teneur en cellulose dépasse les 50% et son taux de lignine est l'un des plus bas comparé aux autres espèces.

Tableau 5.8 : composition du kenaf

	Cellulose (Kg /100Kg Ms)	hémicellulose (Kg /100Kg Ms)	Lignine (Kg /100Kg Ms)
<u><i>Hibiscus</i></u>	53.2 ± 4.1	18.4 ± 1.4	7.9 ± 1.2
<u><i>Cannabinus L</i></u>			

Source : Bruno Godin, et al, 2009.

3.10 La partie aérienne du topinambour (*Helianthus tuberosus* L.)

** Description*

C'est une plante vivace très rustique, résistante au froid, qui peut devenir envahissante à cause de ses rhizomes tubérisés. Elle peut atteindre jusqu'à 2,5 m de haut, avec de fortes tiges, très robustes. Son cycle est annuel. Ses feuilles, alternes, sont de forme ovale, à pointe aiguë, rudes au toucher. [91]



Source : Paul Fenwick, 2004

Photo 5.18 : Partie aérienne du topinambour

**Atouts pour la production du bioéthanol*

La partie aérienne de la plante est riche en cellulose et convient très bien comme substrat pour le bioéthanol lignocellulosique puisque cette dernière n'est ni consommée contrairement à la partie souterraine, ni utilisée comme fourrage. [91]

Tableau 5.9 : composition de la partie aérienne du topinambour

	Cellulose (Kg /100Kg Ms)	hémicellulose (Kg /100Kg Ms)	Lignine (Kg /100Kg Ms)
<i>Helianthus tuberosus L</i>	36.5	12	10.1

Source : Bruno Godin, et al, 2009

4 DISCUSSION DES RESULTATS

Les espèces végétales locales utilisables pour la production du bioéthanol de deuxième génération, citées ci-dessus, sont disponibles en quantité dans notre pays. En réalité, les espèces proposées ne représentent qu'un petit échantillon de tout ce qui pourra être exploité car la cellulose (substance de base du bioéthanol de deuxième génération) est le composé principal de tous les végétaux de la planète, sa teneur diffère d'une plante à une autre.

Les résultats montrent que du point de vue de la qualité, le kenaf a le plus haut pourcentage de cellulose (53%), viennent ensuite les arbres ligneux tel que le peuplier, le saule et l'eucalyptus (qui s'étend sur plus de 43000 ha) qui ont l'avantage d'envahir les forêts du nord algérien. Mais ces trois arbres présentent tout de même l'inconvénient d'avoir de hautes teneurs de lignine dépassant les 20% en plus de leurs exigences en eau (le saule et le peuplier spécialement), dans ce cas la solution est d'utiliser les eaux usées traitées pour l'irrigation.

La fétuque et le ray grass présentent les taux les plus bas de lignine ce qui fait d'eux les matières les plus facilement hydrolysables, ces deux espèces donnent également de bons rendements par hectare avec plus de 14 tonnes pour le ray grass et 16 tonnes pour la fétuque qui a l'avantage d'être pérenne (15 ans).

Les raquettes du figuier de barbarie aussi sont un substrat intéressant pour une fabrication locale du bioéthanol vu sa disponibilité, sa richesse en cellulose et ses faibles exigences en termes de qualité du sol, d'eau et d'engrais.

Du point de vue rendement, le cardon est sans doute l'espèce végétale la plus généreuse en biomasse, elle peut donner plus de 25 tonnes de matière sèche par hectare et par an en se contentant seulement de la pluviométrie, le cardon est également riche en cellulose et pauvre en lignine comparé aux autres espèces. Il présente également l'avantage de pousser spontanément, d'être envahissant et boudé par les animaux, ce qui lui ouvre la voie de la valorisation énergétique notamment celle du bioéthanol de deuxième génération.

5. INVENTAIRE DE QUELQUES ESPECES D'ALGUES LOCALES POUVANT ETRE TRANSFORMEES EN BIOETHANOL DE TROISIEME GENERATION

5.1 Les macaoalgues

5.1.1 *Laminaria sp* (algue brune)

Laminaria sp est une algue brune de la famille des Laminariaceae. Elle mesure de 100 à 150 cm de long et vit de 3 à 5 ans. Elle cesse de croître de la fin de l'été jusqu'à la fin de l'hiver. Elle représente entre autres une espèce emblématique du littoral algérien, elle envahit comme toutes les phéophycées la méditerranée. [92]



(c) Mike Guiry 2002

Photo 5. 19: *Laminaria sp*

Laminaria sp est capable de produire 150 millions de tonnes de biomasse équivalent à 4 millions de tonnes de bioéthanol par an en utilisant le glucose issu de l'hydrolyse de la laminarine. [92]

5.1.2 *La laitue de mer (Ulva lactuca)*

La laitue de mer (*Ulva lactuca*) est une algue verte marine, nitrophile, qui peut atteindre un mètre de longueur dans des eaux riches en matières organiques, sa durée de vie est de quelques mois, mais on en trouve toute l'année, car ces individus se renouvellent, surtout au

printemps et en été. Elle est considérée comme envahissante, elle est très abondante en méditerranée, l'Algérie compte 79 familles d'ulvophyceae. [93]



Neeltje Jans 2008

Photo 5. 20: *Ulva lactuca*

La laitue de mer est une espèce très riche en cellulose, elle pourrait être un excellent substrat pour le bioéthanol de deuxième génération d'autant plus qu'elle produit 700 fois plus de biomasse qu'un champ de blé. [94]

5.2 Les microalgues

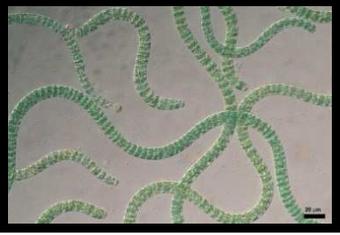
La biodiversité marine reste peu connue en Algérie, et ce en dépit du fait qu'elle constitue un réservoir très riche en microalgues.

Il existe de nombreuses espèces de microalgues à fort potentiel pour la production du bioéthanol, il s'agit d'espèces riches en amidon qui une fois extrait et hydrolysé suit les étapes classiques d'une production de bioéthanol.

5.2.1 Les espèces de microalgues locales à haute teneur en amidon

Tableau5. 10: Espèces de microalgues locales riches en amidon

Espèces	photo	Taux d'amidon	Références
<i>Chlamydomonas sp</i>	 <p data-bbox="544 712 842 741">Krieger-Liszky A. (2008).</p> <p data-bbox="496 775 890 842">Photo 5. 21: Chlamydomonas sp</p>	17.0 %	[95] [98]
<i>Chlorella sp</i>	 <p data-bbox="528 1144 663 1173">Pureocean</p> <p data-bbox="528 1218 855 1247">Photo 5.22: Chlorella sp</p>	37.0 %	[96] [98]
<i>Scenedesmus sp</i>	 <p data-bbox="544 1610 699 1639">K.Simmons</p> <p data-bbox="504 1684 882 1713">Photo 5.23: Scenedesmus sp</p>	20.4 %	[96] [98]

<p><i>Oscillatoria sp</i></p>	 <p>Y. Tsukii 2004</p> <p>Photo 5.24: Oscillatoria sp</p>	<p>19.3 %</p>	<p>[97] [98]</p>
<p><i>Spirulina sp</i></p>	 <p><u>Niciun comentariu</u> 2011</p> <p>Photo 5.25: <i>Spirulina sp</i></p>	<p>37.3 à 56.1 %</p>	<p>[97] [98]</p>

6. DISCUSSION DES RESULTATS

Le potentiel des algues pour la production du bioéthanol est bien connu, les molécules de base sont d'ailleurs très diversifiées (laminarine, cellulose, amidon).

Les résultats montrent que le littoral algérien renferme de vrais trésors verts, les espèces citées ne représentent qu'une infime partie de tout ce qui peut être réellement exploitable.

Jusqu'à présent, la production de bioéthanol à partir de macro-algues n'est pas envisageable en Algérie vu que la transformation de la cellulose algale en bioéthanol n'est qu'au stade des essais au laboratoire, mais les avantages qu'elles offrent par rapport aux plantes terrestres comme la croissance rapide, le haut pourcentage d'hydrates de carbone, nous font croire qu'il y a un potentiel énorme pour adapter ces espèces à la production d'énergie dans le futur.

Les espèces de micro algues montrent également un grand potentiel pour la production du bioéthanol en Algérie d'autant plus que le substrat fermentescible est l'amidon dont l'hydrolyse est plus facile et plus maîtrisée que la cellulose, les résultats montrent que les spirulines ont le meilleur pourcentage d'amidon (jusqu'à 56.1%), les autres espèces sont également de bonnes matières premières pour la production du bioéthanol notamment *Chlorella*, *scenedesmus*, et *oscillatoria* qui peuvent être de bons substituts de la spiruline si cette dernière est cultivée comme complément alimentaire. Mais quelque soit l'espèce choisie, la mise en place d'un tel projet est intéressante en Algérie qui compte 1200 Km de côtes, Il faut bien sûr analyser les éventuels impacts sur l'écosystème et établir à l'avance les zones de cultures qui ne nuiront ni à la pêche ni au transport maritime

7. INVENTAIRE DE QUELQUES MATIERES LOCALES SOUS FORME DE DECHETS POUVANT ETRE TRANSFORMEES EN BIOETHANOL

7.1 Mélasse de betterave sucrière

La mélasse est l'égout de sucrerie qui subsiste après la cristallisation de 3ème jet. Elle peut provenir de la sucrerie de betterave, ou de la raffinerie.



