



## UNITE 5

# BIOCARBURANTS



# SOMMAIRE

I. Introduction .....	3
I.1. Utilisation des biocarburants en Europe .....	5
I.2. Le Protocole de Kyoto et la législation de l'UE concernant la production des biocarburants.	8
I.3. Les nouvelles directives PAC et les perspectives du développement des cultures énergétiques .....	9
I.4. Stratégies de développement des procès liés aux biocarburants .....	9
I.5. Les biocarburants et l'impact sur l'environnement.....	10
I.6. Les acteurs des projets .....	12
II. Culture de plantes à des fins énergétiques .....	12
II.1 Des plantes énergétiques importantes .....	12
II.2 Qualités, productivité, milieu agricole .....	16
III. Les biocarburants comme sources d'énergie .....	23
III.1 Qualités énergétiques et techniques des biocarburants.....	24
III.2 Production des biocombustibles: trans estérification, distillation, pressage.....	39
III.3 Utilisation des biocarburants: utilisations potentielles, solutions techniques.....	46
IV. Points de vue économiques .....	51
IV.1 Rentabilité de la production agricole .....	51
IV.2 Calcul coûts – bénéfices « .....	53
V. Etudes de cas .....	55
VI. Bibliographie .....	57



# I. Introduction

Aucun autre domaine d'activité ne dégage autant d'émissions que le secteur du transport. Voyons sur la figure n° 1 l'exemple de la province de Baden-Vurtemberg pour présenter la part du transport de personnes et de marchandises dans la totalité des émissions des six polluants principaux, causées par l'homme : monoxyde de carbone (CO), oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), composés organiques volatiles (sauf méthane, COV), particules, dioxyde sulfurique (SO<sub>2</sub>) et dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). En moyenne, un tiers des émissions de ces substances est dû aux transports, les émissions de CO et de NO<sub>x</sub> en représentent plus de la moitié. Les particules, le CO<sub>2</sub> et les COV viennent ensuite, pour le SO<sub>2</sub>, la part occupée est faible.

La plupart des substances polluantes émises par les moyens de transport vient des voitures et des motos, c'est-à-dire du transport individuel. La plupart donc des émissions de CO, CO<sub>2</sub> et COV dues au transport est dégagée par le transport individuel. Pour l'émission de NO<sub>x</sub> et de particules le principal responsable est le transport de poids lourds. La participation du transport ferroviaire, fluvial, maritime et aérien aux émissions de

substances polluantes est relativement insignifiante. Ces données sont peut-être différentes de celles des autres provinces allemandes ou des données moyennes pour l'Allemagne ; cependant, il ne doit pas y avoir de très grands écarts.

Les réserves de pétrole sur terre sont limitées et le moment de leur épuisement dépend de plusieurs facteurs, entre autres, de l'utilisation mondiale de l'énergie primaire et du mélange des énergies primaires.

Actuellement, les carburants sont presque entièrement des produits pétroliers et les problèmes environnementaux s'accumulent, il faudrait avoir des alternatives aux combustibles fossiles ne contaminant pas l'environnement. Les biocarburants et les biocombustibles issus des huiles végétales, des céréales, du bois et d'autres matières renouvelables en font sans doute partie.

Un regard sur les différents des biocarburants (figure n°2) montre qu'il existe des possibilités pour chaque type de moteur, bien que les solutions techniques ne soient pas encore trouvées pour tous les cas particuliers.

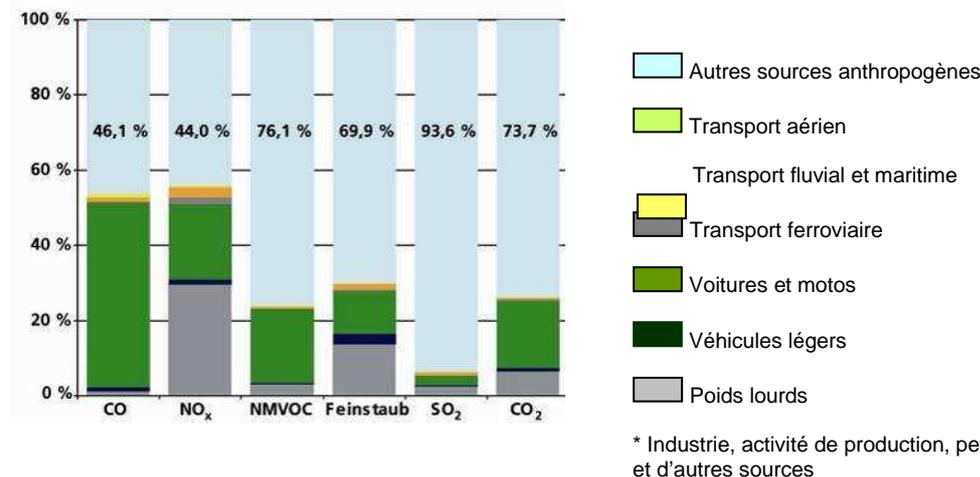


Fig. 1 : Part des émissions dues au transport dans la totalité des émissions anthropogènes – à titre d'exemple Baden –Vurtemberg (source de données : UMEG/AVISO 2003)

\* Industrie, activité de production, petites installations de combustion et d'autres sources

### Carburants issus des huiles végétales

Le principal combustible à base d'huiles végétales est le biodiesel. C'est une huile naturelle améliorée par des procédés chimiques et dont les qualités se rapprochent beaucoup de celles du carburant diesel traditionnel. Avec des modifications du moteur et du système de combustion, les huiles végétales naturelles pourraient être utilisées dans les moteurs diesel.

