

Les biocarburants de première génération : l'éthanol et le biodiesel

Etat de l'art

Daniel Ballerini

Novembre 2007

Sommaire

Introduction

I- Les biocarburants : une filière d'avenir

I-1 Le desserrement de la contrainte pétrolière

I-2 La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)

I-3 L'optimisation de l'utilisation des terres agricoles

II- La production d'éthanol

II-1 La fermentation

II-2 L'extraction de l'éthanol

II-3 Les effluents et co-produits

II-4 Les schémas de procédés et les bilans énergétiques

II-5 Les potentiels de production

II-6 Les coûts

II-7 L'éthanol carburant

II-8 L'ETBE carburant : une alternative

II-9 L'impact sur l'environnement

II-10 La production mondiale d'éthanol carburant

III- La production de biodiesel

III-1 La nécessaire transformation des huiles végétales en EMHV (esters méthyliques d'huiles végétales)

III-2 La fabrication de biodiesel (EMHV)

III-3 La production d'esters éthyliques d'huiles végétales (EEHV)

III-4 La production d'hydrocarbures à partir d'huiles végétales (NextBTL)

III-5 Les qualités du biodiesel

III-6 L'impact sur l'environnement

III-7 Les coûts et les potentiels de production

III-8 La production mondiale de biodiesel

Conclusion

Références

« Le pétrole étant de la biomasse végétale fossile, enfouie depuis 200 millions d'années, comme le gaz et le charbon, on peut dire que les biocarburants sont en fait du « pétrole frais » qui repousse, puisque les plantes qui les produisent sont cultivées chaque année ».

Claude Roy, Coordinateur interministériel français pour la valorisation de la biomasse

Introduction

Les biocarburants sont fabriqués à partir de matières premières végétales, renouvelables : le biodiesel est issu actuellement de la transformation des huiles végétales, tandis que l'éthanol vient des plantes sucrières et céréalières. Une deuxième filière cherche à convertir la biomasse lignocellulosique, non utilisée à des fins alimentaires, en biocarburants ; cette dernière biomasse peut être constituée de résidus agricoles comme les pailles de céréales, de résidus forestiers et de cultures à usages énergétiques telles, par exemple, que les taillis à courte rotation. Les matières végétales utilisent pour leur croissance et leurs besoins en énergie, du gaz carbonique présent dans l'atmosphère, grâce au processus de la photosynthèse. La biomasse ainsi fabriquée est renouvelable, à la différence des énergies fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, qui, elles, sont en cours d'épuisement. Ce n'est pas son seul atout, puisqu'elle présente le plus fort potentiel de croissance parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, en étant produite localement.

Le développement des biocarburants à l'échelle mondiale représente un phénomène d'actualité très présent, qui va certainement encore progresser dans les 25 années à venir. L'accroissement rapide et continu de la production et de l'utilisation des biocarburants, observé depuis le début des années 2000, s'explique en grande partie par l'augmentation des cours du pétrole brut et conséquemment des prix des carburants d'origine fossile, non renouvelables, les essences et le gazole. Une autre raison prend en compte les aspects environnementaux liés au « développement durable » et aux problèmes de réchauffement climatique de notre planète. Ces aspects sont de plus en plus considérés par les responsables politiques et industriels.

Actualité encore avec la prise en compte de ce qui touche au réchauffement climatique, causé en grande partie par les émissions de gaz à effet de serre, parmi lesquels le plus important est le gaz carbonique, dont celui issu des pots d'échappement des voitures. De nombreux pays, à l'exception des Etats-Unis, ont donné leur accord pour l'application du Protocole de Kyoto.

Toutefois, les Etats-Unis sont devenus récemment le premier fabricant mondial d'éthanol-carburant, dont la production ne cesse de croître : une nouvelle unité industrielle de production d'éthanol est construite chaque mois. Les autorités américaines envisagent d'incorporer 4% de bio-éthanol dans les essences en 2010 et fixent un objectif d'incorporation de 30% en 2030.

Cette volonté de développement s'appuie actuellement sur deux enjeux : le soutien à l'agriculture nationale et plus précisément aux producteurs de maïs, et surtout la volonté de réduire la dépendance énergétique vis-à-vis de pays tiers.

Cependant, des modifications interviennent avec la décision prise au début d'avril 2007 par la Cour suprême américaine de légitimer l'Agence de protection de l'environnement (EPA) pour réglementer les émissions de gaz carbonique des automobiles et donc les gaz à effet de serre relargués par les transports.

Un troisième enjeu, la lutte contre le réchauffement climatique de la Terre, est donc amorcé, rapprochant significativement les Etats-Unis de la signature du Protocole de Kyoto. De plus, des lois imposant en 2016 une réduction de 30% des émissions de gaz à effet de serre des véhicules ont été votées dans plusieurs Etats américains, dont la Californie.

Le Brésil, longtemps le premier pays producteur d'éthanol-carburant, continue d'accroître, depuis le début des années 1970, la fabrication d'éthanol à partir de canne à sucre. Les principales raisons de cette progression sont liées à l'amélioration de l'indépendance énergétique et de l'agriculture du pays. Au niveau agricole, c'était et c'est toujours un moyen de trouver une autre valorisation du sucre. Ceci permet au Brésil, premier producteur mondial de ce produit, de stabiliser les cours, par exemple lors de la baisse de la demande alimentaire qui entraînerait une chute des cours.

C'est aussi sensiblement la même position pour les Etats-Unis, avec le maïs qui constitue pratiquement la seule matière première végétale transformée en éthanol.

Toujours du point de vue agricole, le Brésil et de nombreux autres pays, la Chine entre autres, cherche à développer des cultures énergétiques dans des zones semi-arides, afin de pouvoir assurer le maintien sur place des populations actives, plutôt que d'assister à leur migration vers des banlieues pauvres des grandes villes.

L'Europe a proposé au début des années 2000 un plan d'action pour la promotion des biocarburants dans les transports routiers. En 2003, une directive européenne indique que les consommations de biocarburants devront représenter, en 2010, 5,75% (pourcentage calculé sur la base des contenus énergétiques des produits) des utilisations totales d'essences et de gazole. En France, pays précurseur dans le domaine de la fabrication de biocarburants, le gouvernement impose un pourcentage de 7% en 2010, taux d'incorporation qui devra continuer d'augmenter ensuite.

L'Europe fait un effort important pour favoriser les actions de recherche et développement de nouvelles filières de fabrication de biocarburants à partir de biomasse lignocellulosique -les Etats-Unis ont lancé des programmes de recherche très significatifs dans ce même domaine - et pour la mise en œuvre de nouvelles spécifications et réglementations applicables aux formulations futures de carburants, comme les mélanges d'essences avec 10 et 85% d'éthanol, et les mélanges de gazole avec des teneurs en biodiesel plus importantes que 5%.

Des pays, tels que la Chine, l'Inde, la Thaïlande, la Malaisie, et bientôt certains pays d'Afrique commencent à intervenir pour contribuer à l'accroissement de l'utilisation des biocarburants.

I – Les biocarburants : une filière d'avenir

Les biocarburants offrent de bonnes performances tant en carburation qu'au niveau environnemental. Néanmoins, leur compétitivité du point de vue économique demeure encore problématique, malgré un contexte d'augmentation des cours du pétrole brut.

I-1 Le desserrement de la contrainte pétrolière

Sans être à même de pouvoir remplacer en totalité les carburants d'origine fossile, les biocarburants représentent cependant une alternative sérieuse à la fourniture d'énergie dans le secteur des transports. Ceci sera d'autant plus vrai que les ressources en matières premières végétales seront diversifiées et que des économies importantes seront réalisées tout au long de leurs processus de production, « de la terre à la roue ».

Les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) demeureront prépondérantes dans la demande mondiale d'énergie, avec une part se maintenant au-dessus de 80 %, voire 90 % selon certaines prévisions. Dans ce "panier", le pétrole continuera de "faire la course en tête". Il assurerait ainsi de 35 à 40 % de la consommation mondiale en énergie.

Sur la période 2000-2030, la demande mondiale en pétrole brut devrait ainsi progresser de plus de 50 % pour passer de 73 millions de barils/jour (Mb/j) ou 3,7 milliards de tonnes/an (Gt/an) à 115-120 Mb/j (5,8 à 6 Gt/an).

Le secteur des transports est très dépendant du pétrole et continue de croître. En premier lieu, et c'est une donnée fondamentale : les besoins de mobilité sont sur une pente ascendante sur l'ensemble de la planète. Le parc des véhicules devrait ainsi s'accroître d'un tiers dans la zone des pays industrialisés, les états membres de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique) alors qu'il devrait même tripler voire quadrupler dans les autres pays. A cela s'ajoutera un mouvement de même ampleur pour les distances parcourues par les véhicules. Ces prévisions sont établies sur une situation présente où les transports routiers affichent une santé florissante. Sur les vingt dernières années, le parc des véhicules s'est accru de 60 % dans la zone OCDE qui "monopolise" aujourd'hui 4 véhicules en circulation sur 5 au monde, et les distances parcourues ont augmenté de 70 % alors que dans le même temps, le produit national brut ne progressait que de 50 %. Résultat : la route assure aujourd'hui plus de 90 % du transport des personnes et 75 % des transports de marchandises. Le mouvement s'est avéré encore plus prononcé dans le reste du monde où le parc de véhicules y a doublé ces vingt dernières années.

En second lieu, le transport reste avec la chimie le secteur d'activité dans lequel le pétrole est le plus difficilement substituable. Les carburants issus du pétrole couvrent encore 97 % de l'énergie utilisée dans ce secteur des transports. Et dans les décennies à venir, les trois quarts de l'augmentation de la demande de pétrole proviendront ainsi du secteur des transports.

Les biocarburants ont donc un rôle très important à jouer, en desserrant la forte dépendance des transports au pétrole, en favorisant l'indépendance énergétique des pays consommateurs, et en contribuant à diminuer leur facture énergétique.

I-2 La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)

Réduire les émissions de gaz à effet de serre conduit notamment à faire porter cet effort environnemental sur les transports. La route contribue en effet à hauteur d'environ 20 % aux émissions de CO₂.

On doit reconnaître que peu de mesures ont été prises pour abaisser les rejets de dioxyde de carbone, le principal responsable de la création de gaz à effet de serre. Depuis le début des années 70, les émissions de CO₂ liées au secteur des transports ont plus que doublé. Il est vrai que le transport routier a enregistré une croissance phénoménale. Un phénomène de société dû à la hausse du niveau de vie, l'augmentation du temps des loisirs, l'amélioration du réseau des infrastructures. Dans les pays industrialisés, alors que la croissance du Produit Intérieur Brut (PIB) progressait de 50 % ces vingt dernières années, le parc automobile s'accroissait dans le même temps de 60 % et les distances parcourues de 70 %. Aujourd'hui, en dépit de la démocratisation du transport aérien et du retour (dans certains pays) du chemin de fer, la route assure plus de 90 % du transport de personnes et 75 % de celui des marchandises.

Dans les autres pays, la progression du transport routier s'est révélée encore plus forte : sur les deux dernières décennies, le parc automobile a plus que doublé même s'il ne représente encore qu'un quart du total mondial.

Or, le transport routier reste presque totalement dépendant du pétrole et représente 50 % de l'usage final du pétrole.

L'évolution attendue renforce les risques d'une dépendance accrue du transport vis-à-vis du pétrole. Toutes les analyses convergent : le transport routier, entraîné par la demande des pays en développement, va poursuivre sa forte croissance. Selon l'OCDE, le parc de véhicules devrait dans les vingt ans à venir encore s'accroître d'un tiers dans les pays industrialisés et... tripler, voire quadrupler dans le reste du monde. Une même tendance est attendue pour les distances parcourues. Résultat : la consommation d'énergie, et donc de produits pétroliers, destinée au transport devrait tout simplement doubler. Pour l'environnement, la traduction de cet envol prévisible de la consommation de carburants s'avère lourde de conséquences : les rejets de CO₂ liés au transport, qui ont, rappelons-le, déjà doublé ces trente dernières années, devraient encore pratiquement doubler dans les trente ans à venir. Dans les pays industrialisés, le transport serait ainsi en 2030 responsable d'un tiers du total des émissions de CO₂ !

I-3 L'optimisation de l'utilisation des terres agricoles

Certaines productions agricoles sont devenues excédentaires.

Une situation plutôt surprenante, compte tenu d'une part de la diminution des surfaces agricoles, disponibles à l'échelle de la planète par habitant, en partie du fait de l'augmentation de la population mondiale, et d'autre part de l'augmentation des surfaces nécessaires entraînée par l'alimentation de moins en moins végétarienne de la population suite au développement économique des pays. En effet, de 0,5 ha/habitant en 1950, les surfaces agricoles disponibles sont passées à 0,3

ha/habitant en 1990 et sont prévues diminuer à 0,1-0,2 ha/habitant en 2050. Et de plus, quand il faut 1 ha de surface agricole pour une alimentation humaine à base de végétaux, il en faut 5 pour une alimentation à base de viande blanche et 9 pour une base de viande rouge.