Badagnani.2008

Photo 5.26: Mélasse de betterave sucrière

La mélasse, comme la pulpe, est donc un sous-produit de sucrerie. Bien qu'elle puisse constituer un excellent aliment pour le bétail, elle n'est pas, contrairement à la pulpe, reprise par les planteurs. Il s'agit d'une matière qui contient environ la *moitié de son poids en saccharose*, celui-ci étant toutefois non cristallisable en raison des impuretés qu'il contient. La mélasse de betterave est riche en sucre (48 %).

Il est clair que l'Algérie ne produit pas assez de betteraves sucrières pour alimenter les raffineries en continu mais des groupes industriels comme Cevital importent du sucre roux et le raffinent en sucre blanc, en 2010 l'Algérie a importé 1 million de tonnes de sucre roux. [99]. L'opération de raffinage génère elle aussi de la mélasse qui peut être valorisée en bioéthanol mais il faut d'abord débarrasser cette mélasse de substances utilisées pour raffiner et décolorer le sucre roux. [100]

7.2 Le lactosérum

En dehors de l'eau, le lactosérum contient du lactose (de 70 % à 75 %) soit un taux de 50 g /l, le lactose est constitué d'une molécule de D galactose unis à une molécule de D glucose par une liaison osidique 1-4. [101]

Il ne représente pas moins de 85% de la quantité de lait transformé en fromage, il est donc un bon substrat pour le bioéthanol vu sa richesse en lactose, ce dernier est isolé du reste des éléments du lactosérum par filtration ou par cristallisation puis hydrolysé afin de libérer les deux molécules qui le composent : le glucose et le galactose, l'hydrolyse peut être acide ou enzymatique (β galactosidase). [101]

Economiquement cette valorisation est très intéressante car le lactosérum est un déchet dont les industries laitières cherchent à s'en débarrasser.

Tableau 5.11 : Quantité de lactosérum Algérie

	Lait de consommation t/an	% dans la production mondiale	Fromage t /an	% dans la production mondiale	Quantité de lactosérum (m ³)	Devenir du lactosérum
ALGÉRIE	72 730	0,2	37 024	0,9	209 802	STEP Projet de valorisation en boisson gazeuse

Source : Dr. Biere et Partner, Gestion de déchets organiques Valorisation des Déchets dans le Secteur Agroalimentaire au Maghreb, 2008.

En Algérie, le lactosérum n'est pas valorisé, il est jeté dans les cours d'eau causant de graves problèmes de pollution, pire encore les industries agroalimentaires achètent des poudres de lactosérum importées. La DBO (demande biologique d'oxygène) du sérum est de 40 000, c'est-à-dire qu'un litre de sérum nécessite 40 g d'oxygène pour que ses matières organiques soient détruites par oxydation microbienne. Dans ces conditions, il est devenu indispensable de le traiter de sorte qu'il ne constitue plus une matière gravement polluante, la valorisation en

bioéthanol semble être une bonne alternative pour l'Algérie qui compte de plus en plus d'industries fromagères. [102]

7.3 Pommes de terre déclassées et épluchures

Les parties non comestibles des pommes de terre que nous avons coutume de jeter à la poubelle pourraient, remplacer les combustibles fossiles, elles contiennent en effet une quantité d'amidon résiduelle qui peut profiter à une production de bioéthanol, sachant que la pomme de terre contient plus de 17,6% d'amidon. [103]



Photo 5.27: Pelures de pommes de terre

Cette matière ne pose pas de problèmes de disponibilité car la pomme de terre reste le légume féculent le plus consommé en Algérie, elle génère des tonnes de pelures chaque jour.

Sachant qu'un algérien consomme en moyenne 60kg par an [104] et que le poids des pelures est de 114g sur 1Kg [105]. L'algérien jette donc 6.85 Kg de pelures ce qui correspond à un total de 239750 tonnes par an.

7.1 Pelures d'agrumes

Les pelures d'agrumes sont les nouveaux substrats proposés pour la production du bioéthanol, ils sont riches en cellulose (12.7% à 13.6%), [106], abondants, et peu onéreux.



FPL Energy,2007

Photo 5.28: Pelures d'agrumes

Un essai de production de bioéthanol a été mené à bien en Floride par le groupe FLP Energy, l'usine en question a estimé pouvoir produire 15M de litres par an, en utilisant les 5M de tonnes de déchets d'agrumes locaux. [106]

L'Algérie a produit en 2010, près de 10 millions de quintaux d'agrumes ce qui correspond à une hausse de plus de 17,6% par rapport à la campagne précédente. [107]

Cela représente un tonnage important de déchets que l'Algérie pourrait valoriser en bioéthanol à un cout réduit vu que ce déchet est très abondant, encombrant, et aucunement valorisé.

7.5 Pain ranci et déchets de boulangeries et de pâtisserie

Il est étonnant de constater l'importance du volume de pain jeté chaque jour, il s'agit de centaines de baguettes de pain entières, même pas entamées. L'Algérie importe du blé en devises étrangères, le triture, le sasse pour obtenir la farine que nous pétrissons, que nous faisons cuire pour ensuite la donner au bétail.

Pire encore même les boulangeries jettent du pain, des gâteaux et des viennoiseries non vendus dans la journée, dans un pays qui importe, depuis longtemps, quelque 80% de ses besoins en blé tendre servant à la fabrication de la farine.

Selon les dernières estimations les algériens jettent 3millions de baguettes par jour, en sachant qu'une baguette pèse en moyenne 250g, cela nous fait un total de 750 tonnes de pain jetées par jour. [108]

La valorisation énergétique semble être une excellente voie d'utilisation de ces énormes quantités de pain, ajouté à cela une très importante teneur en amidon (entre 65 et 70%) pouvant être hydrolysé et fermenté pour donner du bioéthanol. [109]

7.6 Les rebuts de dattes

Les dattes à part leur grande richesse en sucres (64 à 69%) et leur durée de conservation relativement longue peuvent constituer un substrat de choix pour produire de nombreuses substances à forte valeur ajoutée tel que l'éthanol.



Source A .Boulal et al, 2010

Photo 5.29: Dattes non commercialisables

En Algérie, les cultivars de dattes sont nombreux et sont estimés à plus de 800. Ces ressources génétiques sont très mal exploitées à l'exception de *Deglet Nour* et à degré moindre, *Ghars*, *Degla Beida* et *Mech Degla* qui présentent une importance économique majeure. Par contre, le secteur phoénicicole algérien fournit chaque année un tonnage très élevé de dattes communes, malgré cela la valeur marchande des dattes communes reste faible. [109]

Les rebuts de dattes ou écarts de tri de dattes représentent les fruits du palmier dattier non consommables ; ces dattes ont une faible valeur marchande comparée à deglet Nour , degla Baida , Ghars ou encore Mech degla. Elles sont destinées à l'alimentation animale ou à l'échange sous forme de troc vers le Mali et le Niger. Cependant aucune industrie de

transformation de la datte, n'est implantée. Aujourd'hui grâce aux procédés biotechnologiques, il est possible de valoriser les dattes communes de faible valeur marchande et de mettre sur le marché local et international, une nouvelle génération de produits à forte valeur ajoutée tel que le bioéthanol.

Selon les informations qu'on a pu récolter, il ressort que les écarts de tri représentent une moyenne de 25 % de la production dattière annuelle.

En se basant sur la production de 270 000 tonnes / an de 2010. [109]

On peut estimer le tonnage annuel de rebuts de dattes comme suit :

$$270\ 000 * 25 \% = 67500$$

Soit : **67500 tonnes de rebuts de dattes / an.**

A la lumière de ces résultats estimatifs, nous constatons que ces sous produits sont disponibles avec un tonnage très appréciable, justifiant une étude de leur valeur en vue de leur utilisation rationnelle pour produire du bioéthanol. [110]

7.7 Déchets de papeteries

Le but est de valoriser les déchets issus de la production de pâte à papier à partir de bois. En effet, le bois est dans un premier temps cuit pour en extraire la cellulose, qui servira elle-même à fabriquer le papier. Or, cette étape produit une liqueur noire, qui contient la lignine et une grande partie des hémicelluloses sous forme soluble. Cette liqueur noire est aujourd'hui brûlée pour produire de l'énergie. Comme les usines papetières modernes sont excédentaires en énergie, l'idée a germé de valoriser autrement ces déchets, et notamment les hémicelluloses qui pourraient être utilisées pour produire de l'éthanol plutôt que d'être solubilisées et brûlées. Les chercheurs travaillent sur un procédé d'extraction de ces molécules. L'éthanol est ensuite obtenu par fermentation de ces derniers. Un tel projet présente plusieurs avantages : les collectes de bois sont déjà organisées, les usines de transformation du bois existent et fonctionnent. Le bois collecté peut servir à la fois à la production d'éthanol et de papier. [111]

La production du papier d'emballage est estimée à 66 500 tonnes en Algérie. La majeure partie de la production nationale est l'œuvre du secteur public. Toutefois, le privé a consenti des investissements destinés à la fabrication du papier ouate d'une capacité de 25 000 tonnes/an. Le secteur de la transformation a, en revanche, connu une évolution considérable à

travers les investissements du public et du privé. L'on cite la fabrication de sacs de diverses contenances, les caisses en carton, articles scolaires..., Gipec (leader de l'industrie de papier en Algérie) dispose d'une capacité de fabrication annuelle installée de 60 000 tonnes pour la sacherie, 75 millions d'unités de cahiers scolaires... Le privé, quant à lui, assure une capacité d'environ 100 000 tonnes/an pour le sac, les caisses carton ondulé et la boîte pliante. Tout cela génère des tonnes de déchets considérables qu'on peut transformer en bioéthanol. En Algérie, des plans de recyclage du papier sont prévus notamment au niveau de la papeterie de Baba Ali. [112]

7.8 Déchets des industries textiles

On entend par déchets textiles les déchets neufs d'origine industrielle (chutes de fabrication des filatures et usines de tissage, chutes de tissus), ou bien les chiffons et textiles usagés provenant des ménages.

