

SESSION 2015

**CAPLP
CONCOURS EXTERNE
ET CAFEP**

**Section : BIOTECHNOLOGIES
Option : BIOCHIMIE – GÉNIE BIOLOGIQUE**

SECONDE ÉPREUVE

Durée : 5 heures

L'usage de tout ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout matériel électronique (y compris la calculatrice) est rigoureusement interdit.

Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.

De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il vous est demandé de la (ou les) mentionner explicitement.

NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

**« A Gruissan, la France « carbure » aux microalgues
Salinalgue permet de tester en plein air le développement de la filière des biocarburants de
troisième génération
(Annexe 1 : Le Monde 11.04.2012) »**

1. Après avoir rappelé les différents modes de production de biocarburants ainsi que les mécanismes biochimiques et/ou biologiques impliqués, présenter les avantages et les inconvénients de l'utilisation des microalgues dans la production de biodiesel sur le plan sociétal, éthique, économique et écologique.
2. Développer le processus d'obtention de biodiesel depuis la récolte des microalgues jusqu'à l'extraction des lipides tout en comparant les choix techniques possibles.
3. Réinvestir des données du dossier technique afin d'illustrer la fabrication d'une huile végétale figurant dans le module S2 « processus technologiques » du référentiel de formation du baccalauréat professionnel bio-industries de transformation.

DOSSIER DOCUMENTAIRE

- Annexe 1 - A Gruissan la France « carbure » aux microalgues
- Annexe 2 - bioraffineries de première et deuxième générations
- Annexe 3 - Extrait de directives européennes concernant le biodiesel
- Annexe 4 - Production, usages et incitations publiques des agrobiocarburants en France
- Annexe 5 - Production de biocarburant lipidique par les microalgues
- Annexe 6 - Biodiesel production and potential of microalgal biodiesel
- Annexe 7 - Comparison of photobioreactor and raceway production methods
- Annexe 8 - Effet de la salinité sur la production d'acides gras totaux par les microalgues
- Annexe 9 - Procédés de récolte des microalgues
- Annexe 10 - Modalités d'extraction lipidique à partir de microalgues
- Annexe 11- Advantages of using microalgae derived biofuels
- Annexe 12 - Vue d'ensemble du concept de bioraffinerie pour la filière microalgues
- Annexe 13 - Baccalauréat professionnel spécialité bio-industries de transformation : champ d'activité et extrait de référentiel

Annexe 1 - Article paru dans Le Monde du 11.04.2012

A Gruissan, la France « carbu » aux microalgues

Salinalgue permet de tester en plein air le développement de la filière des biocarburants de troisième génération

Reportage

Gruissan (Aude)
Envoyé spécial

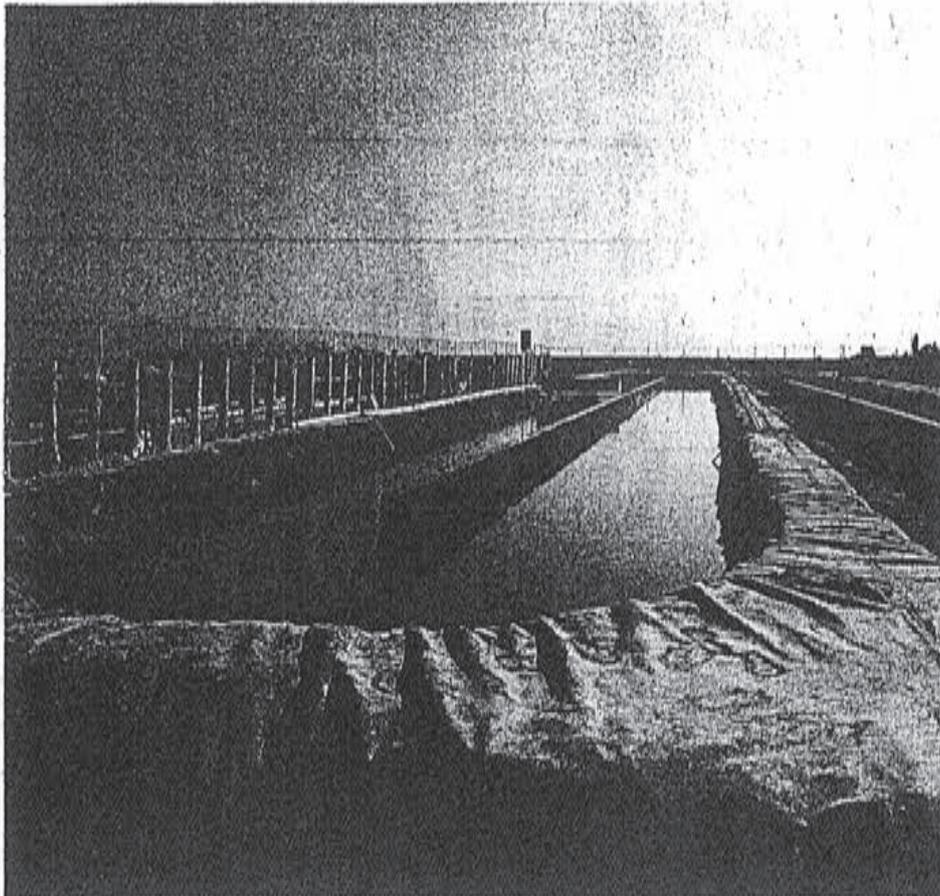
À perte de vue, les salins de Gruissan (Aude) miroitent sous le soleil printanier. Sur près de 400 hectares, entre mer et lagune, la récolte des cristaux d'« or blanc » faisait encore vivre, dans les années 1970, une trentaine de familles. L'exploitation a périclité, même si l'on y produit toujours du sel alimentaire et industriel. Les sauniers ont cédé la place aux touristes, qui viennent y déguster des huîtres et, s'ils ont de la chance, admirer un vol de flamants roses.

