

## Analyse de cycle de vie du bioéthanol

A. Allouache <sup>1\*</sup>, M.A. Aziza <sup>1</sup> et T. Ahmed Zaid <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre de Développement des Energies Renouvelable, CDER  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzareah, 16340, Algiers, Algeria

<sup>2</sup> Département de Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique  
Avenue Hassen Badi, El Harrach, Algiers, Algeria

(reçu le 04 Décembre 2012 – accepté le 30 Juin 2013)

**Résumé** - *L'économie mondiale actuelle doit faire face aux problèmes de pénurie et de pollution des énergies fossiles. Dans ce contexte, la conversion de la biomasse en biocarburants semble être une solution de choix pour pallier à ces problèmes. Le bioéthanol est le biocarburant le plus consommé dans le monde, il est produit par fermentation à partir de matières riches en sucre ou en amidon comme le blé, maïs, canne à sucre. Cependant, la concurrence avec les produits alimentaires qu'il a engendrés à pousser les industriels à abandonner l'utilisation des produits alimentaires à large consommation pour se tourner vers de nouvelles matières non conventionnelles comme les caroubes. Cette étude propose une analyse du cycle de vie de la production d'un bioéthanol fait à partir de gousses de caroubes. Ces dernières représentent une excellente matière pour la production du bioéthanol puisqu'elle est riche en sucre, économique, abondante, et ne concurrence aucunement les cultures alimentaires. Les résultats montrent une grande efficacité énergétique puisque le système produit environ le triple de l'énergie consommée.*

**Abstract** – *The current world economy is facing problems of shortage and pollution of fossil fuels. In this context, the conversion of biomass into biofuels seems to be a preferred solution to address these problems. The bioethanol is the most consumed worldwide biofuel, is produced by fermentation from materials rich in sugar or starch such as wheat, corn, sugar cane. However, competition with food that has led to push the industry to abandon the use of food for consumption and to turn to new unconventional materials such as locust. This study provides an analysis of the life cycle of the production of bioethanol made from carob pods. These represent an excellent material for the production of bioethanol since it is rich in sugar, economic, abundant, and there is no competition with food crops. The results show a high efficiency as the system produces about three times the energy consumed.*

**Mots clés:** Bioéthanol - Caroubes - ACV - Bilan environnemental - Bilan énergétique.

## 1. INTRODUCTION

Le caroubier est un arbre de la famille des légumineuses, (césalpiniciées) à feuilles persistantes atteignant 10 m de haut. Originnaire de l'Asie Mineure, le caroubier est aujourd'hui cultivé dans tout le bassin méditerranéen notamment dans le tell algérien.

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, et il est de plus en plus recommandé pour la reforestation des zones côtières dégradées sous l'effet d'érosion ou de désertification. Actuellement, il est considéré comme l'un des arbres fruitiers et forestiers les plus

---

\* a.allouache@cder.dz

performants, puisque toutes ses parties (feuilles, fleurs, fruits, bois, écorces et racines) sont utiles. [1]

Le caroubier est cultivé pour ses gousses, abondantes et riches en sucre à maturité. Un caroubier peut produire jusqu'à 800 kg de caroubes par an. La caroube algérienne est connue pour ses vertus et sa couleur très caractéristique (un marron qui tire vers le foncé). [1]

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. [2]

L'Algérie a un important potentiel de production en caroubes, selon la FAO, L'Algérie produit 7000 tonnes par an dont 800 tonnes de graines et 6200 tonnes de gousses par an. Une partie de cette production est exportée, l'autre partie est perdue car elle pousse souvent sur des reliefs accidentés rendant la récolte de la caroube très difficile, ceci explique le taux faible des exportations. Ces dernières années, un travail de sensibilisation et une logistique importante ont été mis en œuvre pour récolter ce produit et l'exporter ou le transformer localement.

La caroube représente un énorme potentiel pour le bioéthanol, puisque 100 g de caroubes contiennent un total de 88 g 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. [1].

Le rendement du caroubier est de 5 tonnes par hectare, ce qui donne un rendement de 758 litres de bioéthanol/ha (6.6 kg de gousses donnent 1 litre de bioéthanol). [3]. Il est important de préciser qu'une éventuelle production de bioéthanol à base de caroubes ne pourrait pas se faire à partir des graines, vues 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 pour l'alimentation humaine à cause de sa haute teneur en tannins qui réduit sa digestibilité. [1].