En Algérie, les industries textiles sont fortement déstructurées et endettées. La régression de l'activité a ainsi conduit à un recul de l'industrie nationale en termes de parts de marché et d'emploi. Les parts de marché de l'industrie nationale estimées à 47% reculent fortement en volume malgré un marché de consommation important évalué à environ 95 000 milliards de dinars. [113]

Mais malgré cela les déchets textiles représentent une matière durable pour une éventuelle production de bioéthanol car la consommation en textile de l'Algérie ne cesse d'augmenter à cause des produits d'importation à bas prix qui inondent le marché textile algérien, ce qui offre un tonnage considérable en vêtements usés valorisables en bioéthanol.

7.9 Déchets de menuiserie : sciure et copeaux de bois

Le bioéthanol peut être obtenu à partir des déchets de menuiserie, cette dernière génère des tonnes de sciure et de copeaux de bois par an. En Algérie, il n'existe aucune valorisation ou recyclage pour ce genre de déchets, la sciure est soit utilisée comme litière pour animaux soit tout simplement jetée. La teneur de la sciure et des copeaux de bois en cellulose dépend du type du bois utilisé.

7.10 Autres déchets agricoles

Les matières pouvant servir de substrat pour le bioéthanol lignocellulosique sont nombreuses, en effet un des avantages de cette filière est la flexibilité des matières premières utilisées ainsi les feuilles mortes, la tonte de gazon, les fleurs fanées, le foin, les écorces broyées, les aiguilles de conifère, les déchets des unités vinicoles, et tout autre résidu forestier peuvent être transformés en bioéthanol.

8. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats montrent que les substances de base de la fabrication du bioéthanol (saccharose, amidon, cellulose, lactose) se trouvent en quantité dans les déchets et les coproduits des industries et des ménages locaux, toutes les matières inventoriées sont bonnes à prendre puisqu'elles sont peu onéreuses voir gratuites. Dans la liste présentée, il est clair que les produits qu'offre le palmier dattier dépasse de loin les autres matières, en effet, ce dernier offre un tonnage appréciable de dattes non commercialisables estimé à 67500 tonnes par an, les déchets du palmier sont aussi intéressants, estimés à 135103 tonnes de palmes et 5103 tonnes de pédicelles pouvant être transformés en éthanol cellulosique. La sève aussi peut être valorisée en bioéthanol mais l'expérience est à prendre avec précaution car les essais réalisés sur cette dernière ne mentionnent pas si l'extraction massive de la sève réduit le rendement en dattes ou pas.

Les déchets sous formes de pelures semblent être d'excellentes matières premières pour le bioéthanol qualitativement et quantitativement, en effet, les pelures de pommes de terre particulièrement abondantes en Algérie, (239750 tonnes par an) sont très riches en amidon et aucunement valorisées jusqu'à ce jour. De même, les pelures d'agrumes sont d'excellentes sources de cellulose disponibles en grande quantité.

La fabrication du bioéthanol à partir de déchets n'est pas uniquement une façon de réduire les coûts de la matière première, elle peut aussi représenter une solution écologique pour le recyclage de certains déchets polluants comme le lactosérum ou encore d'un déchet encombrant comme le pain ranci.

Chapitre 6 : RESULTATS DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

DU BIOETHANOL DE CARDON

1. LES ARBORESCENCES

Suite à l'introduction d'intrants et d'hypothèses, indiqués précédemment dans la méthodologie, ces données ont été validées par le logiciel SimaPro qui nous a permis d'avoir les arborescences suivantes :

1.1 Arborescence du produit principal (le bioéthanol)

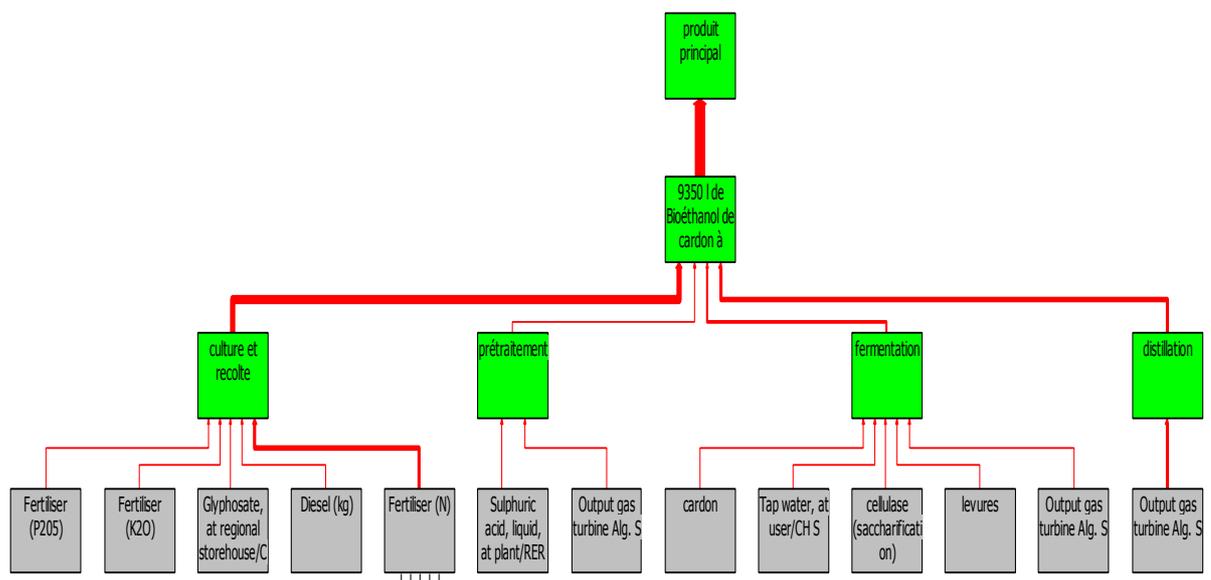


Figure 6.1: Arborescence des étapes de production du bioéthanol de carbon

1.2 Arborescence des coproduits

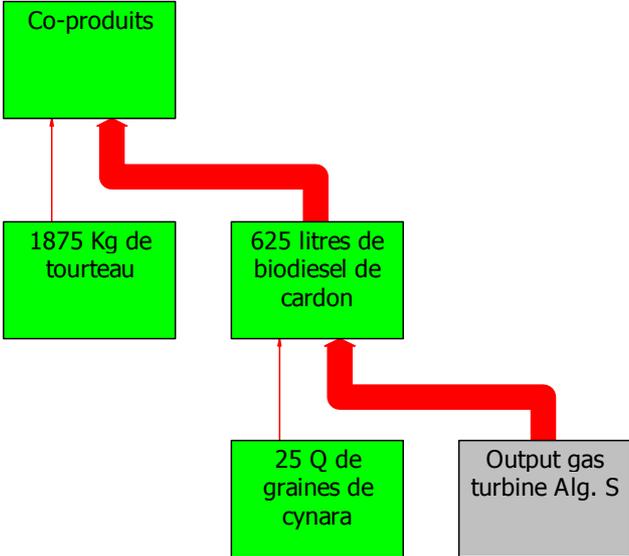


Figure6.2: Production du biodiesel à partir des graines du cardon et génération du tourteau