Mais, aujourd'hui, le site s'est trouvé une nouvelle vocation, scientifique et industrielle. Ici est mené le plus important projet français de valorisation énergétique des microalgues. Le premier à avoir dépassé le stade du laboratoire, pour une expérimentation en conditions réelles et à grande échelle. Il s'agit de démontrer la viabilité, technique et économique, de cette filière comme source de biocarburants, de biogaz et de produits à forte valeur ajoutée.

« Nous sommes partis de rien. Il a fallu tout construire. Chacun y a mis ses compétences », relate Thomas Lasserre, responsable des activités bioénergie de la Compagnie du vent (GDF-Suez), qui coordonne le projet Salinalgue. Organismes publics de recherche, universités, groupes industriels, PME : treize partenaires sont associés dans ce programme de 7,5 millions d'euros financé, pour plus de la moitié, par le ministère de l'écologie, les régions Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur, ainsi que l'Europe.

Quatre bassins de 250 m² chacun, soit au total 1 000 m², ont été aménagés à proximité des marais de Gruissan. Ils ont été ensemencés par une microalgue locale, *Dunaliella salina*, acclimatée aux milieux salins. Des roues à aubes brassent en permanence ce bouillon de culture, où sont injectés du gaz carbonique et des nutriments (nitrates et phosphates).

Tel est le cocktail nécessaire à la



Quatre bassins de culture expérimentaux ont été ensemencés par la microalgue « *Dunaliella salina* » à Gruissan. PATRICE LEMOINE

croissance du phytoplancton par photosynthèse : de l'eau, du soleil et du CO₂. Dans la pratique, la recette est bien sûr plus complexe. « Dès qu'on sort du laboratoire, les conditions deviennent très différentes », explique Thomas Lasserre. Il faut tenir compte du vent, de la pluie, des embruns, de la pollution par des microorganismes... Il faut, surtout, trouver le degré de salinité optimal - celui qui assurera le meilleur développement de *Dunaliella salina* tout en éliminant les algues concurrentes - et le dosage de nutriments le plus efficace - celui qui forcera la plante à produire le maximum d'huile, à partir de laquelle pourra être élaboré du biodiesel.

Sur le papier, le potentiel des microalgues est de 5 000 à 10 000 litres de biodiesel par hectare cultivé et par an, assurent les experts.

Soit entre 5 et 10 fois plus que celui du colza.

C'est ce qui justifie les espoirs placés dans les biocarburants algaux, dits de troisième génération par opposition à ceux de première génération déjà sur le marché (les agrocarburants extraits du colza, du soja, du tournesol ou de la palme pour le biodiesel, de la betterave et de la canne à sucre, du blé ou du maïs pour le bioéthanol), et ceux de deuxième génération encore à l'étude (exploitant toute la matière végétale, bois, feuilles, tiges, pailles et déchets verts).

Les microalgues, elles, n'ont pas l'inconvénient d'accaparer des terres agricoles. Surtout si on les cultive, comme à Gruissan, dans des bassins déjà existants, avec le souci de limiter l'impact sur le milieu naturel. Elles ont aussi l'avantage d'absorber du CO₂, à raison d'un cental-

ne de tonnes par hectare de culture et par an. Le gaz carbonique est livré sur le site par Air Liquide, mais, à terme, il pourrait être récupéré dans les fumées d'une cimenterie voisine. A plus grande échelle,

Les microalgues n'ont pas l'inconvénient d'accaparer des terres agricoles et présentent l'avantage d'absorber du CO₂.

la production algale pourrait ainsi permettre de recycler des volumes significatifs de CO₂ industriel.

Salinalgue n'est encore qu'un « pilote ». Si les essais sont concluants, de nouveaux bassins, 10 à 100 fois plus grands, seront

aménagés entre 2013 et 2015. Avant la possible construction d'un prototype industriel, encore dix fois plus vaste.

D'ici là, beaucoup de « verrous » restent à lever, reconnaît Thomas Lasserre. La culture de *Dunaliella salina* en grands bassins de plein air doit être maîtrisée ; les procédés de récolte et d'extraction de l'huile optimisés, afin qu'ils soient plus économes en énergie ; les coûts de production drastiquement réduits. Pour y parvenir, les partenaires de Salinalgue prévoient de tirer des microalgues tout leur « jus » énergétique et d'en extraire non seulement de l'huile pour du biodiesel, mais aussi des protéines alimentaires pour l'aquaculture et du bêta-carotène (utilisé dans l'alimentation, comme colorant et antioxydant, et dans la cosmétique), les résidus

Le mauvais bilan carbone des agrocarburants

En 2010, environ 2,8 millions de tonnes de biocarburants, dont 2,2 millions de tonnes de biodiesel, ont été consommées en France, soit 6,7% de la consommation totale d'essence et de diesel. Dans un avis rendu public le 5 avril, l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) note que ces biocarburants affichent, par rapport aux carburants fossiles, un bilan énergétique « largement positif ». Il n'en va pas de même pour le bilan environnemental. La plupart des études concluent qu'en raison du changement d'affectation des sols provoqué par la culture des agrocarburants, celle-ci « ne permet pas de respecter le critère de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 35% par rapport aux carburants fossiles de référence ». En outre, les agrocarburants ont des « potentiels d'eutrophisation [des milieux naturels] supérieurs à ceux des carburants fossiles ». Pour l'Ademe, « la réduction drastique des consommations de carburants reste la priorité majeure ».

étant valorisés en biométhane.

« L'utilisation massive des microalgues à des fins énergétiques n'est pas attendue avant dix ans », préviennent les successeurs des sauniers de Gruissan. Avec l'inauguration de Salinalgue, quelques semaines après le lancement d'un autre projet, GreenStars, dans le cadre des Investissements d'avenir, la France a en tout cas entrepris de combler un retard paradoxal. Alors qu'elle possède des équipes de recherche sur les microalgues de premier plan, parmi les plus fécondes au monde en publications et en brevets, elle reste à la traîne pour les développements industriels. Cela quand plus de 200 entreprises, pour la plupart aux États-Unis, ont déjà misé sur l'énergie des algues au total plus d'un milliard d'euros. ■

Préparé par Le Hir

Annexe 2. Bioraffineries de première et deuxième générations

Source : "Le bioraffinage, une alternative prometteuse à la pétrochimie" (extrait)

Biotechnology Agronomy Society and Environment, P. Laurent, J. Roiz, J.L Wertz, A. Richel et M. Paquot, 2011

/.../ les bioraffineries peuvent être classifiées en fonction du type de matières premières utilisées : on parle ainsi de bioraffinerie de première génération pour les procédés à partir de plantes alimentaires et de bioraffinerie de deuxième génération pour les procédés à partir de matériaux lignocellulosiques.

