

Communication à l'Académie des Technologies

LES BIOCARBURANTS

Commission Energie et Développement Durable
Groupe de travail « biocarburants »
Décembre 2007

Table des Matières

Introduction	p 4
Chapitre 1	p 6
Les Biocarburants de 1 ^{ère} génération, en Europe et en France	
Historique	
Le soutien à la filière agricole et l'influence de la PAC	
Le cadre environnemental : la lutte contre l'effet de serre	
Le cadre législatif européen	
Les biocarburants en Europe	
Les biocarburants en France	
L'incitation fiscale française	
Les biocarburants en Allemagne	
Quelques conclusions au chapitre 1	
Chapitre 2	p 19
La production fermentative d'éthanol et la fabrication de l'ETBE	
Les matières premières traditionnelles : les mélasses et les graines de céréales	
Ethanol et ETBE, carburants	
Chapitre 3	
La filière Biodiesel à partir d'huiles végétales	p 24
Les procédés de méthanolyse des huiles végétales	
Les procédés d'éthanololyse des huiles végétales	
Matières premières les mieux adaptées à la production du biodiesel	
Chapitre 4	
Biocarburants de 2 ^{ème} génération	p 34
La voie enzymatique d'utilisation de la cellulose et des hémicelluloses	
Les nouveaux procédés de production de biofuel à partir de huiles	
Chapitre 5	p 43
Les procédés thermochimiques : de la Biomasse aux carburants liquides	
La pyrolyse rapide	
La conversion hydrothermale directe	
La gazéification de la biomasse : le biogaz	
La gazéification pour la synthèse d'hydrocarbures liquides	
De la biomasse aux carburants liquides : quels schéma industriel	

Les voies de recherche et développement

Chapitre 6p 56

Biomasse : les ressources accessibles

Technologies éthanol et diester

Objectifs annoncés et hectares nécessaires – Europe et France

Hectares disponibles et contraintes environnementales

Prix possibles et concurrence mondiale

Conclusion

Technologies « plantes entières »

Performances annoncées

En Europe – compétition entre les usages

Au niveau mondial

Conclusions

Conclusion.....p 65

La première génération

La seconde génération

Annexesp 69

Annexe 1 : Etat de la recherche en France et en Europe

Recherche à 3 horizons temporels

Laboratoires impliqués en France

Budgets publics

Réseaux européens

Annexe 2 : Quelques ratios utiles

Annexe 2 : Personnalités auditionnées par le Groupe de Travail

Annexe 3 : Membres du Groupe de Travail

INTRODUCTION

La Commission Energie et Environnement Durable de l'Académie des Technologies a souhaité, fin 2005, actualiser ses connaissances sur le sujet de bio-carburants. Le groupe de travail chargé de cette étude a fait sienne la recommandation formulée par l'Académie en 2004 et a cadré son étude sur deux périodes bien identifiées :

- la période initiale, de 2005 à 2020 environ, se caractérise, en France et en Europe par la mise en place de stratégies visant simultanément à assurer développement de la filière pour augmenter l'indépendance énergétique et à lutter contre l'effet de serre. La production des biocarburants utilise des technologies déjà au point mais qui restent non compétitives par rapport à l'extraction du pétrole. La montée des prix des sources de biomasses utilisées, parallèle à celle du pétrole, n'améliore pas cette compétitivité qui doit toujours être soutenue par le biais de subventions et de réglementations appropriées.

Les objectifs de production affichés, en France comme en Europe, restent relativement modestes autour des 10% des carburants utilisés pour les transports. Il en résulte que la pression sur la ressource biomasse, à ce stade exclusivement tirée de l'agriculture, reste modérée et ne remet pas en cause les équilibres.

On note toutefois l'existence de grands pays producteurs d'éthanol, comme le Brésil et les USA, qui se sont donnés très tôt une stratégie clairement affichée d'indépendance énergétique, sans les mêmes contraintes environnementales que l'Europe. Ces pays ont développé leurs filières de production en optimisant au mieux à partir des ressources biomasse dont ils disposaient et peuvent par conséquent produire à des coûts très inférieurs à ceux pratiqués en Europe.

- Puis la période 2020 à 2050. On fait alors l'hypothèse qu'au plan européen on se situera dans le cadre des plans de réduction des émissions, « Facteur 2 (2030) » ou « Facteur 4 (2050) ». *Ces plans ne pourront être réalisés sans que le secteur des transports ne prenne en charge une part importante de l'effort de réduction.*

Par ailleurs la séparation entre les usages fixes et les usages mobiles (transport) sera, sur le plan de l'énergie et des émissions, achevée. Si en ce qui concerne les usages fixes, les économies d'énergie, la chaleur renouvelable (solaire, biomasse) et l'électricité « carbon free » (nucléaire, séquestration) assurent que des objectifs ambitieux peuvent être atteints, il n'en est pas de même pour les usages mobiles : nous manquerons encore des vecteurs commodes et bon marché qui permettraient aux énergies « carbon free » d'intervenir.

Les biocarburants sont un de ces vecteurs, qui a le grand avantage d'être liquide et de stocker beaucoup d'énergie. A ce titre ils paraissent supérieurs aux autres. Et c'est bien comme vecteurs, et non comme source d'énergie, que leur utilité semble

indiscutable¹. Toutefois on entend déjà de nombreuses voix s'élever pour stigmatiser la production des biocarburants, accusés non seulement de ne pas être aussi efficaces dans leurs capacités à limiter l'effet de serre mais aussi d'accaparer des terres agricoles dont l'humanité aura grand besoin à l'avenir pour assurer sa subsistance.

De nouvelles technologies, dites de seconde génération et encore au stade du développement aujourd'hui, permettront d'utiliser une gamme de matières premières beaucoup plus large, principalement des déchets ou sous-produits d'origine agricole ou sylvicole.

Sur la période considérée, les chiffres attendus de l'usage des biocarburants sont importants (10 Mtep ou davantage, en France seulement) de sorte que les besoins en biomasse, et donc la pression sur la ressource, peuvent devenir critiques au point qu'on pourrait douter de la possibilité d'atteindre les objectifs mentionnés si la biomasse était seule à fournir l'énergie.

Ce rapport fait l'examen de ces technologies dites de 2^{ème} génération, et tente de mettre en relation ces avancées techniques avec la réalité des consommations en ressource biomasse. Il fait apparaître clairement que grâce à l'utilisation d'énergie et d'hydrogène d'origine externe le tableau peut s'éclaircir.

Mais comme pour la période précédente, la question des coûts et de la compétitivité européenne par rapport aux autres acteurs se posera nécessairement.

Le Groupe de Travail remercie les nombreux intervenants, dont la liste est indiquée en annexe, qui ont bien voulu lui faire partager leur connaissance du sujet. Ses conclusions s'appuient également sur l'étude de nombreux rapports dont les références sont indiquées au fil du texte.

¹ Des trois bilans possibles : bilan en carbone, bilan économique, bilan en énergie seuls les deux premiers sont réellement pertinents, *car on ne manquera pas d'énergie : on manquera de vecteurs appliqués aux transports*

Chapitre 1

Les Biocarburants de première génération en Europe et en France

1. Historique

L'idée de produire des carburants à partir de matières premières renouvelables n'est pas nouvelle. De fait, les carburants des débuts de l'automobile, dans la période avant l'ère du pétrole, étaient d'origine végétale tant en Europe qu'aux Etats-Unis. Il suffit de rappeler qu'à l'Exposition Universelle de Paris en 1900 un moteur diesel fonctionnait à l'huile d'arachide, que les autobus parisiens utilisaient avant la guerre de 1914 de l'alcool dénaturé, et qu'aux Etats-Unis la Ford T fonctionnait également à l'alcool.

L'usage des biocarburants, qui était resté relativement faible pendant la période de l'entre deux guerres, s'est développé pendant la seconde guerre mondiale, faute de disposer de pétrole. Ceci notamment en Afrique (utilisation d'huiles végétales pour alimenter les moteurs diesels) et en Europe (utilisation d'éthanol pour alimenter les moteurs des voitures automobiles).

Après la guerre, les biocarburants n'ont pas connu de développements significatifs et ont même disparu du marché dans les années soixante, par suite de l'abondance et du prix peu élevé du pétrole. Il a fallu attendre les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 et la flambée des cours pour qu'ils redeviennent d'actualité. Il est alors devenu clair que le marché énergétique pouvait constituer un débouché important pour les produits agricoles. Toutefois le fait que le prix de revient des biocarburants soit très supérieur à celui des carburants d'origine fossile restait un obstacle majeur, même si cet écart de prix s'atténuait en cas d'augmentation des prix du pétrole.

La relance des biocarburants, initiée en Europe à partir du début des années 1990, s'est bâtie à partir de 3 politiques qui, bien que déconnectées au moment de leur lancement, se sont complétées au fur et à mesure de leur déroulement :

1. Le soutien à la filière agricole
2. La lutte contre l'effet de serre.
3. Le soutien des gouvernements au démarrage d'une nouvelle filière industrielle allant dans le sens d'une plus grande indépendance énergétique.

Ce sont ces trois points que nous allons passer en revue.

2. Le soutien à la filière agricole et l'influence de la PAC

La « nouvelle » politique agricole commune mise en place en 1992 dans le cadre européen, prévoyait :

- le gel (jachère) d'une partie significative des terres (jusqu'à 15%, révisable annuellement) pour résorber les excédents agricoles qui avaient augmenté très sensiblement
- et l'attribution d'une prime à la jachère dans le cas où celle-ci serait utilisée pour la culture de produits destinés à des fins non alimentaires, ouvrant ainsi la voie à la production agricole à destination des biocarburants.

L'accord de Berlin, en 2000-2001 fixait l'étendue des terres gelées à 10% des surfaces cultivées et le montant de l'aide visant à compenser la perte de revenu pour l'exploitant à 63 €/tonne pour les céréales et les oléagineux. Les terres en jachères ont représenté environ 5,7 millions d'hectares en Europe (UE 15) en 1999 : 17% d'entre elles étaient utilisées pour des cultures non alimentaires, majoritairement destinées à la production de biocarburants.

La nouvelle orientation de la PAC, entrée en application en 2006, a maintenu le taux de jachère à 10% et a accordé une nouvelle aide de 45 €/ha aux cultures à vocation énergétique réalisées hors jachères industrielles dans une limite de 1,5 millions d'hectares pour l'ensemble des pays de l'UE 25. Ces nouvelles orientations incluent aussi une modification importante du règlement sucre, dont les quotas de production à prix garantis sur le marché ont baissé de 33%, le niveau des prix garantis baissant de 37% et les subventions à l'exportation étant très significativement réduites

3. Le cadre environnemental : la lutte contre l'effet de serre

Les biocarburants offrent a priori des perspectives intéressantes dans le cadre de l'amélioration du bilan des émissions des gaz à effet de serre par les transports.

De nombreuses études de cycle de vie, analysant la situation dans différentes parties du monde, ont été publiées sur ce sujet. Leurs résultats peuvent varier de façon très importante et ont par conséquent fait l'objet de controverse, de sorte que l'ADEME vient d'être chargée de faire une synthèse critique des diverses approches. A l'analyse, en effet, il apparaît que ce sont principalement des considérations d'ordre méthodologique qui sont à la base des écarts rapportés. Les conditions culturelles des matières premières utilisées sont différentes par définition : maïs US vs céréales ou betterave Europe, canne à sucre brésilienne. L'intégration de la gestion des co-produits est également différente selon les cas considérés. En conséquence, les bilans énergétiques et environnementaux peuvent montrer une très grande variabilité dans la quantification des gains attendus. On retiendra que, dans le cas des études européennes, ces gains restent toujours positifs pour les biocarburants.

Le tableau ci-dessous présente les résultats de l'étude réalisée en 2002 par Price Waterhouse Coopers/Ecobilan pour le compte de l'ADEME et la DIREM ainsi que ceux de l'étude faite en 2004 et 2006 par le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne, le CONCAWE (association technico-scientifique regroupant plusieurs entreprises européennes du raffinage pétrolier à Bruxelles) et l'EUCAR (bras R&D de l'Association des Constructeurs Européens d'Automobile).

	Etude ADEME/DIREM		Etude JRC/EUCAR/CONCAWE	
	Gain en Consommation D'énergie (%)	Gain en Emission De GES (%)	Gain en Consommation D'énergie (%)	Gain en Emission De GES (%)
Ethanol ex blé	57	60	22	30
Ethanol ex betterave	58	61	24	32
Ethanol ex ligno cellulosique *	-	-	76	78
EMHV ex colza	69	70	64	70
EMHV ex tournesol	71	75	74	78
BTL *	-	-	94	94

* ces deux filières n'existant pas encore les chiffres présentés sont donc basés sur des études théoriques.

On note que si les résultats sont divergents mais positifs pour la filière de production de l'éthanol de première génération, ils sont convergents et encore meilleurs pour celle des EMHV². Le tableau ne montre pas les résultats pour l'ETBE, qui, avec 53% d'isobutène d'origine entièrement fossile dans sa molécule donne des gains en énergie en retrait de 7% par rapport à l'éthanol pur.

Les calculs, encore théoriques à ce stade, réalisés sur les cycles de vie des filières de seconde génération semblent indiquer des gains très importants, qui restent bien sûr à confirmer.

4. Le cadre législatif européen

Sur le plan législatif, une première tentative, connue sous le nom de Directive Scrivener, donnait aux Etats membres de la Communauté européenne la possibilité de défiscalisation des biocarburants, mais elle ne devait pas aboutir (1995).

La Directive 98/70/CE autorise réglementairement l'incorporation d'éthanol jusqu'à 5%, d'ETBE jusqu'à 15% dans l'essence et d'EMHV jusqu'à 5% dans le gazole, pour une vente banalisée à la pompe. Pour des taux supérieurs une information devient obligatoire.

Il a fallu attendre 2003 pour que deux Directives soient finalement approuvées visant à permettre l'incorporation et la défiscalisation de biocarburants en Europe. Le texte 2003/30/CE fixe des objectifs croissants de consommation de biocarburants dans le domaine des transports : taux indicatifs de 2% en 2005 et 5,75 en 2010 (ces pourcentages étant calculés sur les contenus énergétique) des consommations globales d'essence et de gazole utilisés dans les transports.

² EMVH (ester méthylique d'huile végétale) fabriqué à partir d'huile de colza ou de tournesol
ETBE (éthyle tertio butyle éther), produit de la réaction de l'éthanol avec l'isobutène, d'origine entièrement fossile, dont par conséquent seulement la moitié d'origine biologique.

La Directive 2003/96.CE donne la possibilité aux Etats membres d'exonérer partiellement ou totalement d'accises³ les biocarburants.

5. Les biocarburants en Europe

La production de biocarburants européenne reste relativement faible par rapport à celle des deux pays leaders, les Etats-Unis, leader mondial depuis 2006 pour l'éthanol et le biodiesel, et le Brésil, qui a commencé le premier avec son programme Proalcool lancé au début des années 1970. Toutefois elle a connu une forte croissance au cours des dix dernières années et, au vu des programmes engagés devrait continuer à croître de façon très significative dans le court moyen terme.

Contrairement à ceux des deux pays leaders, très majoritairement tournés vers l'utilisation d'essence, le marché européen des carburants est marqué par une domination croissante de la consommation de gazole, qui représente aujourd'hui plus de 60% de la demande en carburant. Ceci explique que la consommation d'EMHV soit passée de moins de 50.000 tonnes en 1992 à 3,849 millions de tonnes d'équivalent pétrole. La production correspondante est entièrement fabriquée en Europe, principalement dans 4 pays : l'Allemagne, la France, l'Autriche et l'Italie. Le marché de la production de biodiesel est dominé par deux acteurs multinationaux : Diester Industrie, filiale de Sofiprotéol, elle-même contrôlée par les producteurs français d'oléagineux et de protéagineux français contrôle près de 30% du marché européen. La société américaine Bunge, multinationale de l'agrobusiness et de l'alimentaire en détient 20%. Le troisième acteur, Oelmühle Hamburg, filiale de l'américain Archer Daniel Midlands, détient 12% du marché.

Avec une capacité installée supérieure à 550.000 tonnes en 2006, la consommation européenne de bioéthanol a elle atteint 0,877 millions de tonnes équivalent pétrole les principaux pays producteurs étant l'Espagne, l'Allemagne et la France. Elle s'appuie en partie sur des importations.

L'augmentation globale a été de 79,7% en 2006 par rapport à 2005, le biodiesel s'octroyant 71,6% (en contenu énergétique) des biocarburants liés aux transports, loin devant le bioéthanol (16,3%) et les autres biocarburants (huile végétale et biogaz) utilisés dans certains pays à 12,1%. De plus l'augmentation de consommation de biodiesel est largement supérieure à la croissance de la consommation de bioéthanol, principalement pour les raisons explicitées ci-dessus. ('EurObserv'ER 2007).

³ Pour le lecteur ordinaire : c'est quoi « accises », quelle relation avec TIPP ?

T2 CONSOMMATION DE BIOCARBURANT DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2006 (EN TEP)*
BIOFUEL CONSUMPTION IN EUROPEAN UNION IN 2006 (IN TOE)*

Pays/Countries	Bioéthanol/ Bioethanol	Biodiesel/ Biodiesel	Autres/Other**	Consommation totale/ Total consumption
Allemagne/Germany	307 200	2 408 000	628 492	3 343 692
France/France	150 200	531 800	0	682 000
Autriche/Austria	0	275 200	0	275 200
Suède/Sweden	162 924	51 309	19 340	233 573
Espagne/Spain	114 522	62 909	0	177 431
Italie/Italy	0	177 000	0	177 000
Royaume-Uni/UK	48 214	128 481	0	176 695
Pologne/Poland	52 548	42 218	0	94 766
Grèce/Greece	0	69 590	0	69 590
Portugal/Portugal	0	58 300	0	58 300
Lituanie/Lithuania	8 486	18 100	0	26 586
Pays-Bas/Netherlands	20 480	n.a.	n.a.	20 480
Rép. tchèque/Czech Rep.	1 200	17 900	0	19 100
Hongrie/Hungary	10 742	0	0	10 742
Danemark/Denmark	0	3 530	0	3 530
Slovénie/Slovenia	0	2 862	0	2 862
Irlande/Ireland	652	686	1 317	2 656
Malte/Malta	0	788	0	788
Finlande/Finland	768	n.a.	0	768
Luxembourg/Luxembourg	0	538	0	538
Belgique/Belgium	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Chypre/Cyprus	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Estonie/Estonia	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Lettonie/Latvia	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Slovaquie/Slovakia	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Total UE/EU	877 936	3 849 210	649 149	5 376 296

* Estimation/Estimate.

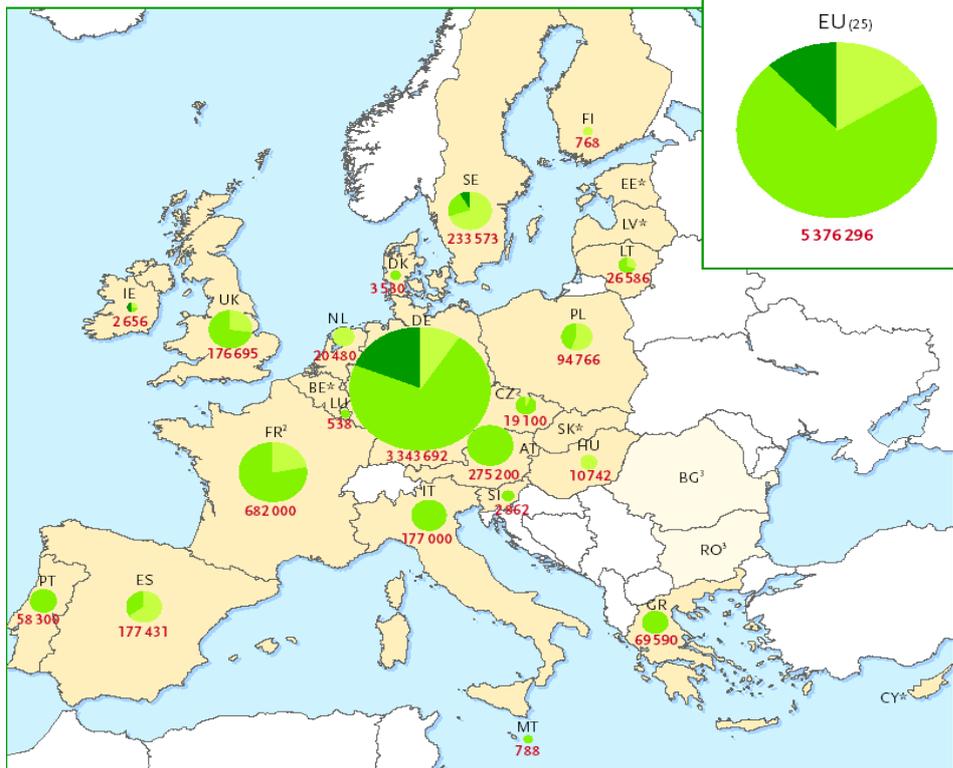
** Huile végétale consommée pure pour l'Allemagne, l'Irlande et les Pays-Bas et biogaz pour la Suède/Vegetable oil consumed pure for Germany, Ireland and Netherlands, and biogas for Sweden.

Source : EurObserv'ER 2007

Source : EurObserv'ER , Mai 2007 , Biofuels barometer

CONSOMMATION DE BIOCARBURANTS DANS L'UNION EUROPÉENNE EN 2006
BIOFUELS CONSUMPTION IN EUROPEAN UNION IN 2006

EUROBSERV'E



LÉGENDE/KEY

Consommation de biocarburants des pays de l'Union européenne à 25 en 2006 (en tep)¹, avec les parts respectives de chaque filière/Biofuels consumption in the countries of the 25-member European Union in 2006 (in toe)¹ with respective shares of each sector

- Bioéthanol/ Bioethanol
- Biodiesel/ Biodiesel
- Autres/Other

5 376 296 Les chiffres en rouge indiquent la consommation totale/ Red figures show total consumption

¹ Non communiqué/Not available – ² Estimation/Estimate – ³ Dom inclus/French overseas departments included
⁴ La Bulgarie et la Roumanie ne font pas partie de notre étude/Bulgaria and Romania are not included in our survey

Source : EurObserv'ER , Mai 2007 , Biofuels barometer

6. Les biocarburants en France

Dès la fin des années 1970, l'Etat français a financé un effort de R&D important. Le plan Carburol a permis, entre autres :

- la mise au point par l'IFP du procédé de production de l'ETBE
- les premiers tests sur la possibilité d'utiliser la cellulose comme matière première de fermentation (pilote semi industriel de l'IFP à Soustons), et l'étude des caractéristiques de la fermentation éthanolique de la levure et de la fermentation acétone-butanol (INSA de Toulouse)
- la mise au point de la production de méthanol à partir de biomasse par la voie thermochimique (plateforme de Clamecy)
- et les premières mises au point de l'estérification des huiles végétales (IFP, Institut des corps gras).

Le plan Carburol a été arrêté au début des années 1990.

A partir de 1985, la filière des huiles végétales, bien structurée, réunit l'ensemble des acteurs sous l'égide de l'ADEME, des constructeurs d'automobiles Renault et Peugeot aux pétroliers d'alors, Elf et Total, autour des producteurs de colza (et à un moindre niveau de tournesol et de soja) de Sofiprotéol, l'établissement financier regroupant les agriculteurs de la filière des huiles et protéines d'origine végétale. A ce groupe de producteurs est adjoint l'IFP comme chef de file technologique. Tous ensemble ils s'accordent pour proposer la mise en place d'une filière de production et d'utilisation de biodiesel, fabriqué par estérification des huiles végétales avec le méthanol, en mélange avec le gazole (jusqu'à 30%).

L'Etat donne en 2002 son agrément à la construction de 5 usines de capacité moyenne, capables de produire ensemble 500.000 tonnes d'EMHV (ou « diester », dans la mesure où la marque déposée par Sofiprotéol et devenue de fait synonyme de biodiesel en France). L'EMHV peut être incorporé réglementairement dans le gazole à hauteur de 5% en volume.

Un plan du même ordre est lancé pour l'utilisation de l'éthanol. Les matières premières sont disponibles, qu'il s'agisse des mélasses de betterave, sous-produit de la production du sucre, des sirops d'amidon (peu utilisés) ou des sous-produits d'amidonnerie. Les développements technologiques sont moindres puisque la production d'éthanol par fermentation des mélasses de betterave suivie d'une distillation est une technologie ancienne et bien maîtrisée. La mise au point des technologies utilisant directement les farines céréalières riches en amidon ou les sous-produits d'amidonnerie nécessite des études particulières, en particulier pour l'optimisation de l'utilisation des enzymes impliqués dans le procédé. Ces améliorations de procédé sont essentiellement menées chez les producteurs.

Le plan issu de l'accord entre les différents acteurs (motoristes, pétroliers et agriculteurs des filières sucre (betterave) et céréales (blé et maïs)) et l'Etat (qui a depuis très longtemps la possibilité de vendre de l'éthanol en cas de surproduction vinicole), prévoit que l'éthanol sera essentiellement utilisé sous forme d'ETBE. Celui-ci pourra être incorporé dans les essences jusqu'à hauteur de 15% en volume. Elf reformate, à partir de 2002, son atelier de Feyzin (originellement dédié à la fabrication du MTBE), et deux nouvelles unités sont construites à Dunkerque et Gonfreville en partenariat entre Total et les betteraviers, les céréaliers et les producteurs d'éthanol.

Aujourd'hui, comme l'a déclaré le Gouvernement dans le Plan Climat 2004 renforcé en 2005, la France s'est résolument engagée dans l'application de la Directive Européenne et s'est même donnée des objectifs de substitution de l'essence et du gazole par les biocarburants supérieurs aux recommandations européennes : 5,75% en 2008, 6,25% en 2009, 7% en 2010 et 10% en 2015.