1.3 Arborescence des déchets

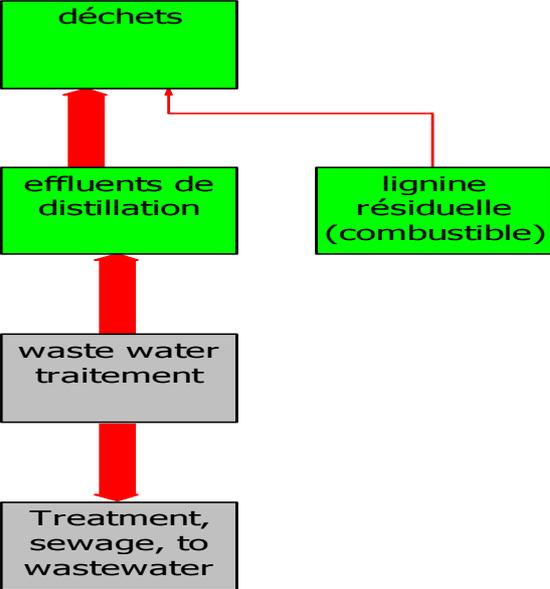
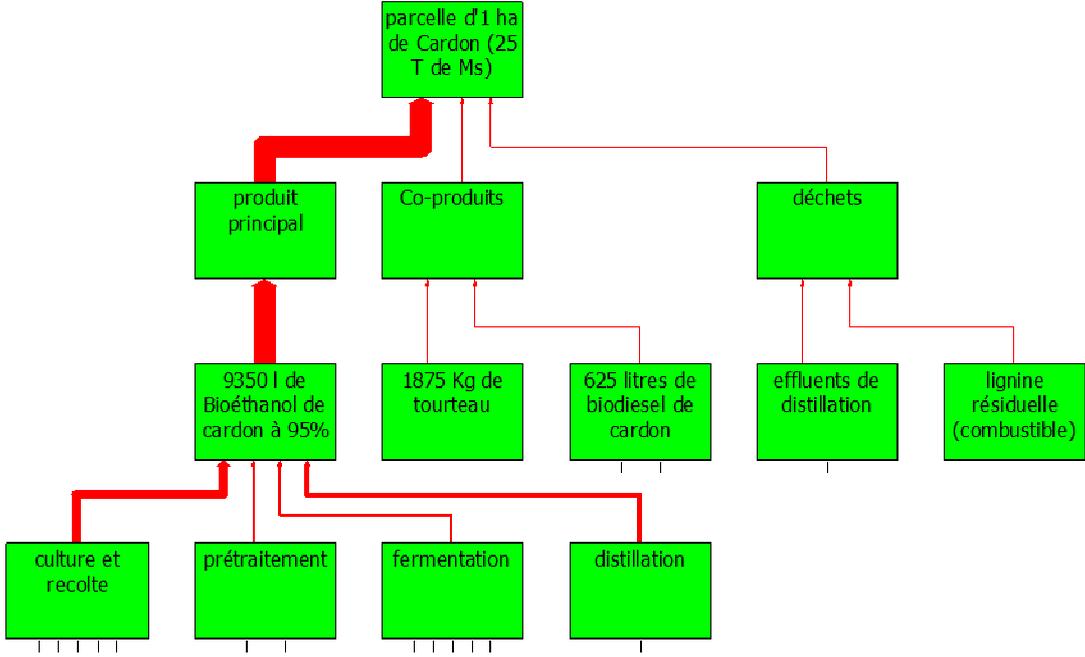
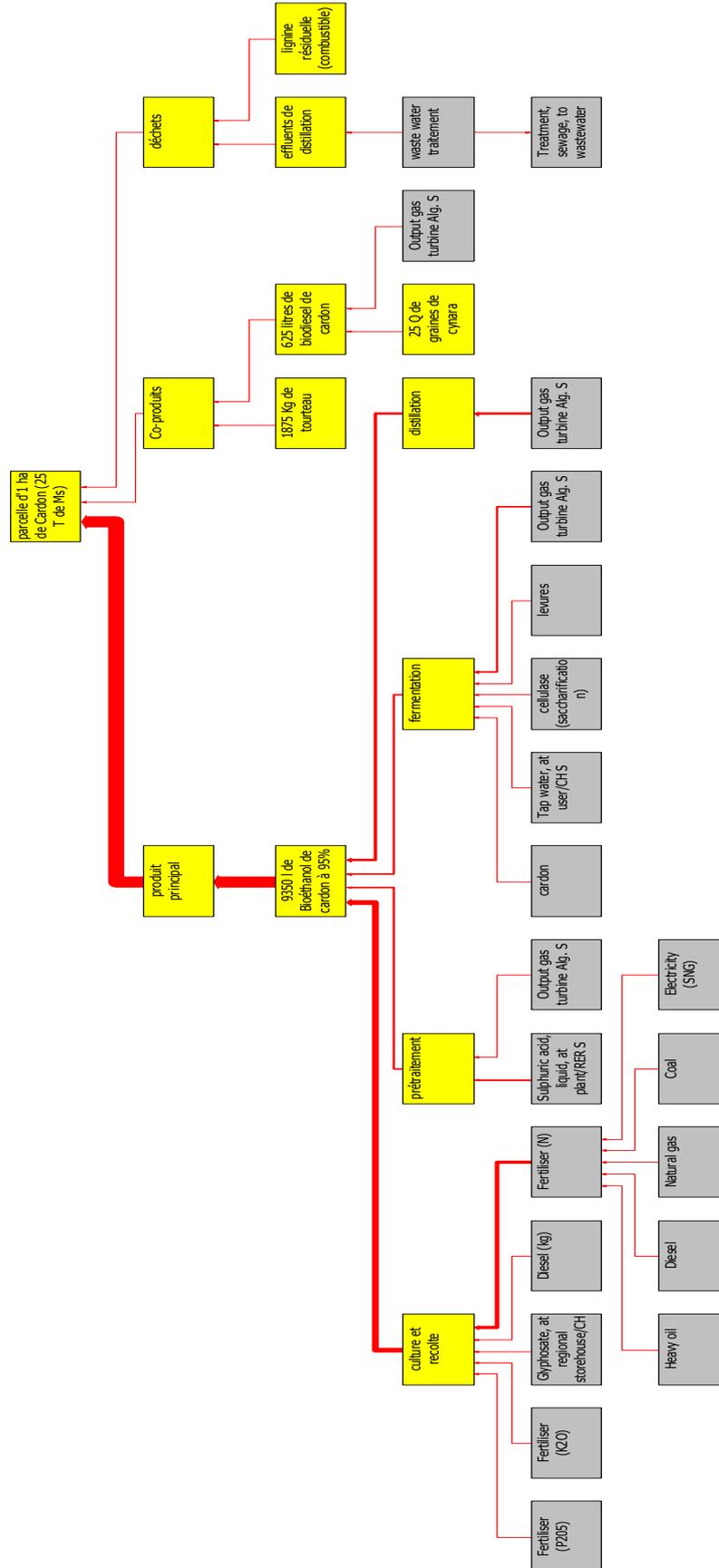


Figure 6.3: Déchets générés lors de la fabrication du bioéthanol de cardon

1.4 Arborescence générale



Figures 6.4: Arborescence générale



Arborescence générale détaillée

2. EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE (Kg de CO₂ équivalent)

Après introduction des données dans le logiciel, on a eu les résultats suivants :

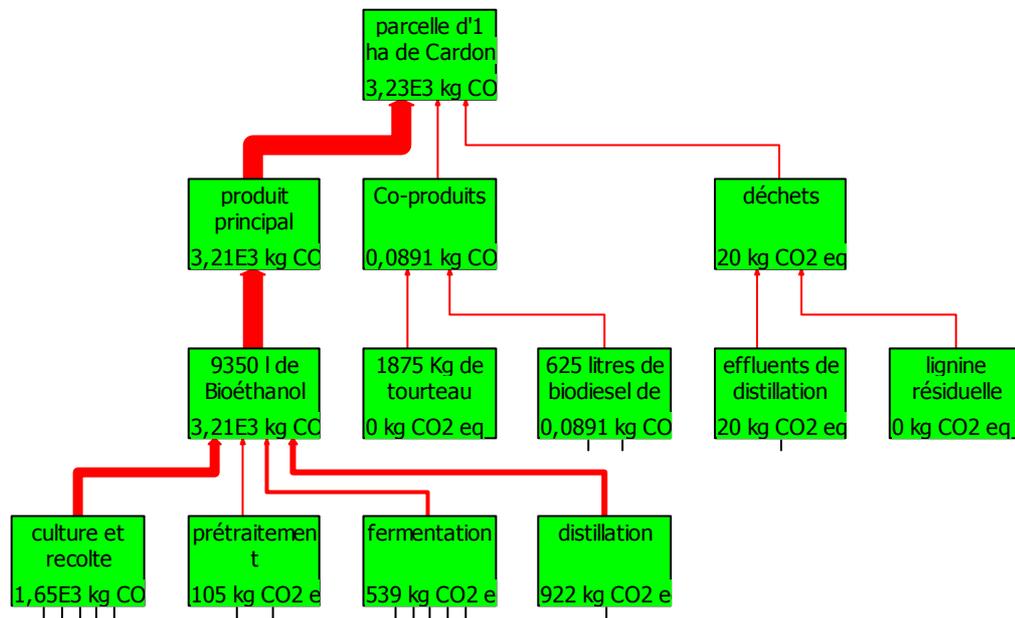


Figure 6.5: Emissions de CO₂ de chaque étape de production du bioéthanol et du biodiesel de cardon

Tableau 6.1: Quantité de CO₂ émise par chaque étape de production du bioéthanol et du biodiesel à partir du cardon

	Kg CO₂ équivalent		Pourcentage
	Bioéthanol 95% de cardon	Culture et récolte	1650
Prétraitement		105	3.28%
Fermentation		539	16.8%
Distillation		922	28.7%
Total		3216	99.4%
Biodiesel	Trans estérification	0.0891	0.0027%
Effluents de distillation	Traitement de l'eau	20	0.62%
TOTAL		3236	100%

Les résultats montrent que la fabrication du bioéthanol de cardon est le processus le plus émetteur de CO₂ avec près de 99.4% de l'ensemble des émissions de la production. Ce résultat est tout à fait logique vu que le bioéthanol est le produit principal avec un rendement estimé à 9350 litres par hectare quand le biodiesel donne seulement 625 litres par hectare.

Les résultats montrent aussi que la culture et la récolte sont les étapes les plus polluantes dans le processus de fabrication du bioéthanol avec 1650 Kg de CO₂ émis.

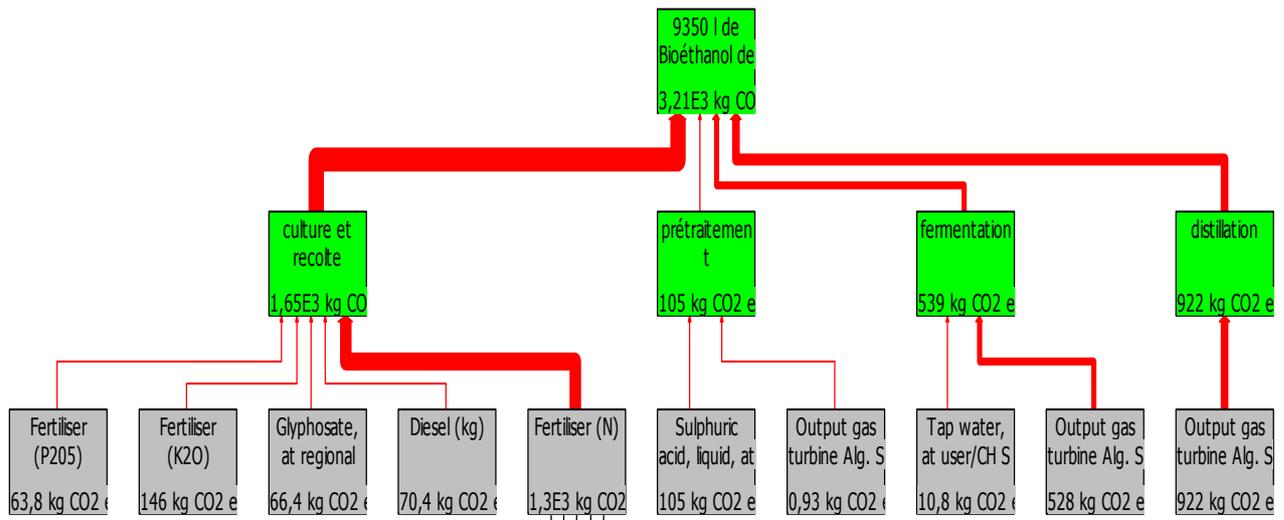


Figure 6.6: Emissions de CO₂ de chaque étape de production du bioéthanol de carbon

Cela est dû essentiellement au lourd bilan carbone des fertilisants utilisés durant la culture notamment celui de l'azote dont la fabrication est connue pour consommer beaucoup d'énergie, notamment le gaz naturel générant ainsi d'importantes quantités de méthane dont l'effet de serre est 25 fois supérieur à celui du CO₂, il y a aussi les fortes émissions de protoxyde d'azote (N₂O) après épandage de l'azote, ce dernier est un puissant gaz à effet de serre, à fort potentiel de réchauffement global.