3. Les bioraffineries de première génération

Cette catégorie de bioraffinerie est basée sur l'utilisation directe des produits et des résidus de la biomasse agricole comme, par exemple, la betterave sucrière, le tournesol, le colza, le soja, le blé, le maïs, etc. Selon ce modèle, on génère essentiellement des biocarburants. Ceux-ci sont produits selon deux types de procédés (**Tableau 1**).

3.1. Les biocarburants de première génération

Les biocarburants de première génération sont donc constitués du bioéthanol et du biodiesel (*Demirbas, 2009b ; Naik et al., 2010*).

Le bioéthanol de première génération est obtenu par fermentation alcoolique de sucres fermentescibles (glucose, saccharose, etc.) (*Didderen et al., 2008 ; Zaldivar et al., 2001*).

Ces sucres sont soit directement présents dans la plante (canne à sucre, betterave sucrière), soit obtenus après hydrolyse enzymatique de l'amidon contenu dans les grains de blé ou de maïs.

Quant au biodiesel de première génération, il s'agit d'un mélange d'esters méthyliques d'acides gras (*Fatty Acid Methyl Esters – FAME*) obtenus après transestérification des triglycérides contenus dans les huiles végétales comestibles telles que l'huile de colza, l'huile de soja ou l'huile de palme, dans les graisses animales ou dans des graisses recyclées (*Lestari et al., 2009*).

3.2. Les produits biobasés de première génération

Si, selon le modèle de la bioraffinerie de première génération, on génère essentiellement des biocarburants, on fabrique également quelques produits chimiques biobasés. Ceux obtenus à partir de sucres et d'amidon incluent l'acide polylactique (PLA) et des molécules plateformes telles que l'acide succinique ou le 1,3-propanediol. Ceux obtenus à partir d'huiles végétales sont majoritairement des acides et esters gras. Enfin, le bioéthanol généré peut être utilisé pour produire des polymères biobasés tels que du chlorure de polyvinyle (PVC), du polyéthylène (PE) ou du polyéthylène téréphthalate (PET) (**Figure 2**).

Cependant, si le bioraffinage de première génération présente plusieurs avantages, il présente également quelques inconvénients, notamment le risque de compétition entre les productions agricoles alimentaires et celles destinées au bioraffinage, le risque de culture intensive, un risque d'épuisement de la qualité organique et minérale du sol, ainsi qu'une utilisation abusive d'engrais et de pesticides pour améliorer les rendements de production.

4. Les bioraffineries de deuxième génération

Les filières de bioraffinage de deuxième génération peuvent être définies comme étant celles qui utilisent de la biomasse lignocellulosique comme matière première et qui valorisent donc des molécules de structuration des plantes comme la cellulose, les hémicelluloses et les lignines.

Le principal intérêt du bioraffinage de deuxième génération est qu'il valorise la source de carbone renouvelable la plus abondante de notre planète. Outre le fait que cette biomasse est beaucoup plus abondante et plus diversifiée que la biomasse de première génération, elle présente aussi l'avantage de réduire les

concurrences d'usage avec la biomasse alimentaire de première génération. Par ailleurs, sur le plan technicoéconomique et environnemental, cette nouvelle génération de bioraffinerie a également pour objectif de réduire

nettement les émissions de gaz à effet de serre et les coûts de production (Williams et al., 2009).

Tableau 1. Procédés de bioraffinage de première génération et biocarburants obtenus — *First generation biorefining processes and obtained biofuels.*

Produit agricole contenant	Procédé	Carburant produit	Sous-produits
Sucre	Fermentation	Bioéthanol	Drêches/Glycérol
Huile	Transestérification	Biodiesel	Glycérol