Ceci étant, les cultures énergétiques se développent de par le monde, souvent avec des aides des Etats.

Les surfaces agricoles seront-elles à même de répondre à la demande croissante en biocarburants? La réponse diffère pour les biocarburants pour moteurs à essence et pour ceux à moteurs Diesel, les disponibilités étant certainement plus importantes dans le premier cas que dans le second.

Concernant les compétitions d'usage entre l'alimentaire et les autres développements industriels des ressources végétales, il faut distinguer les échéances :

- d'ici moins de 10 ans, il ne doit pas y avoir de problèmes de concurrence entre l'alimentaire et la fourniture d'énergie,
- d'ici 30 à 40 ans, le pari de fournir l'alimentaire, une partie de l'énergie (biocombustibles, biocarburants), des matériaux et des produits chimiques, n'est pas "gagné", surtout avec la prise en compte d'une population mondiale qui aura encore augmenté pour se situer aux environs de 9 milliards de terriens "heureux et consommateurs".

Devant la volonté de beaucoup de pays de développer la production de biocarburants pour atteindre, vers les années 2025-2030, des taux de 20 à 30% d'incorporation dans les carburants d'origine fossile, il faudra, pour atteindre ces objectifs ambitieux, absolument diversifier l'approvisionnement en ressources végétales et en particulier aller vers l'utilisation de biomasse lignocellulosique, avec des procédés de transformation en biocarburants encore à mettre au point.

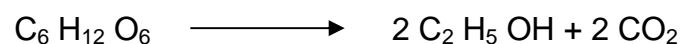
Un dernier point très important : soucieux de limiter les émissions de GES, les responsables politiques doivent aussi prendre en considération l'augmentation de la consommation en eau des productions agricoles qui fournissent des ressources pour les biocarburants. Or les ressources en eau de la planète sont elles aussi appelées à s'amenuiser par suite du réchauffement climatique. Entre l'air et l'eau, il faudra donc aussi arbitrer. De même qu'il faudra toujours veiller à préserver la biodiversité végétale de notre planète.

II La production d'éthanol

II-1 La fermentation

L'éthanol est produit par voie biologique. Les sucres sont convertis en éthanol par l'action fermentaire de microorganismes, levures et bactéries

L'équation stoechiométrique de transformation du glucose en éthanol a été établie par Gay-Lussac.



Le rendement théorique, calculé à partir de cette équation, encore appelé rendement de Gay-Lussac, établit que 51,1 kg d'éthanol peuvent être fabriqués à partir de 100

kg de glucose. En tenant compte des pertes en sucres pour la synthèse de co-produits et des microorganismes fermentaires, le rendement maximal qui est encore appelé rendement de Pasteur, correspond à la production de 48,4 g d'éthanol à partir de 100 g de glucose, soit 94,7 % du rendement théorique.

A l'échelle industrielle, le rendement de production d'éthanol est généralement compris entre 90 et 92 % du rendement théorique.

Si de nombreuses espèces de microorganismes sont connues pour leur capacité à fermenter les sucres en éthanol, il n'en reste pas moins que ce sont encore les levures appartenant aux genres *Saccharomyces* telles que *S. cerevisiae*, *S. carlsbergensis*, *S. bayanus*, *S. uvarum*, qui apparaissent comme ayant le meilleur potentiel alcooligène.

Plusieurs avantages sont liés à l'utilisation des souches de *Saccharomyces* :

- elles sont tolérantes à de fortes concentrations en éthanol, jusqu'à 10-12 % en volume ,
- elles ne sont pas inhibées par des teneurs élevées en sucres,
- elles sont résistantes à des pressions osmotiques importantes,
- elles ont démontré leur stabilité à l'échelle industrielle,
- elles sont capables de se développer et de fermenter les sucres à des pH acides dans l'intervalle 3-4, conditions dans lesquelles sont réprimés l'apparition et le développement de contaminants bactériens dont les principaux appartiennent au genre *Lactobacillus*,
- de par leur taille, elles sont aisément séparables du milieu de culture, par centrifugation ou filtration, avant d'être recyclées en fermentation.

L'étape de fermentation est le cœur du procédé de transformation des matières sucrées en éthanol. Pendant très longtemps, elle a été opérée en discontinu ou semi-continu. Cette mise en œuvre simple se justifiait par les petites tailles des installations industrielles. Avec l'augmentation des capacités de production, avec la nécessité de réaliser des économies d'énergie d'autant plus conséquentes en se donnant la possibilité d'intégrer toutes les étapes de la production d'éthanol : préparation du substrat – fermentation – distillation – traitement des effluents et co-produits, avec la contrainte d'un fonctionnement tout au long de l'année avec un ou plusieurs substrats, ce sont les procédés continus qui se sont imposés progressivement, depuis au moins une vingtaine d'années.

Ce type de fonctionnement permet d'éviter les stockages intermédiaires, sources de contamination potentielle et les arrêts entre deux cycles. Il permet un tableau de marche constant dans le temps, et optimisé comme l'est par voie de conséquence le dimensionnement des unités de fourniture d'utilités (électricité – chaleur – eau de procédé). Il permet aussi une alimentation plus concentrée en sucres.

Les autres améliorations apportées par le passage au continu concernent l'augmentation des productivités spécifiques et volumique ainsi que celle du rendement de conversion des sucres en éthanol, en minimisant les problèmes d'inhibition du métabolisme fermentaire des levures par l'éthanol.

C'est la technologie de fermentation continue en cascade qui s'est imposée, en particulier pour la construction de grosses unités, ayant des capacités de production pouvant atteindre plusieurs millions d'hectolitres. Un exemple d'un tel type de procédé est représenté sur la figure suivante, où les fermenteurs sont directement reliés aux réacteurs de liquéfaction et saccharification de l'amidon (cas de la production d'éthanol à partir de céréales).

Une faible part de l'hydrolysate alimentaire ou les préfermenteurs pour la production de cellules fraîches de microorganismes, la majeure partie étant introduite dans les deux premiers réacteurs de la cascade (environ 2/3 de la charge dans le premier et 1/3 dans le deuxième). Dans ces deux réacteurs, la transformation des sucres n'est pas totale. C'est là un moyen d'augmenter la productivité en alcool, puisque la teneur en alcool à l'équilibre n'est pas trop élevée. L'obtention d'une concentration comprise entre 4 et 5 % v/v dans le premier réacteur constitue un bon compromis entre l'accroissement de la productivité et l'inhibition par l'éthanol. La réaction est complétée dans les deux ou trois autres fermenteurs placés en série.

Pour améliorer l'état physiologique des cellules, une faible aération est assurée dans les deux premiers réacteurs. Pour obtenir une meilleure homogénéité et une meilleure vitesse de fermentation, un système d'agitation peut être mis en œuvre, uniquement dans les deux premiers fermenteurs.

Le gaz carbonique dégagé par la fermentation éthanolique est recyclé dans les derniers réacteurs de la cascade pour homogénéiser le milieu, et en particulier pour éviter le dépôt des levures.

Lorsque le milieu de fermentation renferme peu d'éléments solides en suspension, à l'exception des levures, celles-ci peuvent être séparées du moût fermenté par centrifugation ou filtration, avant d'être recyclées, au moins pour 50 %, en tête de la cascade. Pour éviter le développement d'une contamination bactérienne, la suspension de levures est lavée en présence d'acide sulfurique. Le recyclage des levures est un moyen séduisant d'augmenter la productivité volumique et le rendement de conversion en éthanol puisque la quantité de sucres nécessaire à la production de levures est diminuée, et celle à la fabrication d'éthanol accrue d'autant. Si dans le premier réacteur, la teneur en éthanol, comme il a été écrit précédemment, dépasse rarement 4-5 % v/v, celle-ci en sortie de la cascade est au moins de 10 % v/v.

Les rendements de conversion des sucres en éthanol sont de l'ordre de 92 % du rendement théorique.

La fermentation éthanolique est un processus exothermique. La chaleur dégagée est de 1,2 MJ/kg d'éthanol produit. L'évacuation des calories produites, qui n'est pas problématique avec les modes opératoires actuels pourrait certainement le devenir en doublant ou triplant les productivités, comme pourrait aussi le devenir l'entraînement de l'éthanol dans les effluents gazeux, avec un accroissement concomitant de la production et des vitesses superficielles de dégagement de CO₂.

Avec les céréales comme source de sucre, il est envisagé de réaliser simultanément les étapes de saccharification et fermentation, après liquéfaction de l'amidon. Dans ces conditions, le glucose est transformé en éthanol aussi tôt que produit. Le glucose, ne s'accumulant pas dans le milieu, perd son rôle d'inhibiteur de la saccharification, et ne provoque pas l'apparition de produits de réversion non fermentescibles. Par ailleurs, les problèmes de contamination par d'autres microorganismes sont réduits, par le fait que le temps de séjour du sucre est très faible.

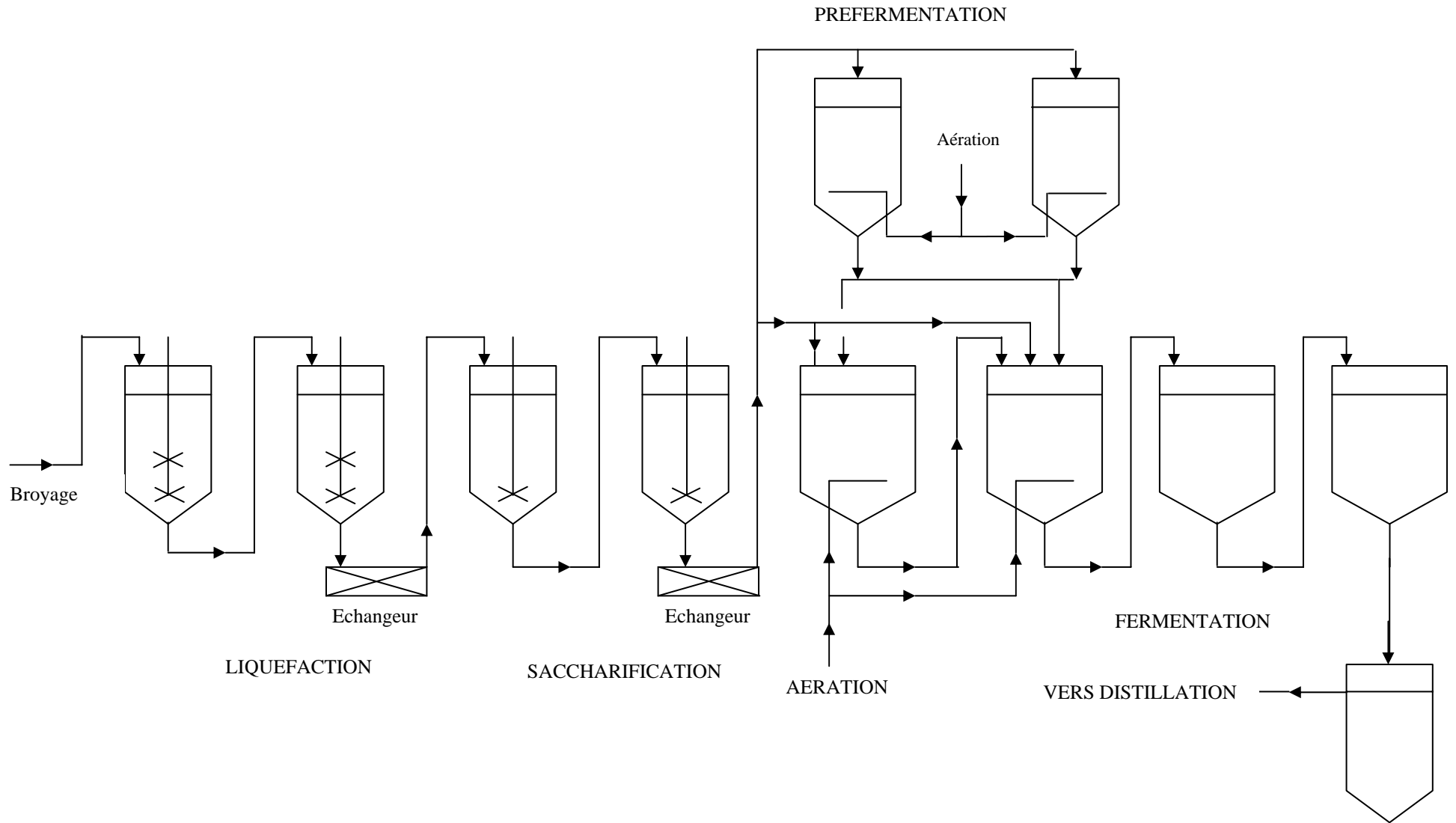


Schéma de procédé de fermentation en continu (dry milling).
 Fermentation en cascade.

Avec une température de saccharification-fermentation plus basse que l'optimum de la réaction de saccharification, les temps de fermentation sont plus longs. Cela impose un nombre de réacteurs en cascade (de 5 à 7) plus important que celui mis en œuvre dans les procédés où ces deux étapes se font successivement.