Selon les rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) le secteur de la production d'engrais représente à lui seul environ 1,2 % de la consommation d'énergie mondiale et est responsable d'environ 1,2 % des émissions de gaz à effet de serre, soit 500 millions de tonnes chaque année.

La distillation émet quand à elle 922 Kg de CO₂ dus à l'utilisation du gaz naturel, ce qui représente environ 28.7% du total des émissions.

La fermentation est responsable d'environ 16.8% des émissions de carbone qui ont pour origine l'électricité (turbine à gaz) utilisée pour assurer simultanément la saccharification et la Co-fermentation, par contre le prétraitement présente le bilan carbone le moins lourd avec 3.28% des émissions, dus essentiellement à la fabrication de l'acide sulfurique nécessaire à l'hydrolyse de la biomasse lignocellulosique, l'énergie consommée durant cette étape n'est pas importante car l'opération ne dure que quelques minutes (de 2 à 10 minutes).

3. CONSOMMATION EN ENERGIE FOSSILE

Après introduction des données dans le logiciel, on a eu les résultats suivants :

Tableau 6.2: Energie consommée en (MJ) par chaque étape de production du bioéthanol et du biodiesel à partir du cardon

	Energie fossile consommée (MJ)		Pourcentage
Bioéthanol 95% de cardon	Culture et récolte	22400	45.8 %
	Prétraitement	1770	3.63%
	Fermentation	9110	18.6%
	Distillation	15300	31.4%
	Total	48600	99.4%
Biodiesel	Trans estérification	1.48	0.003 %
Effluents de distillation	Traitement de l'eau	295	0.603 %
TOTAL		48900	100%

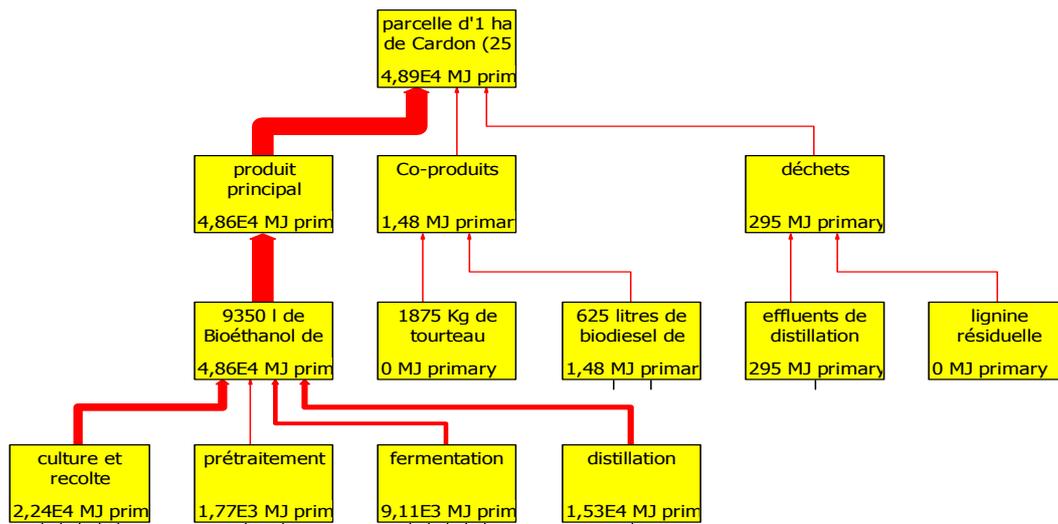


Figure 6.7: Consommation d'énergie durant la production du bioéthanol et du biodiesel à base de cardon

Les résultats montrent que la production du bioéthanol de cardon est le processus le plus vorace en énergie comparé à la production de biodiesel et le traitement des effluents de distillation avec près de 48600 MJ correspondant à 99.4% de la totalité de la consommation énergétique, ceci est logique vu que le bioéthanol est le produit principal de cette raffinerie avec un rendement estimé à 9350 litres par hectare, tandis que le biodiesel n'est qu'un produit secondaire fabriqué à partir d'un coproduit destiné à la consommation locale. Les résultats montrent également que la culture et la récolte sont les étapes les plus consommatrices d'énergie dans la production du bioéthanol avec 22400MJ ce qui correspond à 45.8% de la consommation énergétique totale.

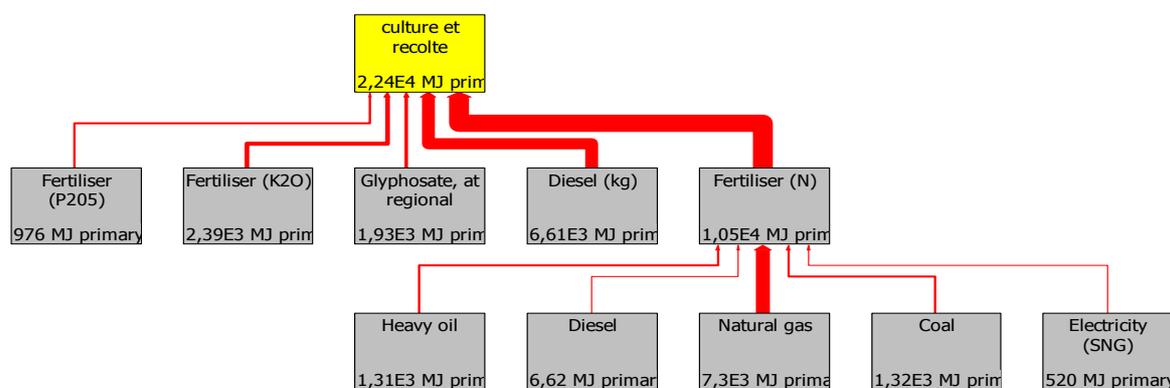


figure 6.8: Consommation énergétique de la culture et de la récolte

En effet, la culture du cardon nécessite un petit apport en engrais et herbicides, les engrais azotés sont spécialement connus pour leur grande consommation d'énergie car ils sont produits à partir de l'ammoniac dont la fabrication consomme d'importantes quantités de combustibles, d'électricité ainsi que de matières premières à base d'hydrocarbures.

La récolte consomme également beaucoup d'énergie 6610MJ, cette énergie est issue des 130 litres de diesel qui alimentent les ramasseuses botteleuses utilisées pour récolter et conditionner la biomasse.

La distillation est elle aussi une étape vorace en énergie consommant près de 15300MJ pour la production de 9350 litres de bioéthanol ce qui correspond à 31.4% de la consommation énergétique totale. La distillation est connue pour être l'étape la plus consommatrice d'énergie dans la fabrication du bioéthanol, cette consommation peut atteindre les 60% de la consommation totale ce qui n'est pas le cas dans notre analyse qui n'est que de 31.4%, ceci est dû au fait que l'étape de déshydratation qui permet de passer de l'éthanol 95% à l'éthanol 99.7% n'a pas été prise en considération ; de ce fait le produit final est un bioéthanol hydraté à 5% et non pas un bioéthanol anhydride permettant ainsi d'économiser 30% d'énergie et par conséquent d'avoir un bioéthanol de moins bonne qualité.

La fermentation consomme 9110MJ, elle est responsable d'environ 18.6% de la consommation totale d'énergie, il s'agit essentiellement de l'électricité qui alimente le bioréacteur durant 24h et qui assure l'agitation, l'aération, le maintien de la température (30°C) pour mener à bien la saccharification ainsi que la conversion du glucose et du xylose en éthanol.

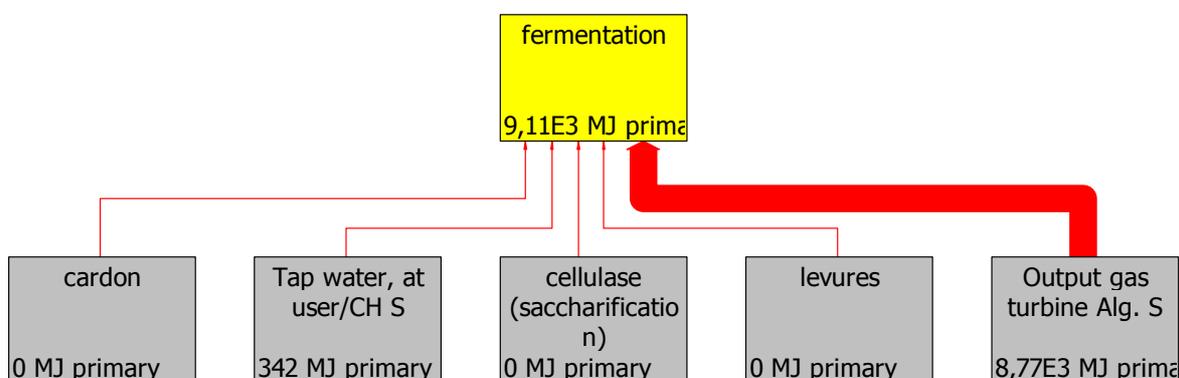


figure 6.9: Consommation énergétique de l'étape de fermentation

Quand au prétraitement, il ne consomme que 1770 MJ ce qui correspond à 3.63% de la consommation énergétique totale, ceci peut s'expliquer par la rapidité de cette étape qui ne dure que quelques minutes (2 à 10 minutes) en présence de l'acide sulfurique dilué.