Les carburants à base d'huiles végétales sont produits à partir du colza, mais le tournesol et la caméline (*Camelina sativa (L.)*) peuvent aussi être utilisés.

Fig. n°2. Présentation des différents biocarburants

Combustibles à base d'huiles végétales	Bioéthanol	Gaz biogènes	Carburants synthétiques	Hydrogène
<p>Les cultures les plus importantes pour la production agricole sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• colza</li> <li>• tournesol</li> <li>• caméline etc.</li> </ul> <p>• biodiesel</p> <p>• huiles végétales pures</p>	<p>Matières premières renouvelables</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• céréales</li> <li>• betterave sucrière</li> <li>• pommes de terre</li> <li>• autres</li> </ul> <p>• éthanol</p> <p>• mélanges éthanol-essence</p>	<p>Biogaz de fermentation et de transformation thermochimique des matières premières renouvelables et des résidus d'origine biogène en gaz</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• biogaz</li> <li>• gaz des stations d'épuration</li> <li>• gaz contenant du méthane comme substitut du gaz naturel</li> </ul>	<p>Transformation en gaz des matières premières renouvelables et des résidus d'origine biogène</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bois</li> <li>• paille</li> <li>• résidus de fermentation</li> <li>• biomasse</li> </ul> <p>• carburants synthétiques gazeux, contenant du méthane comme substitut du gaz naturel</p> <p>• carburants synthétiques liquides comme substituts de l'essence et du diesel</p> <p>• méthanol</p>	<p>Hydrogène de biomasse par des procédés thermochimiques et microbiologiques</p> <p>• Hydrogène comme combustible à long terme surtout pour les générateurs électrochimiques</p>



### *Bioéthanol*

L'éthanol est un alcool qui peut être utilisé pour les moteurs à essence (à carburateur). Sa production se fait à l'aide de la fermentation de plantes contenant du sucre et de l'amidon comme les céréales, la betterave sucrière, les pommes de terre, etc. La combustion du biodiesel est beaucoup plus complète que celle de l'essence ou du diesel.

### *Gaz biogènes*

Pour les moteurs à gaz, il existe aussi des alternatives au gaz naturel. A partir du biogaz et du gaz des stations d'épuration à travers la fermentation ou des procédés thermo-chimiques de gazéification on obtient un gaz contenant du méthane qui peut être utilisé comme carburant pour les moteurs traditionnels.

### *Carburants synthétiques (Syngaz) ou carburants BTL*

Le terme de Syngaz englobe tous les carburants synthétiques. Le gaz biogène se dissocie en monoxyde de carbone (CO) et en hydrogène (H<sub>2</sub>), qui se combinent en chaînes d'hydrocarbures à travers la synthèse de Fischer – Tropsch. Un enrichissement d'hydrogène modifie la longueur et la forme des molécules, de manière à obtenir un carburant adapté de manière optimale au moteur. Les carburants synthétiques peuvent se substituer à l'essence et au diesel, mais aussi au gaz naturel.

## **I.1. Utilisation des biocarburants en Europe**

En 2004, au sein de l'Union Européenne sont produites presque 2,5 millions de tonnes de biocarburants. Par rapport aux deux millions de tonnes produites en 2003 (y compris par les nouveaux pays-membres), on obtient une augmentation de 25,7 %.

Les biocarburants peuvent être divisés en : bioéthanol, biocarburants à base d'huiles végétales (biodiesel) et d'huiles végétales pures, biogaz, biométhanol, bio-diméthyléther, bio-ETBE, carburants synthétiques et bio-hydrogène. Les plus importants sont le biodiesel et le bioéthanol.

### *Biodiesel*

L'Union Européenne occupe la première place mondiale pour le biodiesel. En 2004, 11 pays ont participé à l'ensemble de la production de biodiesel, y compris les nouveaux pays membres (la Tchéquie, la Slovaquie et la Lituanie). L'importance du secteur du biodiesel augmente, comme on peut le voir sur la figure n° 3, présentant l'évolution de la production européenne de biodiesel à partir de 1992. En tout cas, ces chiffres sont bien loin des capacités réelles de production, évaluées à 2,4 millions de tonnes par l'EBB (European Biodiesel Board).