II-2 L'extraction de l'éthanol

L'obtention d'éthanol anhydre se fait en deux étapes :

- la première est une distillation classique produisant de l'éthanol à une teneur voisine de l'azéotrope. Les huiles de fusel sont soutirées en milieu de colonne,
- la seconde est une distillation azéotropique, qui conduit à l'éthanol anhydre (99,8 % v/v) et qui utilise généralement des solvants entraîneurs comme le cyclohexane, le diéthyléther, le n-pentane. Ce type de process est abandonné dans les unités opérées actuellement, au profit de la déshydratation sur tamis moléculaires, utilisant la technologie PSA de « Pressure Swing Adsorption », avec un cycle adsorption sous pression/régénération du tamis sous pression réduite. Cette technologie est économe du point de vue énergétique puisqu'elle ne consomme qu'environ 0,1-0,2 MJ/kg éthanol anhydre.

Les installations classiques, avec une charge à 10 % v/v d'éthanol conduisent à une consommation énergétique de 9 MJ par kg d'éthanol anhydre dont 3,8 pour la distillation azéotropique. Cette consommation est équivalente au tiers du pouvoir calorifique de l'éthanol.

Les dépenses énergétiques ont été considérablement réduites, en adaptant au cas par cas différents systèmes tels que la distillation sous-vide à multiples effets, la thermo-compression ou la recompression mécanique des vapeurs. Avec cette dernière technologie et un schéma où la vapeur en tête de colonne est recomprimée puis condensée au niveau du rebouilleur, les dépenses énergétiques ne sont plus que de 6 MJ/kg d'éthanol anhydre.

Des économies d'énergie ont encore été réalisées, au niveau de l'ensemble du procédé, en intégrant les étapes de récupération de l'éthanol et de traitement des effluents (concentration des vinasses et séchage des co-produits). Des procédés de séparation par membranes ont été développés. Ils sont basés sur le principe de pervaporation par dépression. La phase liquide est en contact avec un côté de la membrane, le vide étant appliqué de l'autre côté. L'énergie consommée, y compris la distillation classique préalable est estimée à 5 MJ/kg d'éthanol.

II-3 Les effluents et co-produits

La fabrication d'éthanol à partir de betteraves sucrières s'accompagne de la production de pulpes sèches à 90 % de MS, utilisées en alimentation animale. Une tonne de betteraves conduit à la production de 70 kg d'éthanol et 54,5 kg de pulpes sèches, soit 0,78 t pulpes/t éthanol.

Les effluents liquides riches en sels et contenant encore des matières organiques non fermentescibles en éthanol sont les vinasses qui sont récupérées au pied de la colonne de distillation conventionnelle. Les vinasses peuvent être épandues en tant qu'amendement sur les terres agricoles, à raison de 3 tonnes maximum par hectare, lorsque l'épandage est autorisé. Elles sont encore concentrées pour être utilisées dans les formulations alimentaires animales, ou bien méthanisées.

Concernant la canne à sucre, outre les vinasses, le co-produit est la bagasse, résidu solide des étapes de broyage-pressage de la canne à sucre. La bagasse est pour l'instant utilisée à des fins énergétiques pour la fourniture d'électricité et de chaleur au niveau de l'usine, mais aussi à destination d'autres utilisateurs.

Pour la production d'éthanol à partir de plantes céréalières (maïs, blé), il existe deux types de procédés : le «wet milling» et le «dry milling», cette dernière technologie étant la plus employée à l'heure actuelle.

Avec le «dry milling» c'est le grain entier qui est traité. Les effluents recueillis après distillation, qui renferment 10 % de matières solides, sont centrifugés. Une partie de la phase liquide clarifiée (les vinasses) est recyclée au niveau de l'étape de liquéfaction tandis que le restant est concentré. Ce concentrat est ensuite remélangé avec la phase solide récupérée après centrifugation pour être séché.

Le produit obtenu, les drèches (encore désignées sous l'abréviation DDGS, Distiller's Dried Grain Solubles), sont utilisées en alimentation animale. Les DDGS ex-maïs contiennent 30 à 32 % de protéines et 8 à 9 % de corps gras. Ceux issus de la fermentation éthanolique du blé renferment entre 35 et 40 % de protéines.

II-4 Les schémas de procédé et les bilans énergétiques

Les deux figures suivantes présentent respectivement les différentes étapes des procédés de production d'éthanol à partir de betteraves ou de canne à sucre, et à partir de céréales (procédé « dry milling »).

Les bilans énergétiques sont calculés pour une usine de production d'éthanol à partir de jus de betteraves et d'égouts pauvres EP2 issus de la deuxième étape de cristallisation du sucre, après centrifugation.

A partir de jus de betteraves, la consommation d'énergie primaire liée à la production d'éthanol (diffusion, fermentation, distillation et déshydratation de l'éthanol, concentration des sous-produits) représente 30 à 33% du contenu énergétique de l'alcool. Ce ratio augmente jusqu'à 39-40% lors de l'utilisation d'EP2.

La méthanisation des vinasses constitue une possibilité d'amélioration des consommations énergétiques ; la production potentielle d'énergie par méthanisation, de l'ordre de 336 MJ/hl d'éthanol pur, permettrait d'abaisser la consommation globale d'énergie primaire à 20% du contenu énergétique de l'alcool produit.

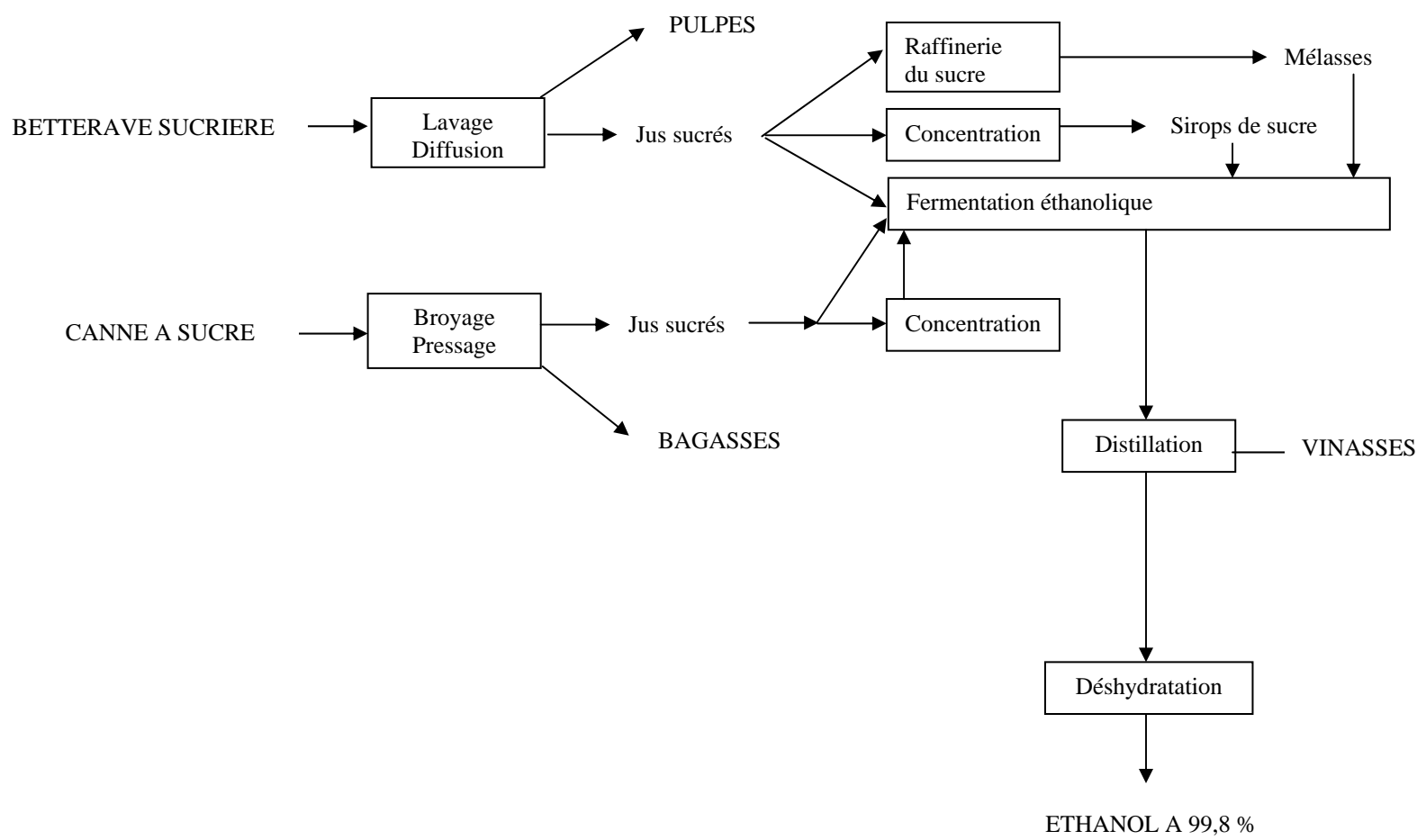
Les consommations énergétiques, rapportées à la fabrication d'un hectolitre d'éthanol anhydre à partir de blé, selon le procédé « dry milling » s'élèvent à 280-300 kg de vapeur 3-4 bar et 39,8 kWh. L'extrapolation des données est linéaire jusqu'à des capacités de production journalière de 5 000 hl.

Pour l'éthanol ex-canne à sucre, les besoins énergétiques de l'unité industrielle sont fournis par la transformation des bagasses.

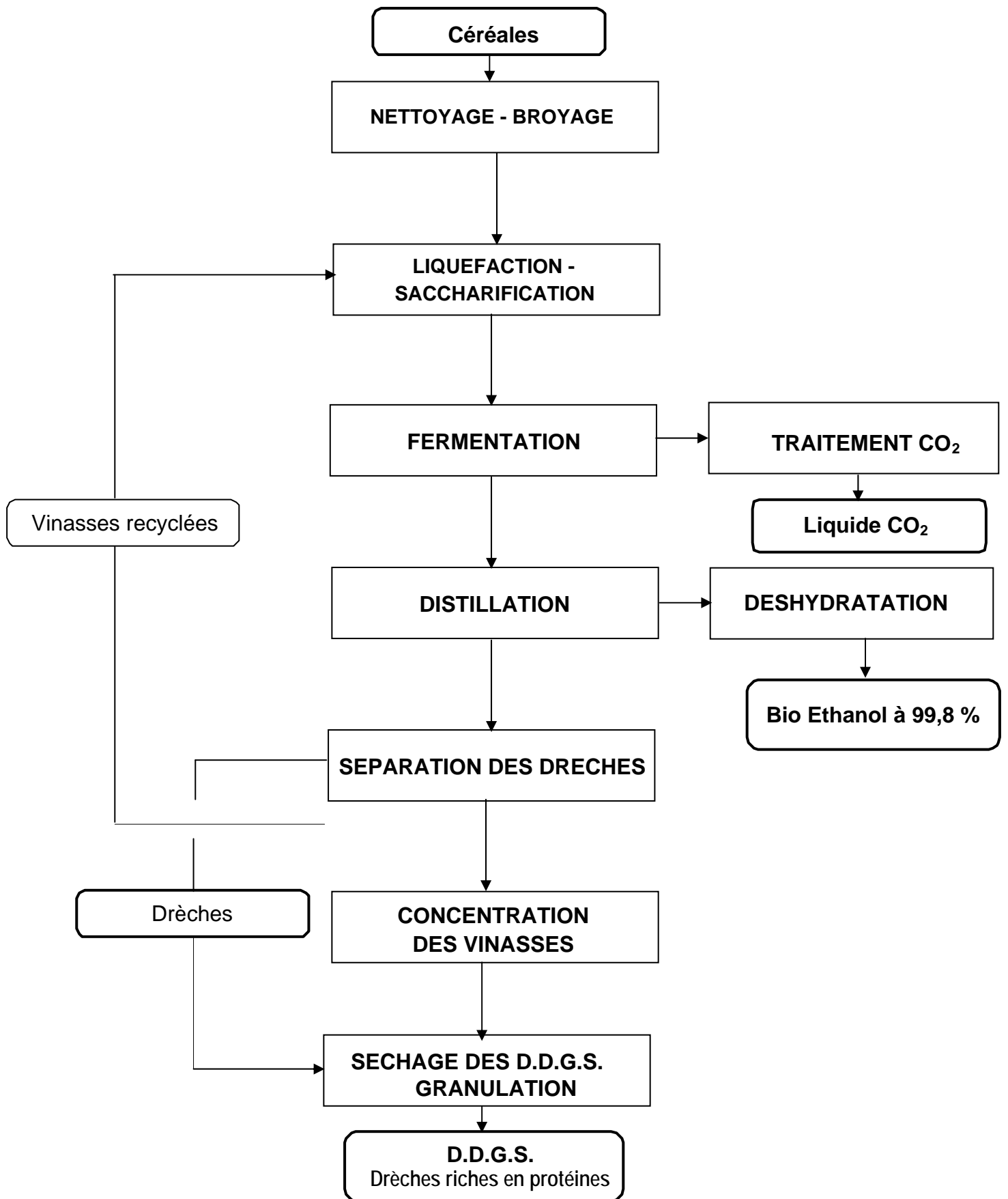
II-5 Les potentiels de production

Un hectare peut produire 75 tonnes de betteraves. Sachant qu'une tonne de betteraves peut donner 70 kg d'éthanol, l'hectare de betteraves fournit 5 250 kg d'éthanol ou 6,6 m³ ou encore une production énergétique brute de 3,3 tep (tonnes équivalent pétrole).