Ce plan conduit à multiplier par 3 la production de 2005 à 2007 et prévoit 19 sites de production pour un total de 3,6 millions de tonnes de biodiesel et 6 sites de production de 1,2 millions de tonnes d'éthanol à l'horizon 2010. L'Etat s'est engagé à faire bénéficier la totalité de cette nouvelle fabrication de l'exonération de la TIPP.



Pour accélérer le développement de la filière alcool, l'incorporation d'alcool à 85% dans l'essence est prévue, ce qui nécessite la mise sur le marché de véhicules flex-fuel. Toutefois, à ce jour le développement du réseau de distribution à la pompe n'est pas encore réalisé et le développement de ce carburant se limite à des flottes captives d'entreprises ou des pouvoirs publics.

En 2004 la surface cultivée pour la fabrication d'alcool représentait 2,8% de la sole betteravière (17.000 ha), cette dernière s'élevant à 430.000 ha dans les années 2002-2003, tandis que les cultures en céréales représentaient 14.400 ha, soit 0,3% de la sole blé qui avoisine 5 Mha environ.

Compte tenu des agréments on prévoit 53.600 ha de betteraves et 270.000 ha de blé en 2010.

Les rendements agricoles moyens sont aussi constamment en augmentation : pour les betteraves ils sont passés de 72 tonnes en 2001 à 77,5 en 2005. Ils devraient atteindre 82,1 tonnes/ha en 2010 tandis que les rendements en blé progressent de 72 quintaux/ha à 76,8 puis 82,8 quintaux/ha sans augmentation des intrants.

Les rendements de la transformation des sucres en en éthanol restent stables à 100 litres d'éthanol/tonne betteraves et 360 litres d'éthanol/ tonne blé.

On rappellera que, calculé en rendement énergétique, le blé fournit environ 1,4- 1,6 Tep/ha, le maïs 1,5 – 1,7, l'orge 0,8 – 1,2, la betterave 3,3 – 3,5 et la canne à sucre 3,5 – 4 Tep/ha.

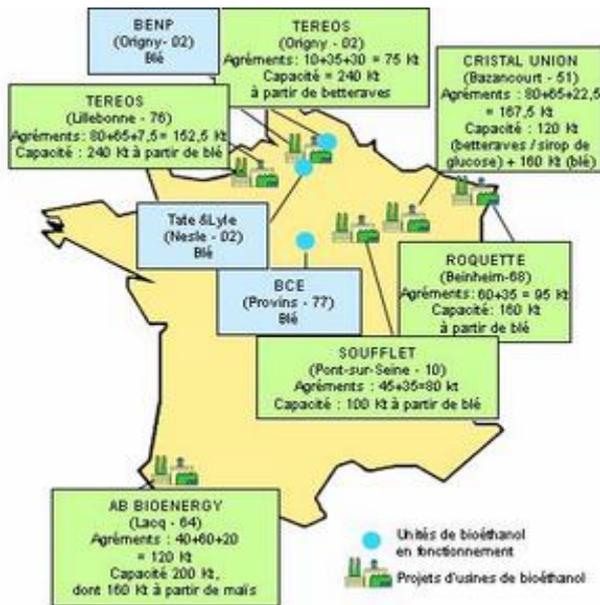


Figure 1: installations agréées pour la production d'éthanol

En 2006 les surfaces agricoles consacrées en France à la culture du colza ont été de 1,1 Mha, avec un rendement moyen de 3,4 t/ha. Les rendements sont assez variables d'une année sur l'autre. La quantité d'huile extraite des graines de colza est de l'ordre de 1,2 – 1,3 tonne/ha.

Le colza et le tournesol à vocation non alimentaire sont cultivés sur jachère industrielle dont la surface représente 90% du total des terres gelées. La production de colza pour la production de biodiesel représente 80% de la sole culture industrielle totale.

Les surfaces cultivées en tournesol sont croissantes en France. Elles devraient atteindre 1,1 Mha en 2010. Les rendements sont de l'ordre de 2,1 tonnes/ha, ce qui permet une production d'huile de tournesol de 0,8 t/ha. Les surfaces de tournesol sur jachère représentent 7% de la surface totale de tournesol et 12% de la sole industrielle totale.

Après pressage et récupération de l'huile les tourteaux de colza, utilisés en alimentation animale comme source protéique et de matière grasse, représentent 1,8 – 1,9 t/ha et ceux de tournesol 0,6 – 0,7 t/ha.

Environ 35% des graines sont utilisées pour la production de biodiesel, le reste étant utilisé pour l'alimentaire et la chimie.

A l'échelle de l'Europe, entre 80 et 90% de la culture d'oléagineux à usage biocarburants sont effectuées en France et en Allemagne.

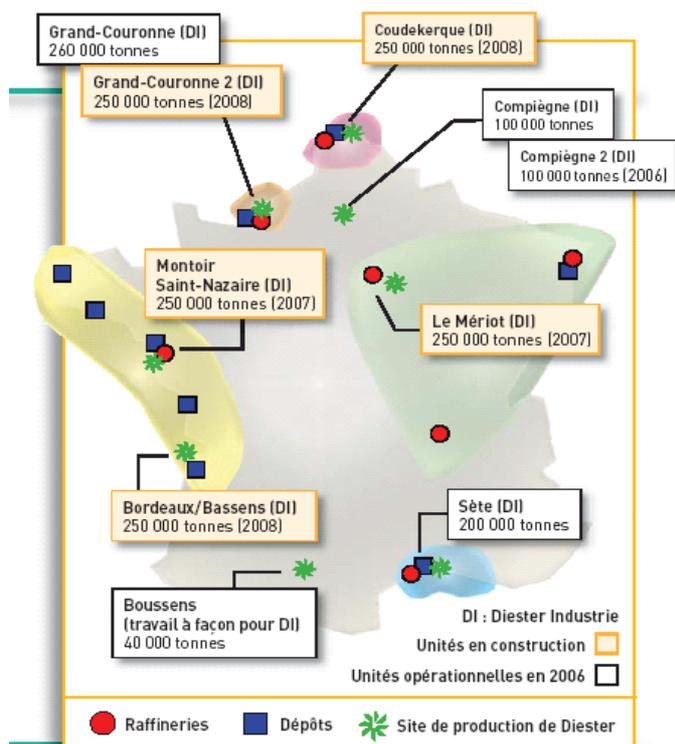


Figure 2: installations agréées pour la production de biodiesel

Les objectifs d'incorporation

% PCI	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Objectifs	1,2%	1,75%	3,5%	5,75%	6,25%	7%
% volume équivalent						
EMHV (1)	1,3	1,9	3,8	6,3	6,8	7,6
ETBE (2)	3,1	4,5	9,0	14,8	16,1	18,0
Ethanol (1)	1,9	2,7	5,3	8,8	9,5	10,7

1 : limite technique admissible dans les moteurs actuels : 5% en volume (7% en France à partir du 1^{er} janvier 2008)

2 : limite technique admissible dans les moteurs actuels : 15% en volume

Consommation de carburants en France

Tonnes (millions)	2002	2003	2004	2005	2006
Essence	13,09	12,27	11,70	10,96	10,33
Gazole	29,49	29,90	30,57	31,04	31,89

Consommation de biocarburants en France

Tonnes (milliers)	2002	2003	2004	2005	2006
ETBE	87	82	87	117	135,2
Ethanol	-	-	0,66	3,3	
Biodiesel	307,5	321	315,5	368,5	350,9

Taux de pénétration, en % énergétique des biocarburants en France

% PCI	2002	2003	2004	2005	2006
Essence	0,56	0,55	0,58	0,89	1,75
Gazole	0,91	0,94	0,93	1,04	1,75
Global	0,80	0,81	0,82	1,00	1,75

7. L'incitation fiscale française aux biocarburants⁴

Les biocarburants présentant de fait un coût de production supérieur à celui des produits pétroliers qu'ils substituent, un premier dispositif de soutien, fondé sur une diminution de la TIPP appliquée aux biocarburants (défiscalisation partielle) a été mise en œuvre depuis le début des années 1990. Depuis la loi de finances 2000, celle-ci est toutefois réservée aux seuls biocarburants produits dans des unités agréées par l'Etat. Les montants de défiscalisation sont ajustés chaque année pour tenir compte de l'évolution des conditions économiques, principalement le prix du baril de pétrole et celui des matières premières agricoles.

A titre d'exemple⁵ le montant global de l'exonération fiscale dont ont bénéficié les biocarburants pour l'année 2005 a été de 195,5 M€ ; de 340 M€ pour 2006 et la prévision pour 2007 est de 650 M€.

Montant de la défiscalisation en France

<i>C€I</i>	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
ETBE	50,23	50,23	50,23	38	38	38	33	33
Ethanol	0	0	0	0	37	37	33	33
EMHV	35,06	35,06	35,06	33	33	33	25	25
Pétrole brut (\$/bl)	29	24	25	29	38	54	65	-

Le montant de défiscalisation est déduit de la TIPP du carburant (essence pour l'ETBE et l'éthanol ; gazole pour biodiesel et EEHV). La TIPP sur l'essence est de 58,92 €/hl (et donc

⁴ Cette partie doit beaucoup à l'article de Ph. Guillard, de la DGEMP, dans la Revue des Ingénieurs des Mines-Mars/Avril 2007

⁵ Le calcul de la défiscalisation, et son acceptation par les Assemblées lors de la discussion de la loi de finances, sont un exercice difficile. Il est en effet difficile, pour les filières concernées, d'admettre que l'augmentation des prix du pétrole justifie une baisse assez sensible de la « subvention » qui leur est attribuée.

réduite à 25,92 €/hl pour les biocarburants) ; la TIPP sur le gazole est de 41,62 €/hl (et donc réduite à 16,62 €/hl pour le biodiesel).

Le second dispositif a été créé par la loi de finances de 2005 qui a introduit une nouvelle taxe, la TGAP (taxe générale sur les activités polluantes) s'appliquant aux entreprises distributrices de carburants. Elle renforce notablement l'incitation à consommer des biocarburants, puisque le système qui reposait sur le volontariat (seuls les distributeurs qui souhaitaient incorporer les biocarburants faisaient appel à la défiscalisation), évolue vers une quasi obligation : à partir de 2005, tous les distributeurs qui incorporent moins que le taux minimal légal doivent payer la nouvelle taxe. Cette dernière représente 450 M€ de pénalité fiscale par 1% non incorporé, et représente par conséquent une véritable incitation.

7. Les biocarburants en Allemagne

L'Allemagne a fait un autre choix, basé sur l'utilisation du biodiesel pur. Cinq installations importantes ont été construites entre 2001 et 2002, qui portent sa capacité totale de production à 730.000 tonnes, et lui donnent ainsi la place de premier producteur européen.

En Allemagne une taxe écologique a d'abord été mise en place en 2000 puis, de 2004 à 2006 la défiscalisation totale a été introduite pour les biocarburants (47 €/hl de diester pur). C'est cette défiscalisation qui a induit la croissance très importante du marché qui bénéficie alors d'un effet d'aubaine. Toutefois, depuis le 1^{er} janvier 2006 la gouvernement fédéral est revenu sur l'exonération totale, le biodiesel en mélange étant taxé au même niveau que le gazole (soit 32 €/hl en 2006 mais 0 €/hl à partir de 2007) ; le biodiesel pur bénéficiant cependant jusqu'en 2011 d'une moindre taxation.

Consommation de biodiesel en Allemagne

Tonnes(milliers)	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Capacité installée	140	200	460	730	1.100	1.100	2.300	2.700
Consommation	100	340	450	550	800	1.200	1.800	2.800

8... Quelques conclusions de ce chapitre

Le panorama des biocarburants de première génération qui vient d'être présenté montre d'abord que leur essor a été significatif, au moins en France et en Allemagne, et qu'il continuera à l'être. L'objectif que s'est fixée la France de 7,5% d'incorporation sera très vraisemblablement tenu, à la réserve près de la disponibilité des produits en 2010 (au pire nous y arriverons en 2011 ou 2012). On ne peut donc plus parler des biocarburants comme d'une filière marginale, même si elle reste très minoritaire. En revanche, il est certain que l'objectif européen de 5,75% en 2010 ne sera atteint dans quasiment aucun Etat membre (sauf Allemagne et France). Les 10% proposés en 2007 par la Commission Européenne à horizon 2020 ne sont par conséquent crédibles qu'en faisant très largement appel aux importations.

Il est alors intéressant de se reporter aux trois enjeux politiques énoncés en introduction de ce chapitre :

- Le soutien à la filière agricole
- La lutte contre l'effet de serre
- Le soutien au démarrage d'une nouvelle filière industrielle.

Savoir jusqu'à quel point ces politiques peuvent continuer à fonder le développement des biocarburants est l'objet essentiel de ce rapport, et il serait très prématuré de formuler une réponse. Le panorama de la première génération qui a été présenté permet néanmoins d'affiner le questionnement.

L'évolution de la filière agricole, et l'adaptation de la PAC à la « nouvelle donne » vont, très probablement, rendre plus difficile l'insertion des biocarburants dans l'utilisation des terres agricoles. Progressivement, les cultures énergétiques seront considérées comme des parties prenantes dans l'utilisation de ressources rares (les terres et l'eau), plutôt que comme des « supplétifs » aidant à résoudre le problème de la jachère.

Dans la lutte contre l'effet de serre, l'utilisation de la biomasse sera certainement un élément important. La compétition s'installera alors entre les diverses formes de bioénergie (chauffage et électricité) et la forme spécifique des biocarburants. Les tableaux de rendement (en énergie et en GES) qui ont été donnés montrent que, dans le cas de la première génération, les biocarburants ne sont pas nécessairement bien placés. Et que le bioéthanol l'est moins que le biodiesel. La question devra être posée pour la deuxième génération.

Concernant le démarrage de la filière, on a pu voir dans ce chapitre que le plan de 1985 avait porté ses fruits, et que la collaboration entre les différents acteurs (industriels, agriculteurs, Etat) avait été significative⁶. Ce qui n'a pas été creusé, par contre, c'est la position concurrentielle de la filière européenne dans le monde. Et son évolution, sur un marché dominé par les USA, le Brésil, et l'Asie du Sud-Est. Là aussi, la deuxième génération aura à répondre à des interrogations délicates.

⁶ On a pu noter l'importance prise par la défiscalisation, pour ce qui concerne l'Europe. Cette importance renvoie évidemment à la question de la position concurrentielle, non pas vis-à-vis du pétrole, mais vis-à-vis des biocarburants importés.

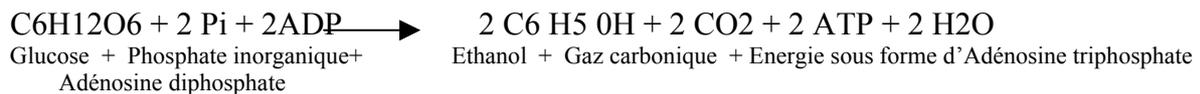
Chapitre 2

La production fermentative d'éthanol et la fabrication de l'ETBE

L'homme sait produire de l'éthanol depuis Noé, (Peut-être 3000 ans avant notre ère !!) et le lien entre sucre et alcool a été fait très tôt même s'il a fallu attendre Gay-Lussac et Pasteur pour en comprendre les mécanismes. Toutefois la production d'éthanol carburant, basée sur les mélasses d'abord, après la 1^{ère} guerre et les céréales ensuite, après la seconde, est relativement récente. La mise au point de technologies robustes permettant la conduite de procédés optimisés à grande échelle s'est véritablement développée depuis les années 1970. Dans tous les cas il s'est agi de trouver des matières premières riches en sucre facilement mobilisable. Le développement des technologies permet maintenant d'envisager l'extraction des sucres de la cellulose et des hémi-celluloses, des polymères végétaux universels ouvrant par là une source de matière première nouvelle pour l'industrie de la fermentation en général et celle de l'éthanol en particulier. Ce chapitre tente de faire le point sur l'état de l'art et les perspectives.

1. Les matières premières traditionnelles : les mélasses et les graines de céréales

Bien que des procédés de préparation de l'éthanol à partir de l'éthylène existent encore dans certaines unités, la très grande majorité des usines de production dans le monde emploient aujourd'hui des procédés biologiques utilisant la levure de bière *Saccharomyces cerevisiae*. La stœchiométrie est basée sur la réaction de Gay-Lussac :



En plus de ces produits majeurs de la réaction, Pasteur a démontré que la fermentation anaérobie conduit aussi à la production de co-produits, essentiellement le glycérol (3%), et des acides organiques dont l'acide succinique (0,5%) et les huiles de fusel (0,5-0,8%). En tenant compte de ces pertes, le rendement maximal, dit rendement de Pasteur, correspond à 48,4 g d'éthanol à partir de 100 g de glucose, soit 94,7% du rendement théorique.

En industriel le rendement de production d'éthanol est généralement compris entre 90 et 92% du rendement théorique.

L'énergie produite est utilisée pour une faible partie par le métabolisme endogène de la levure, la majeure partie étant libérée dans le milieu sous forme de chaleur. Le CO₂ peut-être récupéré mais ceci n'est économiquement viable et pratiquement réalisé que dans les très grosses installations. La fermentation industrielle est menée à 32-35 °C. La levure est souvent achetée chez un producteur spécialisé et est ensuite propagée localement sur l'usine dans de petites cuves de fermentation.

Le glucose provient soit du saccharose des plantes sucrières ou de la dégradation de l'amidon des plantes amylacées. L'éthanol ainsi produit est ensuite distillé et éventuellement déshydraté.

2. La fermentation du saccharose

Le saccharose, un dimère de glucose et de fructose qui se trouve sous forme libre dans la betterave ou la canne à sucre, est récupéré à l'état soluble dans le « jus » extrait de la racine ou de la canne sous forme de « mélasses » ou d'«égouts de 1^{er} ou second jet », qui sont dans les deux cas des étapes intermédiaires du procédé de production du sucre cristallisé. En fonction du cours du sucre sur le marché, il est facile d'arbitrer soit vers le sucre soit vers l'éthanol, en extrayant plus ou moins de saccharose des solutions.

Ces solutions sucrées sont utilisées directement pour la fermentation, la levure étant capable d'hydrolyser par elle même le saccharose dans ses deux composants : glucose et fructose⁷.

Les mélasses sont vendues sur le marché mondial. Elles sont employées comme substrat de fermentation par l'industrie biochimique de la fermentation (acides aminés, vitamines, chimie verte dont l'industrie de l'alcool) et en alimentation animale.

Compte tenu de la production de betterave à l'hectare et de la quantité de sucre récupérable sous forme d'éthanol, cette technologie permet la production d'environ 3,3 à 3,5Tep/ha

Composition des mélasses de canne et de betterave (en % MS)

	Canne	Betterave
Sucres totaux	45-55	48-52
Saccharose	25-35	46-52
Potassium	1.5-5.0	2.0-7.0
Calcium	0.4-0.8	0.1-0.5

3. Wet et dry milling

Dans le cas des graines de céréales, deux procédés ont été développés et sont utilisés : dans les deux cas, il s'agit d'hydrolyser l'amidon, le polymère de réserve présent dans les graines⁸.

Dans le « wet milling » les graines sont préalablement moulues en farine, les composants de cette farine, amidon, protéine et huile étant ensuite séparés. Les grains d'amidon sont ensuite « liquéfiés » et hydrolysés. Cette étape d'hydrolyse, autrefois obtenue par addition d'acide et chauffage, est aujourd'hui réalisée par l'addition d'enzymes spécifiques : l'alpha amylase qui coupe à l'intérieur de la chaîne d'amidon (on parle d'endo-enzyme) et la glucoamylase qui libère un à un les molécules de glucose (on parle d'exo-enzyme). Cette paire d'enzymes jouent le rôle de catalyseurs biologiques fonctionnant dans des conditions de pH proches de la

⁷ Le fructose, un isomère du glucose est aussi directement fermentescible. En plus du sucre, ces solutions contiennent des sels, principalement du potassium et du calcium, des vitamines et des métaux (ppm). Ces composants secondaires des mélasses ne sont pas utilisés dans la réaction et se retrouvent avec la levure en fin de fermentation dans les sous-produits (vinasses). Ces vinasses sont utilisées en alimentation animale. La fermentation est menée « en batch », la cuve de fermentation devant être vidée entre deux opérations.

⁸ L'amidon est un homopolymère composé de chaînes de molécules de glucose liées entre elles par des liaisons alpha 1-6 ou alpha 1-4. Ces chaînes sont localisées au sein de granules de taille variable selon les types de plantes.

neutralité et à des températures moins élevées que les conditions chimiques utilisées autrefois. Les conditions d'utilisation des enzymes sont définies de façon très précises et varient selon le types de grains utilisés. Le glucose libéré sous forme soluble est ensuite utilisé dans l'étape de fermentation.

Le fait que ces solutions sucrées soient relativement pures permet une fermentation pratiquement continue, l'éthanol étant extrait au fur et à mesure de sa production et de la levure fraîche rajoutée. Après la distillation de l'alcool, restent dans le milieu essentiellement la levure et quelques co-produits de la fermentation : du glycérol et quelques acides organiques. L'ensemble, après concentration, est vendu pour l'alimentation animale.

Là aussi la production d'éthanol peut être arbitrée, les sirops de glucose ayant leur propre valorisation sur le marché. A l'inverse des mélasses, les sirops de glucose voyagent mal, le glucose devant être maintenu en solution chaude au risque de cristalliser. La protéine, l'huile et les co-produits de l'étape de meunerie sont tous valorisés séparément en alimentation humaine ou animale.

Dans l'autre procédé, le «dry milling», les graines sont broyées succinctement et l'hydrolyse enzymatique effectuée directement en rajoutant dans le réacteur les mêmes enzymes que dans le cas du «wet milling». Le glucose libéré est fermenté en éthanol et le co-produit restant après la distillation, les drèches riches en protéine ou DDGS (en anglais = distillers dried grain with solubles), est vendu sous forme semi-sèche ou sous forme séchée pour l'alimentation animale. Ce procédé ne produit donc que de l'éthanol et des drèches.

La production d'éthanol par le procédé du «wet milling» nécessite des installations lourdes et est toujours associée à une production d'amidon et de sirops de glucose, produits qui disposent de leurs propres marchés. Typiquement une amidonnerie moderne traite au moins 1 million de tonnes de graines par an, l'éthanol ne représentant qu'un produit parmi des dizaines d'autres.

Le procédé «dry milling» est beaucoup moins lourd en investissements. Il est indépendant de la production de sirops de glucose et spécifique de la production d'éthanol. C'est le procédé aujourd'hui le plus souvent mis en oeuvre dans les distilleries récemment construites.

Une distillerie moderne a une capacité entre 100.000 et 250.000 hl l'éthanol par an (USDA, 2002). Ses coûts de production, hors matière première, sont en moyenne de 12,5 cts \$/litre repartis entre l'énergie (50%), le personnel (16%), la maintenance (10%) et les coûts administratifs (24%). Les coûts d'investissement sont de 0,5 \$/litre d'éthanol pour une installation de type «dry mill» de cette capacité.

La distillerie consomme de l'ordre de 2.2 Kwh d'énergie thermique et environ 0,25 kWh/ d'électricité, par litre d'éthanol produit. Le rendement moyen est de 330 litres d'éthanol/tonne de grain de maïs.

Compte tenu du rendement à l'hectare, ceci correspond à environ 1,6 Tep/ha

Ces deux procédés sont donc basés sur l'utilisation d'enzymes⁹. La production d'éthanol est donc très largement dépendante de la disponibilité d'enzymes commerciales de bonne qualité et accessible à un coût relativement faible.

L'industrie de la fabrication d'enzymes est une industrie très concentrée, les deux leaders, Novozymes, société danoise, et Genencor, société américaine mais appartenant au groupe danois Danisco, couvrant à elles deux 80% du marché mondial. Avec les enzymes utilisées dans les lessives, les enzymes hydrolytiques de l'amidon représentent une part importante du marché des enzymes industrielles.

Le savoir faire et les deux verrous de propriété intellectuelle rappelés plus haut créent de fait des barrières d'entrée qui rendent très difficile l'arrivée de nouveaux venus sur le marché.

4. Ethanol et ETBE, carburants

L'éthanol dispose de propriétés physiques et chimiques intéressantes pour l'alimentation des moteurs à combustion :

- un indice d'octane très élevé qui apporte une grande résistance au cliquetis ;
- une densité proche de celle des essences ;
- la présence d'oxygène qui favorise la combustion des hydrocarbures non brûlés ;
- une chaleur latente de vaporisation élevée qui améliore l'efficacité du remplissage de la chambre de combustion.

Du côté des inconvénients il convient de noter :

- un contenu énergétique plus faible que celui des essences et donc une consommation de carburant plus élevée ;
- la possibilité de difficultés au démarrage à froid, particulièrement dans les climats froids, due à la chaleur latente de vaporisation ;
- une augmentation de la pression de vapeur du fait de la formation d'azéotropes avec les hydrocarbures légers ;
 - une certaine instabilité des mélanges avec les hydrocarbures due à la miscibilité de l'éthanol avec l'eau ;
 - la nécessité d'emploi de certains métaux et polymères capables de résister à la corrosion entraînée par la présence de traces d'acide acétique dans l'éthanol pour les réservoirs et la tuyauterie.
 - La production de traces d'aldéhyde qui peuvent avoir des impacts négatifs pour la santé.

⁹ Les enzymes sont des protéines, produites par les cellules vivantes et sont les catalyseurs des réactions biologiques. Autrefois souvent extraites de tissus végétaux ou animaux, les enzymes sont aujourd'hui essentiellement produites par des micro-organismes spécialement sélectionnés et cultivés dans des grandes cuves de fermentation en utilisant le glucose comme substrat. La possibilité ouverte par la biologie moléculaire de cloner les gènes codant pour ces enzymes a permis dans les dix dernières années le lancement de programmes d'amélioration de leur efficacité. Au delà du savoir-faire lié à leur fabrication, ces enzymes biologiques remaniées par la main de l'homme sont évidemment brevetables du fait de la nouveauté de leur structure mais aussi pour leurs caractéristiques d'utilisation.