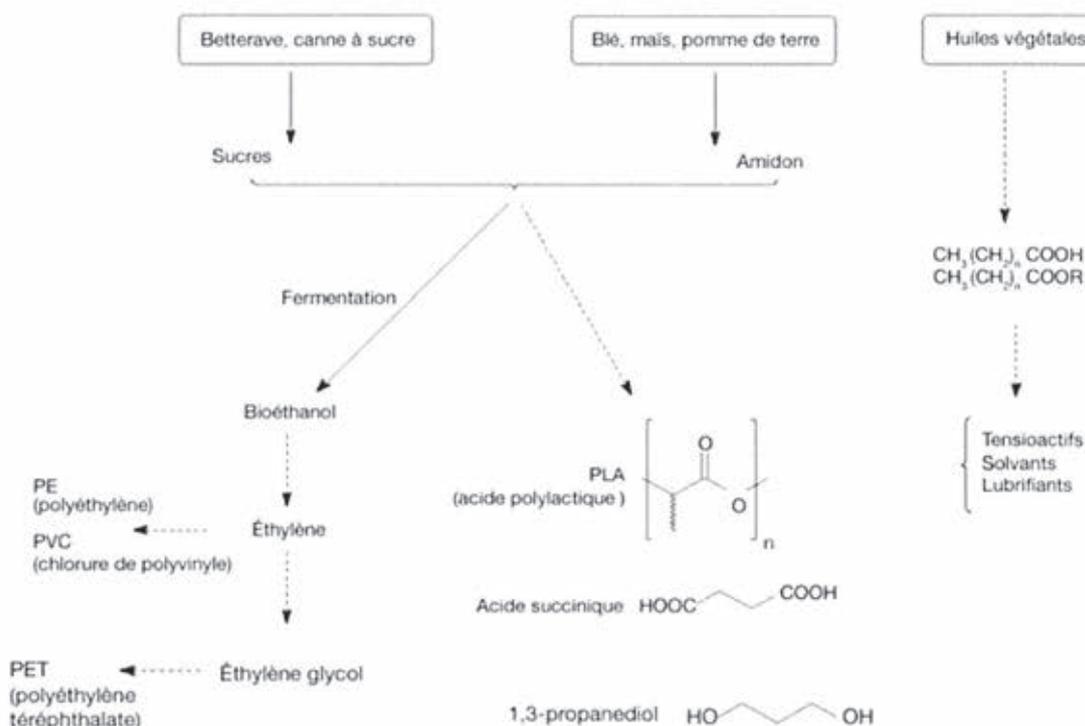
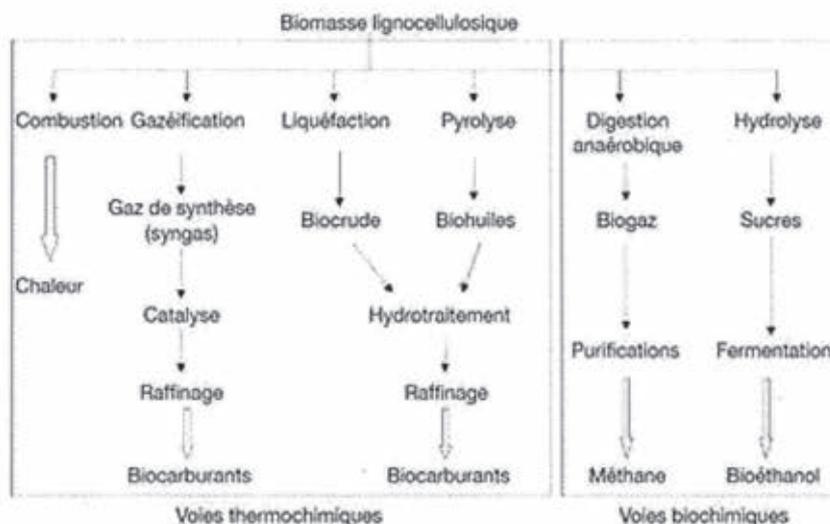


Figure 2. Principaux produits biobasés issus du bioraffinage de première génération



Voies thermochimiques et biochimiques de conversion de la biomasse lignocellulosique (adapté de Demirbas, 2009b) — *Thermochemical and biochemical ways of lignocellulosic biomass conversion (adapted from Demirbas, 2009b).*

Annexe 3. Extrait de directives européennes concernant le biodiesel

Source : Parlement européen

**Proposition de
DIRECTIVE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL
modifiant la directive 98/70/CE concernant la qualité de l'essence et des carburants
diesel et modifiant la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de
l'énergie produite à partir de sources renouvelables**

1. CONTEXTE

La directive 2009/28/CE¹ relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables («directive sur les énergies renouvelables») définit des objectifs contraignants, à réaliser avant 2020, en vue d'atteindre une part de 20 % de l'énergie provenant de sources renouvelables dans la consommation totale d'énergie de l'UE et une part de 10 % de ce type d'énergie dans les transports.

Parallèlement, une modification de la directive 98/70/CE² («directive sur la qualité des carburants») a fixé à l'horizon 2020 l'objectif contraignant d'une réduction de 6 % de l'intensité en gaz à effet de serre des carburants utilisés dans le transport routier et dans les engins mobiles non routiers.

.....

2. OBJECTIFS DE LA PROPOSITION

Les travaux scientifiques indiquent que les émissions dues aux changements indirects dans l'affectation des sols peuvent varier sensiblement selon les matières premières et peuvent annuler une partie ou la totalité des réductions d'émissions de gaz à effet de serre attribuables à des biocarburants par rapport aux combustibles fossiles qu'ils remplacent. L'objectif de la présente proposition est d'engager la transition vers des biocarburants qui assurent des réductions importantes d'émissions de gaz à effet de serre même lorsque les émissions estimatives liées aux changements indirects dans l'affectation des sols sont communiquées.

.....

3. ÉLÉMENTS JURIDIQUES DE LA PROPOSITION

3.1. Résumé des mesures proposées

Les principaux éléments de la présente proposition eu égard à la directive sur les énergies renouvelables sont les suivants:

- l'instauration d'une limite à la contribution des biocarburants et bioliquides élaborés à partir de cultures alimentaires, telles que celles à base de céréales et d'autres plantes riches en amidon, sucres ou huile, à la réalisation des objectifs de la directive sur les énergies renouvelables, correspondant aux niveaux actuels de consommation de ces cultures, sans prévoir aucune limite à leur consommation globale;
- un mécanisme d'incitation renforcé, prévu à l'article 3, paragraphe 4, afin de promouvoir davantage les biocarburants avancés et durables produits à partir de matières premières qui ne créent pas de demande supplémentaire de terres;
- l'instauration de la notification des émissions estimatives découlant de changements dans les stocks de carbone en raison de changements indirects dans l'affectation des sols, sur la base des meilleures données scientifiques disponibles, aux fins du calcul des réductions d'émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie attribuable aux biocarburants et

bioliquides, comme indiqué dans les rapports remis par les États membres conformément à l'article 22;

– le relèvement du niveau minimal de réduction des émissions de gaz à effet de serre applicable aux biocarburants et bioliquides produits dans des installations nouvelles, avec effet au 1er juillet 2014, afin d'améliorer le bilan global de gaz à effet de serre des biocarburants et bioliquides consommés dans l'UE, et de décourager les nouveaux investissements dans des installations à faible performance en termes de gaz à effet de serre;

– la simplification du calcul des réductions de gaz à effet de serre pour les producteurs européens de biocarburants, de façon à uniformiser les conditions de concurrence entre les producteurs de l'UE et ceux des pays tiers;

– l'adaptation de la directive sur les énergies renouvelables à l'entrée en vigueur du traité sur le fonctionnement de l'Union européenne, notamment les pouvoirs conférés à la Commission concernant l'adoption d'actes conformément aux articles 290 et 291 de ce traité.