L'équivalent énergétique d'une tonne de canne à sucre, en comptant le sucre, les bagasses et les autres résidus lignocellulosiques (généralement laissés sur champ)



Production d'éthanol ex plantes sucrières



Production d'éthanol à partir de céréales («dry milling»). Schéma fourni par la Société Maguïn.Interis

est de l'ordre de celui d'un baril de pétrole. Seuls sont transformés actuellement en éthanol les sucres extraits par pressage de la canne à sucre. Un hectare doit permettre de produire en moyenne 6 060 kg d'éthanol, soit un rendement énergétique brut moyen de 3,8 tep/ha, hors valorisation de la bagasse et des autres résidus lignocellulosiques.

Le tableau suivant résume les rendements des plantes sucrières et leur potentiel alcooligène.

Plante sucrière	Rendement agricole t/ha	Rendement éthanol l/t plante	Rendement éthanol m ³ /ha	Rendement énergétique TEP/ha
Betterave	70-75	92	6,5-7,0	3,3-3,5
Canne à sucre	80-90	85	7,0-8,0	3,5-4
Sorgho sucrier	50-60	80	4,0-5,0	2-2,5

Avec une tonne de maïs, on fabrique 317 kg d'éthanol et 320 kg de drêches, soit 80 kg de drêches par hl d'éthanol. Pour un rendement agricole de 8 tonnes de maïs en gains/ha, la production moyenne en éthanol par hectare est de 3,2 m³, ou 2,5 tonnes, soit un rendement énergétique brut de 1,6 tep/ha.

Pour une tonne de blé, sont produits 293 kg d'éthanol et 370 kg de drêches, soit 100 kg de drêches par hl d'éthanol. Avec un rendement agricole moyen de 8t/ha, la production moyenne d'éthanol/ha est de 3 m³, ou 2,4 tonnes, soit un rendement énergétique brut de 1,5 tep/ha.

Avec le manioc, dont la teneur en amidon est de 66% en masse, peuvent être fabriqués 293 kg d'éthanol/tonne de manioc.

Le tableau suivant résume les principaux rendements des céréales.

Céréale	Rendement agricole t/ha	Rendement éthanol l/t grain	Rendement éthanol m ³ /ha	Rendement énergétique TEP/ha
Blé	7,2-8,3	370	2,7-3,1	1,4-1,6
Maïs	7,2-8,5	400	2,9-3,4	1,5-1,7
Orge	5,0-7,0	320	1,6-2,2	0,8-1,2

II-6 Les coûts

Comme pour les autres biocarburants, le coût de production de l'éthanol-carburant par rapport aux essences d'origine pétrolière reste une limite forte à son développement.

Principal producteur d'éthanol de la planète, le Brésil peut aussi se targuer de coûts de production les plus faibles, y compris avant l'Inde et tous les autres pays des régions tropicales à même de produire en grande quantité de la canne à sucre, la plante la plus "efficace" en termes de rendement énergétique. Au Brésil, le prix de l'éthanol hydraté (92 % d'éthanol et 8 % d'eau) était ainsi en 2002 et 2003 descendu au-dessous du prix de l'essence (0,16 dollar par litre contre 0,20 dollar). Avec ce coût de production, et même en tenant compte de son contenu énergétique inférieur à celui de l'essence, l'éthanol brésilien supportait la compétition économique avec l'essence produite sur la base d'un baril de pétrole brut de 25 à 30 dollars. Ramené au contenu énergétique, le prix de l'alcool au Brésil s'élevait à 8 \$/GJ, alors que le coût de l'essence, sur la base d'un baril de pétrole brut à 25-30 \$, était compris entre 6 et 8 \$/GJ. Or, début 2005, l'éthanol était à 0,33 \$/l puis à 0,40 \$/l en novembre 2006, et a varié entre 0,35 et 0,41\$/l en septembre et octobre 2007, du fait de l'augmentation du sucre qui représente 68% du coût net de l'éthanol. Pour cette dernière valeur de 0,41\$/l, le coût énergétique de l'éthanol s'élève à 16 \$/GJ, alors que le cours du baril de pétrole oscille, pour les mêmes dates, autour de 90 \$, soit un coût énergétique de l'essence de l'ordre de 24 \$/GJ.

Le coût de production relativement faible de l'éthanol ex-canne à sucre doit beaucoup à la disponibilité d'une ressource en matières premières abondante mais aussi à l'utilisation de la bagasse, résidu solide de la canne à sucre (les tiges de la plante), en tant que source pour les unités de production conjointe de chaleur et de vapeur, ou par cogénération, de chaleur et d'électricité. L'impact de cet avantage comparatif est notable sur le marché international.

Aux Etats-Unis, l'éthanol, produit essentiellement à base de maïs, est toujours resté plus cher que l'essence. Il se situait en moyenne ces douze dernières années à 0,30 dollar par litre, dont la moitié provenant du coût net de la matière première. Il a certes baissé compte tenu de la mise en service d'installations de capacités de production plus importantes (supérieures à 100 000 tonnes/an) entraînant donc un effet d'échelle. Il n'empêche qu'à l'automne 2005, le prix de l'éthanol s'affichait encore à 0,29 dollar/litre pour une fourchette de 0,18 à 0,25 dollar/litre pour l'essence, avec un prix du baril de brut respectivement de 25 et 30 dollars. Si l'on retient le contenu énergétique, sensiblement plus faible pour l'éthanol, la différence s'aggrave, passant du simple au double entre l'essence à 6-8 \$/GJ et l'éthanol à 14 dollars/GJ.

Les cours de l'éthanol en septembre - octobre 2007 ont varié entre 0,48 \$/l et 0,55 \$/l, soit un coût énergétique compris entre 19 \$/GJ et 22 \$/GJ, pour un coût énergétique de l'essence de 24 \$/GJ.

En Europe, les situations s'avèrent très différentes selon les pays, mais les coûts de production de l'éthanol sont nettement supérieurs à ceux constatés au Brésil et aux Etats-Unis. Un surcoût qui s'explique par trois raisons : des matières premières au

prix plus élevé, un secteur de production moins structuré, des unités industrielles beaucoup plus petites, de l'ordre de 20.000 tonnes/an. Les tailles des nouvelles usines sont largement plus importantes. Réalisée principalement à partir du blé (accessoirement du maïs) et de la betterave, la production d'éthanol ressort à un coût moyen de 0,43 à 0,63 euros par litre en 2006. Rapporté au coût énergétique, l'éthanol se montre ainsi plus cher que l'essence produite sur la base d'un baril de brut à 25-30 dollars (6-8 \$/ GJ) et même à 60-65 dollars (14-16 \$/GJ) : 17 à 22,50 \$/GJ pour l'éthanol provenant du blé et 20 à 24 \$/GJ pour l'éthanol provenant de la betterave à sucre. Avec les cours actuels du brut, et les coûts énergétiques correspondants de l'essence, l'éthanol devient compétitif.

Actuellement, les Etats de l'Union Européenne accordent des allègements fiscaux aux biocarburants : dégrèvements de 39 % au Royaume-Uni (29,6 euros/hectolitre) à 60 % en France (37-38 euros/hl) et même 100 % (dégrèvement total donc) en Espagne, Allemagne et Suède (respectivement 39,6, 65,4 et 54,7 euros/hl).

A noter que les cours du blé, du maïs et du sucre ont augmenté depuis fin 2005, entraînant une hausse des prix de l'éthanol.

II-7 L'éthanol carburant

Les proportions d'éthanol dans l'essence peuvent être comprises entre 5 et 10 %, comme aux Etats-Unis avec notamment le gasohol E10, entre 20 et 24% ou même à 100% comme au Brésil.

Le produit baptisé E85 (ou, aussi en France, superéthanol) comporte quant à lui 85% d'éthanol. Il permet de franchir une étape supplémentaire en soutenant le développement des carburants à haute teneur en biocarburants. Déjà très répandu au Brésil, aux Etats-Unis et en Suède, le superéthanol offre aux automobilistes la possibilité de rouler indifféremment avec de l'essence traditionnelle, avec ce biocarburant presque pur, ou avec un mélange des deux en toutes proportions. Son emploi suppose des modifications au niveau du moteur, mais il constitue une significative alternative économique et technique aux hydrocarbures. Sa commercialisation est autorisée en France depuis le 1^{er} janvier 2007. L'adaptation nécessaire des véhicules pour utiliser indifféremment de l'essence pure, du superéthanol pur ou tout mélange intermédiaire résultant des pleins de carburant effectués dans différentes stations-service a dû être réalisée sans perdre au niveau des performances, en maintenant l'agrément de conduite et en respectant les exigences réglementaires en terme de rejets polluants.

Il a fallu, pour répondre à cette problématique, prendre en compte les caractéristiques les plus éloignées des essences et de l'éthanol (contenu énergétique et en oxygène du carburant, caractéristiques de vaporisation et d'initiation de la combustion, interaction carburant-matériaux) C'est la solution FFV (véhicules flexfuel) adoptée dans certains pays - Brésil, Etats-Unis, Suède, et bientôt la France, qui, au prix de modifications mineures - de 1 à 2 % du prix final de la voiture - permet au véhicule d'accepter les différents mélanges de 0 à 85% d'éthanol dans l'essence. Reste cependant au conducteur à adapter sa conduite et à bien évaluer son autonomie... sachant que le superéthanol a un contenu énergétique au litre inférieur de 25 à 30 % à celui d'un litre d'essence, et qu'en conséquence un plein

d'E85 ne permettra de couvrir qu'un trajet inférieur de 25 à 30 % à celui effectué avec un plein d'essence normale.

Comparé à l'essence, l'éthanol présente, lors de la carburation, des avantages notables :

- un indice d'octane plus élevé, de l'ordre de 110, contre 95 par exemple pour le super en France. L'indice d'octane caractérise la résistance à l'auto-inflammation des essences et donc la résistance du moteur au cliquetis, un risque capital pour sa longévité. Cette caractéristique intéressante de l'éthanol autorise des rendements élevés et des réductions de consommation de carburant. Incorporé à hauteur de 5 à 10 % dans l'essence, l'éthanol permet des gains d'octane de 0,8 à 1,3 point par rapport à l'essence standard,
- une miscibilité en toutes proportions avec les essences,
- une densité proche de celle des essences,
- une présence d'oxygène propre à favoriser la combustion et donc à réduire les émissions d'hydrocarbures imbrûlés ou de produits d'oxydation partielle,
- une chaleur latente de vaporisation élevée qui améliore l'efficacité du remplissage de la chambre de combustion.

Mais, a contrario, certaines de ses propriétés se traduisent par des inconvénients à son utilisation :

- la présence d'oxygène dans sa molécule (35 % du poids) favorise sa combustion, mais se traduit aussi par un contenu énergétique plus faible que celui des essences, et donc par une augmentation en volume de la consommation,
- les propriétés physiques de l'éthanol (faible volatilité, température d'ébullition élevée) peuvent constituer un facteur pénalisant lors des démarrages à froid. Ce désagrément peut être minimisé par l'emploi de l'E85, carburant comprenant 15% d'essence. Au Brésil, une autre solution a été adoptée : le chauffage du système d'injection et l'utilisation d'un second réservoir de carburant contenant de l'essence pure qui sert uniquement au démarrage,
- l'éthanol, en mélange avec l'essence, peut conduire à un accroissement de la pression de vapeur et à une augmentation des émissions de composés organiques volatils dans l'atmosphère, ce qui va naturellement à l'opposé des préoccupations environnementales. Ainsi, en mélange à 5 % dans l'essence, l'éthanol peut accroître de 50 % les quantités d'hydrocarbures évaporés, en augmentant la tension de vapeur du mélange de 80-90 mbar. Cette augmentation se stabilise avec l'accroissement des teneurs en éthanol, pour diminuer ensuite,
- l'éthanol est miscible avec l'eau, à la différence de l'essence. La présence d'eau dans les fonds des cuves des stations-service et les réservoirs des véhicules peut provoquer des risques de transfert de l'alcool contenu dans les essences vers la phase aqueuse. La concentration d'éthanol dans les essences tendant ainsi à diminuer, c'est aussi l'indice d'octane du mélange qui va décroître,
- l'éthanol peut provoquer un gonflement des composants en caoutchouc, et donc engendrer des incidents de fonctionnement. Pour y remédier, on doit recourir à des caoutchoucs à haute teneur en fluor ou du nylon. Des phénomènes de corrosion sont également possibles, en raison de la présence d'acide acétique dans l'éthanol. Il est donc recommandé d'utiliser pour les moteurs de véhicules roulant à l'éthanol des

matériaux tels que l'acier inoxydable et le bronze, et de prohiber le magnésium, le laiton, le zinc ou encore le cuivre,

- la combustion de l'éthanol entraîne l'émission d'aldéhydes, dont les effets potentiellement négatifs sur la santé ne sont pas encore complètement évalués.