Introduite à des taux de 5 à 10% dans les essences (carburants E5 et E10) la plupart de ces inconvénients sont très limité tout en conservant des avantages substantiels.

Intégrée à des taux plus important (E85) il convient d'apporter des réglages particuliers au moteur ;

L'industrie automobile a développé il y a quelques années des moteurs capables d'être alimentés indifféremment avec du E85 ou de l'essence pure tout en respectant les règlements en terme d'émission de polluants, la solution FFV (Fuel flexible vehicles). Cette solution permet d'alimenter les véhicules avec des mélanges contenant des taux variés d'éthanol dans l'essence et sont donc bien adaptés à la situation actuelles des pays où la distribution d'éthanol n'est pas encore établie de façon généralisée.

Les limites signalées plus haut dans l'emploi des mélanges à faible teneur en éthanol ont conduit, dans les années 1980, à l'addition d'ethers dans les essences. 5 types d'ethers sont utilisés dans la fabrication du pool essence, dont le plus important était le MTBE (methyl tetra butene ester) principalement développé aux Etats Unis. Cet additif a été interdit en Californie au début des année 1990, principalement en réponse à sa très lente biodégradabilité. L'ETBE (ethyl tetra butène ether) est également banni aux etats Unis mais est autorisé dans le reste du monde et principalement dans les pays membres de la Communauté Européenne.

L'ETBE est synthétisé par réaction de l'isobutène, lui-même produit à partir du propylène ou du butane, avec de l'éthanol d'origine exclusivement agricole. La réaction est catalysée par les acides, en pratique les résines échangeuses d'ions sous forme acide. Pour optimiser la durée de vie de ces catalyseurs la réaction est menée à 80 °C. La présence d'environ 1% d'éthanol n'ayant pas réagi au cours de la réaction et de composants mineurs dans l'éthanol utilisé entraîne la nécessité d'une purification de l'ETBE avant son incorporation dans l'essence.

Contrairement à l'utilisation directe de l'éthanol dans les essences, l'utilisation sous forme d'ETBE ne pose aucun problème. L'ETBE est un excellent composant des essences qui présente par rapport à l'éthanol l'avantage d'une tension de vapeur favorable et une parfaite miscibilité avec les autres composants tout en présentant l'avantage de convertir l'isobutène en essence.

Chapitre 3*

La filière de production de Biodiesel à partir d'huiles végétales

I – Introduction

Quelle est la raison qui a conduit à transformer une huile végétale en un ester méthylique ou éthylique dans le cadre d'une utilisation carburant, alors que depuis le début du siècle dernier, Monsieur Rudolf Diesel lui-même avait expérimenté avec succès l'emploi direct d'huile d'arachide dans son moteur ?

C'est d'une part, parce qu' on a aujourd'hui obligation de répondre à certaines normes et spécifications sur les carburants et sur les émissions de polluants à l'échappement, et d'autre part parce qu'avec l'arrivée des nouvelles technologies moteurs, à mode d'injection haute pression, du type Common Rail, le moindre écart concernant les propriétés physiques du carburant se répercute sur le bon fonctionnement des moteurs.

Ce qui était possible hier sur des poids lourds et tracteurs agricoles équipés de moteurs à préchambres ne l'est plus aujourd'hui avec les nouvelles générations de véhicules (VL, PL, et véhicules agricoles) qui sont de plus en plus équipés de ces nouvelles technologies moteurs.

Les principaux risques encourus en utilisant une huile végétale pure ou en mélange sont : un dérèglement du calage du moteur (faible indice de cétane), d'importants dépôts au niveau des injecteurs, et à terme un gommage des pistons, sans compter sur une forte pollution des gaz d'échappement (CO, imbrûlés, particules, HAP⁽¹⁰⁾...). Tous ces facteurs concourent à l'emploi des EMHV afin d'éviter tout désagrément lors de l'utilisation de Biodiesel comme carburant.

tableau 1: Propriétés physiques comparées entre une huile, un ester et du gazole

Propriétés	Huile de Colza	esters méthyliques de colza	Gazole
Densité spécifique (Kg/m ³)	920	880 - 885	0,820 - 0,860
Viscosité à 40°C (mm ² /s)	30,2	4,5	2 - 4,5
Point Éclair (°C)	décomposition > 320	170 - 180	≥ 100
Indice de Cétane	35	51	> 50
pouvoir calorifique inférieur (KJ/kg)	37700	39960	42400

Les propriétés physiques des esters méthyliques d'acides gras sont très proches de celles d'un gazole (viscosité, indice de cétane, densité, PCI *massique*, ...), ce qui autorise sans risque leur utilisation dans tous les types de moteurs Diesel pour des mélanges allant jusqu'à 30% volume d'EMHV⁽¹¹⁾ dans le gazole. Au delà et jusqu'à 100% il faut équiper les véhicules de matériaux et de joints compatibles aux esters. Les constructeurs Volkswagen et Mercedes proposent ainsi une gamme de véhicules pouvant fonctionner au Biodiesel pur.

¹⁰ HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

¹¹ EMHV : Esters Méthyliques d'Huiles Végétales

* cette partie a été rédigée par Gérard Hillion, ingénieur de recherche senior à l'IFP

En France la banalisation à la pompe a été adoptée et on trouve actuellement des taux de mélange d'EMHV dans le gazole variant de 2 à 5% suivant les distributeurs de produits pétroliers. Après plus de 12 ans d'expérimentation au niveau national, le DIESTER⁽³⁾ incorporé au gazole a démontré d'excellentes propriétés d'un point de vue carburant. En 1999, il a été démontré qu'il pouvait également être un excellent additif de lubrification des organes d'injection des moteurs Diesel. En effet, l'évolution des spécifications des gazoles visant à réduire leur teneur en soufre à moins de 10 ppm a fait apparaître une diminution des propriétés anti-usures du gazole qui était initialement apportées par la présence des composés soufrés. Les pétroliers et les motoristes ont accueilli avec intérêt l'incorporation des esters d'huiles dans ces nouveaux gazoles, ce qui compense efficacement les pertes de lubrification des nouveaux gazoles, pour un taux d'incorporation en EMHV d'au minimum 2% volume.^(1b)

Les expérimentations en mélange à 30% sont principalement réalisées sur des flottes captives par des sociétés ou des municipalités qui font partie du Club des villes DIESTER⁽⁴⁾. Cette association gère la logistique de la distribution de ce mélange et le suivi technique de plus de 4000 véhicules en visant une diminution de l'ordre de 23% des émissions globales de CO₂ (source Proléa).

Toutes ces conditions d'utilisation ont abouti à la définition progressive de spécifications des esters qui sont désormais celles à obtenir pour que la garantie des constructeurs de véhicules soit maintenue avec les mélanges de gazole et d'ester. La tenue de ces spécifications impacte évidemment les procédés de fabrication.

Le processus de transformation d'une huile en ester est connu depuis plus d'un siècle. Cette réaction, appelée aussi méthanolyse, fait appel à la réaction de transestérification d'un triglycéride par le méthanol. Jusque dans les années 1980, quelques procédés de production d'esters à usages chimiques étaient opérés par les grands acteurs de la lipochimie. Cognis, par exemple, utilisait la catalyse homogène et distillait sous vide les esters obtenus. Dans le cas des esters carburants dont la pureté en esters est au minimum 97,5%, l'étape de distillation a été supprimée de façon à minimiser le coût de production.

Plusieurs procédés de fabrication d'EMHV ont été développés en Europe au cours des années 80 jusqu'à l'échelle industrielle pour produire des esters méthyliques d'huile de colza et/ou de tournesol.

Aujourd'hui 2 types de procédés sont utilisés à des fins commerciales : Le premier type regroupe l'ensemble des procédés utilisant des catalyseurs basiques solubles non recyclables (soude, potasse, méthylate de sodium et carbonates alcalins) ; le second utilise une technologie innovante par le biais d'un catalyseur hétérogène.

En France, la première unité de production d'esters carburant, utilisant un procédé du premier type a été construite en 1992 sur le site de Compiègne sous licence IFP et est opérationnelle depuis 1993. Le nouveau procédé à catalyse hétérogène, mis au point également par l'IFP, a démarré à Sète en mars 2006, puis à Perstorp en Suède en octobre 2007. Depuis 6 autres unités ont été commandées de part le monde.

³ DIESTER : marque déposée qui est la contraction des mots DIESel et esTER)

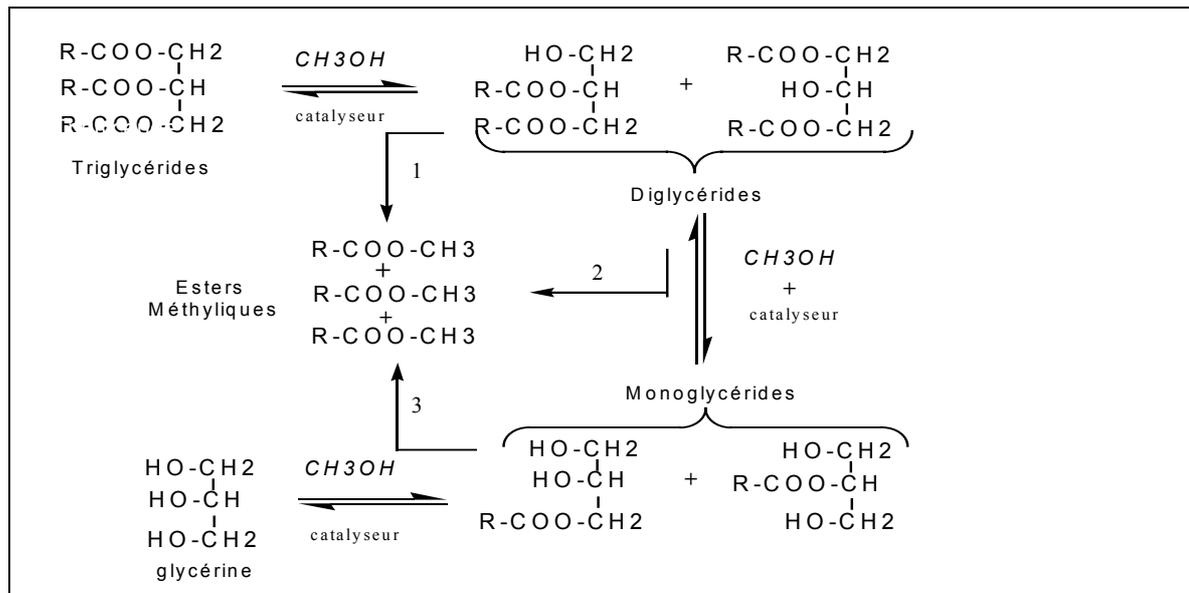
⁴ Créé en 1994 le "Club des Villes Diester" s'appelle "**Partenaires Diester**" depuis 2003. Il comptait 45 adhérents à la fin janvier 2007.

II - Les procédés de méthanolyse des huiles végétales

1 – La réaction de transestérification

La formation d'esters méthyliques passe par la réaction de transestérification de triglycérides (huiles végétales ou graisses animales) avec du méthanol selon le schéma suivant :

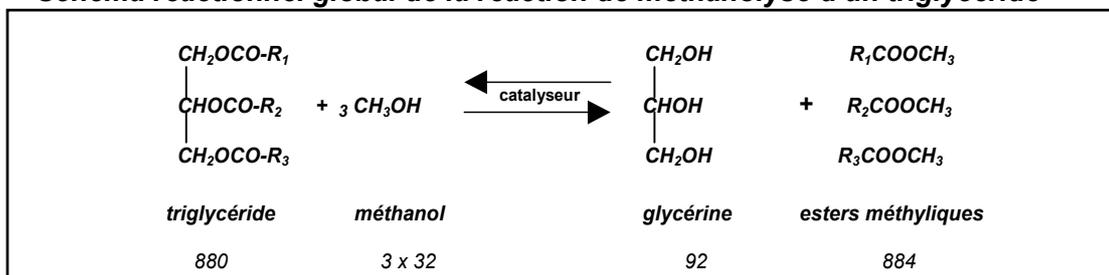
Schéma réactionnel de la transestérification d'un triglycéride par le méthanol



C'est une réaction équilibrée qui a besoin d'être catalysée. Contrairement à l'estérification, réaction que l'on confond souvent et qui est la combinaison d'un alcool avec un acide, la transestérification consiste à substituer l'alcool d'un ester par un autre alcool. Dans le cas d'un triglycéride, qui est un tri ester d'acides gras de la glycérine, cette dernière qui est un polyol (3 fonctions alcool) est remplacée par 3 molécules de méthanol.

Au vu du précédent schéma, on constate que c'est seulement après trois réactions consécutives que la molécule de glycérine est libérée.

Schéma réactionnel global de la réaction de méthanolyse d'un triglycéride



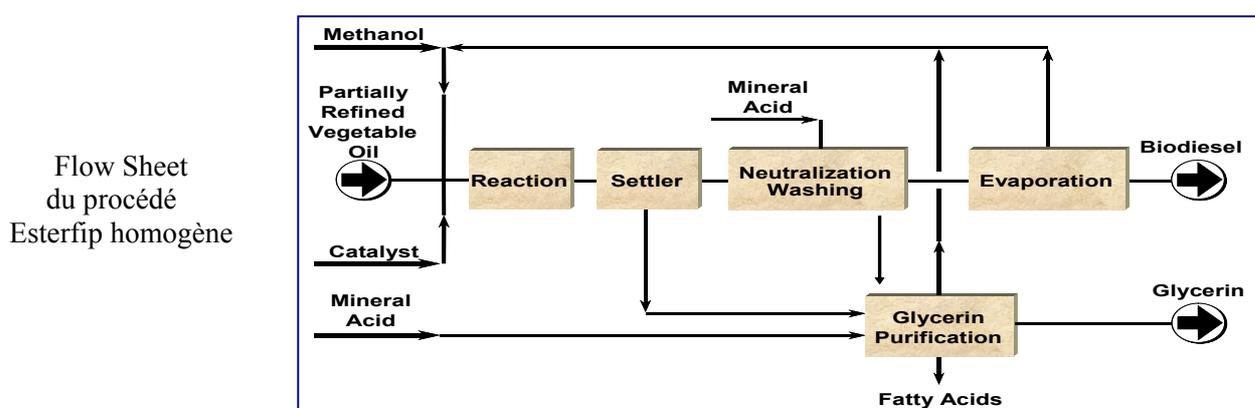
2 - Procédé utilisant la catalyse homogène

Les catalyseurs les plus couramment utilisés sont la soude ou le méthylate de sodium en solution dans le méthanol^(2b). Cette réaction étant chimiquement équilibrée, un excès de méthanol est nécessaire pour obtenir, en une seule étape, une conversion élevée.

La faible solubilité de la glycérine formée au cours de la réaction favorise également le déplacement de cet équilibre.

C'est entre 60 et 80°C que cette catalyse donne les meilleures performances avec un rapport pondéral méthanol/huile compris entre 15 et 30%. Le temps de réaction est de l'ordre de 60 minutes et la séparation de la glycérine est facilement obtenue par simple décantation. Cette glycérine contient essentiellement du méthanol et près de 90 % du catalyseur engagé. Elle est purifiée ultérieurement en y associant les eaux de lavage de la phase ester qui contient principalement du méthanol et des traces de catalyseur et de glycérine. L'ester est purifié par 2 à 3 étapes de lavages à l'eau pure ou acidulée et est ensuite séché sous pression réduite pour éliminer l'eau résiduelle et les dernières traces de méthanol.

Le procédé licencié par IFP suivant ce schéma réactionnel et mis en oeuvre sur l'unité de Compiègne depuis 1993, fonctionne en semi continu. La réaction de méthanolyse, de traitement des eaux glycérineuses et les étapes de lavage sont opérées en "Batch" tandis que toutes les étapes d'évaporations sont opérées en continu.



source : Axens

Une variante de ce procédé pour des capacités en EMHV excédant 100 000t/an peut être proposée en opérant toutes les étapes unitaires en continu.

La partie réactionnelle comprend alors 3 réacteurs agités (en cascade) fonctionnant par débordement. Le temps de séjour et le catalyseur sont ajustés de façon à obtenir les spécifications demandées aux EMHV (Normes CEN 14214).

La phase ester est ensuite purifiée par des étapes de lavage s'effectuant à contre courant. Il est possible d'y associer une étape d'élimination poussée des traces de sodium par un traitement sur résines échangeuses d'ions. L'ultime étape du procédé étant le séchage du biodiesel obtenu.

Les principaux poisons de cette réaction sont l'acidité libre contenu dans l'huile et la teneur en eau des charges (huile et méthanol). Ils ont comme impact direct une surconsommation de catalyseur. Les acides gras neutralisent immédiatement l'alcoolate et l'eau provoque dans un premier temps une hydrolyse de l'huile qui libère de l'acide gras qui à son tour neutralise le catalyseur.

Cette consommation de catalyseur se traduit par une formation de savons de sodium qui représentent la principale perte de rendement. Ces savons se retrouvent dans la glycérine et les eaux de lavage, puis après neutralisation de ces effluents par un acide minéral fort, ils sont transformés en acides gras.

Deux solutions s'offrent à nous pour les retransformer en esters, soit une estérification par le méthanol par catalyse acide, soit en réalisant une glycérolyse^(3b) en utilisant une partie de la

^{1b} - Hillion. G., Montagne .X., Marchand .P., (1999). Les esters méthyliques d'huiles végétales : additif ou biocarburant ? OCL Vol. 6, n° 5, septembre/octobre, 435-438.

^{2b} - Kreutzer .U., J. Amer. Oil. Chem. Soc., (1984), 61, p.343

glycérine basique issue du procédé. Cette réaction qui n'utilise que des produits circulant dans le procédé à lieu à une température $> 180^{\circ}\text{C}$. En mélangeant dans des proportions adéquates les acides gras récupérés avec de la glycérine basique (les savons de sodium quelle contient jouant le rôle de catalyseur) et après élimination en continu de l'eau formée, on obtient un mélange de mono, di et triglycérides qui peut être réintroduit dans le procédé pour y être de nouveau transestérifié et transformés en esters.

Inclure ces traitements dans le procédé de méthanolyse est une solution pour obtenir des rendements approchant les 100%.

3 - Procédé utilisant la catalyse hétérogène

De nombreuses équipes de part le monde travaillent depuis plusieurs années sur la fixation et /ou le greffage de catalyseurs acides ou basiques permettant de fonctionner en catalyse hétérogène^(4b-5b). Si les résultats à ce jour sont encourageants, on constate dans la majorité des cas, soit un problème de stabilité dans le temps, soit un phénomène d'éluion lente du métal déposé qui pollue l'EMHV produit^(6b) ce qui rend difficilement transposable cette technologie au stade industriel.

Certains oxydes métalliques comme par exemple le Zn, Sn, Mg, Ti, Pb, etc....sont connus comme étant de très bon candidats pour promouvoir la réaction de méthanolyse des triglycérides, mais on observe également avec ce type de catalyseurs une lente solubilisation du métal sous la forme de savons métalliques solubles^(7b-8b).

C'est en 1996 que l'IFP a mis au point et breveté un catalyseur hétérogène^(9b) composé d'alumine et d'oxyde de zinc constituant un spinelle (oxyde mixte) ce qui permet de stabiliser l'oxyde de zinc et d'effectuer ainsi la réaction de transestérification sans perte de métal dans les produits.

Avant de réaliser le développement d'un procédé fonctionnant par catalyse hétérogène, ce catalyseur a fait l'objet d'une expérimentation pilote sur près de 12 mois sans perte d'activité.

Le schéma 2 décrit le procédé Esterfip hétérogène fonctionnant en continu.

Pour parvenir à la qualité biodiesel, deux étapes de catalyse sont nécessaires. Deux réacteurs cylindriques de capacité identique, contenant un lit fixe de catalyseur sous forme d'extrudés sont nécessaires. La circulation des fluides est dite Up-Flow, ce type de circulation par effet piston favorise un contact optimum de la charge sur les grains de catalyseur. Le rapport pondéral méthanol / huile est compris entre 70 et 110% avec une V.V.H. (Vol huile/Vol cata/Heure) allant de 0,35 à 1 h⁻¹. La température de catalyse est comprise entre 170 et 210°C. Avec un tel excès de méthanol, la pression de service est fonction de la température et peut atteindre les 60 bar, à cette pression, on est assuré que le réacteur est bien opéré en mode monophasique liquide.

Afin de déplacer l'équilibre de la réaction de transestérification et avant d'effectuer la deuxième étape de réaction, il est nécessaire d'éliminer la plus grande partie de la glycérine formée en première étape. Pour ce faire il faut diminuer fortement la proportion de méthanol du mélange réactionnel. En effet le méthanol joue le rôle de co-solubilisant des phases ester et glycérine. Une étape de détente en sortie du Réacteur 1 permet, par vaporisation, d'atteindre une faible teneur résiduelle en méthanol dans le mélange, une simple décantation statique permet alors d'éliminer la majorité du glycérol.

3^b - Hillion. G., Proriol. D., (2003), Glycerolysis of free fatty acids, 25th World Congress and Exhibition of the ISF, Bordeaux.

4^b - Vielfaure-Joly. F., Thèse de doctorat (UCG Lyon I), 1997

5^b - Gelbard. G., Brès. O., Vielfaure-Joly. F., and Coll., ., *J. Amer. Oil. Chem. Soc.*, (1995), 72, p.1239

6^b - Huoang. L.C., Barrault. J., Brunet. R., Desbordes. P., brevet français - 2 698 101., 1992

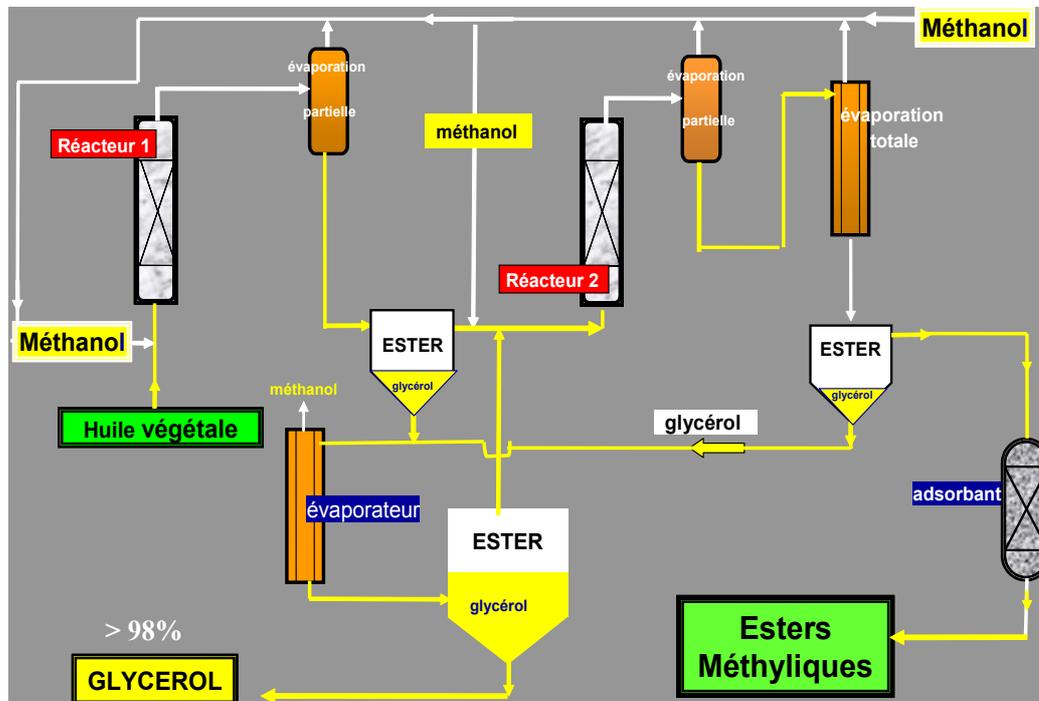
7^b - Société Belge de l'azote et des produits chimiques du Marly, brevet GB-A-795 573, 1956

8^b - Osman., *Fette Seifen und antstrichmittel*, 1968, p.331

9^b - Stern. R., Hillion. G., Rouxel. J.J., Leporq. S., brevet français - 2 752 242, 1996

La phase ester surnageante peut être alors envoyée dans le réacteur 2 avec un appoint de méthanol frais. Ce deuxième réacteur fonctionnant dans les mêmes conditions opératoires que le premier.

Schéma 2 - Schéma de principe du procédé Esterfip Hétérogène



Afin de déplacer l'équilibre de la réaction de transestérification et avant d'effectuer la deuxième étape de réaction, il est nécessaire d'éliminer la plus grande partie de la glycérine formée en première étape. Pour ce faire il faut diminuer fortement la proportion de méthanol du mélange réactionnel. En effet, le méthanol joue le rôle de co-solubilisant des phases esters et glycérine. Une étape de détente en sortie du Réacteur 1 permet par vaporisation d'atteindre une faible teneur résiduelle en méthanol. Une simple décantation statique permet alors d'éliminer la majorité du glycérol.

La phase ester surnageante peut être alors envoyée dans le réacteur 2 avec un appoint de méthanol frais. Ce deuxième réacteur fonctionne dans les mêmes conditions opératoires que le premier.

Les éléments métalliques du catalyseur étant totalement insolubles dans le milieu réactionnel (principe de la catalyse hétérogène), la purification de l'ester obtenu se limite essentiellement à une évaporation poussée des traces de méthanol et d'une étape d'adsorption physique de la glycérine résiduelle restant soluble dans la phase ester, de façon à répondre aux spécifications demandées à un ester carburant.

Concernant la glycérine produite, sa pureté est exceptionnelle au vu des procédés classiques de production de biodiesel avec un titre dépassant les 98% de pureté et peut être améliorée en

qualité couleur par un traitement adapté sur charbon actif. Ce type de post traitement permet d'obtenir un grade ouvrant à l'utilisation de cette glycérine comme synthon dans certaines synthèses chimiques (exemples: base pour peintures glycérophtaliques, polyol pour mousses polyuréthanes,...).