.....

LE PARLEMENT EUROPÉEN ET LE CONSEIL DE L'UNION EUROPÉENNE,
vu le traité sur le fonctionnement de l'Union européenne et notamment son article 192, paragraphe 1, en liaison avec son article 114, en relation avec l'article 1er, paragraphes 2 à 9, et avec l'article 2, paragraphes 5 à 7, de la présente directive,
vu la proposition de la Commission européenne,
après transmission du projet d'acte législatif aux parlements nationaux,
vu l'avis du Comité économique et social européen⁷,
vu l'avis du Comité des régions,
statuant conformément à la procédure législative ordinaire,
considérant ce qui suit :

(1) L'article 3, paragraphe 4, de la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE⁹ fait obligation aux États membres de veiller à ce que la part de l'énergie produite à partir de sources renouvelables utilisée dans toutes les formes de transport d'ici à 2020 soit d'au moins 10 % de leur consommation d'énergie finale. On s'attend à ce que l'incorporation de biocarburants, une des méthodes à la disposition des États membres, assure la plus grosse contribution à la réalisation de cet objectif.

(2) Étant donné les objectifs fixés par l'Union pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et la contribution importante que les carburants routiers peuvent apporter à ces réductions, l'article 7 *bis*, paragraphe 2, de la directive 98/70/CE concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel et modifiant la directive 93/12/CE du Conseil fait obligation aux fournisseurs de carburant de réduire d'au moins 6 %, pour le 31 décembre 2020, les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie du carburant, par unité d'énergie («intensité en gaz à effet de serre»), des carburants utilisés dans l'Union par les véhicules routiers, les engins mobiles non routiers, les tracteurs agricoles et forestiers et les bateaux de plaisance lorsqu'ils ne sont pas en mer. L'incorporation de biocarburants est une des méthodes à la disposition des fournisseurs de carburants fossiles pour réduire l'intensité en gaz à effet de serre des carburants fossiles fournis.

A. Émissions estimatives des biocarburants liées aux changements indirects dans l'affectation des sols

Groupe de matières premières	Émissions estimatives liées aux changements indirects dans l'affectation des sols (en g CO ₂ eq / MJ)
Céréales et autres plantes riches en amidon	12
Plantes sucrières	13
Plantes oléagineuses	55

B. Biocarburants et bioliquides pour lesquels les émissions estimatives liées aux changements indirects dans l'affectation des sols sont considérées égales à zéro

Les biocarburants et bioliquides produits à partir des catégories de matières premières suivantes seront considérés comme ayant des émissions estimatives liées aux changements indirects dans l'affectation des sols égales à zéro:

- (a) matières premières qui ne figurent pas à la partie A de la présente annexe.
- (b) matières premières dont la production a entraîné des changements directs dans l'affectation des sols, c'est-à-dire un changement entre les catégories suivantes de couverture des terres utilisées par le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat); passage de terres forestières, prairies, terres humides, établissements ou autres terres à des terres cultivées ou à des cultures pérennes
.../....

C. Matières premières dont la contribution à l'objectif visé à l'article 3, paragraphe 4 doit être considérée égale à quatre fois leur contenu énergétique

- (a) Algues.
- (b) Fraction de la biomasse correspondant aux déchets municipaux en mélange, mais pas aux déchets ménagers triés relevant des objectifs de recyclage fixés à l'article 11, paragraphe 2, point a), de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.
- (c) Fraction de la biomasse correspondant aux déchets industriels.
- (d) Paille.
- (e) Fumier et boues d'épuration.
- (f) Effluents d'huileries de palme et rafles.
- (g) Brai de tallol.
- (h) Glycérine brute.
- (i) Bagasse.
- (j) Marcs de raisins et lies de vin.
- (k) Coques.
- (l) Balles (enveloppes).
- (m) Râpes.
- (n) Écorces, branches, feuilles, sciure de bois et éclats de coupe.

D. Matières premières dont la contribution à l'objectif visé à l'article 3, paragraphe 4, doit être considérée égale à deux fois leur contenu énergétique

- (a) Huiles de cuisson usagées.
- (b) Graisses animales classées dans les catégories 1 et 2 conformément au règlement (CE) n° 1774/2002 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine.
- (c) Matières cellulosiques d'origine non alimentaire.
- (d) Matières ligno-cellulosiques à l'exception des grumes de sciage et de placage.»

Annexe 4. Production, usages et incitations publiques des agrobiocarburants en France (extrait)

Source : "Agrocarburants et environnement" *Rapport du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie et du Développement Durable, D. Delalande, 2008.*

Production et consommation d'agrocarburants

Tableau : Evolution des consommations d'agrocarburants en France entre 2006 et 2010

Consommations en tonnes

	2006	2007	2008*	2009*	2010*
AC diesel	632 000	1 300 000	2 293 000	2 494 000	2 939 000
AC essence (Ethanol)	235 000	426 000	881 000	1 010 000	1 045 000

* Estimations

/.../

Tableau : Evolution des taux d'incorporation des agrocarburants en France entre 2006 et 2010

2006	2007	2008	2009	2010
1,75%	3,5%	5,75%	6,25%	7%

/.../

Tableau : Evolution des capacités de production en France entre 2008 et 2010

	2008	2009	2010
AC essence production*	941 000	1 090 000	1 090 000
AC essence besoins**	633 000	658 000	715 200
AC diesel production*	2 477 000	2 727 000	3 177 000
AC diesel besoins**	2 196 000	2 433 000	2 754 000

*Estimation d'après la capacité de production des installations agréées.

** Estimation DIREM

/.../

Les incitations publiques directes

L'exonération partielle de la Taxe Intérieure de Consommation (TIC) applicable aux carburants

L'exonération partielle de la TIC applicable aux carburants est fixée chaque année par le Parlement en fonction notamment des cours des produits pétroliers et des matières premières agricoles. Cette exonération est accordée à des unités de production agréées à l'issue d'appels à candidatures publiés au Journal officiel de l'Union Européenne.