II-8 L'ETBE carburant : une alternative

L'ETBE (ethyl tertio butyl ether) est un carburant produit par réaction de l'éthanol avec l'isobutène, afin de lui conférer des performances techniques améliorées. Il est utilisé en France et dans la plupart des pays européens, à l'exception de la Suède.

Dans les années 80, l'utilisation du MTBE (méthyl tertio butyl ether) en mélange dans les essences a connu un fort développement, essentiellement aux Etats-Unis. Il possède un indice d'octane élevé (118) et son introduction dans les essences sans plomb permet de réduire les émissions de polluants des moteurs à essence. Cependant, d'autres problèmes environnementaux sont apparus suite à des pollutions accidentelles d'eaux potables par le MTBE ou par des essences reformulées avec cet éther. Ces problèmes ont entraîné l'arrêt progressif de l'emploi du MTBE-carburant aux Etats-Unis.

Pour faire face aux limites techniques à l'utilisation de l'éthanol rappelées ci-dessus et constatées lors de son incorporation à basse teneur dans les essences, on a cherché par analogie avec le MTBE à produire de l'ETBE. Ce produit est fabriqué par réaction de l'éthanol avec l'isobutène (une oléfine issue du raffinage) en présence d'un catalyseur. Les résultats furent concluants. Effectivement, l'adjonction de l'ETBE à la place de l'éthanol dans les essences permet d'éliminer les inconvénients majeurs de l'éthanol que sont l'augmentation de la tension de vapeur, la mixtion à l'eau ou encore les risques de corrosion de matériaux. L'ETBE, qui offre le même indice d'octane que l'éthanol, permet en outre une réduction de 5 à 15% des émissions de CO et une réduction d'environ 5% des hydrocarbures imbrûlés. En revanche, son emploi se traduit par une augmentation de 5% des rejets d'oxydes d'azote et d'aldéhydes.

La production potentielle d'ETBE est cependant limitée. Au total, les disponibilités françaises en isobutène issu du raffinage du pétrole (craquage catalytique et vapocraquage) sont comprises entre 380 000 et 430 000 tonnes/an. Par exemple en France, si tout l'isobutène disponible était employé pour la fabrication d'ETBE, cela correspondrait à un débouché de seulement 400 000 tonnes/an d'éthanol, loin des prévisions d'incorporation du gouvernement.

II-9 L'impact sur l'environnement

Il est prouvé que l'addition de 5 à 10% d'éthanol dans l'essence entraîne une réduction atteignant jusqu'à 15 % des rejets de CO et d'hydrocarbures imbrûlés. En revanche, au niveau des oxydes d'azote le bilan est plus contrasté. La combustion des biocarburants entraîne parfois une augmentation des émissions d'oxydes d'azote pouvant aller jusqu'à 5% (en particulier de N₂O, gaz trois cents fois plus nocif en terme de GES que le CO₂, mais avec une durée de vie beaucoup plus faible). Toutefois, avec certains types de véhicules, pour des raisons qui restent à élucider, le phénomène inverse de réduction des émissions de NOx, a pu être observé.

Pour l'E85, les mesures ont été réalisées sur l'un des véhicules FFV (Flex Fuel Vehicles) utilisés par le Conseil général de la Marne, dans le cadre d'une expérimentation d'un an, dont l'expertise scientifique a été confiée à l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et à l'IFP (Institut Français du Pétrole). Ces essais ont permis de montrer que l'utilisation de l'E85 permet une diminution substantielle des émissions de CO et NOx, mais également de certains polluants non réglementés tels que le benzène et le 1,3-butadiène (molécules classées comme toxiques par l'Agence de protection de l'environnement américaine). Seules les émissions d'acétaldéhyde (polluant non réglementé, également classé comme toxique par l'Agence de protection de l'environnement américaine et provenant d'une oxydation partielle de l'éthanol) sont augmentées. Une optimisation du système de post-traitement et des stratégies de mise en action de celui-ci pourraient fortement limiter cette augmentation. Par ailleurs, les émissions réglementées sont inférieures aux plafonds définis par la norme Euro 4 et même à ceux attendus de la prochaine norme Euro 5 qui entrera en vigueur en 2008.

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

La méthodologie employée pour établir les bilans "du puits à la roue" des différentes filières carburants est basée sur le concept de l'Analyse de cycle de vie (ACV), seule méthode d'analyse environnementale ayant fait l'objet de normes internationales (normes ISO 14040 à 43). Cette méthode repose sur l'étude de l'ensemble des étapes élémentaires d'une filière, reliées entre elles et conduisant à l'élaboration d'un produit. Est pris en compte l'ensemble des étapes allant de l'obtention des matières premières jusqu'à la fin de vie du produit étudié (recyclage, valorisation thermique ou encore mise en décharge). Cette approche globale de l'analyse est tout à fait indispensable pour éviter tout transfert de pollution. En effet, l'étude et l'optimisation d'une étape indépendamment des autres peuvent engendrer en contrepartie une augmentation des impacts sur une autre étape.

Les résultats des bilans "du puits à la roue" sont issus de deux études de référence, très souvent citées et comparées :

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

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

Plusieurs commentaires peuvent être faits sur la base de ces résultats. Tout d'abord, d'une manière générale, les biocarburants permettent bien une réduction significative des émissions de GES comparativement aux carburants pétroliers, et s'accompagnent d'une consommation de quantités non négligeables d'énergie fossile. Ceci a pour conséquence que le gain final par rapport à la solution "carburants pétroliers" ne sera jamais de 100 %.

On notera que les gains obtenus avec les résultats de l'étude JRC/EUCAR/CONCAWE sont généralement plus faibles et que la filière EMHV est plus favorable en termes de consommations d'énergie fossile et d'émissions de GES que les filières éthanol ex-blé ou ex-betterave. Alors que l'étude ADEME/DIREM avance un avantage relativement important lié à l'emploi de l'éthanol (de l'ordre de 60 %, aussi bien sur les émissions de GES que sur les consommations d'énergies non renouvelables), l'étude JRC/EUCAR/ CONCAWE aboutit à un résultat nettement moins favorable (gains de l'ordre de 30 % sur les émissions de GES et de 20 à 25% seulement sur les consommations d'énergies fossiles). En revanche, cette dernière étude arrive à des résultats très intéressants sur la filière éthanol ex - canne à sucre, puisque les gains en GES et en consommations d'énergies fossiles sont de l'ordre de 90%.

II-10 La production mondiale d'éthanol carburant

La progression des biocarburants dans le monde est très marquée depuis le début des années 2000 dans les régions déjà impliquées, comme le Brésil, les Etats-Unis et l'Europe, mais aussi dans un nombre croissant d'autres pays. A titre d'exemple, la Chine qui, il y a seulement 5 ans, ne montrait pas ou peu de volonté de produire des carburants verts, affiche aujourd'hui celle de devenir rapidement le troisième producteur mondial d'éthanol-carburant derrière le Brésil et les Etats-Unis. De la même manière, il n'y a pratiquement plus un seul pays de l'Union Européenne qui n'ait déclenché un mouvement en ce sens.

La consommation mondiale de pétrole raffiné en essences et gazole est élevée puisqu'elle se situe annuellement entre 1,7 et 2,0 milliards de tonnes (Gigatonnes). Comparativement, en 2005, la production mondiale de biocarburants s'établissait globalement à 31 millions de tonnes (31Mt, soit 21,6 Mtep) : 27 Mt (ou 18 Mtep) d'éthanol-carburant pour les moteurs à essence et 4 Mt (3,6 Mtep) de biodiesel. Les principaux producteurs d'éthanol-carburant sont le Brésil et les Etats-Unis ; l'Europe arrive en tête pour la production de biodiesel EMHV.

En 2006, la production d'éthanol a encore progressé de 20% environ pour atteindre 32 Mt et celle de biodiesel a dépassé 5 Mt. Au total, la production mondiale de biocarburants a donc représenté 37 MT (soit 26 à 27 Mtep) en 2006. Dans les 8 ans à venir, elle pourrait atteindre plus du double de la production actuelle, avec un nombre de pays concernés de plus en plus important.

Le Brésil figure à l'évidence parmi les géants de la planète dans le domaine agricole. Assurer la valorisation de ses ressources et en même temps réduire sa dépendance vis- à- vis des énergies importées, tel est l'objectif de la politique mise en place par les autorités de Brasilia.

Il faut rappeler que les voitures brésiliennes sont toutes à allumage commandé (seuls les gros véhicules utilitaires et les poids lourds utilisent du gasole) et qu'il

n'existe cependant pas d'automobiles roulant à 100% à l'essence, mais seulement des voitures roulant à l'éthanol pur et à l'éthanol anhydre mélangé à l'essence. Il faut aussi noter le développement considérable des voitures FFV (Flex-Fuel Vehicles), technologie permettant à un véhicule d'adapter automatiquement son fonctionnement à tout mélange d'essence et d'alcool pur, jusqu'à 85 % d'éthanol en volume, permettant ainsi aux Brésiliens d'ajuster la valeur du mélange en fonction des prix respectifs de chacun des carburants.

En 2005, environ 50 % du sucre produit au Brésil sont affectés à la fabrication d'éthanol. Le Brésil a démontré, financements publics élevés à l'appui, que les carburants n'étaient plus uniquement d'origine pétrolière. Quasiment 100 % des stations-service proposent de l'éthanol.

Le parc brésilien comprend à ce jour 2,3 millions de véhicules roulant à l'alcool pur et plus de seize millions d'automobiles fonctionnant au gasohol (20 à 25 % en moyenne d'éthanol anhydre dans l'essence) sans compter les deux millions de véhicules FFV (75 % des immatriculations neuves en 2005, 61 % en 2006) qui peuvent utiliser l'éthanol mélangé en toutes proportions à l'essence.

Un seul chiffre suffit à prendre l'ampleur de la puissance de l'éthanol comme carburant : le total de l'alcool employé comme carburant représente désormais près de 40 % de la consommation nationale d'essence et 15 % de la consommation globale tous carburants confondus, puisque les transports de marchandises se font encore par la route avec des camions utilisant le gazole. La consommation brésilienne d'éthanol-carburant a été chiffrée à près de 12 Mt en 2005. Le secteur de la fabrication d'éthanol est en pleine expansion.

Parallèlement, la production de canne à sucre ne cesse de progresser, au détriment d'ailleurs de surfaces dédiées à l'élevage, et de nombreuses installations de production sont en construction, grâce à l'apport d'investisseurs étrangers.

Les automobiles **aux Etats-Unis** fonctionnent essentiellement à l'essence, quelques pourcents seulement roulant au gazole.

Soutenu fiscalement, l'éthanol a aussi bénéficié indirectement de l'interdiction progressive depuis 2003-2004 du MTBE (considéré comme dangereux pour la santé humaine) et des préoccupations environnementales croissantes. Plusieurs états ont adopté des mesures en faveur de la promotion des biocarburants. Le mouvement prend de l'ampleur avec un rythme de croissance annuelle de 15 à 20 % depuis 2002.

En 2005, 12 Mt ont été fabriqués et consommés alors qu'en 2003, la production atteignait déjà 8 Mt. A titre de comparaison, la production actuelle d'éthanol correspond au volume que devraient fabriquer l'ensemble des états européens pour respecter leurs objectifs d'incorporation de biocarburants (5,75 %) dans les carburants en 2010 ! Les usines se multiplient spécialement dans les grandes régions agricoles du Midwest, à l'ouest de Chicago : elles comptent actuellement une centaine de "bioraffineries". Les projets en cours de réalisation – 32 nouvelles unités et six extensions de sites- devraient accroître de 48 % la capacité de production actuelle d'éthanol d'ici 2008 pour atteindre une production globale de 20 Mt. Les rendements progressent : de 3,7 hectolitres d'éthanol par tonne de maïs en 1995 à 4,3 hectolitres dix ans plus tard (+ 15 %). Les Etats prennent des initiatives plus radicales que l'Etat fédéral : grand Etat agricole, le Minnesota promeut le passage du mélange actuel à 10 % d'éthanol à celui à 20 % en 2010 au plus tard. Hawaï s'engage même à ce que 85 % des carburants distribués à la pompe en 2006

contiennent 10 % d'éthanol. Les automobilistes suivent : la consommation d'éthanol augmente à un rythme annuel supérieur à 20 %.

Un mouvement qui est bien engagé. Les autorités américaines retiennent l'objectif d'incorporer 4 % de bioéthanol synthétisé à partir du grain de maïs, dans les essences entre 2008 et 2010.

Au-delà, l'Energy Policy Act (EPAAct), signé en août 2005 par le président Bush, souhaiterait une incorporation d'éthanol de 5,5 % (de l'ordre de 23 Mt) dans les carburants d'origine fossile, à un prix acceptable, de l'ordre de 0,28-0,30 \$/l, en 2012.