Ces gousses indigestes (sans les graines) peuvent donner un éthanol à 99.5 %, après fermentation du sucre qu'elles contiennent. [4]

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, elle résulte de l'interprétation du bilan quantifié des données (quantité d'eau, énergie consommée, ...) liées à chaque étape du cycle de vie des produits (acquisition de matières première, transport, production, consommation, recyclage ou élimination). Ces données serviront à calculer les impacts potentiels sur l'environnement. [5]

Dans le but de quantifier les impacts et d'éviter d'éventuels problèmes liés à la consommation d'énergie ou d'importantes émissions de gaz à effet de serre, l'application de l'analyse de cycle de vie 'ACV' avant tout projet est préconisée. [6]

Ces analyses comptabilisent les impacts de la totalité du cycle de production, de l'acquisition de la matière première à la consommation en passant par le transport et la transformation. C'est ce qu'on appelle une analyse de cycle de vie, 'du puits à la roue' ou 'du berceau au tombeau'.

Cette étude propose une quantification de la consommation en énergie fossile d'un bioéthanol à base de caroubes. Les résultats obtenus ont permis de calculer le bilan énergétique et d'évaluer l'efficacité du système de production.

## 2. METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Le bioéthanol produit dans cette étude est à base de gousses de caroube sans graines (destinées à l'industrie agroalimentaire), ces dernières sont considérées comme une source très prometteuse pour la production de biocarburants liquides dans l'avenir. L'analyse du cycle de vie de ce bioéthanol a été réalisée après l'introduction de plusieurs données dans le logiciel SimPro (quantité d'eau, électricité consommée, produits chimiques utilisés). Ces données sont relatives aux étapes de culture, de fermentation et de distillation.

L'unité de référence considérée dans cette analyse est 1 litre de bioéthanol.

Les processus qui ont servi à modéliser la fabrication du bioéthanol ont été en grande partie construits ou adaptés à partir de processus existants. Pour réaliser cette analyse plusieurs hypothèses ont dûes être posées.

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

- La culture du caroubier a lieu sur une terre non arable. La parcelle considérée n'est pas irriguée, le seul apport d'eau étant la pluviométrie.
- Bien que le caroubier soit une espèce abondante en Algérie, 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.
- 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.
- La consommation énergétique relative au transport du bioéthanol aux pompes, ainsi que le mélange avec l'essence ne sont pas pris en considération.

Les données collectées ont été introduites dans le logiciel SimaPro, elles nous ont permis de calculer la quantité d'énergie fossile consommée lors de la production du bioéthanol de caroubes.

**Tableau 1:** Données introduites dans le logiciel pour la construction de l'ACV

Matières premières	Gousses de caroubes	1 litre	Ref
			6.6 kg
Fertilisant	Azote N	0.065 kg/l	[8]
	P2O5	0.026 kg/l	[8]
	K2O	0.065 kg/l	[8]
Transport	Camion de 40 t/km	0.082	Estimation
	Carburant consommé pour 5 km (4.5/km)	0.03	Estimation
Fermentation	Acide sulfurique	0.035	[9]

	(hydrolyse)		
	Eau	5 litres	[9]
	Energie consommée	0.08 kWh	[10]
<b>Distillation</b>	Energie consommée	0.132 kWh	[9]

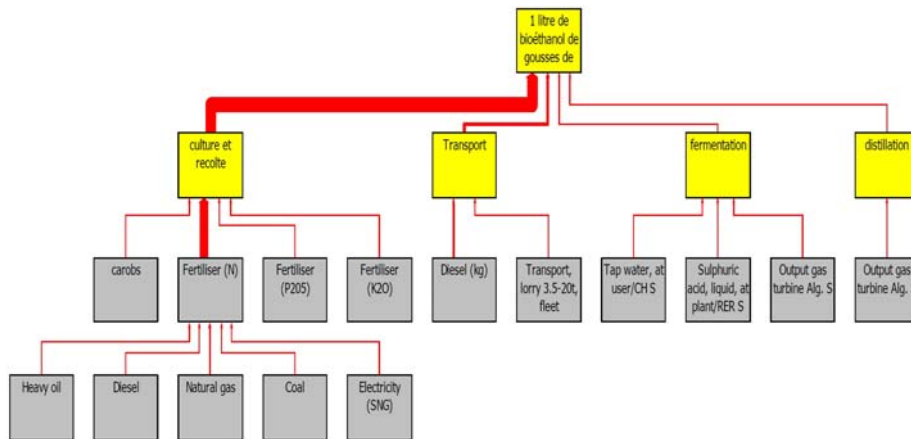


Fig. 1: Arborescence générale de la production d'un litre de bioéthanol à base de caroubes

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

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

#### 3.1 Consommation d'énergie fossile

**Tableau 2:** Consommation énergétique de chaque étape de production du bioéthanol de caroubes

Catégorie d'impact	Unité	Culture Et récolte	Transport	Fermentation	Distillation	Total
<b>Epuisement des ressources fossiles</b>	MJ	4.362	1.902	0.392	0.476	7.134
	%	61.14	26.66	5.6	6.67	100

Les résultats montrent que la culture et la récolte sont les étapes les plus voraces en énergie dans la production du bioéthanol avec 4.362 MJ, ce qui correspond à 61.14 % de la consommation énergétique totale.