*Tableau : Évolution des exonérations des AC
entre 2005 et 2007*

	Filière diesel			Filière essence	
	EMHV	Agrodiesel de synthèse	EEHV	Ethanol	ETBE
2005	33 €/hl	-	-	37 €/hl	38 €/hl
2006	25 €/hl	25 €/hl	30 €/hl	33 €/hl	33 €/hl
2007	25 €/hl	25 €/hl	30 €/hl	33 €/hl	33 €/hl

Les taux unitaires de défiscalisation étaient en 2007 de 25 €/hectolitre d'AC diesel et de 33 €/hectolitre d'éthanol.

Au titre de l'année 2006, le montant de la défiscalisation s'est élevé à 161,21 M€ correspondant à 569 420 T pour les AC diesel. Si 100% des agréments avaient été réalisés, le montant aurait été de 192,47 M€. Le montant de la défiscalisation s'est élevé pour les AC essence (éthanol et ETBE) à 38,97 M€ pour 235 300 T. Une réalisation complète des agréments aurait conduit à un montant de 125,32 M€.

Au titre de 2007, le montant pour les AC diesel est de 325,47 M€ pour 1 149 500 T (avec un plafond d'exonération de 382,77 M€ pour la réalisation de 100% des agréments). Pour les AC essence, le montant est de 174,53 M€ avec un plafond d'exonération de 220,80 M€.

A compter du 1er janvier 2008, les exonérations sont de :

- a) 22 €/hectolitre pour les EMHV et les EMHA incorporés au gazole ou au fioul domestique;
- b) 27 €/hectolitre pour le contenu en alcool des dérivés de l'alcool éthylique incorporés aux supercarburants dont la composante alcool est d'origine agricole ;
- c) 27 €/hectolitre pour l'alcool éthylique d'origine agricole incorporé aux supercarburants ou au superéthanol E85 repris à l'indice d'identification 55 ;
- d) 22 €/hectolitre pour les EMHV et l'agrodiesel de synthèse de synthèse et 27 €/hectolitre pour les esters éthyliques d'huile végétale, incorporés au gazole ou au fioul domestique.

Les pénalités pour les distributeurs qui n'atteignent pas les objectifs d'incorporation au titre de la Taxe Générale sur les Activités Polluantes (TGAP)

/.../

Le dispositif de soutien aux agrocarburants contient également une pénalité, un prélèvement supplémentaire au titre de la TGAP payée par les distributeurs qui n'atteignent pas les objectifs d'incorporation inscrits dans la loi d'orientation agricole (1,75% en 2006 – 3,5 % en 2007 – 5,75% en 2008 – 6,25 % en 2009 – 7% en 2010).

Pour 2006, le supplément TGAP s'est élevé à 417 000 € pour les AC diesel et à 1,9 M€ pour les AC essence (éthanol). Pour 2007, le supplément TGAP s'est élevé à 5,26 M€ pour les AC diesel et à 19,75 M€ pour les AC essence (éthanol).

Annexe 5. Production de biocarburant lipidique par les microalgues

Source : "Production de biocarburant lipidique avec des microalgues : promesses et défis"
(extrait) *Journal de la Société de Biologie*, J.P Cadoret et O. Bernard, 2008

Les microalgues et les cyanobactéries sont des organismes qui utilisent la lumière comme source d'énergie pour fixer le dioxyde de carbone (CO₂). Ces microorganismes (rassemblés par la suite sous l'appellation abusive « microalgues ») dont la taille varie du micron à la centaine de microns se trouvent en abondance dans les milieux aquatiques (océans, rivières, lacs, etc.). Comme chez les végétaux terrestres, certaines espèces peuvent accumuler, dans certaines circonstances, le carbone absorbé sous forme de lipides (principalement triglycérides), ce qui permet d'envisager d'utiliser ces microorganismes pour produire des biocarburants. Des travaux en ce sens ont été initiés à la suite du choc pétrolier de 1973 par le National Renewable Energy Laboratory (NREL), et ont été arrêtés en 1996.

/.../

On estime entre 200 000 et plusieurs millions le nombre d'espèces d'algues existantes, ce qui est très supérieur aux 250 000 espèces de plantes supérieures recensées ; une telle diversité non exploitée constitue un réel potentiel pour la recherche et l'industrie.

/.../

Les microalgues et cyanobactéries peuvent être autotrophes au carbone (elles ont alors comme seule source de carbone du carbone inorganique - principalement CO₂ et bicarbonate- et puisent leur énergie des photons reçus) ou bien hétérotrophes au carbone (elles utilisent alors également du carbone organique comme source de carbone et d'énergie). Cette distinction est capitale lorsqu'on envisage une valorisation de l'énergie piégée dans les microalgues : dans le cas de l'hétérotrophie, il faut avoir produit préalablement la source d'énergie. Par la suite nous considérerons principalement les espèces autotrophes.

Un des éléments marquants qui caractérise les microalgues est leur rendement photosynthétique très élevé. Ce rendement est le rapport entre l'énergie lumineuse incidente et l'énergie stockée dans la plante. Dans les conditions optimales, des études au laboratoire estiment qu'il faut 10 moles de photons pour fixer une mole de CO₂ (*Benemann, 1997*). La théorie de la photosynthèse voudrait que 8 moles de photons soient nécessaires pour activer successivement les deux photosystèmes ; les deux moles de photons supplémentaires s'expliquent par les besoins minimums de la cellule en énergie et les différentes pertes inévitables. Si l'on considère qu'en moyenne, une mole de carbone dans la cellule correspond à une énergie de 475 kJ, et qu'une mole de photon (dans les longueurs d'onde captables par les antennes des photosystèmes) a une énergie moyenne de 217 kJ, le rendement moyen théorique est de 22%. Seulement 45 % du spectre solaire est exploitable par les photosystèmes (principalement dans le rouge et le bleu). Le rendement maximal de la photosynthèse par rapport à lumière solaire est donc au mieux de 9.9%.