Pour arriver à ce résultat, l'éthanol devra être fabriqué, non seulement avec le maïs grain, mais avec d'autres matériaux végétaux lignocellulosiques.

En **Europe**, il est indiqué en 2003 que les consommations de carburants d'origine végétale devront représenter au minimum 2 % des consommations totales de carburants (essences et gazole) en 2005 et 5,75 % en 2010. Il est toutefois spécifié que ces objectifs chiffrés sont indicatifs et ne présentent aucun caractère obligatoire. Pour démontrer son engagement politique ferme, l'Union Européenne adopte une directive fiscale permettant aux états membres d'exonérer, partiellement ou totalement, les biocarburants des droits d'accise (impôts indirects).

Globalement, l'Europe est devenue un acteur majeur pour les biocarburants, en dépit d'un retard certain par rapport aux deux géants de la planète en ce domaine, le Brésil et les Etats-Unis. La croissance la plus nette a été enregistrée pour le biodiesel.

La production d'éthanol s'avère nettement moins élevée. Toutefois, le rythme de croissance aura été soutenu, passant entre 1993 et 2003 de 50 000 à 300 000 tonnes. Une spécificité doit être notée : à l'exception de la Suède, où il est introduit directement dans l'essence - tout comme aux Etats-Unis ou au Brésil - l'éthanol est dans les autres pays européens transformé en ETBE avant d'être mélangé à l'essence (l'incorporation directe de l'éthanol dans l'essence rendant ce mélange trop volatil). Ces dernières années ont été marquées par une croissance spectaculaire avec une production d'éthanol qui est passée entre 2004 et 2005 de 500 000 tonnes à 750 000 tonnes, en raison d'une forte utilisation de surplus de vin (environ 170 000 tonnes). L'Espagne occupe une position de leader devançant la Suède, l'Allemagne et la France qui fut longtemps le n°1 en Europe.

Il reste à accélérer le mouvement pour être au rendez-vous des 5,75 % en 2010, date à laquelle les perspectives d'incorporation de biocarburants s'élèvent à 20,6 Mt, se décomposant en 8,4 Mt d'éthanol et 12,2 Mt de biodiesel. Cette situation nécessitera une surface cultivable voisine de 14 Mha, et donc d'autres terres que les seules mises en jachères.

Beaucoup d'autres pays dans le monde souhaitent s'impliquer dans les domaines techniques de la fabrication des biocarburants.

En 2004, l'essence comprenant de l'éthanol assurait environ 7 % du marché national des carburants, au **Canada**.

De nombreux facteurs jouent en faveur de l'expansion des biocarburants en **Chine**. Dans le domaine de l'éthanol, fabriqué à partir de maïs - dont la Chine est le deuxième producteur mondial -, Pékin a inscrit son développement au 10^{ème} plan quinquennal (2001-2005) pour la protection de l'environnement. Il a été ainsi prévu qu'à la fin 2005 un mélange contenant 10 % d'éthanol remplace les carburants

classiques dans neuf régions. A cette fin, quatre unités ont été installées pour une production totale de 1 Mt. A la mi-2007, une nouvelle usine représentant un investissement de 107 millions de dollars et d'une capacité de production de 200 000 t/an d'éthanol à partir du manioc doit entrer en service dans la région de Guangzi.

Au **Mexique**, la compagnie pétrolière nationale Pemex mène des études sur la substitution du MTBE par de l'éthanol. Il n'en reste pas moins qu'une production nationale ne semble pas être envisageable à court terme, compte tenu notamment de la faible compétitivité de l'agriculture mexicaine vis-à-vis de ses deux grands voisins, les Etats-Unis et le Brésil..., grands producteurs et exportateurs de biocarburants.

Réduire la pollution dans les métropoles, telle est l'une des raisons du développement des biocarburants en **Inde**. Deuxième producteur mondial de canne à sucre, après le Brésil, l'Inde avait prévu l'obligation en 2005 de la commercialisation d'un mélange contenant 5 % d'éthanol. Cet objectif n'a pu être atteint en raison de conditions climatiques défavorables et du retard dans la construction d'installations. Il n'en reste pas moins que la distribution d'un mélange à 5 % a effectivement été rendue obligatoire dans neuf états et trois régions. Une obligation soumise toutefois à deux conditions : la disponibilité d'éthanol en quantités suffisantes... et à des prix compétitifs avec ceux des carburants pétroliers. Globalement, la capacité de production d'éthanol-carburant se monte à environ 500 000 tonnes.

La Colombie est bien engagée aussi sur la fabrication d'éthanol-carburant.

En **Thaïlande**, le MTBE, objet d'une interdiction, a laissé la place à l'éthanol. Des projets sont en attente d'autorisation pour des usines de production utilisant comme matières premières manioc, mélasses et maïs. Le coût de production estimé se révèle supérieur à celui de l'essence (0,30 dollar/litre contre 0,22 dollar, en 2005), ce qui implique des aides publiques pour assurer sa rentabilité. Les compagnies pétrolières travaillent sur l'élaboration de carburants intégrant de l'éthanol pour les véhicules et les deux-roues.

De nombreux pays africains réfléchissent actuellement sur les problèmes de production de biocarburants et de bioénergie. **L'Afrique du Sud** est certainement le pays le plus avancé dans les processus de mise en œuvre de la fabrication d'éthanol à partir de canne à sucre et de maïs. La conférence « 2nd African Biofuels » a réuni, fin mars 2007 à Johannesburg, de l'ordre de 300 participants, avec plusieurs sociétés industrielles impliquées dans le domaine des biocarburants. La stratégie de mise en place d'un programme biocarburants a été détaillée. Les décisions finales gouvernementales sur la mise en œuvre d'un plan biocarburants devaient être prises durant le deuxième semestre 2007. La SABA (South African Biofuels Association) a une vue détaillée sur cette mise en œuvre. Des études de faisabilité de projets de production de biocarburants sont très avancées.

III- La production de biodiesel

III-1 La nécessaire transformation des huiles végétales en EMHV (esters méthyliques d'huiles végétales).

Pour l'instant, il faut reconnaître que l'emploi direct d'huile végétale comme carburant, en lieu et place d'un carburant d'origine pétrolière, est bien marginal. Après purification, plus ou moins poussée, l'huile végétale peut être utilisée comme

carburant pour des applications bien limitées. Elle peut ainsi servir à alimenter des moteurs de conception rustique et trouve notamment des applications avec les tracteurs agricoles sous certaines conditions. Mais les améliorations de la technologie et des performances des moteurs Diesel, et notamment le développement de la technologie "hautes pressions" (connue sous les noms commerciaux HDI, TDI, etc.), se sont accompagnées d'exigences plus grandes quant à la qualité des carburants employés. Exigences auxquelles ne peuvent répondre les huiles végétales brutes.

Ce constat d'inadaptation des huiles végétales brutes à être utilisées comme carburant dans les moteurs modernes s'explique par leurs caractéristiques physico-chimiques :

- un indice de cétane inférieur à 40, alors qu'il devrait être au moins égal à 50. Plus cet indice est élevé, plus le délai d'auto-inflammation du carburant dans le cylindre est court,
- des masses moléculaires élevées et une faible volatilité qui conduisent, durant les processus de vaporisation et de combustion, au craquage des molécules et à la formation de dépôts,
- une viscosité élevée qui perturbe la pulvérisation du carburant et le calage de la combustion, déjà gênés par le faible indice de cétane. De plus, à basse température, l'augmentation de leur viscosité rend leur emploi impossible. Le développement d'une technologie de démarrage à froid devient incontournable (démarrage au gazole ou préchauffage du carburant),
- leur teneur élevée en molécules à doubles liaisons, ces molécules ayant avec le temps tendance à s'oxyder et rendant nécessaire l'emploi d'additifs de stabilisation pendant le stockage.

De surcroît, l'emploi direct d'huile brute comme carburant se traduit par des émissions de gaz polluants d'un niveau incompatible avec les normes européennes en matière d'environnement.

En règle générale, l'utilisation des huiles végétales dans un moteur diesel entraîne une augmentation des émissions de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures imbrûlés et de particules, mais peut néanmoins conduire à une réduction des émissions d'oxydes d'azote (NOx). Les compositions des rejets sont variables selon l'état du véhicule, et les différences peuvent s'accroître avec le kilométrage, l'ancienneté du moteur et son état d'encrassement. Souvent, des dépôts se forment sur les injecteurs et le piston, et on observe un gommage des segments.

L'huile végétale brute n'est donc en général pas autorisée comme carburant routier. Aujourd'hui, seule l'Allemagne autorise l'usage d'huiles pures comme carburant, en dépit des normes européennes, mais leur développement y reste malgré tout limité et leur utilisation s'opère sous la responsabilité entière des propriétaires de véhicules. En France, l'emploi d'huiles végétales pures est autorisée pour certaines catégories d'utilisateurs (agriculteurs) mais toujours interdite par la législation pour le transport de voyageurs.

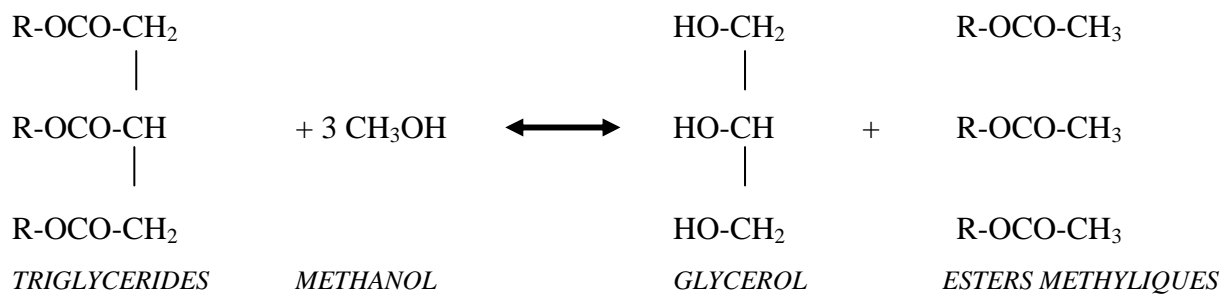
Les huiles végétales constituent certes une alternative, mais elles présentent des risques que ni les constructeurs automobiles, ni les constructeurs d'engins agricoles et de tracteurs ne sont prêts à assumer.

III-2 La fabrication de biodiesel (EMHV)

Des experts de l'Institut Français du Pétrole ont découvert que la transestérification des huiles végétales menait à la production d'esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) dont les propriétés permettent l'emploi comme carburant dans les moteurs diesel.

Les esters méthyliques sont obtenus par réaction de transestérification des triglycérides avec le méthanol selon le schéma suivant. Cette réaction est équilibrée. Elle s'effectue en présence d'un catalyseur.

Les triglycérides des huiles sont des esters de glycérol, encore désigné sous le nom de glycérine, et d'acides gras R-COOH.



Les procédés décrits ci-dessous fonctionnent avec les différentes huiles végétales (colza, tournesol, soja, palme,...)

En catalyse homogène, la transestérification est réalisée avec différents types de catalyseurs basiques (soude, potasse, méthylate de sodium).

La capacité des unités construites ces dernières années dépassant souvent les 100 000 t/an, les procédés en continu sont maintenant régulièrement choisis. Les principaux avantages résident, d'une part, dans la réduction sensible de la taille des équipements et conséquemment des investissements et, d'autre part, dans la diminution des coûts opératoires, dont ceux de main-d'œuvre. Le schéma de principe suivant illustre les grandes étapes d'un procédé continu.

La réaction de transestérification est généralement effectuée dans deux réacteurs en série, de même capacité, avec des temps de séjour optimisés permettant d'obtenir un taux maximum de conversion et une qualité d'esters répondant le mieux possible aux spécifications imposées aux esters carburants. Cette qualité est encore améliorée par lavage à l'eau à contre-courant qui élimine les traces de catalyseur, de glycérine et de méthanol. Enfin, le séchage de l'ester est effectué sous pression réduite entre 40 et 60 mbar à 140 °C.