En effet, la culture du caroubier 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.

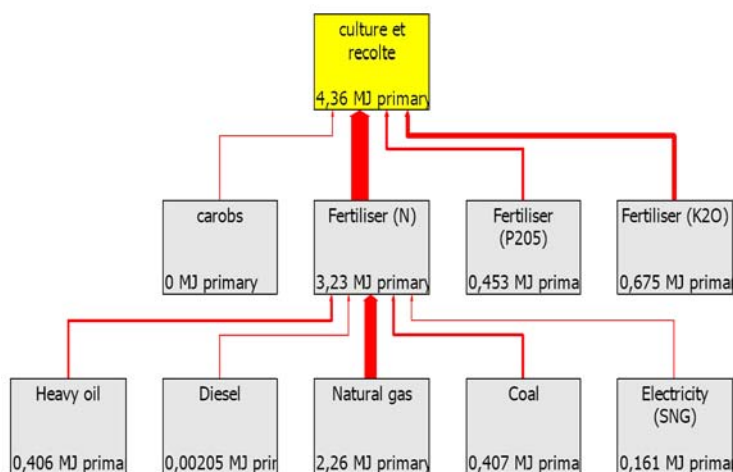


Fig. 2: Consommation en énergie fossile de la culture et de la récolte

L'étape de récolte consomme également beaucoup d'énergie, il s'agit essentiellement du carburant diesel qui alimente les camions et les ramasseuses botteleuses utilisés pour le transport, la récolte et le conditionnement de la biomasse.

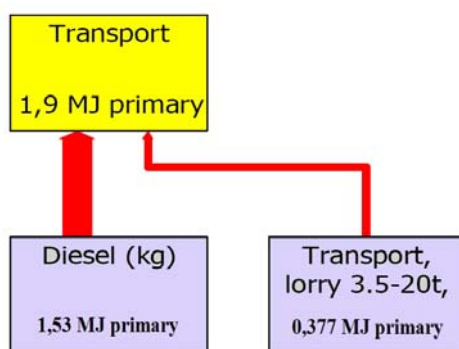


Fig. 3: Consommation en énergie fossile du transport

Le transport de matière première est responsable de 26.66 % de la consommation de l'énergie totale. Il s'agit de la quantité de carburants liquides consommée par les camions pour acheminer la matière première des plantations de caroubier à la raffinerie, cette distance a été estimée théoriquement à 5 km pour réduire au maximum les dépenses énergétiques, en moyennes les distances séparant les raffineries des terrains agricoles sont beaucoup plus longues (entre 50 et 150 km). [11]

La distillation est elle-aussi une étape vorace en énergie consommant près de 0.476 MJ pour la production de un litre de bioéthanol, ce qui correspond à 6.67 % 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 du au fait que l'étape de déshydratation qui permet de passer de l'éthanol 95 % à l'éthanol 99.7 % n'ai 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 de l'énergie et par conséquent d'avoir un bioéthanol de moins bonne qualité.

La fermentation consomme 0.392 MJ, elle est responsable d'environ 5.6 % de la consommation totale d'énergie. Il s'agit essentiellement de l'électricité qui alimente le bioréacteur durant 24 h et qui assure l'agitation, l'aération, le maintien de la température (30°C) pour mener à bien l'hydrolyse ainsi que la conversion du glucose et en éthanol.

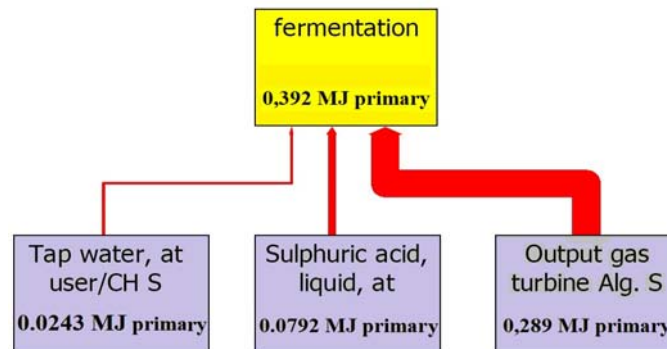


Fig. 4: Consommation en énergie fossile de la fermentation

### 3.2 Bilan énergétique

Le bilan énergétique a été calculé selon la relation suivante:

$$\text{Bilan énergétique} = \frac{\text{Energie produite sous forme de biocarburant}}{\text{Energie consommée}}$$

#### Energie produite

$$\text{PCI (Pouvoir calorifique inférieur du bioéthanol)} = 21.3 \text{ MJ/l} \quad [12]$$

#### Energie consommée

L'énergie consommée est égale à 7.134 MJ (donnée par le logiciel SimaPro pour un litre de bioéthanol).

$$\text{Le bilan énergétique est égal à: } 21.3 / 7.134 = 2.98$$

$$\text{Le bilan énergétique du bioéthanol de caroubes} = 2.98$$

Le bilan énergétique du bioéthanol de caroubes montre une efficacité énergétique. En effet l'énergie produite est 3 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 non loin du terrain de plantation du caroubier, 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.