Ces rendements théoriques ne diffèrent pas fondamentalement des rendements optimaux des végétaux supérieurs (6.6% pour les plantes en C3 (*Keoleian & Volk 2005*) et 13.4% pour les plantes en C4 (*Muchow et al. 1994*)), mais il est plus facile de s'en rapprocher, pour des microorganismes notamment, parce que les conditions de croissance, en phase liquide, peuvent être beaucoup plus facilement optimisées, en particulier pour que le CO₂ ne soit jamais limitant. Par ailleurs, chez les végétaux terrestres, une grande partie du CO₂ est dévoyée vers des molécules lignocellulosiques, qui –pour l'instant- ne peuvent pas directement être utilisées comme source de carburant. Par opposition, chez les algues, la fraction de la biomasse directement utilisable est bien plus élevée. Dans les conditions optimales, certaines espèces peuvent atteindre des taux de croissance de l'ordre de 3.8 jours (tableau 1)

Tableau 1. Taux de croissance de diverses espèces de microalgues et cyanobactéries et temps de doublement correspondant (valeurs obtenues dans des conditions diverses).

	Taux de croissance maximum (J^{-1})	Temps de doublement (Jour)
<i>Botryococcus braunii</i>	0,2	3,4
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	3,8	0,18
<i>Chlorella vulgaris</i>	1,84	0,37
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	3,5	0,2
<i>Isochrysis galbana</i>	2,0	0,34
<i>Navicula muralis</i>	2,63	0,26
<i>Pleurochrysis carterae</i>	0,65	1,1
<i>Rhodomonas salina</i>	0,6	1,15
<i>Spirulina platensis</i>	0,5	1,38
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	2,48	0,27

/.../

Les microalgues et cyanobactéries contiennent, comme tous les organismes vivants, une fraction de lipides. En condition normale, ces teneurs restent faibles, et les lipides sont principalement constitués de phospholipides et de glycolipides difficilement utilisables dans un biocarburant. L'étude menée par le NREL (Sheehan *et al.* 1998) sur près de 3000 espèces marines (principalement des diatomées et des algues vertes) a permis de dégager des candidats à la production de lipides. Chez certaines espèces, il est possible d'augmenter significativement la production de lipides par un stress. Les stress identifiés peuvent être de différentes natures (Sheehan *et al.*, 1998).

Tableau 2. Contenu lipidique de diverses espèces, d'après Sheehan *et al.*, 1998 (sauf pour ¹ Xu *et al.* (2006), ² Takagi *et al.* (2006), ³ Moheimani & Borowitzka (2006), ⁴ Brown *et al.* (1996).

	Contenu maximum en lipides (% poids sec)
<i>Botryococcus braunii</i>	29-75
<i>Chlorella protothecoides</i>	15-55 ¹
<i>Cyclotella DI-35</i>	42
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	71,4 ²
<i>Hantzschia DI-160</i>	66
<i>Isochrysis sp.</i>	7-33
<i>Nannochloris</i>	6-63
<i>Nannochloropsis</i>	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Nitzschia sp</i>	45-50
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	31
<i>Pleurochrysis carterae</i>	32-35 ³
<i>Scenedesmus TR-84</i>	45
<i>Stichococcus</i>	9-59
<i>Tetraselmis suecica</i>	15-32
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	21-31 ⁴

Les conditions de carence en azote sont connues pour stimuler la production de lipides. Pour les diatomées, une limitation par la silice conduit également à la production de lipides. L'augmentation soudaine de l'intensité lumineuse produit un effet similaire. Enfin, un choc thermique, de même qu'un choc osmotique stimule également la production de lipides.

/.../

La capacité à fixer le CO₂ de manière contrôlée a récemment mis les microorganismes autotrophes en lice pour la course vers des systèmes de captation du CO₂. Un kg de biomasse représente, en moyenne, 1.8 kg de CO₂ fixé (*Chisti, 2007*). Il est important de garder à l'esprit que fixer le CO₂ ne veut pas dire le piéger. Il faut ensuite réutiliser, voire piéger ce carbone devenu organique, avant que la biomasse se décompose ce qui produirait CO₂ et méthane, et induirait donc des rendements en terme de gaz à effet de serre négatifs à l'échelle du mois (le méthane a un effet de serre estimé à 23 fois celui du CO₂ sur un horizon temporel de un siècle). Fixer le CO₂ industriel implique donc une production de carbone organique dans les mêmes volumes qui doivent donc être réutilisés ou enfouis. La valorisation énergétique de la biomasse est bien évidemment une voie privilégiée au cours de laquelle le CO₂ fixé sera finalement réémis (ce procédé sera donc neutre par rapport aux gaz à effet de serre) après avoir restitué une partie de l'énergie solaire accumulée.

Avant que le CO₂ puisse être consommé au cours de la photosynthèse, il doit être solubilisé dans le milieu de culture, principalement sous forme de bicarbonate et de CO₂ dissous. Cette étape de transfert de la phase liquide vers la phase gazeuse doit être optimisée pour limiter les pertes de CO₂ dans l'atmosphère.

/.../

Il est important d'apporter le CO₂ de manière à rester dans des gammes de pH non inhibantes pour la croissance des cellules (*Olaizola, 2003*), c'est-à-dire en pratique en régulant le pH. Les rendements de photosynthèse présentés précédemment induisent directement les valeurs maximales des flux de CO₂ qui peuvent être fixés. La valeur théorique limite, correspondant à un rendement photosynthétique de 9.9%, en fonction de l'insolation moyenne reçue à différentes latitudes. Dans le Sud de la France, la limite théorique maximale est 328 T/ha/an de matière sèche. Cette limite passe à 456 T/ha/an sous les tropiques.