4 – Comparaison des procédés de catalyse homogène et hétérogène de l'IFP

Plusieurs avantages sont à mettre au crédit du procédé utilisant la catalyse hétérogène et notamment le respect de l'environnement. Ce procédé innovant répond aux nouveaux concepts de la "chimie verte", car la pureté des produits et les rendements élevés, conduisent à une disparition quasi complète de rejets polluants. De plus l'absence de sels dans les produits de réaction, contrairement à la catalyse homogène, simplifient toutes les étapes de traitements des produits de réaction aussi bien l'ester dont la purification ne nécessite plus d'étapes de lavage et surtout la glycérine qui, dans certaines applications industrielles, peut être valorisée directement sans distillation.

Ce tableau rend compte des avantages (+) et désavantages (-) des 2 procédés.

Homogène	Hétérogène
<ul style="list-style-type: none"> - Rendement max, 99.3% - Qualité de la glycérine - Étapes de séparation et purification plus complexes - effluents aqueux et sels de Na - Consommable (acide minéral) + Conditions douces de T & P + Faible ratio MeOH/huile 	<ul style="list-style-type: none"> + Rendement > 99.8% + Qualité de la glycérine + Étapes de séparation et purification plus simples + Pas de déchet + pas de consommable + Pas de consommation de cata → "Green Process" - Conditions de T & P plus sévères - Ratio MeOH/huile élevé

Les points faibles que l'on peut mentionner sont les conditions opératoires plus sévères: température, pression et fort excès de méthanol ce qui engendre un surcoût énergétique, qui peut toutefois être partiellement amorti par un meilleur rendement massique et une pureté accrue des produits fabriqués, donc mieux valorisés.

On peut également noter que le poste "coût catalytique" devient très compétitif si la durée de vie du catalyseur dépasse 12 à 14 mois de fonctionnement, performances qui ont pu être facilement atteintes au stade pilote et récemment sur la première unité industrielle de Sète.

III - Les procédés d'éthanolisation des huiles végétales

En théorie, remplacer le méthanol par l'éthanol dans la réaction de transestérification des huiles végétales ne devrait pas poser de problèmes particuliers, sauf que l'éthanol possède un bien meilleur pouvoir solvant que le méthanol, ce qui a pour conséquence de rendre soluble la glycérine formée au cours de la réaction. L'équilibre de la réaction s'en trouve donc déplacé, ce qui pénalise la conversion en esters en empêchant d'obtenir en une seule étape de catalyse une conversion suffisante pour répondre à la spécification d'un biodiesel.

Pour mémoire, avec un poids moléculaire de 46g contre 32g pour le méthanol, l'éthanol permet d'obtenir en théorie si l'on part de 100g d'huile contenant 100% de triglycérides 105,22g d'esters éthyliques, contre 100,45g d'esters en utilisant le méthanol.

Pour obtenir les meilleurs performances tant sur la réactivité de la catalyse que sur la consommation de catalyseur et sur les rendements, la teneur en eau de l'éthanol ne doit pas excéder les 1500 ppm.

1 – Procédé d'éthanolise par catalyse homogène

Si l'on conserve les conditions opératoires de la méthanolise, température, temps de réaction, et quantité molaire en réactifs et catalyseur, on constate que le mélange réactionnel final est totalement homogène.

L'analyse du produit de réaction donne une conversion en esters éthyliques de l'ordre de 93% alors que pour la méthanolise c'est un minimum de 97,5% d'esters méthyliques qui est obtenu.

Une deuxième étape de catalyse est alors nécessaire, mais auparavant, il est indispensable d'éliminer la plus grande partie de la glycérine et cela peut être réalisé qu'après une évaporation partielle de l'excès d'éthanol. Cette opération est toutefois délicate car en présence de catalyseur et dans certaines conditions, la réaction inverse qui redonne des mono et diglycérides peut avoir lieu au détriment de la teneur en esters éthyliques.

Opérer une deuxième étape de catalyse implique aussi une surconsommation de catalyseur et d'alcool.

Contrairement au méthanol qui ne forme pas d'azéotrope avec l'eau, avec l'éthanol on doit tenir compte du séchage poussé de l'alcool recyclé, ce qui grève le coup opératoire du procédé (séchage sur tamis ou sur membranes).

Les rendements massiques obtenus après les deux étapes de catalyse en utilisant de l'éthylate de sodium comme catalyseur ont du mal à atteindre les 97% par rapport à la théorie, contre 99,3% pour la méthanolise. Dans le cas où on utilise comme catalyseur une solution de soude dans l'éthanol, c'est un rendement de l'ordre de 93% massique qui est obtenu.

Toutes ces contraintes techniques, les investissements, le coût opératoire, les rendements inférieurs, ainsi qu'une productivité réduite, font que les procédés d'éthanolise ne sont pratiquement pas proposés par les bailleurs de licences présents actuellement sur le marché.

A ce jour, la seule unité industrielle de production d'esters éthyliques qui doit être prochainement mise en service en France est située en Charente Poitou et est opérée par "SICA Atlantique". Elle utilise le procédé "MULTIVAL" de Valagro. Sa capacité de production sera comprise entre 10 et 60 000t/an d'esters éthyliques.

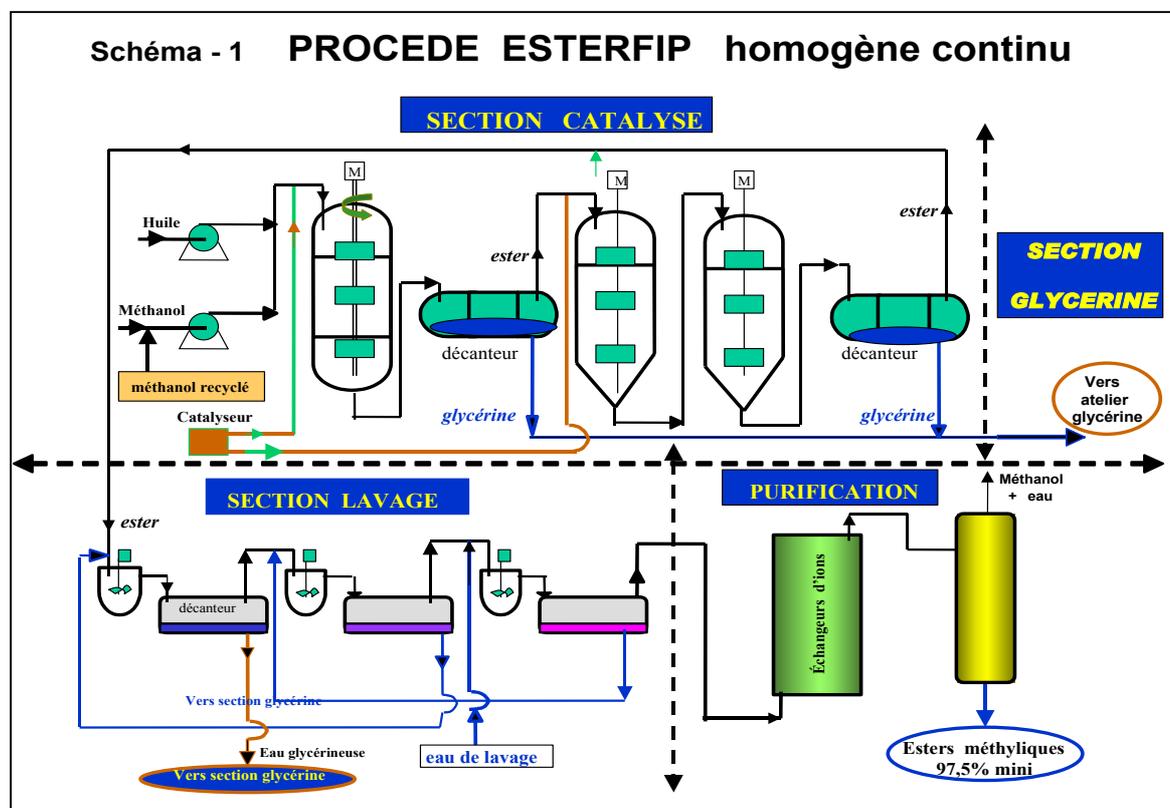
Les rendements industriels sont difficiles d'obtenir à ce jour pour ce type de technologie qui réalise en une seule opération à la fois l'extraction de l'huile et la transestérification.

2 – Procédé d'éthanolise par catalyse hétérogène

L'avantage incontestable de la catalyse hétérogène réside en ce que l'on peut remplacer une huile par une autre ou le méthanol par l'éthanol en conservant le même principe de fonctionnement. Dans tous les cas étudiés, les rendements sont proches de la valeur théorique, puisqu'il n'y a pas consommation de chaînes grasses par le catalyseur dû à la formation de savons.

D'autre part et contrairement à la catalyse homogène, l'élimination d'une partie de l'excès d'éthanol ne risque pas de provoquer une rétro réaction, puisque cette évaporation est réalisée en dehors du lit catalytique.

La réactivité de l'éthanol étant moindre dans le cas du procédé "Esterfip-H" d'IFP-Axens, il faut compenser cette perte d'activité par une augmentation du temps de séjour sur le lit catalytique ce qui se traduit par une baisse de productivité de l'ordre de 30 à 35%.



IV - Matières premières les mieux adaptées à une utilisation biodiesel

La réaction de transestérification fonctionne sans aucun problème avec les procédés actuellement disponibles sur le marché avec toutes huiles ou graisses quelque de toute nature et provenance à condition de respecter certaines spécifications comme l'indice d'acide, une teneur en eau acceptable et une teneur en phosphore (phospholipides) inférieure à 10 ppm.

En Europe, les contraintes climatiques interdisent certains types de matières premières comme les huiles concrètes de palme et de coprah, ainsi que les graisses animales dont les points de fusion trop élevés poseraient des problèmes de fonctionnement en saisons froides. Seules les huiles polyinsaturées comme le colza, le tournesol, ou le soja répondent au critères de tenues à froid sous nos climats, à condition d'employer des additifs adaptés pour le stockage pendant les périodes hivernales.

L'indice de cétane qui est une des spécification importante à considérer pour assurer une combustion correcte dans les moteurs Diesel est sensible à la composition et à la nature des acides gras présents dans l'huile. On peut signaler que plus la chaîne grasse est saturée, plus l'indice de cétane des esters est élevé.

Une autre spécification importante est l'indice d'iode. Cet indice permet de quantifier le taux d'insaturation des chaînes d'acides gras. Plus le nombre est élevé, plus l'huile contient

de doubles liaisons C=C, ce qui se traduit, lorsque celui-ci dépasse 120, par une plus grande instabilité à l'oxydation. Cette réaction d'oxydation qui génère des hydroperoxydes peut devenir critique au stockage, ainsi que dans la chambre de combustion, car ces produits sont d'excellents initiateurs de réactions de polymérisation. Les polymères ou gommages ainsi formés peuvent être responsables à terme d'un serrage des pistons des moteurs Diesel utilisés.

Par exemple, pour les huiles de tournesol et de soja (indices d'iode > 130), un mélange avec du colza et ou du palme, dans des proportions adéquates, permet d'ajuster l'indice d'iode à une valeur compatible et par la même être une solution détournée pour introduire sous nos climats une petite fraction de palme (5 à 10% vol) qui à cette dilution ne posera pas de problème de tenue à froid.

Les huiles de fritures et les graisses animales sont également utilisables après méthanolyse dans les moteurs Diesel.

La composition de ces huiles diffère légèrement des huiles précédemment citées du fait que les chauffages répétés en présence d'aliments et d'eau conduisent à former par oxydation des polymères et de l'acidité libre par hydrolyse. Elles doivent dans un premier temps être décantées et filtrées.

Comme l'acidité libre (créée par hydrolyse) est un poison du catalyseur de transestérification, ces huiles ne peuvent être transestérifiées en l'état. Une pré étape d'estérification par le méthanol est indispensable avant d'effectuer la réaction de transestérification.

La présence de polymères solubles qui peuvent atteindre dans certains cas jusqu'à 5% dans les esters méthyliques obtenus représentent un réel danger pour les moteurs (gommage des pistons) ; le procédé de production de biodiesel utilisant les huiles de fritures devra inclure obligatoirement une étape de distillation des esters obtenus, opération qui laissera en fond de colonne la fraction lourde constituée des polymères d'acides gras.

Le surcoût opératoire de ces opérations peut être largement compensé par le faible coût de ces matières premières, par contre les réseaux de collectes devront rester vigilants sur la pérennité dans le temps de la composition de ces huiles usagées. Un trop grande hétérogénéité dans la composition de ces huiles complexifierait énormément les opérations de prétraitement et la qualité finale du biodiesel obtenu.

L'huile polyinsaturée extraite de la graine du **Jatropha curcas** est promise à un bel avenir. Cet arbuste possède des capacités à résister à de longues périodes de sécheresse^(10b).

Un grand nombre de pays du Sud cultivent aujourd'hui le *Jatropha curcas* : Inde, Chine, Népal, Afrique du sud, Ghana, Togo, Malawi, Zambie, Tanzanie, Sénégal, Mali, Côte d'Ivoire, République démocratique du Congo, Tunisie, Maroc, Égypte, Thaïlande, Indonésie, Philippines, Brésil, Argentine, Cambodge, etc...

Sa graine, qui n'est pas comestible, contient entre 30 et 35% d'huile et les rendements à l'hectare, selon la pluviométrie des régions de culture, varient de 2t /ha/an à 8t /ha/an pour une plante âgée d'au minimum 5 ans, ce qui donne respectivement de 0,7 t à 2,8 t en équivalent huile.

Chapitre 4

Biocarburants de 2eme génération

1. La voie enzymatique d'utilisation de la cellulose et des hemi-celluloses

Si les plantes sucrières et amylacées sont apparues très tôt comme des matières premières idéales pour la production d'éthanol-carburant, après leur utilisation traditionnelle dans la production d'alcool-boisson, d'autres composants génériques des plantes, la cellulose et les hém-celluloses, vont devenir dans les années à venir une source importante de sucres fermentescibles qui pourra par conséquent être utilisée, au moins en partie, pour la production d'éthanol.

Composant principal de la paroi des cellules des plantes, la cellulose est un polymère linéaire d'unités de glucose liées entre elles par des liaisons béta 1-4¹².

Dans la paroi cellulaire, la **cellulose** est associée à la lignine et aux hém-celluloses.

Les **hém-celluloses** sont des polysaccharides complexes, linéaires ou ramifiés, et de faible degré de polymérisation (100 à 300), dont les sucres de base sont le plus souvent des pentoses (sucres en C5) comme le xylose et l'arabinose, des hexoses (sucres en C6) comme le glucose, le galactose ou le mannose et des dérivés de l'acide uronique.

La lignine est un polymère fortement réticulé, formé essentiellement par condensation de trois alcools aromatiques : les alcools coumarylique, coniférylique et sinapylique.

Ces trois polymères, cellulose, hém-celluloses et lignine, sont étroitement imbriqués au sein de la paroi végétale. Leurs interactions varient d'une plante à l'autre mais aussi en fonction de l'âge de la plante.

Distribution des sucres composants de la cellulose et des hém-celluloses dans le bois et la paille (% MS)

Type de sucre	Xylose	Arabinose	Galactose	Mannose	Glucose
Bois dur	17.4	0.5	0.8	2.5	50.1
Bois tendre	5.7	1.0	1.4	11.2	46.3
Paille	16.2	2.5	1.2	1.1	32.5

Composition de végétaux lignocellulosiques (% MS)

Végétal	Lignine	Cellulose	Hémicelluloses
Pin	27-29	38-42	20-24

¹² Chaque résidu glucose est positionné à 180° par rapport au résidu adjacent, donnant au polymère une structure très particulière. Le degré de polymérisation peut varier de façon importante d'un végétal à l'autre, de 100 à 15 000 selon les espèces. Pour le bois, il est autour de 10 000.

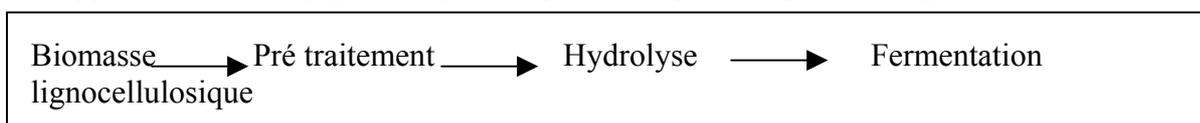
Peuplier	20-24	40-49	16-27
Paille de blé	15-23	30-43	22-35
Rafle de maïs	12-17	35-41	20-27
Bagasse de canne	11-25	38-40	23-34

La grande imbrication de ces macromolécules entre elles, et les variations de composition selon les espèces, ont bien sûr une grande importance quand il s'agit de définir des procédés d'extraction et d'hydrolyse de ces molécules pour aboutir aux sucres de base en C6, *seuls utilisables aujourd'hui directement dans la réaction de Gay Lussac par la levure.*

L'universalité de ces composants dans le règne végétal rend cette approche très prometteuse puisqu'elle apportera une source renouvelable de sucres fermentescibles et donc de substrats de fermentation.

Les procédés actuellement en cours d'étude au niveau de la R&D ne partent pas de rien : L'extraction de cellulose à partir de bois est à la base de la production de la pâte à papier, et des unités de production de cellulose cristalline, pour la fabrication de filtres à cigarettes, de cellophane ou d'excipient pharmaceutique existent depuis longtemps. Enfin des procédés industriels conduisent à la purification du xylose, un sucre utilisé principalement en confiserie. Toutefois ces procédés sont gourmands en énergie et optimisés pour la production des polymères proprement dits, ce qui n'est pas le but quand on cherche à en isoler les composants de base que sont les sucres.

L'approche technologique se segmente par conséquent en plusieurs opérations unitaires :



1. Le pré traitement

Après avoir broyé le matériel végétal à traiter pour le rendre aussi homogène que possible et augmenter les surfaces, il s'agit de rendre la cellulose et les hémicelluloses accessibles aux réactifs qui seront utilisés pour l'hydrolyse des polymères. On travaillera également à conserver la lignine sous une forme aussi insoluble que possible, ce dernier composant étant essentiellement utilisé comme combustible (source d'énergie directe).

De nombreuses variantes ont été décrites et brevetées, souvent optimisées au moins au laboratoire pour telle ou telle source de matière première. Toutefois, seules les expérimentations en pilote de taille pré-industrielle ont vraiment un sens dans ce domaine, en particulier quand il s'agit d'évaluer de façon rigoureuse les coûts mis en œuvre.

Le tableau suivant reprend les différentes classes de procédés de prétraitement mis au point :

Procédés physiques	Prétraitement mécanique Thermolyse	Bois
Procédés thermochimiques	Thermohydrolyse Explosion à la vapeur Explosion à la vapeur en conditions acides AFEX Explosion au CO2	Bois, Paille
Procédés chimiques	Prétraitement à l'acide dilué Prétraitement alcalin Procédé Organosolv Oxydation chimique	Paille, rafles de maïs

D'après « Les biocarburants », D. Ballerini, IFP Publications, éditions Technip, 2006

On ne traitera ici que les procédés ayant fait l'objet d'études approfondies, en vraie grandeur.

a. Explosion à la vapeur :

Elle consiste à chauffer rapidement le substrat à des températures moyennes (160 à 260 °) par injection de vapeur saturée à haute pression (10 à 50 bars), à le maintenir à la température désirée pendant un temps variant de quelques secondes à quelques minutes puis à l'amener à la pression atmosphérique par une détente brutale. Le résultat conduit à une ouverture des structures de la paroi et donc à l'exposition de la cellulose. Cette technique, qui peut être combinée avec différentes conditions acides ou basiques, en particulier en présence d'acide sulfurique dilué, de SO₂ ou d'ammoniac conduit à de bons résultats en particulier si les conditions de séchage initial de la biomasse sont bien contrôlées. Toutefois les conditions pratiques dépendront beaucoup du type de biomasse utilisée. Les conditions utilisant la présence d'acides ou de bases des systèmes de récupération et de recyclage des réactifs doivent impérativement être mis en œuvre, à la fois pour des questions d'ordre économique et d'ordre environnemental. Le problème couramment rencontré est la formation de produits inhibiteurs de la fermentation qui affectent les rendements de l'étape de fermentation en fin de chaîne.

Ce procédé a été testé en France par l'IFP sur la plate-forme de Soustons dans les années 80 à partir de copeaux de résineux.

b. Pré-traitement en conditions acides

On utilise l'acide sulfurique ou l'acide chlorhydrique dilué en proportion de quelques % par rapport à la matière sèche du substrat, dans des conditions en température comprise entre 60 et 200° selon les auteurs. Les temps de séjour varient de quelques secondes à quelques minutes et dépendent des conditions de température. Ces technologies conduisent à une bonne dépolymérisation des hémi-celluloses et augmente la digestibilité de la cellulose par les enzymes. Par contre elles solubilisent une partie de la lignine. Selon les substrats elles conduisent aussi à la production d' inhibiteurs de la fermentation qui doivent être retirés par précipitation sélective ou par passage sur résines échangeuses d'ions. Enfin elles impliquent une neutralisation du mélange en fin de réaction par addition de base qui génère des sous-produits insolubles et très mal valorisés.

Le National Renewable Energy Laboratory américain, qui dépend du DOE, a breveté ce procédé. De nombreuses variantes ont été décrites et les détails peuvent varier de façon importante selon le type de substrat végétal que l'on cherche à traiter.

2. L'hydrolyse

Comme nous l'avons mentionné plus haut, ces pré-traitements, s'ils donnent des résultats utiles pour le dépolymérisation des héli-celluloses, restent insuffisants pour l'hydrolyse de la cellulose en glucose. Deux types d'hydrolyse sont envisageables : l'hydrolyse acide et l'hydrolyse enzymatique.

a. Hydrolyse acide

Après séparation de la fraction solubilisée par le pré-traitement, la fraction solide est soumise à une nouvelle hydrolyse en réacteur à percolation, à co-courant ou à piston. Le NREL recommande plusieurs hydrolyses successives en conditions acides d'abord à 0,7% puis 0,4% d'acide sulfurique autour de 200°C, séparées par neutralisation à la chaux. Le rendement en sucres libres varie selon les matières premières et les conditions. A partir de la rafle de maïs utilisée par NREL le glucose est récupéré à 50% et le mannose et galactose à plus de 80%.

Le procédé Arkénol sur le même matière première et en utilisant des conditions acides plus concentrées mais à plus faible température permet de récupérer 90% des sucres.

De toutes façons, ces technologies impliquent le recyclage de l'acide utilisé et l'utilisation de réacteurs en inox compte tenu des conditions utilisées. On a du mal à croire que ce procédé soit rentable

b. Hydrolyse enzymatique

Les « cellulases » sont connues depuis longtemps et sont principalement produites par des champignons poussant sur le bois. Il s'agit en fait d'un mélange de 3 activités enzymatiques, une endo, une exo qui coupent la cellulose respectivement à l'intérieur et séquentiellement à l'extérieur de la chaîne polymérique. Enfin une bêta-glucosidase est nécessaire pour cliver les petits polymères de glucose libérés.

Les formes naturelles de ces enzymes, si elles hydrolysent bien la cellulose, le font avec une cinétique relativement lente et insuffisante pour une application industrielle à grande échelle comme celle envisagée pour l'industrie de l'éthanol.

Le DOE a financé depuis 2001 des programmes lourds de génie génétique chez les deux grands producteurs d'enzymes Novozymes et Genencor pour gagner un facteur 10 dans la vitesse d'hydrolyse de leurs enzymes commerciales. En parallèle de très nombreux laboratoires académiques, en France et dans le monde, et quelques start-ups, se sont lancés dans l'identification de nouvelles cellulases et dans l'amélioration de leurs propriétés par les techniques de la biologie moléculaire. La start-up la plus avancée pourrait être Iogen, société canadienne soutenue par Shell. Novozymes a annoncé la mise sur le marché pour la fin 2007 aux Etats-Unis de son nouveau cocktail optimisé pour la production de glucose à partir des rafles de maïs prétraitées à l'acide dilué.

Comme dans le cas des matières premières traditionnelles, ces enzymes fonctionnent dans des gammes de température entre 60 et 80°C et sont capables d'hydrolyser la cellulose avec un rendement élevé. Ils libèrent donc le glucose qui se solubilise au fur et à mesure dans le milieu. Cette solution peut être utilisée directement en fermentation ou purifiée par passage sur résines et concentrée.

Plusieurs pilotes sont déjà en place ou en construction, pour tester en vraie grandeur et à partir de matières premières variées cette nouvelle approche

Iogen corp	Ottawa	2006	800 t	Paille blé Rafles de maïs
Celunol Corp Diversa	Louisiane	Fin 2007 ?	42.000t	Bagasse
Mascoma Corp Danisco	Rochester	Fin 2007	1.500t	Plaquettes de bois Déchets papier
Abengoa	Espagne	En cours	pilote	Paille de blé
Petrobras	Brésil	En cours	pilote	Bagasse
SEKAB Tech.	Suède	En cours	pilote	Paille, Bois
Bioethanol Japan	Japon	En cours	pilote	Bois

Le DOE américain a annoncé au printemps 2007 un total de subventions de 385 millions \$ pour 6 projets industriels de production d'éthanol à partir de cellulose, qui devraient être en place à partir de 2009. L'investissement total dépasserait 1,2 milliards \$.

3. La fermentation à partir des sucres de la ligno-cellulose

La fermentation est menée de la même façon qu'avec les sirops de sucre traditionnels. On notera toutefois que la quantité de sucres en C6, directement fermentescibles par la levure, ne représente que de l'ordre de 30 à 40 % de la matière sèche de la biomasse plante entière contre 50% dans le cas de la mélasse de betterave. Qui plus est les technologies en développement sont plus complexes que les technologies d'extraction de 1^{ère} génération, et par conséquent plus coûteuses. Enfin la quantité de protéine présente dans le moût de fermentation étant très faible, le crédit de valorisation obtenu en alimentation animale le sera d'autant.