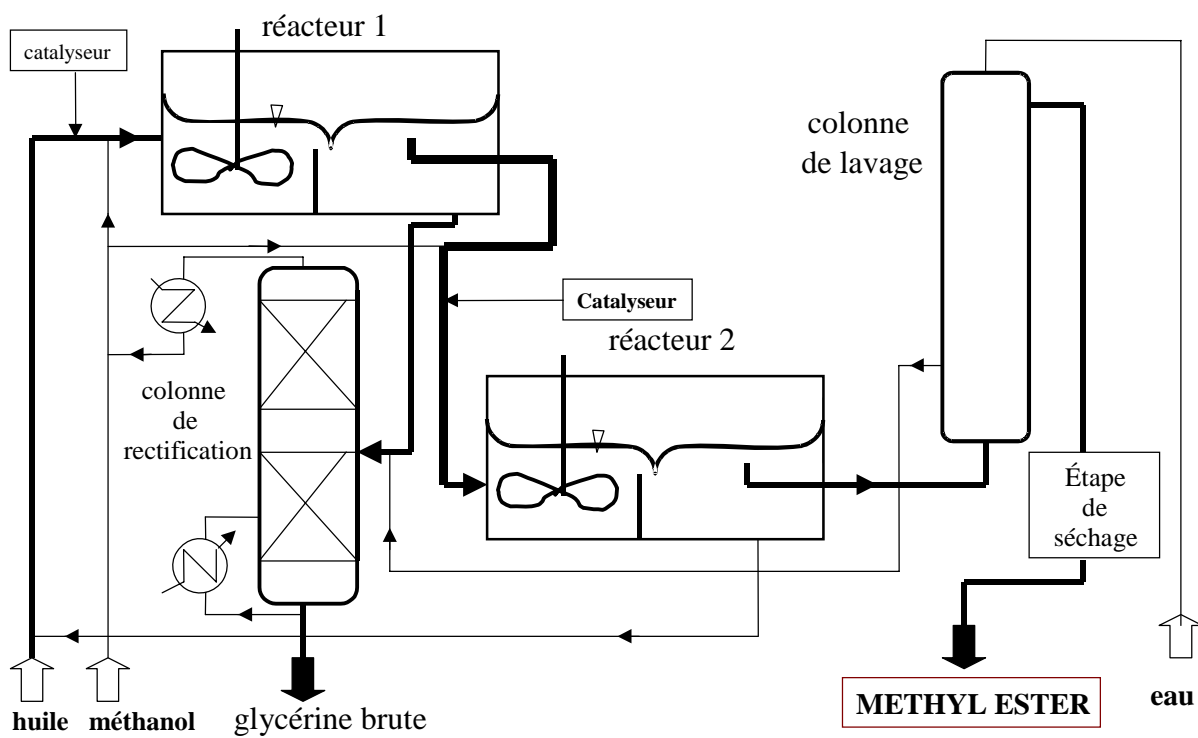


Schéma de principe d'un procédé continu de production d'EMHV (Procédé proposé par la Société Lurgi)

Les sels basiques, provenant du catalyseur et contenus dans la glycérine brute et les eaux de lavage, sont neutralisés par un acide minéral (HCl, H₂SO₄, H₃PO₄). L'excès de méthanol est récupéré par distillation, au cours de laquelle la teneur en glycérine est amenée à une valeur comprise entre 80 et 90 % par élimination de l'eau.

Comme pour les procédés opérant en discontinu, les rendements en esters méthyliques sont compris entre 98,5 et 99,4 %. Une étape ultérieure de glycérolyse des acides gras pourrait avantageusement augmenter ces rendements.

Les caractéristiques des produits fabriqués sont sensiblement les mêmes que celles obtenues avec les procédés discontinus, et correspondent aux normes des esters carburant.

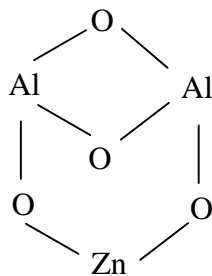
Toujours en respectant la spécification des charges, les consommations en catalyseur rapportées à la tonne d'huile sont sensiblement équivalentes à celles indiquées pour les procédés en discontinu, soit entre 3,6 et 4,4 kg de soude, soit entre 3,8 et 4,9 kg de méthylate de sodium, disponible en solution à 30% dans le méthanol, par tonne d'huile traitée.

Du fait des conditions opératoires (température, pression) sensiblement comparables entre les procédés opérant en discontinu et en continu, les consommations énergétiques par tonne d'huile traitée sont du même ordre : 900 MJ (utilisation du gaz naturel) pour la production de vapeur auxquelles s'ajoutent la consommation en électricité de 30 à 35 kwh.

La catalyse hétérogène présente des avantages significatifs en matière de respect de l'environnement. Elle répond aux critères associés aux nouveaux concepts de «chimie verte», car la pureté des produits obtenus, associée à des rendements de synthèse élevés, conduit à une disparition pratiquement totale de rejets polluants. De plus, l'absence de sels dans les produits de réaction n'impose pas, à la différence de la catalyse homogène, des traitements coûteux de purification, et élargit les possibilités de débouchés industriels de la glycérine, sans avoir à la purifier au préalable.

Comme mentionné précédemment, les procédés, qui utilisent actuellement la catalyse homogène en milieu basique, fonctionnent à catalyseur perdu. Ces choix s'accompagnent d'une complication des processus de purification des deux produits, les EMHV et la glycérine et d'une dépense en consommables, comme par exemple l'acide chlorhydrique employé lors de la neutralisation de la glycérine.

Le catalyseur solide développé par l'IFP, qui se présente sous forme d'extrudés est un aluminat de zinc de type spinelle de formule brute Zn Al₂ O₄. Sa formule développée est la suivante :



Ce catalyseur présente d'une part une grande stabilité dans le temps puisqu'aucune perte d'activité n'est observée après 1 an de fonctionnement, et d'autre part une bonne résistance à l'attrition.

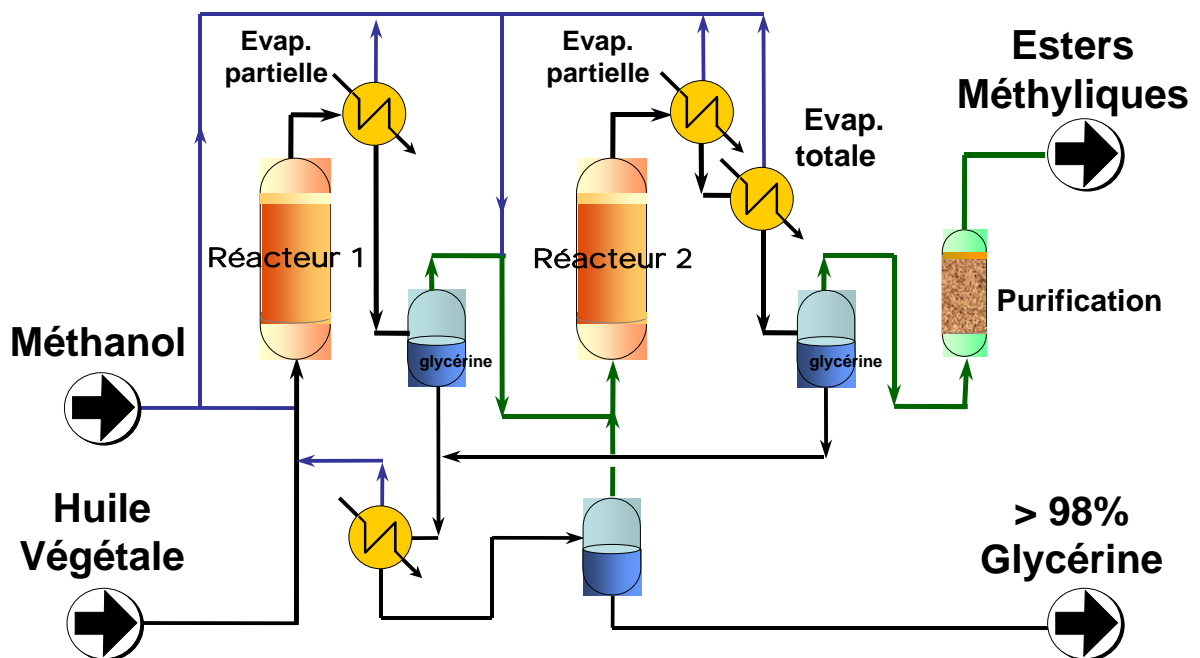


Schéma de principe d'un procédé continu de production d'EMHV par catalyse hétérogène (Procédé IFP)

Les deux réacteurs de transestérification, installés en série afin que les rendements approchent les 100 % théoriques, sont des réacteurs à lit fixe de catalyseur qui fonctionnent en continu. L'énergie d'activation du catalyseur étant relativement élevée, les températures de réaction sont beaucoup plus importantes que celles imposées en catalyse homogène. Elles se situent entre 180 et 220 °C, avec des pressions comprises entre 40 et 60 bar.

Le ratio méthanol/huile est compris entre 35 et 50 % poids. Le mélange est introduit dans le premier réacteur en respectant un temps de séjour de l'ordre d'une heure. L'effluent, dont la teneur en esters méthyliques avoisine les 95 %, est soumis à une évaporation partielle pour éliminer l'excès d'alcool. Cette façon de procéder a pour effet de favoriser la séparation de la glycérine formée et de déplacer favorablement l'équilibre réactionnel afin d'approcher 100 % de rendement de transestérification dans le deuxième réacteur.

La détente en pression de l'effluent en sortie du premier réacteur, ainsi que son contenu calorifique, sont valorisés dans le processus d'évaporation de l'excès d'alcool entre les deux étapes de transestérification.

À l'issue de la deuxième réaction de transestérification, la totalité de l'excès de méthanol est éliminée par distillation et recyclée. La teneur en esters est supérieure à 98 % en poids. Une ultime étape de purification des esters méthyliques peut consister en l'élimination de la glycérine soluble par passage sur une colonne remplie d'un adsorbant sélectif. La glycérine, est séparée par décantation ; sa pureté est supérieure à 98 %, l'impureté principale étant l'eau, initialement présente dans les matières premières utilisées.

La glycérine ainsi obtenue présente une pureté supérieure à celle obtenue par les procédés fonctionnant en catalyse homogène, avec notamment l'absence totale de sels solubles. Sans traitement de purification préalable, elle peut être utilisée dans de nombreuses applications à usages chimiques (peintures glycérophthaliques, polyols pour polyuréthane, synthon pour diverses synthèses chimiques d'éthers, d'acétals ou de carbonates).

III-3 La production d'esters éthyliques d'huiles végétales (EEHV)

La possibilité de fabriquer des esters éthyliques d'huiles végétales, en remplaçant le méthanol par l'éthanol, est en cours de développement. Elle constitue une voie indirecte d'introduction d'éthanol dans le pool gazole, puisque les EEHV présentent des caractéristiques en tant que carburant, au moins équivalentes à celles des EMHV. Il est cependant utile de rappeler que l'éthanololyse est rendue très difficile en catalyse basique homogène. En effet, la glycérine, de par sa totale solubilité dans le milieu réactionnel, modifie l'équilibre de la réaction, ne permettant pas alors d'atteindre en une seule étape des valeurs de conversion élevées. C'est pourquoi une deuxième étape de transestérification est nécessaire. Elle est réalisée après distillation de l'excès d'alcool qui entraîne la démixtion de la glycérine formée et rend possible sa séparation. En catalyse homogène, cette opération de distillation est délicate à mettre en œuvre, car le catalyseur encore actif et présent dans le milieu peut favoriser le phénomène de rétro réaction avec le glycérol libéré et reformer des glycérides.

Avec le procédé en catalyse hétérogène, on s'affranchit du problème de rétro réaction, car la séparation du glycérol n'est pas effectuée en présence du catalyseur.

D'une façon générale, l'éthanol étant moins réactif que le méthanol, les productivités en esters éthyliques sont toujours plus faibles que celles en esters méthyliques.

D'autre part, l'eau est le poison commun aux procédés de méthanolyse ou d'éthanololyse utilisant la catalyse homogène ou hétérogène. En catalyse homogène, l'eau est précurseur de la réaction de saponification. Cela se traduit par une surconsommation de catalyseur et par une diminution du rendement. En catalyse hétérogène, cela se traduit par une inhibition temporaire et réversible de l'activité catalytique pouvant réduire fortement la conversion.

III-4 La production d'hydrocarbures à partir d'huiles végétales (NextBTL)

La société finlandaise Neste Oy a mis au point un nouveau procédé qui permet de fabriquer l'équivalent d'un gazole (mélange d'hydrocarbures) à partir d'huiles végétales, de graisses animales ou encore d'huiles de friture. Plus précisément, c'est un procédé d'hydrotraitement des triglycérides, qui hydrogène totalement à 300°C les insaturations des chaînes d'acides gras et les groupements carboxyliques pour aboutir en final à des n-paraffines, du propane issu de la transformation de la glycérine, de l'eau et un peu de gaz carbonique.

Le mélange d'hydrocarbures, dénommé NextBTL, après traitement pour respecter les spécifications imposées par l'usage carburant, et après élimination de l'eau et du propane, possède un très bon indice de cétane, de l'ordre de 70.

La production de 100 000t/an d'équivalent gazole requiert environ 115 000 t d'huile de colza et 4300 t d'hydrogène et génère 5 800 t de propane. Les usines utilisant ce type de procédé devront être installées sur des sites disposant de grandes quantités d'hydrogène, par exemple à l'intérieur de raffineries de pétrole brut qui, par ailleurs, offrent des possibilités de valorisation du propane. Un moyen de limiter la demande en hydrogène serait de chercher à transformer des huiles et matières grasses saturées comme les huiles de palme et les matières grasses animales, par exemple. Celles-ci, en effet, renferment dans leur formule chimique très peu de doubles liaisons consommatrices d'hydrogène pour leur réduction. Ce choix serait d'autant plus justifié que les unités d'hydrotraitement déjà existantes en raffineries pourraient être employées pour traiter une charge pétrolière mélangée à 5-10% en poids d'huile végétale.