### 3.3 Comparaison du bilan énergétique du bioéthanol de caroubes avec celui d'autres cultures énergétiques

**Tableau 3:** Comparaison des bilans énergétiques de plusieurs bioéthanol

Type de bioéthanol	Bilan énergétique	Ref.
<b>Bioéthanol de caroubes</b>	<b>2.98</b>	
Bioéthanol de cannes à sucre	3.5	
Bioéthanol de betteraves sucrières	3	[13]
Bioéthanol de blé	2.25	

Le tableau montre que le bilan énergétique du bioéthanol de caroube se rapproche des autres bioéthanol, fait à partir de substrats classiques comme la canne à sucre ou encore la betterave sucrière.

Le tableau montre également que le bilan énergétique du bioéthanol de caroube est meilleur que celui du bioéthanol de blé, ce dernier produit seulement le double de l'énergie qu'il consomme.

## 4. CONCLUSION

Les biocarburants produisent et consomment de l'énergie, réduisent et émettent des gaz à effet de serre. Leurs impacts économiques et écologiques ne peuvent être réellement mesurés que par des analyses de cycle de vie. Ces dernières permettent d'établir avec précision le bilan carbone et le bilan énergétique.

Cette étude vient lever l'incertitude qui plane au-dessus de l'intérêt des biocarburants, puisque elle a démontré l'efficacité énergétique d'un bioéthanol à base de gousses de caroubes produisant trois fois plus d'énergie qu'il n'en consomme.

## REFERENCES

- [1] I. Konate, '*Diversité Phénotypique et Moléculaire du Caroubier (Ceratonia siliqua L.) et des Bactéries Endophytes qui lui sont Associées*', Thèse de Doctorat, Rabat, Maroc, 2007.
- [2] <http://www.portugalmania.com/legendes-histoires/caroube.htm>
- [3] M.N. Rejeb, '*Le Caroubier en Tunisie: Situation et Perspectives d'Amélioration, In Quel Avenir pour l'amélioration des plantes ?*', Ed. AUPELF-UREF, J. Ibbey Eurotext, pp. 79 - 85. Paris, 1995.
- [4] T. Roukas, '*Ethanol Production from Carob Pod Extract by Immobilized Saccharomyces cerevisiae Cells on the Mineral Kissiris*', Food Biotechnology, Vol. 9, N°3, pp. 175 - 188. 1995.
- [5] Rapport Scientifique de WWF World Wide Fund, '*Conifères Méditerranéens et les Forêts Mixtes*', 2008.
- [6] J. Caliez et L. Nguyen, '*Les Biocarburants*', Synthèse faite d'après le Rapport 'Les Biocarburants' de P. Sadones, publié dans EDEN 2006
- [7] S. Sánchez and L.J. Lozano, '*Carob Pod as a Feedstock for the Production of Bioethanol in Mediterranean Areas*', *Applied Energy*, Vol. 87, N°11, 3417 – 3442, 2010.

- [8] I. Battle and J. Tous, '*Carob Tree Ceratonia siliqua L., Promoting the Conservation And use of Underutilized and Neglected Crops*', Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Rome, Italy, 1997..
- [9] A. Dauriat and N. Jungbluth, '*Ethanol, 95% in H<sub>2</sub>O, from Sugar Beet Molasses, to distillery, kg/CH, Life Cycle Inventories of Bioenergy*', Base de données SimaPro Ecoinvent Unit Process, Vol. 28, N°2, 2008.
- [10] C. Fargues, R. Lewandowski, M.L. Lameloise, '*Evaluation of Ion-Exchange and Adsorbent Resins for the Detoxification of Beet Distillery Effluents*', Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 49, N°19, pp. 9248 – 9257, 2010.
- [11] E. Gnansounou et A. Dauriat, '*Etude Comparative de Carburants par Analyse de leur Cycle de Vie*', ENAC: Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, ICARE: Institut des Infrastructures, des Ressources et de l'Environnement, LASEN: Laboratoire des Systèmes Energétiques, 2007.
- [12] A. Dauriat, '*Le Bioéthanol*', Rapport Publié par ENERS Energy Concept, Lausanne – [www.eners.ch](http://www.eners.ch). 2003.
- [13] J.S. Yuan, K.H. Tillier, H. Al-Ahmad, NR. Stewart, Jr.N.C. Stewart, '*Plants to Power: Bioenergy to Fuel the Future*', Trends Plant Science. Vol. 13, N°8, pp. 421 – 429, 2008.