4. LE BILAN ENERGETIQUE

Le bilan énergétique a été calculé selon la relation suivante :

*** bilan énergétique = énergie produite sous forme de biocarburant / énergie consommée**

***L'énergie produite**

PCI (pouvoir calorifique inférieur du bioéthanol) = 21.3 MJ/l. [114]

Energie produite= 21.3 MJ/l . 9350 l = 199155 MJ

*L'énergie consommée= 48600MJ (donné par le logiciel SimaPro)

Bilan énergétique = 199155/ 48600 = 4.07

Bilan énergétique du bioéthanol de cardon = 4.09

Le bilan énergétique du bioéthanol de cardon montre une efficacité énergétique, en effet l'énergie produite est 4 fois supérieure à l'énergie consommée, ceci peut s'expliquer par les

hypothèses qui nous ont permis d'éviter des consommations énergétiques inutiles parmi lesquelles on peut citer :

- La localisation de la raffinerie à coté du terrain de plantation du cardon, qui diminue la consommation d'énergie liée au transport de la biomasse.
- La suppression de l'étape de déshydratation responsable de 30% de la consommation énergétique.
- La limitation de tout apport hydrique à la pluviométrie.
- Le choix du prétraitement avec l'acide dilué parmi d'autres méthode plus consommatrices d'énergie comme l'explosion de vapeur ou la thermohydrolyse.

5. COMPARAISON DES RESULTATS

Les émissions de CO₂, la consommation d'énergie fossile ainsi que le bilan énergétique du bioéthanol 95% de cardon ont été comparés respectivement à ceux du bioéthanol à base de canne à sucre, de maïs, et de swich grass (herbe verte).

Tableau 6.3: Comparaison des émissions de CO₂, de la consommation énergétique ainsi que du bilan énergétique du bioéthanol de cardon avec ceux des bioéthanol de canne à sucre, d'herbe et de maïs.

	Quantité de CO ₂ émise (Kg CO ₂ eq)	Energie fossile consommée (MJ)	Bilan énergétique
Bioéthanol 95% de cardon	3210	48600	4.06
Bioéthanol 95% de canne à sucre	2300	34200	5.82
Bioéthanol 95% de maïs	14600	203000	0.98
Bioéthanol 95% à base d'herbe (Grass)	3610	87900	2.26

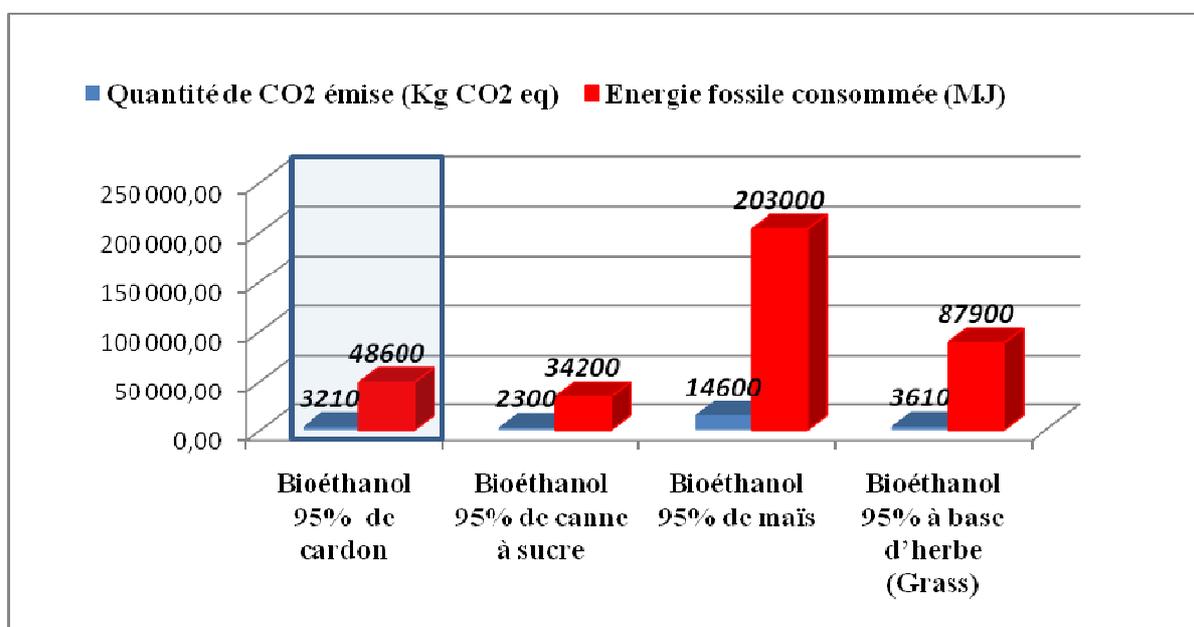


Figure 6.10: Emissions de CO₂ et consommation énergétique du bioéthanol de cardon, de maïs, de canne à sucre et d'herbe.

Les résultats montrent que le bioéthanol de cardon émet plus de CO₂ et consomme plus d'énergie comparé au bioéthanol de canne à sucre, ce dernier présente le meilleur bilan carbone ainsi que le meilleur bilan énergétique parmi les quatre types de bioéthanol comparés. Cela ne veut pas dire que le bioéthanol de canne à sucre consomme moins d'énergie que le bioéthanol de cardon, bien au contraire, ces raffineries sont connues pour être très voraces en énergie, la différence est qu'une grande partie de l'énergie consommée est renouvelable, elle provient de la combustion de la bagasse qui génère l'électricité nécessaire pour alimenter la raffinerie. Contrairement au carbone issu des combustibles fossiles, le CO₂ issu de la combustion de la bagasse ne s'ajoute pas à celui déjà contenu dans la biosphère, ce CO₂ n'est que le carbone emmagasiné durant la photosynthèse, il sera réabsorbé lors du cycle de croissance suivant de la plante.

Comparé à un autre éthanol cellulosique (herbe), le bilan énergétique ainsi que les émissions de CO₂ associées du bioéthanol de cardon peuvent être considérés comme très bons, surtout que la production du bioéthanol du switch grass (herbe) utilise les mêmes procédés (prétraitement à l'acide, SSCF), aussi, c'est une biomasse cellulosique comparable au cardon, ceci est dû aux quantités d'intrants agricoles nécessaires à la culture de l'herbe ainsi qu'à la consommation de carburants fossiles pour acheminer la matière première à la raffinerie.

Les bilans du bioéthanol de cardon sont également nettement supérieurs à ceux du bioéthanol de maïs qui a les plus lourds bilans (énergétique, CO₂) des quatre types de bioéthanol comparés. Ceci peut être expliqué par la voracité des étapes d'hydrolyse de l'amidon ainsi que par la consommation d'importantes quantités d'eau et d'engrais. En effet, l'azote est responsable de la libération du protoxyde d'azote (N₂O), qui est un puissant gaz à effet de serre, à fort potentiel de réchauffement global et à durée de résidence élevée (de l'ordre de 100 ans).

De là, on peut déduire que la production du bioéthanol de cardon est écologique et contribue par ses procédés, ses intrants ainsi que par son produit final à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Aussi, une telle production génère environ **4** fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme, ce bilan bien qu'il soit légèrement inférieur à celui de la canne à sucre, qui est un produit alimentaire peut être considéré comme excellent si on le compare au bilan énergétique moyen du bioéthanol qui est de **1.2**.

CONCLUSION GENERALE

A l'issue de cette étude, il a été possible de dresser un début d'inventaire des matières premières locales non alimentaires valorisables en biocarburants (espèces végétales, déchets, algues), en Algérie. Plus d'une vingtaine d'espèces végétales a été inventoriée et décrite, avec l'aide et les orientations de nos collègues de l'Institut National de la Recherche Forestière, de façon à ne pas perdre de vue un critère important, la durabilité de la filière de production des biocarburants.

En effet, l'inventaire réalisé met en évidence la biodiversité de nos ressources végétales, en particulier les espèces riches en cellulose et les espèces aquatiques, qui pourront servir de substrats pour ce qu'on appelle les nouvelles générations de biocarburants, ou encore pour les bioraffineries. Ces dernières sont des systèmes de production de biocarburants qui associent la chimie verte, la valorisation des déchets, le traitement des effluents et la production de biocarburants.

De là, il apparaît évident, que les biocarburants de première génération seront amenés à être remplacés. En témoigne l'inventaire restreint des matières pouvant être transformées en bioéthanol de première génération. L'éthanol cellulosique est donc mis en avant. Mais, il subsiste des éléments-clés comme la maîtrise des technologies de production, qui détermineront l'évolution d'un tel secteur en Algérie.

Les biocarburants de troisième génération peuvent également être les carburants de demain en Algérie, notre littoral renferme de nombreuses espèces d'algues qui peuvent être d'excellents substrats pour le bioéthanol et l'inventaire proposé dans cette étude ne représente qu'un petit échantillon. Les avantages du bioéthanol algal ne sont plus à démontrer, outre la culture rapide, les algues consomment du CO₂ durant leur croissance et contribuent donc à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

L'analyse de cycle de vie du bioéthanol de carbone, nous a permis de mettre en évidence l'amélioration des bilans énergétique et environnemental, lorsqu'on utilise des substrats celluloses, par rapport aux produits alimentaires. En effet, les résultats montrent qu'une telle raffinerie produit quatre fois plus d'énergie qu'elle n'en consomme. Cependant les étapes de fermentation, prétraitement et distillation restent voraces en énergie. C'est justement sur ce point que travaillent actuellement les scientifiques, car ils sont convaincus, qu'une fois les

coûts et les besoins en énergie liés à ces techniques réduits, ces nouvelles générations de biocarburants seront très compétitives.