4. L'utilisation des Sucres en C5 pour la production d'éthanol

Les sucres en C5, issus de l'hydrolyse des héli-celluloses, représentent également un potentiel intéressant pour la production d'éthanol. Ils représentent jusqu'à 18% des sucres libérés par l'hydrolyse acide de l'ensemble ligno-cellulose dans la paille.

Toutefois le développement des cocktails enzymatiques capables de réaliser cette même hydrolyse en conditions douces est moins avancé que dans le cas des cellulases. Ceci est dû d'une part à une moins bonne connaissance de ces classes d'enzymes et aussi à la plus grande complexité des cocktails nécessaires. Des programmes de recherche sont actifs dans ce domaine, aux Etats-Unis comme en Europe.

Un autre complication liée à l'utilisation de ces sucres en C5 provient du fait que la levure de boulangerie, traditionnellement utilisée pour la production d'éthanol, est incapable de métaboliser le xylose ou l'arabinose. D'autres micro-organismes sont eux capable d'utiliser ces sucres et de les transformer en éthanol mais se révèlent être de mauvais producteurs à partir du glucose.

Les voies actuellement les plus actives en recherche consistent à introduire dans des souches de levure les gènes manquant pour la production d'éthanol à partir de ces sucres en C5. Compte tenu de la difficulté d'une telle approche, il faudra attendre encore quelques années pour qu'elle porte ses fruits et que la totalité des sucres libérés par l'hydrolyse de la ligno-cellulose puisse être utilisée comme substrats de fermentation.

Par contre il est tout à fait possible d'utiliser ces sucres pour des procédés de méthanisation capables de produire de l'énergie dans une seconde étape.

5. Conclusions

Quelques chiffres concernant les procédés décrits dans ce chapitre commencent à être publiés. L'Université technologique danoise (DTU) et l'USDA ont tous les deux proposé des évaluations, massique et énergétique, basées sur les résultats expérimentaux au niveau du petit pilote :

- Dans le procédé danois, à partir d'une tonne de paille de blé, on récupère 310 litres d'éthanol, 90 m³ de méthane (produit par méthanisation de la matière organique non sucrée) et 230 kg de lignine qui peut être brûlée. La paille a une productivité de 5 tonnes de matière sèche à l'hectare. Si la totalité du méthane produit est utilisée pour les besoins en énergie de la distillerie, le rendement net du procédé calculé sur la production d'alcool sera de l'ordre de 1,2 tep/ha, légèrement inférieur au rendement énergétique du blé-grain (1,5 tep/ha). Dans un souci d'efficacité optimum, on peut rajouter au bilan la quantité de chaleur fournie par la combustion de la lignine, soit 0,46 tep/ha.
- Dans l'exemple américain, 7 tonnes de bois fournissent 1,5 tonne d'éthanol (0,94 tep) et 1,4 tonne de lignine combustible (0,56 tep). Une forêt moyenne d'eucalyptus produisant de l'ordre de 16 tonnes de matière sèche à l'hectare, le rendement énergétique calculé sur la production d'éthanol sera de 2,15 tep/ha. Dans ce cas l'ensemble des organiques et de la lignine est brûlé pour les besoins énergétiques du process.

Il apparaît clairement que ces procédés enzymatiques dits « de 2^{ème} génération » se situent sur le plan technologique directement dans le prolongement des procédés classiques. Comme dans le cas de l'amidon, les procédés d'hydrolyse acide ont été rapidement remplacés par l'utilisation d'enzymes spécifiques découverts et développés par les fabricants d'enzymes. Ceux-ci « contrôlent » l'innovation et définissent de fait le calendrier de mise en œuvre de cette « 2^{ème} génération ».

Il est très vraisemblable que le passage de la « 1^{ère} génération » à la « 2^{ème} » se fera en continuité dans les mêmes distilleries, avec simplement l'addition d'un atelier de pré-traitement de la biomasse qui pourra traiter selon leur prix une fourchette assez large de matières premières : paille, plante entière ou déchets de bois.

Il est sans doute trop tôt pour évaluer la marge de compétitivité des procédés qui dépendra beaucoup du prix de la biomasse utilisée, sans que l'on continue à bénéficier de la vente du DGGs. La récupération sous forme de chaleur de la lignine compensera au moins en partie cette diminution de valorisation. Il est toutefois difficile d'imaginer aujourd'hui que compte tenu des conditions de production de la biomasse d'une part et de la quantité relativement faible de sucres fermentescibles disponibles, le rendement énergétique à l'hectare soit très différent de celui de la première génération, et cela dans le meilleur des cas. Par contre, l'utilisation de matières premières sans valeur alimentaire permettra l'exploitation de ressources biomasse aujourd'hui non utilisées pour cette application.

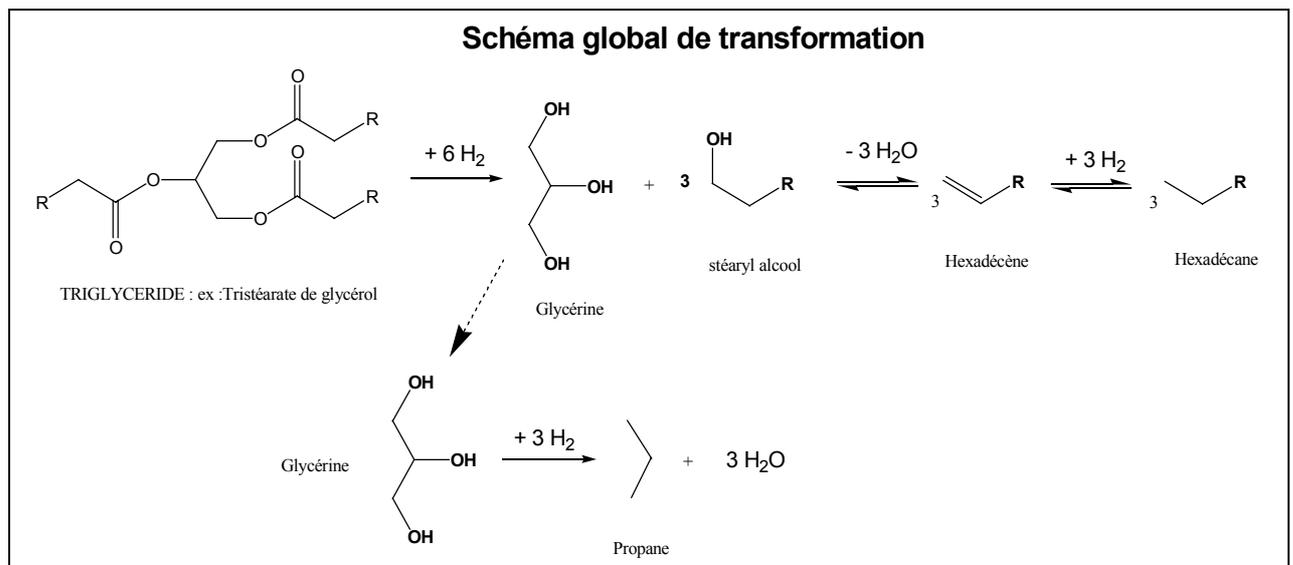
2. Les nouveaux procédés pour la production de biofuels à partir des huiles *

1- Le procédé NExBTL.

Toujours à partir d'une huile végétale ou d'une graisse animale, c'est une voie qui, en faisant appel à un procédé de type pétrochimique, permet d'obtenir un excellent substitut du gazole. Cela consiste à transformer directement les triglycérides en n paraffines et en propane par hydrogénation totale, en appliquant le principe d'un hydrotraitement catalytique (HDT). Afin d'éviter une confusion dans le type de carburant obtenu, nous n'allons pas l'appeler Biodiesel, mais Biofuel.

Comparable au traitement d'une charge pétrolière pour l'obtention d'une coupe gazole, l'emploi d'un catalyseur permet d'hydrogéner totalement (300°C), à la fois les insaturations des chaînes d'acides gras et les groupements carboxyliques pour en final former des n paraffines, du propane et de l'eau. Après élimination du propane et de l'eau, on y ajoute une étape d'hydro- isomérisation de façon à satisfaire aux spécifications de propriétés à froid avec notamment la TLF (Température Limite de Filtrabilité, ou CFPP dénomination anglo-saxonne).

La base gazole ainsi obtenue possède un indice de cétane > 80.



La consommation en hydrogène nécessaire pour obtenir cette transformation à partir d'huile de colza est de l'ordre de 3,6% pds.

Elle se répartit de la façon suivante: pour 1 mole d'huile de colza (PM: 880) on a besoin au total de 16,05 moles d'hydrogène qui se répartissent de la façon suivante: 4,05 moles d' H_2 pour les insaturations des chaînes grasses et 12 moles pour les groupements carboxyliques de la fonction ester du glycérol.

Dans le cas d'une sélectivité optimale, on obtiendrait pour 100kg d'huile mis en jeu: 86,3kg de biodiesel, 5kg de propane et 12,3kg d'eau.

Une unité industrielle produisant 100.000t/an de cette nouvelle base gazole, devrait être alimentée par 116.000t d'huile de colza, 4200 t d'hydrogène et générerait 5800 t de propane.

* cette partie a été rédigée par Gérard Hillion, ingénieur de recherche senior à l'IFP

Ceci implique que cette transformation soit réalisée sur le site d'une raffinerie disposant d'un potentiel en hydrogène important. Pour réaliser industriellement cette transformation, deux

solutions sont envisageables: soit on utilise une unité dédiée selon le Procédé "NExBTL" de la Sté Neste Oil, soit une unité d'HDT existante sur raffinerie dans laquelle il serait mélangé 5 à 6% poids d'huile végétale ou de graisse animale à une charge pétrolière.

Le principal avantage de ce procédé est qu'il privilégie les huiles et matières grasses saturées (réduction de 15 à 25% du besoin en hydrogène) comme le palme, le palmiste et le coprah ainsi que les huiles de friture et les graisses d'origine animale beaucoup plus difficiles à transformer par transestérification. Les procédés classiques de transestérification peuvent également traiter ces matières premières, mais il est souvent nécessaire d'y inclure une pré étape d'estérification permettant de diminuer la valeur d'indice d'acide qui dépasse généralement 4 à 5.

Toutefois, à partir de ce type de matières premières à faible indice d'iode, et même sous la forme d'esters méthyliques leur utilisation dans nos climats reste toujours délicate à cause d'une très mauvaise valeur de TLF.

Nota: Il est fort probable que si la société Finlandaise "Neste Oil" (anciennement Fortum) envisage d'opérer sur une unité dédiée, c'est d'une part que le catalyseur doit être spécifique et très sélectif pour hydrogénéolyser complètement le triglycéride car il n'y a pas de fonctions carboxyliques dans une coupe pétrolière et d'autre part, comme il est nécessaire d'isomériser les n paraffines obtenues, il est sans aucun doute économiquement plus intéressant de traiter uniquement les n paraffines seules qu'un mélange constitué de 5 à 6% de ces dernières dans du gazole.

2 - Le cracking catalytique des huiles

Le chauffage d'une huile en présence d'un catalyseur conduit à la formation de divers produits gazeux et liquides. Un exemple sur de l'huile de palme ^(11b)

A 480°C sur zéolithe (silicoaluminates amorphes ou cristallisés, naturels ou de synthèse) de type ZSM 5, on obtient des composés gazeux de C1 à C5 (dont l'acroléine), du CO, CO₂, des hydrocarbures liquides lourds (benzène, cycloalcanes, oléfines, paraffines linéaires plus ou moins ramifiées). Cette coupe liquide après distillation fractionnée donne un équivalent essence, d'une fraction intermédiaire se rapprochant du pool gazole et d'une fraction visqueuse lourde constituée d'acides gras et d'hydrocarbures lourds.

Les rendements sont loin d'être intéressants il y a beaucoup de gaz qui sont difficilement valorisables, sauf comme combustibles, et les catalyseurs ont tendance à coker en perdant de leur activité et de leur sélectivité.

3 - La pyrolyse des huiles

C'est un traitement thermique sans catalyseur, mais qui demande des températures beaucoup plus élevées que le cracking catalytique.

On obtient en fonction de la température les composés suivants :

- Entre 200 et 300°C: il y a surtout polymérisation de l'huile (60%), formation de produits volatils condensables (35%) et formation de gaz légers: acroléine, CO, CO₂ (5%).
- A partir de 300°C, les huiles se dégradent en acroléine, cétènes (R-C=C=O) et acides gras (R-COOH) et le craquage se poursuit avec formation d'hydrocarbures (oléfines et paraffines) qui se dégradent plus ou moins suivant la température de pyrolyse.

- Entre 500 et 600°C, on obtient un mélange complexe de gaz et de liquide. ^(12b)

On est loin d'obtenir une coupe gazole de bonne qualité sans avoir recours à la distillation. Les rendements massiques en Biofuel sont alors médiocre et la diversité des produits obtenus complique fortement leur valorisation sans compter sur le coût énergétique très important de cette transformation.

4 - production d'huile à partir de micro algues

Certaines familles de micro algues sont aujourd'hui présentées comme des candidates à la production d'huiles à usage carburant. Avec ces micro algues qui, pour se développer, fixent le CO₂ par photosynthèse on y voit l'avantage, en plus de fournir une base Biodiesel, une façon de piéger le CO₂ de centrales électriques ou d'industries grandes consommatrices d'énergies fossiles.

Mais lorsqu'on analyse de près ces articles, qui sont souvent flatteurs sur les chiffres annoncés concernant la productivité en huiles, il devient évident qu'il sera difficile d'obtenir à grande échelle les productivités annoncées ^(13b).

Productivité à partir de micro algues

- en matières sèches d'algues : de 8,8 à 50 mg/m²/j

- en lipides : de 47,2 à 142 *m³/ha/an

pour les huiles végétales on obtient les valeurs suivantes

- pour le colza : 1,25 m³/ha/an

- pour le palme : 6 m³/ha/an

** Valeur haute obtenue par calcul et fortement surestimée*

Pour mieux appréhender la faible concentration en biomasse obtenue dans les photobioréacteurs qui rappelons le, offrent les meilleurs taux de productivité comparés aux bassins aquacoles, on peut exprimer la concentration de biomasse en Kg/m³. On obtient alors de l'ordre de 4kg/m³ en réacteurs contre 0,14kg/m³ pour les bassins. Un facteur limitant de productivité est la capture de la lumière qui est également dépendant de la concentration en micro algues du milieu. Ce mode de production engendre des coûts de traitement élevés essentiellement dû aux importants volumes liquides à traiter. L'extraction de l'huile est également très onéreuse, extraction par solvant (n hexane).

Une information souvent absente dans ces communications, est la composition des huiles issues de ces algues ^(14b). Leurs compositions qui se rapproche de celles des huiles de poissons avec un Indice d'Iode très élevé (> 180) les rendent impropre à être transformées en esters méthyliques pour un usage carburant. Pour les utiliser en tant que tel, après transformation en esters méthyliques, seule une étape d'hydrogénation sélective est à même de réduire l'indice d'iode à une valeur acceptable. La quantité d'hydrogène nécessaire pour réduire l'indice d'iode d'une tonne d'esters est estimé à environ 50m³.

Le coût de production estimé de ces esters après hydrogénation est de l'ordre 2,80\$/L ce qui est environ 5 fois supérieur au seuil de rentabilité.

Il y a donc encore de gros progrès à faire pour utiliser cette voie en tant que source de biocarburants et selon certains spécialistes les triglycérides produits par ces micro algues sont devenus et déjà très convoités pour accéder à des acides gras polyinsaturés à longues chaînes possédant de multiples propriétés dans le domaine de la santé et de la cosmétique.

11^b - Graille et al. (1981), production d'hydrocarbures par craquage catalytique des sous produits de l'huile de palme – *Revue Française des Corps Gras*, n°10, p.421-426.

12^b - Petit, J., (1952) Contribution à l'étude du traitement thermique des huiles végétales: cas de l'huile d'olive. *Mémoire présenté à la Sté Chimique*,; N° 59, p.293-296.

13^b - Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology advances* 25:294-306

14^b - Belarbi, E.H., Molina, E., Chisti, Y. (2000). A process for high yield and scaleable recovery of high purity eicosapentaenoic acid esters from microalgae and fish. *Enzyme Microbiology Biotechnology* 26:516-529.

documents ayant également servi de support :

- "Les Biocarburants" - *Daniel Ballerini* - Edition Technip (2006)
- Méthanolyse des huiles végétales – *Daniel Ballerini et Gérard Hillion* – L'Actualité Chimique - p. 64-69 (nov-déc 2002)

Chapitre 5

Les procédés thermochimiques : de la Biomasse aux carburants liquides

Le traitement de biomasse par la chaleur, en l'absence ou en quantité réduite d'oxygène, conduit à des produits très divers selon les conditions de ces traitements, du classique charbon de bois au gaz de gazogène, des goudrons aux mélanges de composés liquides organiques plus ou moins oxygénés, jusqu'au gaz de synthèse pour produire des hydrocarbures, des bases chimiques ou de l'hydrogène.

Les procédés thermochimiques constituent ainsi un ensemble de solutions plus ou moins complexes pour transformer la biomasse en vecteurs énergétiques, offrant des possibilités de production de bases intermédiaires entre la biomasse humide collectée et les biocarburants, biohydrogène et bioproduits chimiques.

Les procédés de transformation ou raffinage des bases d'origine biologique déjà disponibles qui ont été présentés au premier chapitre, telles que les filières MTBE, ETBE, Butanol ou Hydrotraitement de corps gras ou d'huiles végétales d'origines diverses (procédé Nexbtl) permettent dès aujourd'hui d'intégrer des biocarburants de manière compatible avec les réseaux de distribution pétroliers et les caractéristiques du parc automobile. En particulier la transformation d'huile de palme, de soja, et de graisses animales en biocarburant diesel de haute qualité (cétane, tenue au froid), sans co-produit glycérine, ouvre des perspectives de développement parallèles à celles des di-esters de colza ou de tournesol. Au cours du présent

chapitre, nous considérerons que ces procédés, qui transforment des matières premières de potentiel alimentaire, ne constituent qu'une première phase du développement des bioénergies et nous viserons plus spécifiquement l'utilisation de la biomasse sous forme de paille, de déchets végétaux et de bois issu de forêts exploitées spécialement pour des usages énergétiques, ensemble qui constitue la biomasse lignocellulosique.

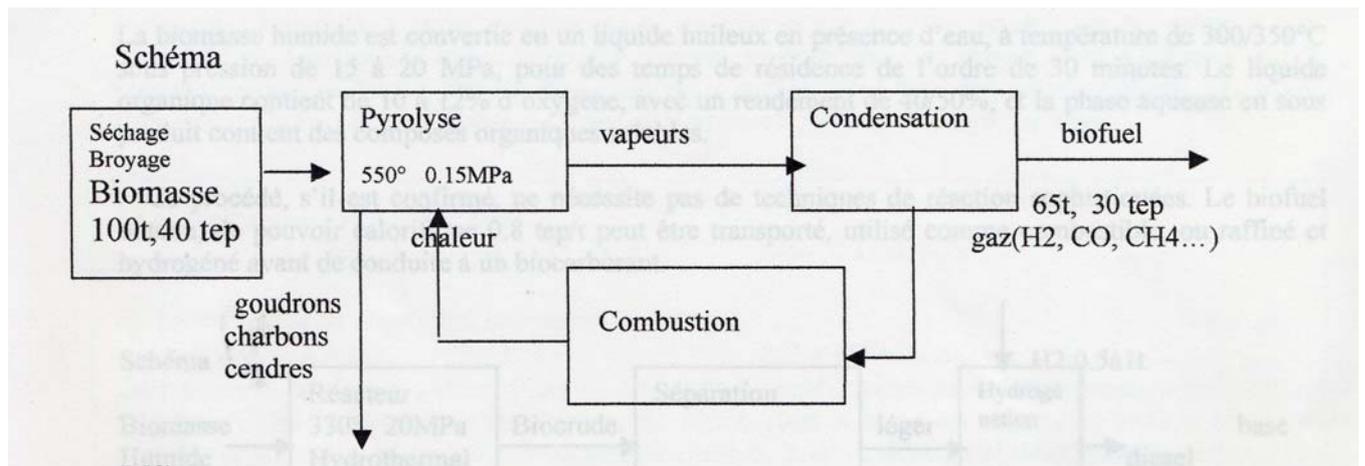
Cette matière hydrocarbonée complexe, dont la formule chimique simplifiée $C_{12}H_{22}O_{11}$ associe un squelette carbone à des liaisons H-OH, est en gros équivalente à un peu moins de 50% de carbone après séchage, pour un pouvoir calorifique d'environ 0.4 tep/t. Elle contient en outre des éléments tels qu'azote, potassium, phosphore, silice, et autres minéraux, et génère des cendres de combustion.

1 – La pyrolyse rapide

La pyrolyse rapide est un procédé de décomposition thermique qui se produit à des températures de 500/600°C et pression faible, mais avec un transfert élevé de la chaleur au sein des particules de biomasse, et avec un temps de résidence très court des vapeurs chaudes dans la zone de réaction. La préparation des charges (broyage, torréfaction) et la conception des réacteurs de pyrolyse permettent d'assurer ces conditions, et d'obtenir des rendements en produits liquides atteignant 75% du poids de la biomasse sèche initiale. Les réacteurs sont à lits bouillonnants, circulants ou transportés.

L'huile de pyrolyse a été testée dans des moteurs, des chaudières et des turbines, mais elle n'a pas encore une stabilité permettant de garantir qu'elle puisse être stockée et transportée sans grandes précautions. *Le biofuel de pyrolyse*, non miscible aux hydrocarbures, n'est pas directement un biocarburant, mais un produit intermédiaire obtenu près des centres de production de biomasse ou un substitut à des fuels fossiles plus aisément transformables en carburants. Son intérêt est d'être liquide, et de pouvoir être plus facilement stocké et transporté comme charge d'unité aval de transformation en carburant.

Plusieurs unités de démonstration confirment depuis les années 1990 la faisabilité des technologies de pyrolyse rapide : Des procédés à lit fluide circulant (50t/j- Red Arrow Product Co Wisconsin) à lit fluide bouillonnant (10 à 100t/j- Dynamotive- Vancouver Canada) à réacteur à cône rotatif (BTG – Hollande) sont en service, et permettront des gains d'échelle. Les rendements et propriétés du biofuel obtenu dépendent de la charge, de son prétraitement, du procédé et de ces conditions, et de l'efficacité de la collecte. L'étape de prétraitement qui réduit la teneur en eau de la biomasse de 50 à 15%, et facilite son broyage pour injection dans le réacteur de pyrolyse, voire dans un gazéifieur, est particulièrement critique.



Références

Malgré de nombreux développements au stade pilote, il n'y a pas encore de véritable unité industrielle en opération.

Economie

Une taille économique et cohérente avec une production et une collecte industrielle de la biomasse, paraît se situer autour de 1000 000 t/an de biofuel, soit 1500 000 t/an de matière sèche (5000 t/j), collectée sur 150 000 ha (rayon 22 km, soit en pratique des trajets de 50-100 km), pour un investissement sol nu de 200-300 M\$. En fait les premières unités seront adaptées aux ressources existantes, sous produits de l'agriculture et de la sylviculture, et leur taille sera plutôt de l'ordre de 200 000t/an pour un investissement de 70-100M\$.

Les frais variables sont faibles et compensés par la combustion des gaz, utilisable en production de chaleur/électricité.

Coût/t biofuel : en admettant 10%/an de l'investissement pour l'amortissement, et 10%/an pour frais fixes de personnel et maintenance, le coût par tonne de la pyrolyse serait de l'ordre de 60\$/t biofuel (40\$/t de matière sèche MS) à 100\$/t pour les premières unités(67\$/tMS).

Environnement

Le traitement des goudrons et charbons, riches en polyaromatiques cancérigènes, potentiellement générateurs de dioxines dans des chaudières et incinérateurs demande des précautions particulières. L'innocuité du stockage et de l'utilisation des cendres devra être établie.

Développements

Des recherches au pilote portent sur des réacteurs couplant réacteurs à lits fluides et effet cyclone ; un vaporisateur a été couplé au système de pyrolyse pour produire de l'hydrogène dans un cadre expérimental.

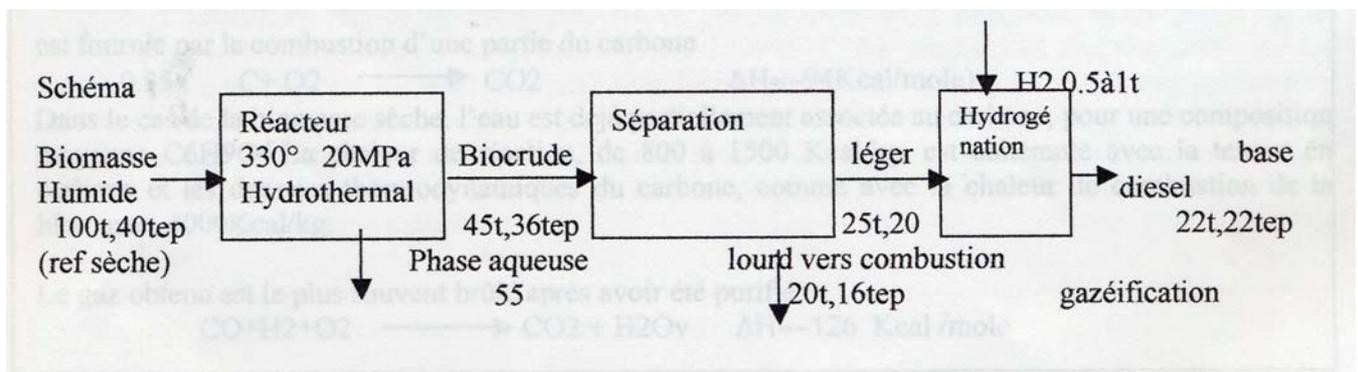
Les procédés de pyrolyse de la biomasse sont très prometteurs, mais ne paraissent pas encore arrivés à maturité. Les technologies dépendent en fait très fortement de la nature des charges, qui caractérisent les productions de cendres et goudrons, et la tenue des lits de pyrolyse (exemple de la silice contenue dans les pailles). Elles dépendent aussi des exigences de qualité, et des purifications requises pour l'utilisation du biofuel, soit comme combustible, soit comme charge d'unité de synthèse Fischer-Tropsch. *Leur intérêt majeur et de pouvoir*

concentrer, stocker, et transporter la biomasse sous forme fluide, à partir de zones d'exploitation dispersées, pour une complexité et un investissement modéré¹³.