La production de microalgues et cyanobactéries est en forte augmentation à travers le monde. Elle est passée de 5000 tonnes par an à plus de 10000 en l'espace de 5 ans (*van Harmelen & Oonk, 2006*). Les cultures à grande échelle de biomasse riches en protéines, en vitamines, sels minéraux, pigments, antioxydants, acides gras polyinsaturés à longue chaîne etc (*Pulz, 2004, Spolaore, 2006*) sont principalement dédiées à l'industrie cosmétiques et des compléments alimentaires. La spiruline (*Arthrospira platensis*) et les espèces de type *Chlorella* sont les principales espèces cultivées dans ce but. D'autres espèces sont cultivées en aquacultures pour produire du zooplancton, nourrir les larves de poissons, des bivalves, etc.

Il y a deux manières de produire des microalgues suivant que le dispositif de culture est ouvert (type étang) ou fermé dans une enceinte transparente. Les cultures à grande échelle se font pour l'instant principalement à l'aide d'étangs à haut rendement de type « champ de course » (raceway, voir Figure 3), pour une profondeur de quelques dizaines de centimètres. Ce système de culture, qui contribue très majoritairement à la production mondiale de biomasse (*van Harmelen & Oonk 2006*) est relativement standardisée. Le milieu de culture circule grâce à des roues à aubes. Les éléments nutritifs sont apportés de manière à garantir, dans les conditions standard, une croissance optimale des algues. Un bullage assure l'apport en CO₂, mais le transfert du CO₂ dans la phase liquide est souvent médiocre compte tenu de la faible profondeur des bassins.

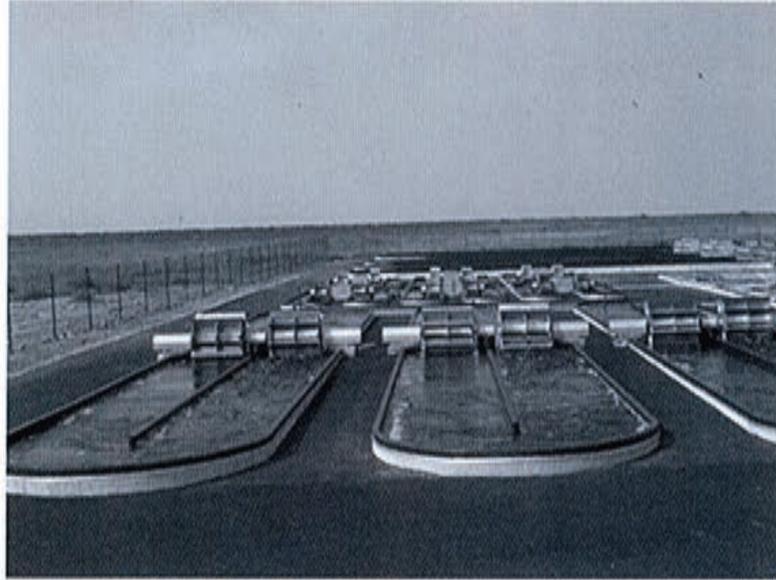


Fig. 3. Système de culture en extérieur du type Raceway (Société Inovalg (85)).

Ces systèmes, de part leur caractère ouvert, sont très sensibles à la contamination, soit par des espèces locales qui y trouvent les conditions idéales pour se développer et finalement supplanter l'espèce cultivée, soit par des prédateurs (daphnies, copépodes, ...) qui broutent une partie importante de la biomasse.

/.../

Les photobioréacteurs (Figure 4) peuvent compenser un coût bien plus élevé par des productivités optimisées. Alors que les étangs à haut rendement ont souvent des designs assez proches, les technologies de design des photobioréacteurs sont très variables et dépendent fortement de l'ingénieur qui les a conçus et de l'espèce à cultiver. En effet, il faut établir des conditions d'agitation et de turbulence compatibles avec la biologie des espèces. Certaines cellules qui ont un flagelle particulièrement fragile sont extrêmement sensibles à de fortes contraintes de cisaillements.



Figure 4 : Photobioréacteur pilote IFREMER avec éclairage artificiel.

Récolter des cellules de quelques microns de diamètre qui ont une densité proche de l'eau n'est pas une tâche aisée. Cette étape clé est trop souvent passée sous silence et constitue une réelle étape limitante dans une optique de production de biocarburants. Certaines espèces peuvent se récolter simplement par filtration sur des soies (spiruline), après décantation (*Odontella aurita*) ou par filtration membranaire (Rossignol et al. 2000) voire séparation ultrasonique (Bosma et al. 2003). Pour beaucoup d'espèces il est nécessaire, après une étape de préconcentration, de centrifuger (Heasman et al. 2000) l'échantillon pour diminuer son taux d'humidité. Des méthodes de floculation (Poelman et al. 1997; Knuckey et al. 2006) peuvent également être envisagées. Suivant les sous-produits à récupérer, il peut être nécessaire de sécher le produit obtenu. Les étapes associées à la récolte et au séchage peuvent être fortement demandeuses d'énergies. Les techniques classiques pour récupérer les lipides des microalgues consistent à utiliser un solvant (type hexane). Des méthodes alternatives (CO₂ sc*) qui offrent des bilans globaux intéressants sont à l'étude (Crampon et al. soumis). Les techniques classiques de transestérification développées pour les plantes oléagineuses terrestres peuvent alors être appliquées pour la production d'ester méthylique d'huile végétale (biodiesel).

/.../

A l'heure actuelle le coût de cultures de microalgues reste relativement élevé. Les différentes études qui ont pu être menées ne peuvent néanmoins pas donner une idée précise du coût de cultures à grande échelle. En effet, la majorité des procédés étudiés ont pour objectif la production de composés à haute valeur ajoutée (c.a.d pour des valeurs supérieures à 10\$ par kg). Par ailleurs, l'extrapolation de quelques mètres carrés à des hectares est loin d'être simple. Il faut donc prendre les données de la littérature avec la plus grande prudence. Les chiffres les plus communément admis se situent toutefois dans une fourchette de 5 à 70 dollars par kg de matière sèche (Moore 2001; Molina Grima et al. 2003; Olaizola 2003, Reith et al. 2006). Les étangs permettent d'obtenir les coûts les plus faibles, alors que les photobioréacteurs requièrent des coûts d'investissement d'un facteur 10 fois supérieur (Hallenbeck & Benemann 2002).

* sub critique