Cette voie de synthèse s'affranchit totalement des problèmes liés à la valorisation de la glycérine. En revanche, comme nous l'avons vu, elle pose des problèmes quant à la faible valeur du propane et à l'importance de la demande en hydrogène.

Ce type de procédé devrait, dans les semestres qui viennent, voir son industrialisation en Finlande, une fois réglés les problèmes liés à la validation du catalyseur et aux coûts d'investissement encore très élevés, et largement supérieurs à ceux des procédés de catalyse décrits précédemment.

III-5 Les qualités du biodiesel

Trois types de carburants à base d'EMHV sont disponibles actuellement :

- un mélange banalisé (comme en France), jusqu'à 5 % d'EMHV dans le gazole,
- un mélange à 30 % d'EMHV, utilisé par exemple dans les flottes captives de certaines entreprises ou collectivités locales,

- et des EMHV à 100 % comme en Allemagne et dans certains autres pays européens.

Des analyses de performances des EMHV en tant que carburants ont montré que, pour ces trois types de produits, les résultats enregistrés sont tout à fait satisfaisants :

- EMHV 5 : aucun impact négatif sur les caractéristiques de combustion et d'injection, le comportement en endurance ou l'usure du moteur,

- EMHV 30 : le bilan est plus mitigé. Peu de modifications du système de combustion et d'injection, peu d'encrassement des injecteurs. En revanche, il existe des risques tenant notamment à la dilution du lubrifiant par le carburant, une réduction des performances en termes de lubrification pouvant conduire à abaisser la protection des moteurs. Certes, aucun effet négatif n'est constaté quant à l'usure des moteurs mais la vigilance s'impose sur le suivi des conditions de service des véhicules. Cette surveillance peut impliquer de procéder à des vidanges à des intervalles plus rapprochés,

- EMHV purs : les véhicules circulent sans désagrément particulier. Toutefois, il faut noter que, dans ce cas, les véhicules ont été adaptés par les constructeurs. C'est ainsi que pour accepter l'EMHV brut, il a été procédé au remplacement des matériaux classiques par des matériaux polymères pour résister à l'effet de corrosion entraîné par l'EMHV.

Les EMHV sont miscibles au gazole et ont une viscosité et un indice de cétane pratiquement comparables à ceux du gazole.

Ensuite, sur le plan environnemental, l'absence de soufre et de structures aromatiques dans le biodiesel est particulièrement avantageuse. Par ailleurs, des gains appréciables sont observés en termes de rejets de gaz à effet de serre, notamment du CO₂. Et enfin, sur le plan mécanique, alors que la forte désulfuration des gazoles induit une réduction significative de leur pouvoir lubrifiant, l'incorporation d'EMHV permet d'améliorer nettement cette caractéristique.

En revanche, il faut remarquer que les EMHV présentent un pouvoir calorifique massique inférieur d'environ 10% à celui des gazoles, ce qui entraîne, en volume, une consommation en EMHV supérieure d'environ 10% par rapport à celle en gazole.

A noter également : la nature chimique des EMHV induit des propriétés dont les conséquences doivent être maîtrisées, notamment leur instabilité dans le temps, au cours de leur stockage, causée par les insaturations des acides gras qui les composent et qui requiert l'usage d'additifs.

Enfin, le point d'écoulement des EMHV (plus basse température à laquelle une huile coule encore lorsqu'elle est refroidie) augmente avec la proportion d'acides gras saturés, principaux responsables des mauvaises caractéristiques à froid. Ainsi, les huiles végétales "figent" à quelques degrés au-dessus de zéro °C ; elles ne peuvent donc pas s'écouler en-dessous de cette température et encore moins alimenter un moteur dans ces conditions climatiques. Pour donner un exemple extrême, les esters méthyliques d'huile de palme, très saturés, ont un point d'écoulement de +13°C. Par comparaison, le point d'écoulement d'un gazole ne doit en aucun cas être supérieur à -15°C, en France.

III-6 L'impact sur l'environnement

Au regard des critères de pollution locale, les EMHV présentent un bilan environnemental très favorable. On enregistre avec eux une diminution quasi générale des émissions de polluants, qu'il s'agisse de particules, d'hydrocarbures imbrûlés ou d'oxyde de carbone : moins 15 à 30 % de rejets avec la formule à 5 % d'EMHV. Seuls les oxydes d'azote ont parfois tendance à légèrement augmenter (moins de 5% d'augmentation avec la formule à 20 % d'EMHV).

Les gains sont encore plus appréciables en termes de rejets de gaz à effet de serre (GES), particulièrement de CO₂, les émissions étant calculées sur l'ensemble du cycle de vie des EMHV, de leur production à leur utilisation. S'appuyant sur les deux études déjà citées, l'utilisation de biodiesel permet une réduction des GES par rapport aux solutions conventionnelles de 55 % à 75%, ce qui représente, dans ce dernier cas, si l'on prend l'exemple de l'EMHV ex-colza, 2,75 tonnes de CO₂ évitées par hectare.

Enfin, la consommation de biodiesel permet d'économiser de l'énergie fossile dont on sait que les gisements ne sont pas inépuisables. En termes de rendement énergétique, toujours pour le colza et sur la base d'un rendement brut en biodiesel de 1,4 t/ha, la production brute d'énergie est de l'ordre de 1,3 tep/ha. Après déduction de tout apport d'énergie fossile (utilisation d'engrais, carburant pour tracteurs,...), la production nette d'énergie est de 0,85 tep/ha. Par comparaison, le ratio énergie restituée/énergie fossile consommée, qui n'est que de 0,92 pour le gazole (les activités de production, transport et raffinage consomment 8% du pétrole extrait), passe à 3 pour le biodiesel.

III-7 Les coûts et les potentiels de production

Les EMHV affichent un coût de production sensiblement plus élevé que celui du carburant d'origine pétrolière. Une situation qui, nous l'avons vu, pénalise également l'éthanol. Du fait d'une demande importante, les cours de l'huile de colza, la principale matière première du biodiesel en Europe, atteignaient ainsi en mai 2006 sur le marché de Rotterdam près de 630 euros/tonne. Un niveau largement supérieur aux cours du pétrole relevés à cette date, 70 dollars par baril, soit environ 500 dollars la tonne. Par ailleurs, à ce niveau de prix, le coût de la matière première représente de l'ordre de 80% du coût du biodiesel, qui se retrouve ainsi environ 1,5 fois plus cher que le gazole pour un cours du pétrole brut de 60\$/baril.

De plus, la valorisation actuelle du co-produit, la glycérine, du fait de la saturation du marché mondial, n'est pas faite à des cours intéressants.

Concernant les autres ressources en matières premières oléagineuses, les cours de l'huile de palme et de soja ont sensiblement progressé pour se rapprocher de ceux du colza.

Pour être compétitif, le biodiesel doit donc être subventionné. Cette subvention peut intervenir soit au niveau de l'utilisation (prime à la consommation), soit au niveau de la production (aide au producteur).

Par exemple, les primes à la consommation sont données via une détaxation partielle du biodiesel, variable selon les pays, et qui prend en France la forme d'une

exonération partielle de la Taxe Intérieure de Consommation (TIC, ex-TIPP). En 2004 et 2005, cette exonération française était de 33 euros/hl (soit 555 euros/tep). Avec la loi de finances de 2006, elle est passée à 25 euros/hl (soit 458 euros/tep). En Europe, elle varie selon les pays : 47 euros/hl en Allemagne, 41 euros/hl en Italie et 51 euros/hl en Belgique.

Les potentiels de production à l'hectare cultivé sont plus faibles que ceux de l'éthanol, de même que la production mondiale d'oléagineux sera toujours limitée, malgré le développement de celles d'huile de soja et surtout de palme.

Les rendements agricoles sont limités pour le colza, dont la production d'huile est comprise entre 1,2 et 1,3 t/ha, presque le double, toutefois, de ceux obtenus avec le tournesol et le soja. La production d'huile de palme est, en revanche, beaucoup plus importante, puisqu'elle est comprise entre 6,0 et 7,0 t/ha.

Plante oléagineuse	Graines (t/ha)	Huile (t/ha)	Tourteaux (t/ha)
Soja	3,4	0,7	2,7
Palme	30 ⁽¹⁾	6,3	-
Colza	3,1	1,2-1,3	1,8-1,9
Tournesol	1,7	0,7	0,6-0,7 ⁽²⁾

(1) : régimes de palmes

(2) : tourteaux décortiqués

III-8 La production mondiale de biodiesel

C'est actuellement le deuxième biocarburant utilisé dans le monde après l'éthanol, mais sa contribution est encore modeste, avec une production mondiale de seulement 3,7 millions de tonnes par an. A peine plus de 10 % de la production totale d'éthanol-carburant. Son avenir n'en est pas moins prometteur, essentiellement en Europe, déjà sa principale zone de consommation, en raison de la diésélisation importante du parc automobile : environ les 2/3 des nouvelles voitures immatriculées en Europe sont équipés d'une motorisation diesel.

Il est aujourd'hui produit à partir d'huiles végétales (colza essentiellement, tournesol, soja et palme). Les EMHV peuvent aussi être fabriqués à partir de graisses animales et d'huiles usagées telles que les huiles de friture.

Des procédés de production de biodiesel à partir d'huiles végétales s'implantent de plus en plus en Europe et dans le Monde. L'Allemagne, qui a accordé des aides fiscales déterminantes, a produit en 2005 plus de la moitié du biodiesel de l'Union Européenne (1,7 millions de tonnes sur un total de 3,2). La France arrive en seconde position avec un demi million de tonnes de biodiesel produit ; elle développe fortement sa production. Géants au niveau mondial pour l'éthanol, les Etats-Unis et le Brésil disposent d'une position modeste pour le biodiesel mais sont engagés sur une voie ascendante. La production a triplé aux Etats-Unis entre 2004 et 2005 (de 100 000 à 300 000 tonnes), et le Brésil envisage de rendre obligatoire l'addition de 2 % d'EMHV dans le gazole à l'horizon 2008.

Un deuxième type de biodiesel pourrait aussi être fabriqué, par synthèse chimique cette fois, à partir des mêmes huiles végétales, graisses animales. Le procédé alors

mis en oeuvre est un hydrotraitement catalytique et le produit obtenu est un mélange d'hydrocarbures (combinaison chimique d'atomes de carbone et d'hydrogène), sans composés oxygénés comme dans le cas des esters. Ce procédé est en cours d'industrialisation. Il présente l'avantage de produire un gazole de grande qualité dont l'utilisation ne nécessite pas d'adaptation des motorisations des véhicules.

Le développement de ces filières sera néanmoins limité par le manque de disponibilité des ressources premières, même si des pays tropicaux cherchent à transformer d'autres huiles végétales non alimentaires, comme le jatropha par exemple.

Conclusion

En conclusion, il est aujourd'hui bien démontré que l'usage des biocarburants en substitution aux carburants conventionnels permet de réduire les émissions de GES et les consommations d'énergies non renouvelables, tout en offrant des possibilités de développement des activités agricoles. Il s'agit des principaux arguments en faveur de leur usage à grande échelle : utilisés purs, ils peuvent induire un gain en termes de rejet de GES pouvant aller jusqu'à 80-90 % pour les filières les plus efficaces. Ce gain est d'ailleurs du même ordre de grandeur en termes de consommation d'énergie fossile. Dans le contexte actuel qui veut que les biocarburants soient le plus souvent utilisés en mélange à des teneurs relativement faibles, le bénéfice global, en termes d'effet de serre, peut apparaître faible : gain en termes d'émissions inférieur à 5 % pour des taux d'incorporation des biocarburants dans les carburants traditionnels de 5 à 10 %. Mais, si ces chiffres paraissent faibles en première approche, il est important de souligner qu'ils peuvent être obtenus dans un secteur dont la croissance est très difficile à maîtriser et pour lequel les solutions offrant le même bénéfice dans un temps relativement court sont peu nombreuses. Les biocarburants ne représentent pas La SOLUTION au problème d'émissions de gaz à effet de serre du secteur transport, mais un ELEMENT DE SOLUTION qui, combiné à d'autres (évolution des technologies moteur, évolution des comportements, etc.), peut apporter un début de réponse.

Références

D. Ballerini. Le plein de biocarburants ? Enjeux et réalités. Editions Technip, Paris, 2007

D. Ballerini, N. Alazard-Toux. Les biocarburants. Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement. Editions Technip, Paris, 2006

Etude ADEME-DIREM (décembre 2002). Bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de biocarburants en France. http://www.ademe.fr/partenaires/agriculture/publications/documents_français/synthèse_bilans_energetiques_fr.pdf

Panorama 2007- Les biocarburants, www.ifp.fr

R.D. Perlack, L.L. Wright, A.F. Turhollow, R.L. Graham, B.J. Stokes, D.C. Erbach. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry : the technical feasibility of a billion-ton annual supply, a joint study sponsored by U.S. Department of Energy and U.S. Department of Agriculture, DOE/GO-102995-2135, ORNL/TM-2005/66, 2005

Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context, Concawe, Eucar, JRC, Well-to-Wheels report, March 2007, <http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>