2- La conversion hydrothermale directe

La biomasse humide est convertie en un liquide huileux en présence d'eau, à température de 300/350°C sous pression de 15 à 20 MPa, pour des temps de résidence de l'ordre de 30 minutes. Le liquide organique contient de 10 à 12% d'oxygène, avec un rendement de 40/50%, et la phase aqueuse en sous produit contient des composés organiques solubles.

Ce procédé, s'il est confirmé, ne nécessite pas de techniques de réaction sophistiquées. Le biofuel obtenu, de pouvoir calorifique 0.8 tep/t peut être transporté, utilisé comme combustible ou raffiné et hydrogéné avant de conduire à un biocarburant.



Références

A l'état de recherche essentiellement. Changing world Technologies, Enertech Environmental (US), Biofuel B.V. (NDL)

Projet de démonstration 25000t/an MS à l'étude, 30 à 50 Meuros pour 100t/j

Economie

Le point d'équilibre serait de 60-70\$/bbl de biocrude, hors séparation et Hydrogénation qui en double le niveau. Le rendement énergétique est attractif.

Environnement

Le traitement de la phase aqueuse est sans doute délicat et pourrait rendre le procédé plus complexe.

Développements

La désoxygénation du biofuel par hydrogénation, pour conduire à une base diesel de qualité est un point critique. Les conditions de réaction, les catalyseurs et leurs poisons, les besoins en hydrogène restent à préciser pour un biofuel complexe riche en alcools, éthers, etc....

¹³ **En variante** de préparation de charge pour une unité de gazéification et synthèse de biocarburant, un ensemble séchage, torréfaction à 250°C et broyage fin suffirait à une alimentation homogène pulvérulente du gazéifieur pour un coût deux fois plus faible, mais ne concentrerait pas des productions dispersées de biomasse.

En étant optimiste l'injection dans un hydrocraqueur ou un coqueur existant serait-elle possible ?

L'étude de la désoxygénation du biofuel au laboratoire est en cours à Biofuel B.V en coopération avec IFP et TOTAL, puis un pilote devrait confirmer la faisabilité de ces travaux.

3- La gazéification de la Biomasse : le Biogaz

A haute température et avec apport d'oxygène, la combustion partielle en présence de vapeur d'eau de la biomasse essentiellement constituée d'atomes de carbone, oxygène et hydrogène, fournit un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène, le gaz de synthèse. Un tel gaz a été autrefois utilisé comme carburant automobile, à partir des gazogènes, ou comme gaz de ville, produit par les usines à gaz. Aujourd'hui, il est utilisé industriellement comme combustible (plus propre et plus efficace que le charbon, le bois ou les déchets et résidus agricoles et forestiers) dans des centrales électriques IGCC (Integrated Gazeification Combined Cycle) ou il permet l'utilisation de turbines à gaz.

La chaleur nécessaire à la réaction

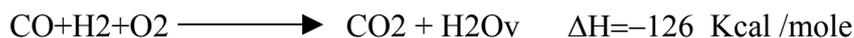


est fournie par la combustion d'une partie du carbone



Dans le cas de la biomasse sèche, l'eau est déjà partiellement associée au carbone, pour une composition moyenne $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4$. La chaleur de réaction, de 800 à 1500 Kcal/kg, est cohérente avec la teneur en carbone et les données thermodynamiques du carbone, comme avec la chaleur de combustion de la biomasse, 4000Kcal/kg.

Le gaz obtenu est le plus souvent brûlé après avoir été purifié



Une partie de l'énergie est dégradée du fait des irréversibilités, des processus de purification, et des limites à la récupération de chaleur des fumées (présence d'alcalins), tout en permettant une bonne efficacité de la transformation en énergie de la biomasse, des déchets ou du charbon grâce à sa forme gaz, avec un rendement de l'ordre de 80%. Pour les usages thermiques industriels, l'appoint d'oxygène est apporté par l'air, le gaz obtenu étant un «gaz pauvre» destiné à la combustion à proximité de sa production.

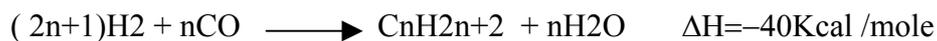
En particulier, le couplage de la production de chaleur (pour des usages industriels ou des chauffages collectifs) à celle de la production d'électricité, en co-génération, est très efficace et peut être obtenu dans des systèmes modulaires «bioénergie», de taille réduite, libérant ainsi des combustibles liquides pour des usages "transport" ou pour une transformation en carburants plus aisée. L'introduction de biomasse gazéifiée dans les chaudières à co-génération de raffineries de pétrole pourrait relever par exemple d'un tel schéma.

En variante, mais encore à l'état de recherche, le gaz de synthèse pourrait être utilisé pour produire un carburant liquide susceptible d'alimenter un moteur, tel que de l'éthanol biocarburant, dans des conditions moins sévères que la synthèse Fischer-Tropsch.

De nombreuses applications relevant de cette filière sont en opération de façon courante, en particulier dans des papeteries, ou elles permettent de valoriser en électricité la lignine et autres déchets biomasse, et de produire la vapeur du procédé.

4- La gazéification pour la synthèse d'hydrocarbures liquides

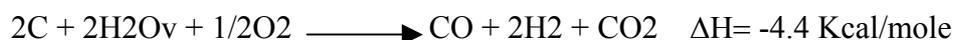
La réaction de synthèse Fischer-Tropsch (1920) permet de produire des hydrocarbures – essence – kérosène- gazole- à partir d'un gaz de synthèse issu d'une gazéification :



Cette réaction exothermique se produit sous pression modérée (2MPa), et température modérée (230°C), sur catalyseur à base de fer pour la production d'essence, à base de cobalt pour la production de gazole et kérosène. Les cires paraffiniques obtenues dans la réaction F.T. sont dirigées vers un hydrocraqueur assez peu sévère (10Mpa,400°) puis fractionnées, le catalyseur F.T. orientant les rendements. On notera que le niveau thermique de la réaction ne permet pas de tirer pleinement profit de son exothermicité, et conduit à des pertes énergétiques vers des productions de vapeur à moyenne pression et des condensations de turbines.

Afin d'obtenir un gaz de synthèse $2H_2 / 1CO$, peu de méthane, d'impuretés et de goudrons, la gazéification se fait à très haute température (1200-1500°C). La préparation des charges, pour en assurer l'homogénéité, la continuité de qualité et la facilité réactionnelle dans des conditions opératoires stables est critique : Aussi les projets à partir de biomasse (Choren en Allemagne) incluent-ils une première étape de pyrolyse produisant un liquide plus constant en qualité que la biomasse, ou de torréfaction à 240/300° suivie de broyage, permettant de stabiliser la teneur en eau de la charge, et d'assurer une granulométrie optimale.

La réaction de gazéification est schématiquement :



Elle résulte des réactions et des équilibres C, CO, CO₂, O₂, H₂O



et de l'ajustement des conditions d'équilibre et de l'extraction du CO₂ (réaction Shift)

L'équilibre thermique est ajusté par la combustion d'une partie de la charge

La gazéification est conduite en deux étapes, la gazéification, puis la réaction de shift.

Dans le cas de la biomasse lignocellulosique, l'eau est associée au carbone sous forme de chaînes hydrocarbonée H-C-OH et les réactions sont en fait différentes de celles du carbone, tout en relevant du même principe.

Pour éviter de surdimensionner les installations, de diluer le gaz de synthèse par l'azote et d'en assurer la qualité pour la réaction Fischer-Tropsch à laquelle il est destiné, la gazéification se fait à l'oxygène, et non à l'air. La production de cet oxygène est donc également critique : elle requiert des équipements bien connus, mais coûteux en investissement, et en consommation d'énergie.

Pour traiter 10.000t/j de carbone, il faut 6660 t/j d'oxygène, soit 30200 t/j d'air, soit 24 Mm³ /j.

Compte tenu des tailles des équipements, cela implique plusieurs unités de séparation de l'air exigeantes en énergie (0.7MW/tO₂) et coûteuses en investissement.

Dans le cas du charbon, les besoins de vapeur pour le procédé, 15.000t/j pour 10.000t/j de carbone, demandent également des installations de traitement des eaux(625t/h) et des chaudières importantes. Dans le cas de la biomasse, de teneur variable en H-OH, le dimensionnement de la production de vapeur implique un facteur de sélectivité vis à vis des charges. C'est aussi pourquoi l'étape préalable de pyrolyse paraît nécessaire.

Le gaz brut sortant de gazeifieur doit être débarrassé du CO₂, des impuretés et des poisons du catalyseur Fischer-Tropsch (sulfures, cyanures, COS, halogènes, alcalins...). Cela implique là aussi des installations classiques, mais de grande dimension, ainsi qu'une perte d'intégration thermique Gazeifieur/Purification/Synthèse /Hydrocraqueur¹⁴

Le rendement global en hydrocarbures liquides est de l'ordre de 15- 20% des matières sèches alimentant le gazeifieur, (ce qui équivaut à 40-50% du contenu énergétique des charges) Pour comparaison le rendement énergétique est de l'ordre de 50% pour une filière GTL à partir de méthane.

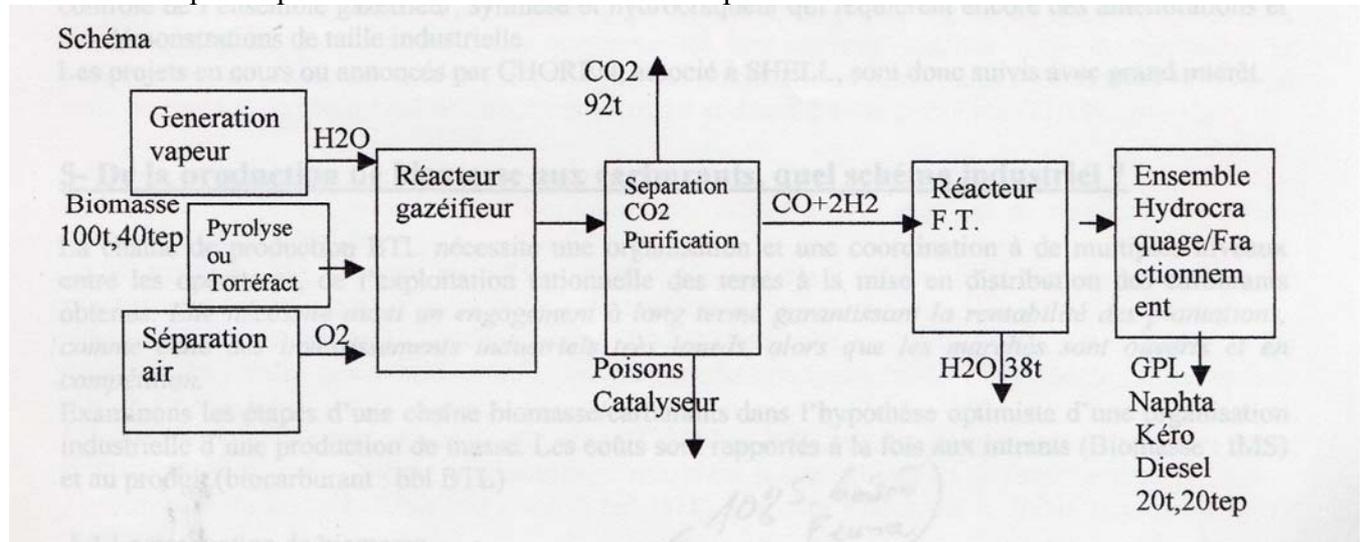
Ainsi, très grossièrement l'usine de traitement de 10.000t/j de carbone équivaut à traiter 20.000t/j (6.7 Mt/an) de matières végétales sèches¹⁵ et produit au mieux 4.000t/j d'hydrocarbures liquides pour le transport (1,3Mt/an). La biomasse qui l'alimente est produite à raison de 7-10 t MS/ha/an par 700.000 à 1.000.000 ha(soit rayon exploité de 50km ou 2% du territoire français) pour une production nette de 1.3 à 1.9 t/ha/an de biocarburant d'excellente qualité et compatible avec les carburants pétroliers.

Une telle usine n'a toutefois pas encore la taille économique pour être comparable aux installations du raffinage (plutôt 3 Mt/an) et pour optimiser la taille des unités complexes qui la constituent. Il faudra donc imaginer une exploitation de la biomasse de manière intensive,

¹⁴ L'étape de purification du gaz de synthèse, par des procédés conventionnels de lavage aux amines, ou d'absorption physique (Rectisol, méthanol à -60°) revient à traiter un gaz à 25-30%de CO₂. Pour 10.000t/j de carbone au gazeifieur, les effluents représentent 31700 t/j, soit 37Mm³/j, et la quantité de CO₂ rejetée, 20000 t/j, équivaut à plus de la moitié du carbone chargé. La taille des unités de purification est donc très importante, de même que la consommation d'énergie requise pour le procédé et pour abaisser les températures aux niveaux requis. Une protection complémentaire contre des poisons du catalyseur sera prévue, avant de diriger le gaz de synthèse (CO+2H₂) à la section réaction F.T (2-5 MPa, 230°C) couplée à un hydrocraqueur (10 MPa /400°C) transformant les paraffines lourdes et les cires obtenues dans le réacteur FT, en hydrocarbures liquides utilisables. La chaleur de réaction est utilisée pour produire de la vapeur. Elle représente environ 20% du pouvoir calorifique de la charge en équivalent carbone. La réaction, associée à des étages de séparation et recycle du gaz, fournit un mélange d'hydrocarbures plus ou moins lourds selon les catalyseurs et les procédés, qui est fractionné pour fournir des bases naphta (pour vapocraqueur ou à isomériser pour obtenir l'octane des essences), des bases kérosène et des bases diesel de très bonne qualité (indice de cétane très élevé, faible densité, pas de soufre ni d'aromatiques).Le procédé produit de grandes quantités d'eau (2t/t BTL),qu'il faut purifier avant rejet ou réutilisation. Les sous produits éventuels ne constituent pas à priori une source de valorisation supplémentaire et sont recyclés ou brûlés.

¹⁵ Le rapport entre les PCI du carbone (0.75 tep/t) et de la biomasse (0.4 tep/t) explique les tonnages

des usines de première transformation et de prétraitement décentralisées près des exploitations forestières pour faciliter ensuite le transport et le stockage de biocrude vers une usine générale de gazéification et synthèse Fisher-Tropsch des charges collectées et homogénéisées ou, comme CHOREN, accepter les surcoûts d'usines BTL régionales, compatibles avec la production et la collecte de la biomasse. Le choix dépendra des productivités de biomasse, des coûts des prétraitements pour obtenir un biocrude stable et transportable, du gain de coût lié à l'effet de taille de l'usine de synthèse, et du risque financier acceptable pour un investissement de cette importance.



Références

Procédés LURGI – SASOL Afrique du Sud 10 Mt/an ex charbon
 SHELL – BINTULU – Malaisie ex gaz
 Projet CHOREN/Freiberg – 15.000/an BTL automne 2007
 Projet CHOREN Allemagne 500 M. euros, 1Mt MS en charge.

Economie

Investissement : 1500M\$ / 1 Mt/an Diesel BTL (sol nu)

La taille économique devrait se situer autour de 2à3Mt BTL. Ce qui implique un approvisionnement continu en charge issue de biomasse sur de grandes distances, et une optimisation entre la collecte des charges, leur prétraitement et l'usine BTL, et l'utilisation des produits dans les carburants distribués.

En ordre de grandeur, pour 3 Mt/an BTL, l'investissement serait de 3100M\$.

En estimant à 10%/an les frais de capital, et à 10%/an les frais fixes de maintenance et de personnel, et en estimant à 30\$/t BTL les frais variables, (électricité, produits chimiques, catalyseurs...), le coût de la gazéification et synthèse F.T (hors prétraitement de torréfaction ou pyrolyse) serait de l'ordre de 236\$/t BTL¹⁶, soit 34\$/bbl, soit 47\$/t M.S.

Avec les mêmes répartitions des coûts, le projet CHOREN conduirait à 530 \$/t BTL, 106\$/t MS. Il serait de l'ordre de 330\$/tBTL, 66\$/t.M.S, pour 1Mt/an Diesel BTL.

Consommations

¹⁶ Il n'est donc pas certain que le gain sur la taille de l'usine de synthèse ne soit pas annulé par le surcoût des unités de pyrolyse par rapport à une simple torréfaction. Dans notre exemple les coûts sont équivalents. Il est donc probable que l'industriel de l'usine BTL réduira ses risques en ne produisant que 1Mt BTL plutôt que 3.

Le bilan énergétique du procédé est globalement équilibré, compte tenu de l'ajustement du rapport $2H_2/CO$ au gazeur et de la combustion d'une partie de la biomasse. Mais les besoins d'électricité pour les unités d'air, et l'hydrocraqueur sont importants. Les consommations de catalyseurs et de produits chimiques sont significatives.

Développements

Si les principes généraux d'une transformation du carbone ou du méthane en hydrocarbures par la voie gazéification/synthèse F.T., sont bien connus et éprouvés, leur application à la biomasse demande encore à être prouvée industriellement. La variabilité de composition des charges en carbone, hydrogène, oxygène, azote, cendres etc. induit en effet des problèmes de dimensionnement et de contrôle de l'ensemble gazeur, synthèse et hydrocraqueur qui requièrent encore des améliorations et des démonstrations de taille industrielle.

Les projets en cours ou annoncés par CHOREN, associé à SHELL, sont donc suivis avec grand intérêt.

5- De la production de biomasse aux carburants, quel schéma industriel ?

La chaîne de production BTL nécessite une organisation et une coordination à de multiples niveaux entre les opérateurs, de l'exploitation rationnelle des terres à la mise en distribution des carburants obtenus. *Elle nécessite aussi un engagement à long terme garantissant la rentabilité des plantations, comme celle des investissements industriels très lourds, alors que les marchés sont ouverts et en compétition.*

Examinons les étapes d'une chaîne biomasse/carburants dans l'hypothèse optimiste d'une organisation industrielle d'une production de masse. Les coûts sont rapportés à la fois aux intrants (Biomasse : tMS) et au produit (biocarburant : bbl BTL)

5.1 La production de biomasse

Pour obtenir in fine 3Mt/an de biocarburant, il faut disposer de 15Mt/an de biomasse sèche, ce qui utilise au moins 1.5Mha soit une plantation de 120kmx120km. Une telle surface consacrée à la biomasse est peu réaliste en Europe, et ce seront en fait sur des ensembles régionaux de taille plus réduite que seront produites et collectées les charges brutes, les déchets de bois, les pailles, les bois et plantes spécifiquement cultivées pour leur rapidité de croissance et leur rendement énergétique.

La valeur de cette production devra rémunérer les exploitants : valeur des sols, personnel, machines, semis et plants. En Europe, la valeur des sols exploitables en particulier avec des machines est relativement élevée, de même que les frais de personnel. Une hypothèse de 60\$/t MS, cohérente avec un stère de bois à 30\$, et un prix du maïs de 120\$/t n'assure qu'un revenu brut de 60000\$/an pour 100 ha. Il est donc nécessaire d'améliorer très sensiblement la productivité des cultures de biomasse énergétique car cette hypothèse équivaut déjà à 45\$/bbl BTL.

5.2 Le transport vers les centres de prétraitement

En imaginant des sites de production régionaux associés à des usines de prétraitement de 1.5Mt/an, concentrant la biomasse sur 1Mt/an de biofuel fluide, stockable et transportable, on doit aussi organiser la logistique d'approvisionnement de ces sites.

Cette quantité équivaut à 7500 tMS/j ouvré, environ 15000 m³/j, 2 rotations /j pour 200 camions, avec chauffeurs et chargeurs. Le coût de cette logistique riche en main d'œuvre devrait en Europe se situer dans une fourchette 30-45 M\$/an, soit 20-30 \$/t MS, et 15-20 \$/bbl BTL

5.3 Les centres de prétraitement

Ils collectent la biomasse brute pour la sécher, la broyer, avant une pyrolyse ou un autre traitement conduisant à un biofuel fluide. Une dizaine sont nécessaires pour approvisionner une usine de synthèse ce qui assure une certaine garantie sur la continuité de son approvisionnement. Nous avons estimé le coût de ces opérations à 40\$/tMS, soit 30\$/bbl BTL.

5.4 Le transport du biofuel vers l'usine de synthèse

Les centres de prétraitement étant répartis sur le territoire pour une ou deux usines de synthèse situées en zone portuaire pour garantir l'équilibre avec les marchés internationaux, et pour permettre le transport par cabotage, les distances de transport sont importantes et justifient des logistiques dédiées, soit par fer, soit par chalands, soit par cabotage. Les oléoducs existants ne peuvent sans doute pas être utilisés par les biofuels. Nous estimons ce coût de transport à 5-10\$/t biofuel, soit 10\$/t MS, ou 7\$/bbl BTL.

5.5 L'usine de gazéification et synthèse

C'est un ensemble industriel d'unités de type pétrolier, de grandes dimensions et complexes. L'intégration de cet ensemble à une raffinerie permettrait de bénéficier de fortes synergies, aussi bien pour l'utilisation des produits BTL, que pour les compétences requises dans la réalisation et l'exploitation d'unités sous pression d'hydrogène, et de fractionnements. Nous avons estimé le coût de cette conversion du biofuel en biocarburants kerosene et diesel à 47-66\$/tMS soit 34-48\$/bblBTL.

5.6 Récapitulation : Quels niveaux de prix au total ?

Nos estimations n'ont pour but que de donner des ordres de grandeur, et de souligner les points économiquement sensibles.

La biomasse, matière première brute départ à 60\$/t MS représente 45\$/bbl BTL, sans assurer un revenu très rémunérateur aux exploitants dans un contexte européen.

Son transport vers les sites de prétraitement, 20-30\$/t MS, soit 15-20\$/bbl BTL, est coûteux car on manipule de grandes quantités de solides pour une production finale faible. La biomasse rendue revient à 80-90\$/t MS.

L'étape de prétraitement, 40-66\$/t MS, soit 30-50\$/bbl BTL, est également coûteuse du fait de la multiplication des centres, de la relative complexité de ces prétraitements, et du faible rendement final.

Le transport du biofuel, 10\$/t MS, soit 7\$/bbl BTL, supporte également le faible rendement de la synthèse.

La gazéification –synthese, 47-66\$/t MS, soit 34-48\$/bbl BTL, représente finalement un coût modéré dans la chaîne globale, malgré la lourdeur des investissements industriels, en bénéficiant de l'effet de taille.

Au total, le coût des biocarburants ex biomasse par la voie de la synthèse Fisher-Tropsch est de l'ordre de 885-1160\$/M.S., soit 125-165\$/bbl BTL, dans l'hypothèse d'un rendement de synthèse de 20%. Il dépend directement du rendement de la synthèse, et du prix de la biomasse, ce qui justifie toutes recherches visant à accroître les rendements de l'ensemble gazéification/réaction Fisher-Tropsch, et à produire davantage de biomasse par hectare exploité.

6-Les voies de recherche et développement

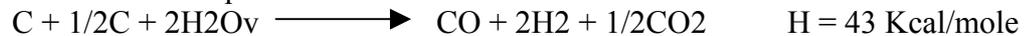
6.1-Les réactions de gazéifications, stoechiométrie

Nous avons vu que l'économie de la filière biomasse/gazéification F.T./synthèse supportait les coûts de production, transport et prétraitement de 100t de matière première sèche, pour conduire à 20t seulement d'hydrocarbures, avec des pertes énergétiques supérieures à 50%.

En remarquant que la réaction de gazéification F.T. de base à 1200°C équilibrée thermiquement



ne valorise en chaîne -CH₂- que 1 carbone sur deux, soit un rendement masse limité à 14/24=58% du carbone, soit environ 29% de la biomasse, et un rendement énergétique de 73%, on réalise qu'une partie des pertes résulte de la combustion d'une partie de la charge pour ajuster le bilan thermique de la réaction

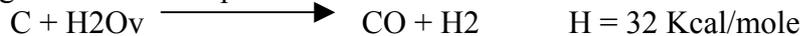


Par la combustion de



En fournissant 43 Kcal/mole au procédé, à haute température, soit 2400 Kcal/kg C ou 1200 Kcal/kg biomasse, on peut valoriser un carbone sur 1.5, pour un rendement masse de 77% du carbone, soit 38% de la biomasse, et un rendement énergétique de 75%.

En apportant le complément d'hydrogène pour les proportions F.T. et la chaleur à la réaction de gazéification simple



Par exemple $H_2O_l \longrightarrow H_2 + 1/2 O_2 \quad H = 68 \text{ Kcal/mole}$,

On apporte 2670 Kcal/kg C ou 1335 Kcal/kg biomasse, et 0.085 kgH₂/kg biomasse.

Le rendement masse est de 117% du carbone, 58% de la biomasse. Le rendement énergétique est de 92% hors hydrogène, mais en prenant en compte l'énergie de dissociation de l'eau pour le produire, on apporte 100Kcal/mole au total, soit 8330 Kcal/kg C, 4170 Kcal/kg biomasse pour un rendement énergétique de 71%.

Bien entendu, *ces rendements sont des valeurs théoriques* résultant des stoechiométries et des équilibres thermiques, et constituent donc des limites maximales que les irréversibilités et les pertes réduiront sensiblement : par exemple, la réaction de base ne conduit qu'à un rendement de 20% et non de 29%.