En raison de l'importance de la biodiversité, il serait plus rentable et durable que chaque région profite de ses spécificités en termes de ressources végétales, pour l'installation d'une production locale de biocarburants. La valorisation des déchets et la culture des micro-algues pourraient être associées à ces ressources pour la mise en place d'un mix énergétique. Une approche intégrée permettrait de mieux apprécier l'impact du développement d'une telle filière sur l'agriculture, l'utilisation rationnelle de l'eau et le développement de ces régions de manière générale. De plus certaines espèces cellulosiques peuvent servir comme aliment de bétail, le développement de cultures fourragères à double usage pourrait s'avérer plus rentable et motivant pour les agriculteurs, en plus de la valorisation des déchets agricoles.

L'analyse de cycle de vie des biocarburants produits à partir de ces matières premières vérifie la viabilité de la filière, son rendement, son caractère durable, et permet ainsi d'éviter les erreurs en termes d'impact environnemental et rendement économique. Cependant, il est nécessaire de continuer l'inventaire et les essais expérimentaux, de manière à collecter un maximum de données, liées aux ressources et conditions locales. Et ce dans le but de constituer une base de données qui servira de base sûre à des analyses de cycle de vie plus objectives, et de connaître le réel potentiel de l'Algérie en termes de biomasse et de bioénergie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M. Grifon, Compétition entre cultures alimentaires et énergétiques, Agence nationale de la recherche française, Avril 2007.
- [2] BNDES (Banque nationale du développement économique et social) et CGEE (centre de gestion des études stratégiques), Bioéthanol de canne à sucre : énergie pour le développement durable, 1^{ère} édition, 2008, pages 24, 25
- [3] Agence suisse de promotion des biocarburants (plateforme energy). Production de biocarburants dans le monde. info@eners.ch · www.eners.ch. 2009.
- [4] La biomasse, ADEREE/ Développement Durable/ Centre Info Energie. 2011.
- [5] Communiqué de presse «Biocarburants» : l'OFAG doit réagir contre les abus. Les carburants agricoles sont des agrocarburants. Paru dans le journal Bio-suisse le 23 mars 2009. www.bio-suisse.ch
- [6] Subvention des biocarburants. Revue Environnement et stratégie, n° 233, 24 oct 2007, page 1.
- [7] Energy - New and Renewable Energies. Intelligent Energy for Europe. 2008
- [8] J. Caliez et L. Nguyen, les biocarburants, synthèse faite d'après le rapport « Les biocarburants » de P. Sadones publié dans EDEN 2006 (énergie durable en Normandie). 2010, page 4.
- [9] La fermentation acétonobutylique. Synthèse bibliographique et orientations actuelles, Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP, Vol. 37, No. 3, pp. 389-401. 1982.
- [10] Société française de chimie. Synthèse industrielle du méthanol (<http://www.sfc.fr/Donnees/orga/methanol/texmeol.htm>), Mars 2009.
- [11] C. Laurent. Production d'hydrogène à partir de sucres, Technisch Weekblad n°24, 30 septembre 2006. Publié sur le site bulletins-electroniques.com le 18/01/2007.
- [12] M. Balat. Global Trends on the Processing of Bio-fuels, International Journal of Green Energy, volume 5, n° 3, pp 255-262. Juin 2008.
- [13] Y. Desmons, La biomasse. Article publié dans Ecologie. Mars 2007.
- [14] L. Bilhère-Dieuzeide / A. Chauvet. Projet Futurol : Lancement du projet de Recherche et Développement de bioéthanol de 2^{ème} génération, Conférence tenue dans le cadre des 6^{ème} Rencontres de la Biomasse organisées par Valbiom (Association de la valorisation de la biomasse non alimentaire). 2009.
- [15] J. caliez / L. Nguyen, les biocarburants, synthèse faite d'après le rapport « Les biocarburants » de P. Sadones publié dans EDEN 2006 (énergie durable en Normandie). 2010, page 9.

- [16] Plateforme Biocarburants ·ENERS Energy Concept Agence de promotion des biocarburants · Production mondiale de biocarburants. Suisse. 2010
- [17] BNDES (Banque nationale du développement économique et social) et CGEE (centre de gestion des études stratégiques), Bioéthanol de canne a sucre : énergie pour le développement durable, 1^{ère} édition, 2008, page 54.
- [18] Note sur les biocarburants, Réseau Action Climat-France, Mai 2006
- [19] Agence Internationale de l'énergie, Biofuels for Transport: An International Perspective, 2004.
- [20] B. Sorensen, Renewable Energy 3rd Edition, Academic Press. 2003, page 45.
- [21] Un bilan environnemental mitigé pour les biocarburants. Les Echos n° 19765 du 04 Octobre 2006, page 27.
- [22] J.caliez, et L. Nguyen. Les biocarburants, synthèse faite d'après le rapport « Les biocarburants » de P. Sadones publié dans EDEN 2006 (énergie durable en Normandie)2010 page 12.
- [23] A. Collet. Afrique : Les émeutes contre la vie chère se multiplient ([http:// www.courrierinternational.com/ article.asp?obj_id=84412](http://www.courrierinternational.com/article.asp?obj_id=84412)). Revue de presse d'Anne Collet publié sur le site internet de Courrier International. 2008
- [24] S. Pfuderer, M. Del Castillon. The impact of biofuels on commodity prices. Publié sur le site: www.defra.gov.uk. 2008.
- [25] Biofuels and food. Rapport publié par EuropaBIO et Biofuels factsheet. 2009.
- [26] BNDES (banque nationale du développement économique et social) et CGEE (centre de gestion des études stratégiques), Bioéthanol de canne a sucre : énergie pour le développement durable, 1^{ère} édition, 2008, page 41.
- [27] E. Gnansounou et A. Dauriat. Le bioéthanol. Rapport publié par ENERS Energy Concept. Lausanne, 2008, pages 1 à 5.
- [28] C. Nunes Da Silva. La filière bioéthanol. Rapport publié par GNFA (Groupement National pour la Formation Automobile) en partenariat avec le ministère de l'éducation nationale français. 2009.
- [29] CEPAF (Centre d'expertise sur les produits agroforestiers). La production de biocarburants dans les milieux ruraux du Québec.mai 2007.
- [30] BNDES (Banque Nationale du Développement Economique et Social) et CGES (Centre de Gestion des Etudes Stratégiques), Bioéthanol de canne a sucre : énergie pour le développement durable, 1^{ère} édition, 2008, page 81.
- [31] F. Menot. La vinification : principes physiques et méthodes. Edition Artemiz, 272 pages. 2008.

- [32] G. Carmaux. Les différents modes de conduite des bioréacteurs, Thèse de Doctorat. Université de Nantes, 105 p. 2008
- [33] BNDES (Banque Nationale du Développement Economique et Social) et CGES (Centre de Gestion des Etudes Stratégiques), Bioéthanol de canne a sucre : énergie pour le développement durable, 1^{ère} édition, 2008, page 83.
- [34] BNDES (Banque Nationale du Développement Economique et Social) et CGES (Centre de Gestion des Etudes Stratégiques), Bioéthanol de canne a sucre : énergie pour le développement durable, 1^{ère} édition, 2008, page 73.
- [35] C. Nunes Da Silva. La filière bioéthanol. Rapport publié par ANFA (Groupement National pour la Formation Automobile) en partenariat avec le ministère de l'éducation nationale français. 2009.
- [36] <http://cerig.efpg.inpg.fr/memoire/2008/biocarburant.htm>
- [37] A. Boulal, B. Benali, M. Moulai et A. Touzi. Transformation des déchets de dattes de la région d'Adrar en bioéthanol, Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 455 – 463 Adrar, Algérie. 2010.
- [38] M. Ould El Hadj. Etude Comparative de la Productivité d'Alcool Brut de Dattes selon les Variétés. Recherche Agronomique, N°9, pp. 91 – 99, Institut National de la Recherche Agronomique. Algérie, 2001.
- [39] D. Fabienne. Génie Fermentaire. Edition Doin. Editeurs, pp. 226 - 229, Paris, 1991.
- [40] P. Ashoc. Handbook of plant based biofuels. Maison d'édition CRC press 2009. page73.
- [41] M. ALATIKI. Glucides: oses et osides, For Fuels & Chemical 28-29 November, Singapore http://www.azaquar.com/iaa/index.php?cible=ca_glucides.
- [42] P. Ashoc. Handbook of plant based biofuels. Maison d'édition CRC press 2009. Page 88.
- [43] P. Ashoc. Handbook of plant based biofuels. Maison d'édition CRC press 2009. Page 90.
- [44] JP. Borel, A. Randoux, FX. Maquart. Biochimie dynamique, édition De Boeck Paris. 1997.
- [45] D. Arapoglou, Th. Varzakas, A. Vlyssides, C. Israilides. Ethanol production from potato peel waste (PPW), Institute of Technology of Agricultural Products, National Agricultural Research, Greece, July 2009.
- [46] Alcosuisse - Le centre de profit de la RFA Le bioéthanol, 2011.
- [47] P. Ashoc. Handbook of plant based biofuels. Maison d'édition CRC press 2009. PP 160-167.