Il apparaît cependant que la théorie ouvre une voie de recherche permettant de mieux tirer profit d'une biomasse difficile à exploiter et à transporter, à condition de bénéficier d'une source d'énergie à haute température, non émissive de CO₂, et économique, ainsi que d'hydrogène (par exemple électrolytique ou dissociation thermique).

Ainsi, l'IFP et le CEA sont associés dans un projet de recherche visant à améliorer la production de biocarburant de synthèse F.T. en apportant la chaleur au procédé sous forme d'électricité nucléaire, (ou même chaleur de réacteur nucléaire à haute température), et en apportant le complément d'hydrogène par électrolyse ou dissociation thermique de l'eau.

6.2-Perspectives d'amélioration des procédés

Evaluons les perspectives économiques et industrielles de ces schémas. Ils reposent sur une hypothèse que l'on peut expliciter de la façon suivante :

*Alors que le prix des carburants (usages mobiles) s'élèvera de façon continue, on disposera, pour les usages fixes, de sources d'électricité (ou de chaleur haute température) dont le prix restera modéré.*¹⁷

Dans le schéma **d'apport de chaleur**, pour traiter 6.7 Mt/an de biomasse, l'apport de chaleur (0.12tep/t,) serait de 0.8Mtep/an soit 9.3 Twh. La production théorique de biocarburant serait portée de 1.94 à 2.61 Mt/an, la production vraisemblable plutôt de 1.3 à 1.8 Mt/an. Le coût de la chaleur, sur base électronucléaire, 40\$/Mwh, est de 372 M\$/an. Soit 744\$/t BTL complémentaire (environ 110\$/bbl), et permet bien de réduire le coût global de production si les modifications pour apporter la chaleur à la gazéification ne sont pas trop coûteuses. On notera que l'on consomme 2% de la production d'électricité française, soit une tranche nucléaire, pour produire 0.5Mt/an BTL.

Dans le schéma **d'apport de chaleur et d'hydrogène** (voie électrolyse de l'eau, sur la base de l'énergie de dissociation, hors irréversibilités), pour traiter 6.7 Mt/an de biomasse, l'apport d'énergie (chaleur + hydrogène), 0.42 tep/t, serait de 2.8 Mtep/an soit 32.6Twh.

La production théorique de biocarburant serait portée de 1.94 à 3.9 Mt/an ,la production vraisemblable plutôt de 1.3 à 2.7 Mt/an. Le cout de l'énergie, sur base électronucléaire, 40\$/Mwh, est de 1304M\$/an, soit 931\$/tBTL complémentaire, et reste dans la fourchette des coûts. On consommerait alors 6-7% de l'électricité française, soit 3 tranches nucléaires, pour produire 1.4 Mt/an BTL .

Nous résumons ci-dessous les estimations économiques de ces développements :

6.7Mt/an, 20000t/j biomasse	schéma base	apport chaleur	chaleur+H2
Coût biomasse 60\$/t	402M\$/an	402	402
transport vers prétraitement 25\$/t	168	168	168
prétraitement 40\$/t	268	268	268
transport biofuel 10\$/t MS	67	67	67
gazéification –synthèse 55\$/tMS	368	368	368
énergie et hydrogène	0	372	1304
coût annuel M\$/an	1273	1645	2577
production BTL vraisemblable Mt/an	1.3	1.8	2.7
coût BTL \$/t BTL	979	914	954
production maxi théorique Mt/an	1.94	2.61	3.9
coût BTL \$/t BTL	656	630	660

¹⁷ On peut penser à l'électronucléaire, au charbon avec séquestration (si les prévisions de l'AIE se vérifient), ou même à l'énergie solaire. Dans le texte, on a utilisé des prix liés à l'électronucléaire, mais le raisonnement est applicable, mutatis mutandis, à d'autres sources et systèmes de prix.

En conclusion, *ces développements impliquent que l'hypothèse centrale sur le système des prix soit vérifiée, ce qui peut conduire à des investissements considérables en électricité.* Ils rendent interdépendants les producteurs de biomasse, l'industriel biocarburant et les producteurs d'énergie, et ne modifieraient les économies biocarburant que si des progrès permettaient d'approcher les rendements théoriques, ou si le coût de la biomasse exigeait de limiter son usage.

A moyen terme, on peut sans doute disposer d'hydrogène plus économique, et le couplage de la gazéification de biomasse à une production d'hydrogène par vaporeformage de gaz naturel serait probablement un moyen efficace d'améliorer les performances de conversion, mais ne serait pas 100% BIO... En effet, l'appoint d'hydrogène peut être obtenu à partir de ¼ mole CH₄ pour 1 mole C, avec un faible apport d'énergie, soit une consommation de 17 t CH₄ pour 100 t biomasse, qui, couplée à un apport de chaleur électronucléaire ou biomasse, permettrait de multiplier par 2 la production de BTL sans bouleverser la stratégie électronucléaire nationale.

Une voie de recherche plus pragmatique, qui conviendrait aux raffineurs, consiste à étudier l'injection d'un biocrude dans un cokéur ou dans un hydrocraqueur de produits pétroliers lourds, avec apport d'hydrogène produit conventionnellement à partir de gaz (steam reformeur) ou de coupes très lourdes (oxydation partielle). Ce serait alors une voie naturelle de fabrication de carburants ex biomasse, progressive et bien intégrée dans un outil industriel et commerçant existant¹⁸.

Chapitre 6

Biomasse : les ressources accessibles

Comme cela était expliqué en Introduction, la question des biocarburants est structurée par une sorte de « fracture », de division en deux générations technologiques, et en deux périodes de temps successives. Le chapitre 1 (Filière Ethanol et Filière Diester) relève de la première période, les chapitres 2 et 3 (Filière enzymatique et Filière thermochimique) de la seconde. Le présent chapitre va traiter des deux périodes et sera donc, lui-même, divisé en deux parties. En effet, les questions l'on est amené à se poser sont très différentes selon que l'on traite de la première ou de la seconde génération.

Pour les filières Ethanol et Diester, les questions-clés concernent la façon dont l'agriculture française et les agricultures mondiales pourront fournir, pour un prix compétitif, des quantités de biocarburants qui soient en ligne avec les plans de développement annoncés. Ces plans

¹⁸ **Remerciements**

Nous tenons à remercier Daniel BALLERINI de IFP et Philippe BONNELLE de TOTAL pour les renseignements qui ont permis de compléter et valider les informations utilisées dans ce chapitre.

sont (très) ambitieux, mais les biocarburants partent d'un niveau très bas. La notion de « ressources ultimes » n'est donc pas vraiment pertinente. Celle de la relation entre les objectifs quantitatifs et les prix l'est bien davantage.

A l'opposé, lorsqu'on aborde la seconde génération, on doit se poser la question de la biomasse disponible et des ressources ultimes. Question qui est inséparable de celle du partage des ressources naturelles (l'eau et les sols) entre les différents usages, et principalement l'alimentation. La capacité des différentes filières à utiliser le carbone contenu dans toute la plante, et à dissocier, le cas échéant, carbone et énergie¹⁹, fait que la question des ressources ne peut pas recevoir une réponse simple et univoque.

Le chapitre va donc être divisé en deux sous-chapitres, correspondant à chacune des deux « époques ».

Pour éviter les incompréhensions, on doit insérer ici un « avertissement » soulignant que, lorsqu'on parle de production par hectare (en litres ou en Tep par hectare), il s'agit toujours de la production finale « brute », quels que soient les apports d'énergie intermédiaires. Le point de vue adopté est donc très différent de celui des ACV évoquées au chapitre 1, car la question que ce chapitre veut instruire est avant tout la question des ressources en biomasse (ou en carbone d'origine biologique) disponibles pour les programmes « Biocarburants »

Première partie : Technologies Ethanol et Diester

Au cours de cette première époque (qui prend fin au voisinage de 2020), « l'outil » qui peut fournir la biomasse nécessaire est bien précisé ; c'est l'agriculture des céréales et des oléagineux. La forêt et les « déchets agricoles ou forestiers » ne jouent pas encore de rôle. Les ressources ne peuvent croître que par un changement de l'usage des sols (Land Use- Land Cover : LULC) : Extension de la part des cultures énergétiques, extension des hectares cultivés par remplacement des prairies et des jachères. Ou par une généralisation (au niveau européen) de rendements élevés.

1-Objectifs annoncés et hectares nécessaires - Europe et France

Les décisions (pourcentages de biocarburants allant de 5.75% à 10%) ont été annoncées par l'Europe en Mars 2007. Elles sont *renforcées* par la décision de donner aux Energies renouvelables une part de 20% dans le mix énergétique

¹⁹ Comme cela était expliqué à la fin du chapitre précédent.

	2008	2010	2015	2020
Europe (énergie transports) ²⁰	370 MTep	380	390	405
France (énergie transports)	57 MTep	58	60	61
Europe (biocarburants)	4% - 15MTep	5.75% - 22	8% - 31	10% - 40
France (biocarburants)	5.75% - 3.3	7% - 4	10% - 6	10% - 6
Europe (Mha) ²¹	10 Mha	15	20	27
France (Mha)	3.3	4.0	6	6

Les rendements annoncés pour les filières 1 et 2 sont variables, de 1.0-1.2 Tep/ha (diester) à 1.9-2.2 Tep/ha (éthanol). Comme la structure des transports européens conduit à ce que le diester soit dominant, on a utilisé un ratio de 1.5 Tep/ha. Ce qui conduit aux chiffres du tableau pour les hectares nécessaires. Il s'agit, comme on l'a déjà fait remarquer, d'hectares de céréales ou d'oléagineux, qui peuvent provenir :

- Soit de réaffectation de cultures céréalières (alimentation)
- Soit de mise en culture de jachères ou de pâturages

2-Hectares disponibles et contraintes environnementales

Dans son rapport « How much bioenergy can Europe produce without harming the environment ? » (ref 4), l'EEA fait le point sur les ressources disponibles entre 2005 et 2030. L'origine possible pour ces ressources est triple :

- Il y a d'abord l'agriculture et les cultures bioénergétiques, actuelles ou futures
- La deuxième ressource est la forêt
- La troisième, qui occupe actuellement une place importante, est constituée par les déchets organiques.

*Au cours de la première phase, seule l'agriculture est concernée.*²² Concernant les *hectares supplémentaires disponibles* (available arable land) le rapport donne les chiffres suivants :

	2010	2020	2030
Hectares disponibles	13 Mha	16 Mha	20 Mha
Reconversion « grasslands »	1.8 Mha	4.5 Mha	5.5 Mha

Ces chiffres sont obtenus grâce au modèle CAPSIM, modèle d'équilibre économique partiel consacré aux productions agricoles des pays européens et aux politiques choisies. Diverses contraintes environnementales sont prises en compte : ressources en eau, biodiversité, érosion, développement (plus de 30% du total) de l'agriculture « extensive » et de l'agriculture « organique », etc..

L'approche choisie par l'EEA est donc assez conservative, et les chiffres du tableau sont plutôt des minima. Ce qu'ils montrent (surtout lorsqu'on y ajoute le chiffre des hectares

²⁰ Chiffres tirés de la ref (8), qui décrivent un scénario de référence jusqu'en 2030

²¹ On passe des productions aux hectares en utilisant un ratio Tep éthanol/ha. On a utilisé dans ce chapitre le ratio 1ha= 1.5 Tonne de biocarburant

²² Mais il faut noter que, dans la référence 4 cette agriculture comprend les « taillis à rotation rapide » et les cultures équivalentes (en particulier, lors de la conversion des « grasslands »). Au cours de la 1^{ère} phase, ce terme joue un faible rôle.

consacrés aujourd'hui aux biocarburants (5 Mha)) c'est qu'au cours de la première phase (2010 – 2020) le problème des ressources ne devrait pas se poser de façon aigüe. Du moins au niveau des Mha disponibles : savoir si les cultures de production de biocarburants se développeront et occuperont les Mha en question est, par contre, une question plus difficile à trancher.

3-Prix possibles et concurrence mondiale

Jusqu'ici, nous n'avons pas abordé la question des productions mondiales, et de la position de l'Europe sur le marché des biocarburants. Les chiffres de production ci-dessous sont extraits d'un exposé de C. Lacadée (AGPM) ref(6).

Production actuelle d'éthanol et de diester			
---	--	--	--

Ethanol en Mhl	2006	2010	2015
Europe	3.5 Mhl	7.0	8.5
dont : France			
USA	17	26	31
Brésil	19	22	25
Autres	11	15	21
Total	51 Mhl	70	85

Diester en MT	2006	2008	2010
Europe	4.1 MT	7.3	9.2
Dont : France			
Amérique Nord	0.7	2.1	2.9
Amérique Sud	0.4	1.6	2.1
Autres	0.3	3.7	4.6
Total	5.4 Mt	13.7	18.9

On voit tout de suite que l'Europe représente entre 7% et 10% de la production d'éthanol, entre 75% et 50% de celle de diester. Quant aux prix, ils sont donnés, pour l'éthanol, par les prix indicatifs suivants :

Europe : 50 €/hl (dont 25€ pour la biomasse) USA : 30€/hl (dont 15€ pour la biomasse)
 Brésil : 24 €/hl (dont 9€ pour la biomasse).

La référence (13) donne des rapports de prix très voisins : l'avantage est de 2 pour la « moyenne du Brésil » par rapport à l'Europe, de 2.5 pour les meilleurs producteurs. Et de 1.33 pour le maïs américain

Ce sont ces constatations (production assez marginale, et prix peu compétitifs) qui expliquent, beaucoup plus que le manque d'hectares disponibles, le fait que *les chiffres de croissance indiqués par les professionnels sont, de façon générale, plus faibles que ceux du tableau initial*. Les objectifs européens ont de grandes chances d'être atteints grâce à l'importation de biocarburants.

En conclusion :

On peut reprendre les trois constats principaux faits au cours de ce chapitre, et qui semblent bien caractériser la première phase :

- Il ne devrait pas exister, au cours de cette phase, de problème de ressources (hectares) pour disposer de la biomasse nécessaire. Les objectifs se situent à la limite de ce qui serait possible sans importation, mais justement l'importation jouera un rôle important.
- Les coûts envisagés par la profession sont nettement plus importants que les cours mondiaux : l'écart sur la biomasse est de l'ordre de 2.5. Ce qui devrait rendre l'importation inévitable.
- Les investissements nécessaires sont importants, pour des débouchés assez incertains, compte tenu de ce que seront les marchés internationaux..

Deuxième Partie : Technologies « Plante entière »

Dès que ces technologies seront disponibles de façon industrielle, l'outil de production de la biomasse destinée aux biocarburants sera beaucoup plus large que dans la première partie: il inclura aussi bien les forêts que les déchets d'origine biologique. Les quantités utilisables seront donc plus que doublées, d'autant que, au sein de la filière agricole, c'est la plante entière qui est prise en compte. Les questions de coût et de compétition entre usages ne disparaîtront pas pour autant, mais la question des « ressources ultimes » sera posée à nouveaux frais.

1-Performances annoncées

Les estimations dont on dispose aujourd'hui concernent, en général, trois quantités :

- Le nombre d'hectares disponibles pour la bioénergie²³, et pas seulement pour les biocarburants (qui ne peuvent en occuper qu'une partie)
- La production par hectare, en Tonnes de biomasse /ha
- Le contenu énergétique de la biomasse produite, en Tep/ha

Pour pouvoir se prononcer sur le développement des biocarburants, il faut connaître la « productivité » des filières utilisées, que l'on exprimera :

- Soit en Tep/tonnes de carbone contenues dans la biomasse
- Soit en Tep (carburant) /Tep (biomasse)

Malgré les apparences, le deuxième chiffre ne représente pas un « rendement ». En effet, il est tout à fait possible que, comme on l'a vu au chapitre 3, certaines filières ajoutent de l'énergie (soit directement, soit sous forme d'hydrogène) pour produire davantage de biocarburant²⁴.

2-En Europe : Compétition entre les usages

Dans le rapport de l'EEA déjà cité, on trouve une évaluation des quantités de biomasse (mesurées en Tep) qui pourraient être disponibles en Europe (de 2010 à 2030), sans affecter

²³ Bioénergie = biochaleur + bioélectricité + biocarburants . La répartition entre ces trois termes est, évidemment, une question essentielle.

²⁴ Le premier chiffre est, par contre, analogue à un rendement, car la « règle du jeu » interdit de rajouter du carbone d'origine non biologique : Si le rendement en carbone est égal à 1, le chiffre maximal est alors 1. 1 Tep/Tonne de carbone d'origine bio

l'équilibre alimentaire (mais en réduisant les exportations), et sans causer de dommage à l'environnement.

Production de Bioénergie, selon l'origine, et selon l'affectation

	2010	2020	2030
Agriculture	46 MTep	95 MTep	142 MTep
Forêts	42	39	39
Déchets	100	100	102
Total	188	234	280

Ce tableau montre bien que « Forêts et Déchets », qui sont aujourd'hui les sources dominantes de biomasse-énergie pourraient être, en 2030, rattrapées par le développement de l'agriculture, qui passerait de 40Mtep à 140Mtep. L'affectation de la *biomasse agricole* est faite, dans le rapport, selon trois catégories : biocarburants, biogaz, taillis (biomasse solide : électricité ou chaleur).

Utilisation de la Bioénergie, selon les applications

	2010	2020	2030
biocarburants	20 MTep	27 MTep	21 MTep
biogaz	13	33	53
Chaleur/Electricité	13	35	68
Total	46	95	142

Si l'on suit les conclusions de l'EEA, le potentiel de la bioénergie est très important, et celui des biocarburants assez faible. Mais ces données prospectives sont étroitement liées au choix des filières. Il est évident que le rapport favorise la génération d'électricité et le chauffage, et donc le biogaz et les combustibles solides²⁵. Rien ne prouve que, si l'évolution économique l'imposait, les biocarburants ne puissent pas se voir adjuger la moitié du total de la biomasse produite. Soit 140 Mtep (au dépens de la génération d'électricité et de la chaleur), et non pas 20Mtep.²⁶

Ce que l'on doit retenir, c'est donc qu'en Europe, et de façon plus générale dans le monde, la concurrence entre les différents usages de la biomasse – énergie sera importante, et que c'est une des clés de l'avenir des biocarburants. Au niveau de 20 ou 25 Mtep, les biocarburants représentent 5% à 6% de la consommation des transports européens. Au niveau de 140 Mtep, de l'ordre de 35%.

3-Au niveau mondial.

L'étude la plus complète des ressources de biomasse mobilisables (vers 2050) au niveau mondial, ainsi que de l'équilibre entre alimentation et bioénergie, a été faite par Michel Griffon (référence). A la base de cette étude, on trouve deux « diagnostics » :

²⁵ Le fait que les biocarburants diminuent entre 2020 et 2030 est caractéristique de ce biais

²⁶ Les chiffres pour la France, tels qu'avancés par l'ADEME pour la préparation du Plan Biocombustibles, sont de 45 Mtep/an pour le potentiel de gisement lignocellulosique mobilisable à horizon 2030, dont 13 Mtep/an pour les biocarburants. Dans ces conditions, les surfaces mobilisées seraient de 2 Mha en agriculture (1^{ère} génération) et de 4 Mha en agriculture et forêt (2^{ème} génération). Rappelons qu'en France les grandes cultures occupent 18 Mha, les prairies 10 Mha et la forêt 15 Mha.

- Vers 2050, l'humanité dans son ensemble s'approche d'une situation de déficit alimentaire (ou du moins de forte tension). Donc, dans toute évaluation des ressources mobilisables, on doit compter pour rien l'Inde, la Chine, l'Asie du Sud et du Sud-Est.
- Alors que les forêts du « Nord » s'étendent et augmentent la masse de carbone stocké, les forêts du « Sud » (Amérique latine et Afrique) sont en recul sensible, et doivent être protégées (ref 11).

Ces deux éléments de diagnostic expliquent pourquoi, alors que le total des surfaces que l'on peut mettre en culture (éventuellement aux dépens de la forêt) est très grand, il en reste très peu, en fait, lorsqu'on tient compte des besoins alimentaires. Ceux-ci croissent en effet très rapidement avec l'augmentation de la population et des revenus. C'est ce que montre le tableau ci-dessous :

Besoins alimentaires, et surfaces disponibles, pour les trois continents			
--	--	--	--

	Asie sud et sud-est	Amérique latine	Afrique s-saharienne
Besoins actuels	1800 MTonnes	272 MTonnes	262 MTonnes
Besoins 2050	4150 MTonnes	520	1350
Surfaces actuelles	439 Mha	203 Mha	228 Mha
Surfaces 2050	586 Mha	1066	1030
Production	3190 MTonnes	1704	1350

On peut alors examiner ce que Michel Griffon considère comme un scénario « ambitieux » ; c'est-à-dire *un scénario très tourné vers la production de bioénergie*

Production de bioénergie, en 2050, scénario « très ambitieux »					
--	--	--	--	--	--

	Asie	Am Latine	Afrique	OECD	Russie
Surfaces	25 Mha	120 Mha	120 Mha	150 Mha	150 Mha
Tep / ha	2	5	4	2	1
Production -Tep	50 MTep	600 Mtep	480 MTep	300 Mtep	150 Mtep
Supplément		200 MTep	150 Mtep	300 Mtep	150 Mtep

Les trois premières lignes du tableau correspondent à des « cultures énergétiques », d'ailleurs bien adaptées à la production de biocarburants. On peut alors, comme l'a fait le rapport de l'EEA, ajouter à ces chiffres *ceux qui correspondent à la biomasse forestière et aux déchets d'origine biologique*. C'est ce qui a été fait (scénario très ambitieux) dans la ligne « supplément » : 30% de la ligne précédente pour l'Afrique et l'Amérique latine, 100% pour l'Europe, l'Amérique du Nord, et la Russie. *Cette dernière ligne ne figure pas dans le rapport de Michel Griffon*

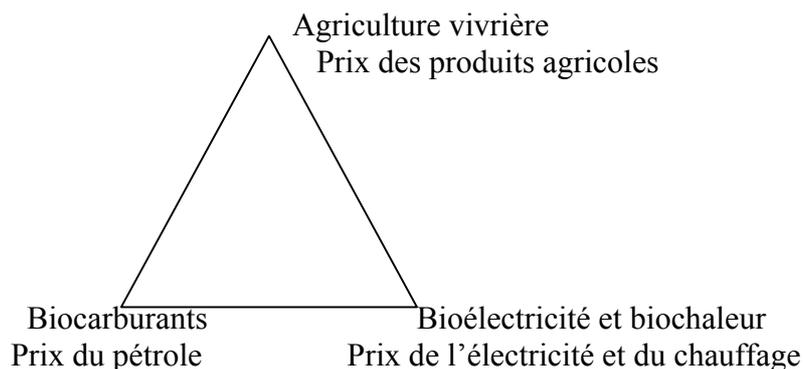
On arrive alors à une évaluation maximale de 2.480 Mtep, dont 1580 Mtep proviennent de cultures²⁷. Au sein de ce total, la part des biocarburants pourrait être élevée : en effet, les biocarburants risquent d'avoir une valeur marchande bien supérieure à celle de la bioénergie.

²⁷ Il faut noter que le scénario considéré comme le plus probable (moins ambitieux) conduit à des valeurs inférieures. Amérique latine : 130 Mtep pour 26 Mha ; Afrique : 240 Mtep pour 60 Mha.

Le chiffre final, bien que différent, est comparable à ceux que cite la ref (13) qui évoque, pour la bioénergie, un potentiel de 3.760 Mtep. La valeur élevée de ce dernier chiffre s'explique, avant tout, par une sous-estimation des besoins liés à la nourriture.

4- Conclusions

La conclusion qui paraît s'imposer est que, au cours de la 2^{ème} période, les biocarburants devront trouver une place au sein d'une compétition triangulaire :



Cette compétition sera gouvernée par l'évolution de trois groupes de prix, comme l'indique la figure.

- le prix des produits agricoles (céréales, sucre, oléagineux) qui, après avoir chuté (division par 2.4 entre 1960 et aujourd'hui) est parti à la hausse, sous l'influence de l'augmentation des besoins. Ce prix sera probablement mondial.
- Le prix des carburants pétroliers, éventuellement augmenté d'une taxe sur le CO₂, pourrait doubler ou tripler. Ce prix sera mondial.
- Le prix de l'énergie « pour usages fixes » (électricité ou chauffage) sera le résultat de l'évolution des prix du gaz et du charbon (avec séquestration du CO₂), et du nucléaire. Ce prix sera continental, voire national, car il dépendra du « bouquet énergétique » qui caractérisera les nations ou les continents.

Les termes utilisés (« prix mondial » et « taxe CO₂ » « bouquet énergétique ») *dépendent énormément du scénario d'évolution de l'économie mondiale dans lequel on se situe*. Il y a une correspondance étroite entre trois termes : scénario mondial, système des prix, évolution des biocarburants. De sorte que, pour pouvoir se prononcer sur le devenir des biocarburants en Europe, il faudrait être capable de construire une prospective énergétique mondiale, ce qui dépasse, évidemment, le cadre de ce rapport.

A titre de conclusion provisoire, néanmoins, on peut noter que les études prospectives courantes proposent deux orientations qui paraissent bien difficiles à justifier :

- Les institutions européennes favorisent la bioélectricité et la biochaleur : on ne voit pas se dessiner un système de prix qui justifierait ce choix.
- Les producteurs de biocarburants semblent persuadés que, dans le cadre des filières « plante entière », les biocarburants européens pourront affronter la compétition avec ceux de l'Afrique et de l'Amérique latine. Les chiffres que donne la référence (1) montrent qu'il n'en est rien. L'avantage de ces deux continents est, potentiellement, aussi fort pour les filières futures que pour celles d'aujourd'hui.

Références utilisées

- (1)- « Will the World have enough space and resources for food and energy production from biomass? » Michel Griffon – CIRAD - 2005
- (2)- « Biomass Utilization, Limits of » – David Pimentel Encyclopedia of Physical Science and Technology 2002
- (3)- « L’Agriculture, une alternative au « carbone fossile » - AGBP - Paris, 14 février 2007
- (4)- « How much bioenergy can Europe produce without harming the environment? » European Environment Agency – 2006
- (5)- Coordination de la valorisation de la Biomasse- Note Stratégique – Claude Roy – 2006
- (6)- « Bioénergie : un défi pour l’agriculture. » Claude Lacadée - Journée AFEID - 6 février 2007
- (7)- La production des biocarburants de seconde génération par voie thermochimique : le programme du CEA- Sylvie Rougé - 27-29 Novembre 2006
- (8)- European Energy and Transport: Trends to 2030 – Update 2005
- (9)- L’énergie (édition 2004) Ministère de l’Economie et des Finances.
- (10)- Evaluation des ressources forestières mondiales 2005 – FAO – « Les 15 résultats principaux »
- (11)- Analyse de la ref (4)- Pierre Bacher - Septembre 2006
- (12)- Ratios utiles3.doc note à compléter
- (13) « Impact of an increased biomass use on agricultural prices, markets and food security : a long term perspective » ; Josef Schmidhuber – 2006
- (14) « Fuelling the Future – a consultation document » <www.forsight.gov.uk>

Chapitre 7

Conclusion

Lorsqu'on aborde le dossier des biocarburants, on constate immédiatement qu'il faut distinguer entre deux générations technologiques :

- La première concerne les technologies utilisées actuellement. Elle s'applique à un nombre limité de cultures : canne à sucre, betterave, maïs, blé, huile de palme et colza.
- La seconde est encore en préparation. Les technologies correspondantes permettront, lorsqu'elles auront atteint leur maturité, de tirer parti de « la plante entière », et non pas seulement de la fraction « noble ». Et d'accepter, pratiquement, une biomasse provenant de toute origine : déchets agricoles, forestiers, etc..

La première génération est déjà déployée, et l'on s'attend à ce qu'elle reste en place jusqu'en 2015 – 2020. La seconde devrait, progressivement, prendre le relais et couvrir la période 2020 – 2050 et au delà.

Le Rapport a donc traité successivement des deux générations. Les problèmes qu'il a abordés et les conclusions auxquelles il aboutit sont évidemment différentes d'un cas à l'autre.

La Première Génération

La relance des biocarburants, initiée en Europe à partir du début des années 1990, s'est bâtie à partir de trois politiques qui, bien que déconnectées au moment de leur lancement, se sont complétées au fur et à mesure de leur déroulement :

1. Le soutien à la filière agricole
6. La lutte contre l'effet de serre.
7. Le soutien des gouvernements au démarrage d'une nouvelle filière industrielle allant dans le sens d'une plus grande indépendance énergétique.

Cette « relance » s'est appuyée sur une première génération de biocarburants, qui fait intervenir des filières éprouvées (éthanol et biodiésel). Elle joue un rôle particulièrement important au Brésil, qui réalise 36% de la production mondiale d'éthanol, à égalité avec les USA. L'Europe, pour sa part, a fixé des objectifs : 5.75% des carburants utilisés en 2010 (et 10% en 2020) devront provenir, soit de la filière éthanol, soit de la filière biodiésel.

Un tel développement n'a pu se faire sans d'importantes subventions²⁸, que justifiaient les trois motifs exposés plus haut. Or, deux au moins de ces motifs sont aujourd'hui remis en cause :

- Sous l'influence de la demande mondiale, et en particulier de celle des pays asiatiques, les prix agricoles ont cessé de décroître, et ont même entamé une évolution dans l'autre sens. La nécessité d'un soutien est donc devenue discutable.
- La plupart des organisations écologiques mondiales (ou françaises) ont des doutes sur l'efficacité et le coût des biocarburants actuels pour réduire les émissions de CO₂. On peut critiquer leur façon d'établir les bilans, mais on est obligé de constater leur absence de soutien²⁹.
- Enfin, les organisations internationales (AIE, OCDE, OMC) sont très sensibles aux perturbations que les cultures consacrées aux biocarburants, et les subventions qui leur sont attachées, entraînent sur les marchés agricoles. On s'éloigne un peu plus d'un fonctionnement équilibré et sans subventions, alors que rien ne semble justifier cette évolution³⁰.

Ces arguments ne s'appliquent pas au cas du Brésil, car le prix de l'éthanol brésilien (qui est compétitif par rapport au pétrole) est de l'ordre de 250\$/M³. Ils correspondent tout à fait, par contre, à la situation des USA(350\$/M³), et surtout de l'Europe (600\$/M³). Celle-ci est donc à peu près obligée de réfléchir à un changement de génération, même si elle ne peut pas « abandonner » ceux qui ont commencé à investir sur la première.

La deuxième génération

²⁸ Le rapport de l'OCDE « Biofuels : linking support to performance » (2007) cite des exemptions de taxe de 1 milliard \$ au Brésil, et de 4 milliards aux USA pour l'année 2007 et 4 milliards \$ en 2006 pour EU25

²⁹ La demande, faite à l'ADEME lors du Grenelle de l'Environnement, d'établir un bilan complet des différentes filières correspond à ces réticences, dont le premier chapitre de ce rapport s'est fait l'écho.

³⁰ Les termes d'un rapport de la FAO sur ce point sont extrêmement clairs, et devraient être médités par les européens ; « Policy distortions of developed countries agricultural markets, which were slowly and painfully reduced in the 1990s, will not be re-introduced through the « bioenergy backdoor ».

Les carburants de deuxième génération se situent encore au niveau de la recherche, des pilotes de démonstration, et du choix des filières de développement. On est, en effet, amené à distinguer deux voies possibles pour atteindre les objectifs recherchés :

- La voie enzymatique (que présente le chapitre 4) qui aboutit à l'éthanol, à partir de matières premières (pailles, bagasse, bois) qui étendent très largement le champ de la 1^{ère} génération.
- La voie thermo-chimique (traitée au chapitre 5) qui recouvre en fait plusieurs filières, traite les mêmes matières que la voie enzymatique, et aboutit à des produits très proches des produits pétroliers actuels.

On doit souligner que, dans tous les cas, la mise en place de la seconde génération demandera du temps pour la mise au point des procédés, et *des investissements importants pour la mise en place du système complet*. C'est ainsi que le chapitre 5 a montré que, pour aller chercher la biomasse là où elle est disponible, faudrait probablement construire un système à deux niveaux. Le premier niveau (<100 000 Tonnes), situé à proximité des lieux de collecte, alimentant le second (>1 Million de Tonnes) qui serait analogue à une raffinerie.

Indépendamment des obstacles que rencontre tout développement nouveau de grande ampleur, *la mise en place d'une industrie des biocarburants de deuxième génération devra affronter trois difficultés spécifiques*. Le rapport les a examinées toutes les trois (en particulier au chapitre 6) :

- La première est liée à la *limite des ressources disponibles en matière de biomasse*. Dans la mesure où la deuxième génération veut représenter plus qu'un « appoint » aux carburants fossiles (ce qui est, pour l'essentiel, la situation des biocarburants actuels), il est inévitable qu'elle entre en compétition, au niveau des ressources, avec les usages alimentaires. Cette compétition est atténuée par l'usage des déchets, des pailles, de la forêt, etc... mais elle n'en demeure pas moins.
- La seconde concerne la *concurrence entre les différentes formes de bio-énergie : bio-chaleur, bio-électricité, bio-carburants*. Suivant les pays, l'une ou l'autre de ces formes peut être dominante. Au niveau européen, la part laissée aux biocarburants est assez faible, de sorte que la France, qui les choisit comme axe de sa politique, se trouve relativement isolée.
- La troisième concerne la *concurrence entre pays* : c'est la même difficulté que l'on rencontre à propos de la première génération. Si, malgré leurs efforts, l'Europe et la France aboutissent à un écart de prix trop important en leur défaveur, il sera difficile d'attirer un volume important d'investissements sur l'ensemble des filières.

En définitive, on est amené à dessiner, pour les carburants de deuxième génération, deux scénarios de développement très différents. Aucun des deux ne peut être exclu aujourd'hui et, comme ils sont franchement différents, l'évolution réelle peut se situer « n'importe où » sur un arc entre les deux extrêmes.

Le premier de ces scénarios correspond aux ambitions initiales, et en particulier à la lutte contre les émissions de CO₂. Les biocarburants peuvent représenter, à l'horizon 2030 – 2050, une part significative (jusqu'à 20%) des carburants liquides utilisés, et leur qualité essentielle est d'être « carbon-free ». Compte tenu des limitations qui portent sur les ressources en biomasse, il faut que cette biomasse *soit utilisée pour son carbone plutôt que pour son énergie*. Les procédés doivent donc permettre l'apport d'hydrogène et d'énergie, eux aussi

« carbon free » pour *maximiser le rendement en Tonnes de carburants par hectare*. La voie thermochimique semble bien adaptée pour répondre à ce cahier des charges.

Le second scénario est assez symétrique du premier, au moins dans ses objectifs qui sont plus modestes. Les biocarburants occupent une niche, et sont utiles tout autant par leur énergie que comme moyen de lutter contre le CO₂. La filière enzymatique étend les possibilités de la première génération, et lui succède assez naturellement. Du côté des filières thermochimiques, celles qui alimentent les raffineries par un mélange de biomasse (issue des unités de premier niveau) et de produits fossiles semblent être bien adaptées.

Il serait très prématuré de chercher à positionner, dès aujourd'hui, l'Europe ou la France sur l'arc que définissent ces deux scénarios. Mais on peut insister sur ce qui restera l'obstacle central pour le développement : ce sera la compétition entre pays, doublée d'une compétition sur la façon la plus économique de lutter contre le CO₂.

Au cours de la période 2030 – 2050, la lutte contre les émissions de CO₂ se sera généralisée au niveau de la planète, ce qui ne pourra pas se faire sans que le prix de la tonne de CO₂ ne soit devenue une *valeur de référence*. C'est cette valeur qui se substituera aux subventions actuelles, de sorte que chaque filière devra faire la preuve de son efficacité en matière d'économie d'émissions. Parallèlement, la tension sur les ressources et sur les prix agricoles sera devenue un souci permanent. Il sera donc impossible de défendre une filière qui aurait besoin de subventions pour survivre.

Face à ce cahier des charges, tout donne à penser que les pays qui, dès aujourd'hui, sont les mieux placés pour produire des carburants de première génération, le seront également lorsque la deuxième génération sera prête.

ANNEXES

ANNEXE 1

ETAT DE LA RECHERCHE EN FRANCE ET EN EUROPE

1-Recherche à trois horizons temporels

La recherche en France sur les bioénergies en général et les biocarburants est structurée par le programme national de recherche sur les bioénergies (PNRB) financé et organisé par l'ANR. En Europe, le volet énergie du FP7 (7th framework program) qui définit un cadre de recherche sur les bioénergies. Le Department of Energy (DOE) aux USA lance lui aussi un appel à projets sur les thématiques liées aux bioénergies.

L'ensemble de ces cadres structurant la recherche dans ce domaine reprennent des thématiques proches qui peuvent se décliner en trois horizons temporels d'industrialisation :

- Le perfectionnement des biocarburants de 1^{ere} génération (~2008);
- Le développement des biocarburants de 2^{eme} génération (~2015) + hydrogène (2030 ?) ;
- Le développement du concept de bio-raffinerie permettant d'intégrer la production de biocarburant, bioénergie et chimie verte dans un outil industriel utilisant au mieux la ressource biomasse (au moins 2015).

Le tableau A reprend les thématiques essentielles des projets de recherche.

	Première génération	Deuxième génération+hydrogène	Bio raffinerie	Dimension environnementale et sociale
Ressources		<ul style="list-style-type: none"> - Recherche de plantes à haut contenu énergétique et à rotation courte ; - Exploration de la biomasse aquatique 	<ul style="list-style-type: none"> - Développement du concept de bio raffinerie aux produits de la forêt ; - Usage de la glycérine dans les bio raffineries 	-Evaluation des impacts environnementaux liés aux cultures spécifiques ;
Transformation	<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation énergétique des procédés de transformation actuels ; - Meilleure utilisation des co produits au sein même du procédé ou en valorisation externe; 	<ul style="list-style-type: none"> - Pré traitements physico chimique de la biomasse lignocellulosique - Pré traitement par hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique (diverses sources) pour production d'éthanol : limitation des inhibiteurs, développement de nouvelles enzymes, saccharification et fermentation simultanée.. - Hydrogénation d'huiles végétales et de graisses animales ; - Techniques de purification du syngas ; - Transformation par voie biologique du syngas en carburants liquides ; - Transformation de l'huile de pyrolyse en carburant ; 	- développement des bio raffineries produisant simultanément des biocarburants, de l'électricité, de la chaleur et de la matière première pour la chimie	- Comparatif des ACV des différentes filières de transformation de biomasse en carburants ;

2- Laboratoires impliqués dans ces recherches en France

Laboratoire	Implication
IFP	analyse environnementale, pyrolyse/gazéification, dimension socio économique, Prétraitement physico-chimique et enzymatique de la biomasse lignocellulosique
CEA grenoble	analyse environnementale, pyrolyse/gazéification, dimension socio économique
CIRAD	Pyrolyse rapide/gazeification
CNRS Nancy	Pyrolyse rapide
INSA Toulouse	Fermentation d'hydrolysats lignocellulosique
INRA	Gisements, hydrolyse enzymatique, analyse environnementale
Mines Paris	ACV des filières, étude de la pyrolyse rapide et caractérisation de l'huile de pyrolyse, application de la torche à plasma froid
Mines de Douai	Etude de la pyrolyse rapide/gazéification
ONF	Evaluation de gisements et dimension socio économique

Le pôle de compétitivité TENERRIS regroupe, en Région Rhône-Alpes l'ensemble de ces acteurs publics.

3- Budgets publics alloués pour les programmes de recherche

Les budgets de recherche sur les bioénergies ne cessent d'augmenter. La figure ci dessous montre l'évolution des financements publics américains sur les 12 dernières années des recherches sur les bioénergies.

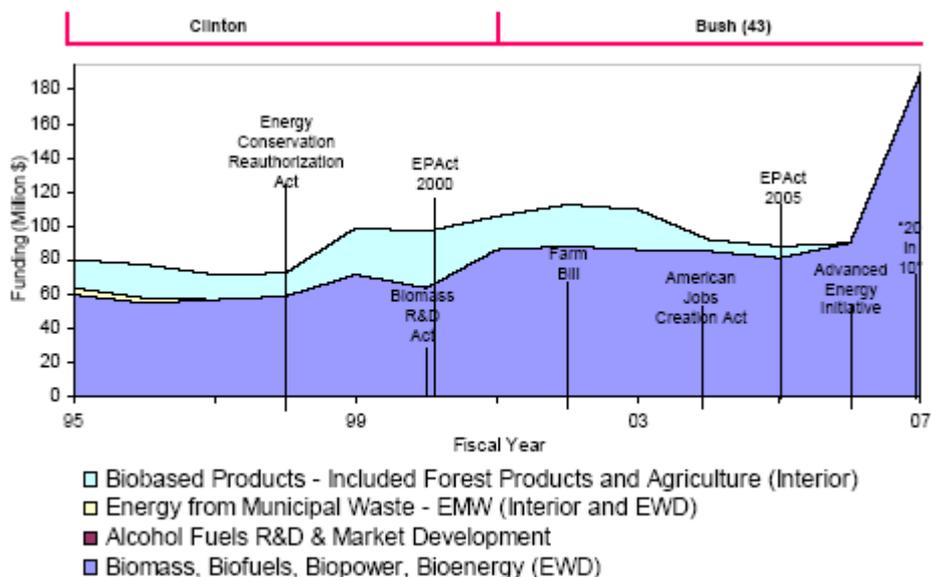


Figure 1 – Financements publics américains de la recherche sur les bioénergies (source USDOE)

D'une façon similaire, le volet énergie du FP7 dispose d'un budget de recherche sur 2008 de 150 Meuros.

Comme indiqué sur la figure 1 et aussi bien dans l'appel à projets du FP7, ces budgets concerne plus largement les bioénergies et donc reviennent en partie pour les biocarburants en particulier.

4 – Réseaux de recherche Européens

Plusieurs réseaux de recherche Européens se sont développés autour de la valorisation énergétique de la biomasse.

Les réseaux les plus connus sont essentiellement organisés autour de la conversion thermique de la biomasse ; ces réseaux ont été créés avec l'aide de « Intelligent Energy Europe » :

- PyNe : réseau de recherche sur la conversion de la biomasse par pyrolyse. Piloté par l'université d'Aston en UK ;
- GasNet : réseau de recherche sur la gazéification de la biomasse. Piloté par la TU de Vienne en Autriche ;
- CombNet : réseau de recherche sur la combustion de la biomasse.

D'autres réseaux s'intéressent à la forêt et sa gestion tel que « agriculture and forestry biomass network ».

En plus des réseaux Européens des structures nationales ont été créées dans chaque état membre tels que AGRICE en France, BELBIOM en Belgique et CARMEN en Allemagne.

L'appel d'offres du PNRB 2005 français, a été financé par l'ANR à hauteur de 8,5 millions €. La durée des projets est généralement de 36 mois. Celui de 2006 sera de 8 millions.

Des projets de pilote, associant public et privé, sont en cours d'instruction, sur les 2 filières, biochimique et thermochimique. Le montant à investir, hors frais de fonctionnement, tourne autour de 230 millions pour des investissements qui sont prévus pour démarrer avant la fin de la décennie et fonctionner entre 5 et 10 ans.

Les Etats-Unis visent la mise au point d'un procédé de production d'éthanol cellulosique pour 2012. DOE subventionne ce programme à hauteur de 385 millions \$ (pour la période 2007-2009) qui inclut de la recherche, en particulier sur la mise au point de techniques de fermentation simultanée des sucres en C6 et en C5, mais surtout des plateformes de démonstration utilisant différentes sources de biomasse. Le DOE prête ou garantit des prêts pour des industriels intéressés à hauteur de 250 millions sur la même période.

Le Brésil s'intéresse vivement aux carburants de seconde génération. Des partenariats public-privé ont été mis en place par le MCT (Min de la recherche) à hauteur de 300 millions \$ sur 5 ans pour la réalisation de pilotes.

En Europe il faut noter le Réseau de recherche NILE du 7 PCRD, financé par la Commission à hauteur de 7,7 million € qui travaille sur un pilote suédois de production d'éthanol à partir de plaquettes de bois

Le Danemark a un projet de pilote associant DTU et Dong sur l'éthanol cellulose (projet Maxifuel)

L'Espagne a un projet de pilote associant Abengoa et Novozymes sur la filière éthanol lignocellulosique qui devrait produire 4000 tonnes /an d'éthanol.

L'Allemagne travaille surtout sur la filière thermochimique : Choren, filiale de Shell et de Mercedes achève une unité préindustrielle de 15.000 tonnes/an qui devrait démarrer en 2008.

L'Université de Freiberg s'est associée à Volkswagen et Total et pourrait financer un autre pilote en Saxe.

Enfin le Centre de recherche de Karlsruhe a démarré un petit pilote de pyrolyse rapide en 2007.

ANNEXE 2

Quelques Ratios utiles

Pour pouvoir raisonner et, en particulier, comparer entre elles les différentes prévisions (souvent très divergentes) qui sont faites, il faut disposer d'un certain nombre de ratios donnant « la production possible par hectare », ou encore, « l'énergie par tonne de matière utilisée ». Nous allons donc proposer deux tableaux :

- le premier donnera, pour chaque tonne de produit, l'énergie récupérable (en Tep /Tonne), ainsi que le CO₂ produit par cette combustion (en TCO₂/Tep). Ce dernier ratio est souvent appelé « intensité carbone ».
- Le second donnera la productivité, en Tonnes par hectare, (ainsi qu'en Tep/ha).

Remarque importante : Les TCO₂ sont les tonnes émises lors de la combustion : elles ne sont pas reliées au CO₂ émis ou économisé par le processus dans son ensemble. L'approche « ACV » ou « Bilan carbone » n'est pas abordée ici.

Intensité Carbone/énergie

Les colonnes présentent, pour chaque matériau :

(a)TCO₂/Tep :CO₂ émis dans la combustion,(b)Tep/Tonne : énergie par tonne

(c) Tcarb/Tonne : pourcentage de carbone (en masse),

(d) Tcarb/Tep = (c) / (b) ; (d) = (a) /3.67

	TCO ₂ /Tep	Tep/Tonne	Tcarb/tonne	Tcarb/Tep
Charbon ³¹	3.95 – 4.5	0.8	0.92	1.15
Pétrole	3.10	1.0	0.85	0.85
Gaz	2.30	1.3	0.82	0.63
Céréales ³²	4.4	0.4 – 0.5	0.5 ³³	1 – 1.25
Colza ³⁴	2.9	0.62	0.5	0.8
Canne à sucre ³⁵	3.7	0.5	0.5	1
Triticale				
Ethanol ³⁶	2.93	0.63	0.5	0.8
Diester	2.04	0.89	0.5	0.55
Bois ³⁷	4.4 - 7	0.26 – 0.43	0.5	1.25 – 1.9
Miscanthus				
Biomasse	4.4	0.4	0.5	1.25
Déchets	4.4 - 7	0.25 – 0.33	0.5	1.5 - 2
Europe transports	2.80 – 2.70			
US electrical grid	2.85			

³¹ Charbon, pétrole et gaz : Extrait de ref (6),(10), et (12)

³² Céréales : ref (4)

³³ Le facteur 0.5 est tiré de la formule C₆ H₉ O₄

³⁴ Colza : ref (4)

³⁵ Canne à sucre (sucre) (1)

³⁶ Ethanol et Diester : ref

³⁷ Bois, Biomasse, Déchets : ref

Les deux dernières lignes donnent l'ordre de grandeur de l'intensité carbone des secteurs de l'économie. Ils sont tirés des références (9) et (12)

Une première remarque s'impose : le ratio CO2/Tep des transports, même s'il est nettement plus élevé que celui de l'économie en général, reste voisin de 2.8, et ira en baissant (le rapport européen prévoit des valeurs proche de 2.5 vers 2030). Ce qui signifie que les valeurs de 4 Tonnes de CO2 « économisées » pour chaque Tep (Claude Roy) sont exagérées

Productions par hectare

On est obligé de prendre des valeurs assez moyennes, valables (ou atteignables) en Europe et dans les pays voisins. Pour le reste du monde, la réf (1) donne des valeurs différentes, sur lesquelles on reviendra.

	Tonnes / ha	Tep / ha	Tcarb /ha
Céréales ³⁸	7 - 10	3 - 4	3.5 - 5
Colza ³⁹	2.5	1.6	1.25
Canne à sucre ⁴⁰	7 - 9	3 - 4	3.5 - 4.5
Bois	7	1.8 - 3.0	3.5
Taillis ⁴¹	7.5	2 - 3.2	3.7
Triticale ⁴²	12	4.6	2.3
Miscanthus	12.5 - 20	5 - 7	6 - 10

Maximum céréales avec 2 récoltes : 6.3 Tep / ha (ref (4)) Bois tropical : 6 Tep /ha (ref (1)), soit le double du chiffre retenu pour l'Europe. Le « cas du Miscanthus » (ref 13) est à creuser.

³⁸ ref (3) et (4)

³⁹

⁴⁰

⁴¹

⁴²

Références

- (1)- « Will the World have enough space and resources for food and energy production from biomass ? » Michel Griffon – CIRAD - 2005
- (2)- « Biomass Utilization, Limits of » – David Pimentel Encyclopedia of Physical Science and Technology 2002
- (3)- « L'Agriculture, une alternative au « carbone fossile » - AGBP - Paris, 14 février 2007
- (4)- « How much bioenergy can Europe produce without harming the environment ? » European Environment Agency – 2006
- (5)- Coordination de la valorisation de la Biomasse-Note Stratégique – Claude Roy – 2006
- (6)- Perspectives énergétiques pour 2035 (tome1)- Synthèse _ Office fédéral de l'énergie OFEN - Confédération suisse - Janvier 2007
- (7)- Contexte énergétique en Europe et en France, Place de la biomasse énergie – Etienne Poitrat, ADEME, 26 mars 2007
- (8)- La production des biocarburants de seconde génération par voie thermo-chimique : le programme du CEA- Sylvie Rougé - 27-29 Novembre 2006
- (9)- European Energy and Transport : Trends to 2030 – Update 2005
- (10)- L'énergie (édition 2004) Ministère de l'Economie et des Finances.
- (11)- Evaluation des ressources forestières mondiales 2005 – FAO – « Les 15 résultats principaux »
- (12)- « The carbon intensity of manufacturing » T. Gutowski – 40th CIRP Seminar, 1er Juin 2007

ANNEXE 3

Personnalités auditionnées par le Groupe de Travail

DR. G. RIBA, Directeur Général Adjoint, INRA

MR. C. ROY, Coordinateur interministériel Biomasse

Mr. P. CARILLO, Directeur technique, Abengoa

Mr. O. ALEXANDRE, Directeur de la stratégie et du marketing, Total

M. M. BUREN, Secrétaire Général de l'AGPB

Mme S. HALLEY des FONTAINES, Sous-directrice des eaux et forêt

Mr. P. DUPUY, Sous-directeur de la demande et de la maîtrise de l'énergie

Mr. J-C POUET, Chef de projet bois, ADEME

Mr. A. GRAFFIN, Responsable bois énergie, ONF

Mr. P. DUCRAY, Directeur de l'Union des coopératives forestières de France

Mr. M. GILLMANN, Chargé de mission Biomasse, Ministère de l'agriculture et de la pêche

ANNEXE 4

Membres du Groupe de Travail

Bruno JARRY (Coordinateur)

Paul CASEAU

Pierre FILLET

François de CHARENTENAY

Michel FRYBOURG

Jean LUNEL

Gérard CHOUX (CNISF)

Michel GIRARD (Académie d'Agriculture)

Jean GRENIER (ORGANIBIO)

Azid ZAGRAIB (Ecole des Mines)