- [48] A. Dipardo and al. *Simultaneous saccharification and fermentation* (SSF) of alkaline hydrogen peroxide pretreated of *Antigonum leptopus* (Linn) leaves to ethanol (2000),
- [49] C. E. Wyman. What is (and not) vital to advancing cellulosic ethanol. *Trends in Biotechnology*. 2007.
- [50] Rapport publié par Oligae: Energy from Algae: Products, Market, Processes and Strategies (www.oilgae.com), Février 2011.
- [51] T. Mata, A. Martins, N. Caetano. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew. Sustain.* 14, 217–232. 2010
- [52] R. Harun, M. Danquah, G. Forde. Microalgal biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production. 2010.
- [53] P. Rojan, A. John, G. Anisha, K. Madhavan, P. Ashoc. Micro macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. Institut National de la Recherche Scientifique-Eau Terre Environnement, Québec, Canada. 2010.
- [54] P. Chen, M. Min. Review of the biological and engineering aspects of algae to fuels approach. *Review of the biological and engineering*, volume 2, n°4. 2009. Pp 168- 193
- [55] A. Borowitzka. The polymorphic diatom *Phaeodactylum Tricornutum*: ultrastructure of its morphotypes, *journal of phycology*, volume 14, n°1. 2008
- [56] ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). *Management environnemental et écoproduits*. 2009.
- [57] S. Faghen. Analyse du cycle de vie axée sur les conséquences d'un biocarburant de deuxième génération à base de saule. Thèse de master Montreal 2009, pp 13-16.
- [58] Weidema, Geographical, technological and temporal delimitation in *LCA*. 2003
- [59] A. Prieur-Vernat, S. His, F. Bouvar. *Panorama 2007 : Biocarburants : quels bilans sur l'environnement*. 2007
- [60] J. Fernandez. *Production and utilization of C. cardunculus*. (ETSIA Madrid) 1989
- [61] A. Monti, S. Fazio, G. Venturi. Cradle-to-farm gate life cycle assessment in perennial energy crops, *European Journal of Agronomy*, volume 31, n°2. 2009. Pages 77 à 84.
- [62] A. Dauriat. Ethanol, 95% in H₂O, from wood, Base de données SimaPro ecoinvent unit process. 28. 02. 2008
- [63] J. Sutter. Ethanol 95% in H₂O from grass, Base de données SimaPro ecoinvent unit process. 2007.
- [64] J. Fernández, M. Curt. Universidad Politécnica de Madrid, IN El Bassam. *Handbook of Bioenergy Crops- A Complete Reference to Species, Development and Applications* - (1996).
- [65] D. Loren *Panorama 2011. L'eau et les biocarburants*, Rapport publié par IFP Energies Nouvelles 2010. Page 6.

- [66] E. Gnansounou. Vegetable oil methyl ester, at esterification plant, Base de données SimaPro ecoinvent unit process. 2008.
- [67] J. Berzelius, J. Valerius. Traité de chimie. 1997. Edition Valerius, tome 4, Page 183
- [68] <http://www.parlonsbonsai.com/Quercus-suber.html>
- [69] O. Zandouche. Conservation de la biodiversité dans la suberaie. Rapport INRF. 2011.
- [70] http://fr.123rf.com/photo_2856946_direction-d-39-un-quercus-coccifera-ch-ne-avec-plusieurs-glands-isol-sur-un-fond-gris-blanc.html
- [71] WWF Scientific Report. Conifères méditerranéens et les forêts mixtes". Consulté le 10 Février 2008.
- [72] <http://www.topwalks.net/plants/green/01.htm>
- [73] I. Konate. Diversité Phénotypique et Moléculaire du Caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) et des Bactéries Endophytes qui lui sont Associées, thèse de doctorat Rabat 2007, pages 25,30, 45.
- [74] <http://www.portugalmania.com/legendes-histoires/caroube.htm>
- [75] T. Roukas. La production d'éthanol à partir de gousses de caroube extrait par *Saccharomyces cerevisiae* immobilisées sur la kissiris minérales. Volume 9, Numéro 3, De Food Biotechnology, Pages de 175 à 188. 1995
- [76] <http://www.plantzafrica.com/plantefg/faidalb.htm>.
- [77] F. Venter. *Making the most of indigenous trees*. Briza Publications, Pretoria. 2010.
- [78] G. Seif El Din, A. Sita, G. Nahal. Rôle des acacias dans l'économie rurale des régions sèches d'Afrique et du proche orient. 2004, page 96.
- [79] G. Jung. Cycles biogéochimiques d'*Acacia albida* dans un écosystème de région tropicale sèche peu lessivée sur sol ferrugineux. Laboratoire de Microbiologie des Sols R.S.T.O.M., Dakar (Sénégal). 2006.
- [80] K. Mohguen et A. Abdelguerfi. Comportement et évaluation de quelques populations de fétuque élevées (*Festuca arundinacea* Schreb). Institut National Agronomique, Alger. 2009.
- [81] S. Chouaki, F. Bessidik, A. Chebouti. Deuxième rapport national sur l'état des ressources phylogénétiques INRA. Juin 2006.
- [82] M. A. Aziza. Etude de la qualité microbiologique, physicochimique et organoleptique d'un fromage traditionnel obtenu par coagulation par la fleur de cadron (*Cynara cardunculus* L.)2000.
- [83] G. Gosse. Les cultures lignocellulosiques : Perspectives, Etude AGRICE présentée au séminaire du 18 novembre1998 sur les cultures lignocellulosiques. 1998.
- [84] <http://www.prairies-gnis.org/pages/rgi.htm>

- [85] Article bulletin mensuel de l'information et de liaison du PNTTA Maroc. Nouveaux aliments pour les ruminants à base de fruits de cactus. 2009. page 2
- [86] <http://www.fao.org/DOCREP/003/X6771F/X6771F02.htm>
- [87] <http://www.fao.org/docrep/006/11807f/L1807F04.htm>
- [88] Le Centre Régional de la Propriété Forestière, en partenariat avec l'ADEP (Association pour le Développement du Peuplier) Guide de la populiculture en Poitou-Charentes. 2010.
- [89] R. Clusters article : Het Nieuwsblad 06/12/2007
- [90] P. *Quézel*, S. *Santa*. *Nouvelle Flore de l'Algérie et des Régions Désertiques Méridionales* 1962–1963. Page 624
- [91] B. Godin, F. Ghysel. Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération. Volume 14, numéro spécial 2 : 549-560. 2010
- [92] N. Chenouf. Quatrième rapport national sur la mise en œuvre de la convention sur la diversité biologique au niveau national. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement et du Tourisme. Algérie, Mars 2009
- [93] A. Chalabi. Plan d'Action Stratégique pour la Conservation de la Diversité Biologique en Région Méditerranéenne. Rapport national, juillet 2002 page 55
- [94] S. Alibeu. Biocarburant. Rapport publié par L'Institut National de Recherche Environnementale (INRE-DMU). 2007
- [95] R. Rihani. Caractérisation du bioréacteur torique en pyrex pour la production de l'hydrogène à partir de *Chlamydomonas* sp. Actualités du réseau Alpheia hydrogène, communiqué n° 22. 2005
- [96] S. Chader et A. Touzi. Biomasse Algale : Source Energétique et Alimentaire. Revue des Energies Renouvelables. : Production et Valorisation – Biomasse, 47-50. 2001.
- [97] A. Saoudi, A. Ouarsi, D. Chekireb. Estimation de la biomasse globale du phytoplancton par le dosage de la chlorophylle (A). Université Badji Mokhtar, Faculté des Sciences, Département de Biochimie. Annaba, Algérie. Article présenté lors du **2ème Colloque International de Biotechnologie - 26-29 avril 2010 Oran - Algérie**
- [98] P. Rojan. A. John, P. Ashok. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol, Bioresource Technology n° 102, 2011, pages 186–193.
- [99] Statistiques du ministère du commerce. Algérie. 2011

- [100] A. Arzate. Extraction et raffinage du sucre de canne. Rapport du Centre de recherche, de développement et de transfert technologique en acériculture. 2005.
- [101] P. Jouan. Lactoprotéines et lactopeptides : propriétés biologiques, INRA Paris, édition Quae, 2002 , page 20
- [102] FAO: <http://www.fao.org/docrep/t4280f/T4280F0h.htm>
- [103] <http://www.cnipt-pommesdeterre.com/la-nutrition-3.html>
- [104] R. Rayane. Production de pomme de terre en Algérie, algerie-dz.com D'après la Tribune. www.latribune.dz
- [105] France Nature Environnement. Etat des lieux Enjeux et Pistes pour agir. Janvier 2010
- [106] Citrus energy: fuel ethanol production from citrus waste biomass Florida department for agriculture and consumer services. 2007
- [107] Rapport du Ministère de l'agriculture. Algérie. 2010
- [108] M.Malek et M. Seraï. Consultations internationales. Le bureau Algérie .2011
- [109] A. Benattia. Valorisation des rebuts de dattes, composition chimie et digestibilité in vivo. Thèse ing INES Batna. 1989, page 49.
- [110] A. Chehma et H. Longo. Valorisation des Sous-produits du Palmier Dattier en Vue de leur Utilisation en Alimentation du Bétail, Institut National d'Agronomie. Revue des énergies renouvelables- Valorisation biomasse, pp 59-64, 2001.
- [111] <http://www.grenoble-inp.fr/recherche/bioethanol-quand-le-bois-se-fait-carburant-210033.kjsp> Grenoble INP - Pagora Laboratoire LGP2 Carnot énergies du futur
- [112] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE). Plan d'Action National pour la réduction de la pollution marine due à des activités menées à terre. Novembre. 2005. Page 38
- [113] <http://www.algerie-dz.com/article3124.html>
- [114] A. Dauriat. Le bioéthanol. Rapport publié par ENERS Energy Concept, Lausanne – www.eners.ch. 2003