En 2004, l'Allemagne a gardé sa place en tant que premier producteur de biodiesel au niveau européen. Pour la première fois, la production a dépassé le million de tonnes (1 035 000 t) réalisant ainsi une augmentation de 44,8 % par rapport à l'année précédente. La production allemande de biodiesel représente la moitié de la production européenne. Ce succès est dû surtout à la législation exceptionnellement favorable : à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2004 les composants biogènes des mélanges de carburants et du mazout sont exonérés de l'impôt sur les huiles minérales (les biocarburants en sont exonérés depuis l'année 2002). Les biocarburants sont aussi dispensés de la taxe écologique en vigueur depuis 1999 et applicable sur les dérivés des huiles minérales.

En France, la production de biodiesel diminue depuis l'année 2001, lorsque la France était le plus grand producteur en Europe. En 2004 elle n'a produit que 348 000 t. Et le quota de 387500 t déterminé comme autorisé pour exonération d'impôt n'était pas atteint. En 2004, en Italie la production de biodiesel a atteint 320.000 t, un accroissement de 17,2 % par rapport à 2003. Plus de 90 % de la production était destinée au marché des combustibles, le reste était utilisé dans les installations de chauffage. Le pronostic pour 2005 prévoit une diminution du quota de biodiesel avec environ 100 000 tonnes en faveur de l'éthanol. Parmi les autres pays européens en 2004 une augmentation importante a eu lieu en Autriche et au Danemark (respectivement 78,1 et 70,7 %). L'Espagne, le Portugal, la Grande Bretagne et la Finlande ont aussi commencé à produire du biodiesel.



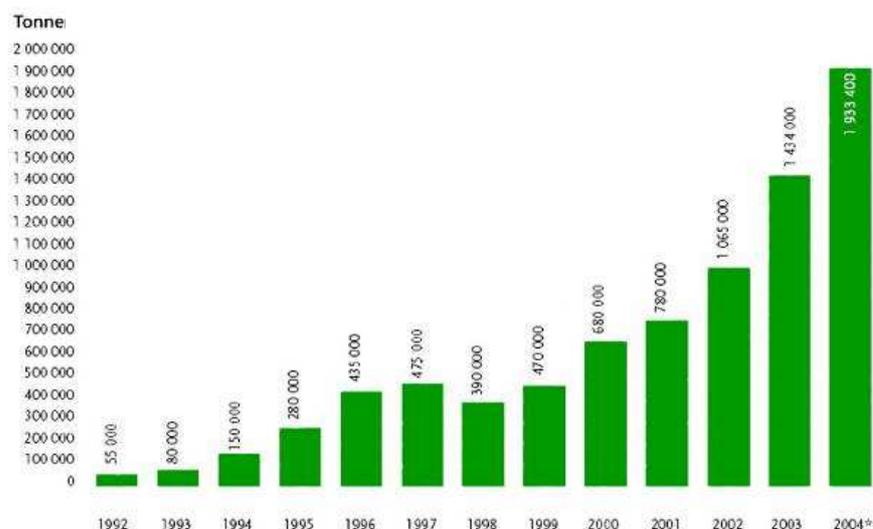


Fig. n°3. Production de biodiesel dans l'Union Européenne depuis 1992

Tableau n° 1: Production de biodiesel en 2003 et 2004 dans l'UE; \* tolérance d'erreur +/- 10 % (source : EurObserv'ER/EBB 2005)

Pays	2003	2004	Croissance
Allemagne	715000	1035000	+ 44,8%
France	357000	348000	- 2,5%
Italie	273000	320000	+ 17,2%
Danemark	41000	70000	+ 70,7%
Tchéquie	70000	60000	- 14,3%
Autriche	32000	57000	+ 78,1%
Slovaquie	0	15000	
Espagne	6000	13000	+ 116,7%
Grande-Bretagne	9000	9000	+ 0,0%
Lituanie	0	5000	
Suède	1000	1400	+ 40,0%
<b>Total des 25 de l'UE</b>	<b>1504000</b>	<b>1933400</b>	<b>+ 28,6%</b>

### Bioéthanol

Le bioéthanol est le deuxième marché de biocarburants dans l'Union européenne (UE) avec une production de 491 040 t en 2004 par rapport aux 424 750 t l'année précédente.

Dans le cadre de l'UE, l'Espagne est le premier pays producteur de bioéthanol avec ses 194 000 t en 2004 (en 2003, la production était de 160 000 t).

En Espagne, comme en France, le bioéthanol est transformé en ETBE (Ethyl-Tertio-Butyl-Ether) et peut remplacer dans l'essence le complément ajouté au carburant appelé MTBE (Méthyltertiobutyléther).

En 2004, la France a produit 102 000 t de bioéthanol : 24,4 % de plus que l'année précédente, mais le marché français n'a consommé que 80.887 t.

En Suède, par contre, la quantité du bioéthanol utilisée dépasse de beaucoup la quantité produite au sein du pays (2004 : 52 000 t de production, utilisation de 206 000 t). Le bioéthanol en Suède n'est pas transformé en ETBE, on l'ajoute à l'essence. De l'essence avec jusqu'à 5 % d'éthanol est déjà en vente depuis longtemps. De plus, le carburant E 85 (85 % d'éthanol, 15 % d'essence) est utilisé pour alimenter des véhicules munis de la technologie FFV (véhicules flexible fuel).



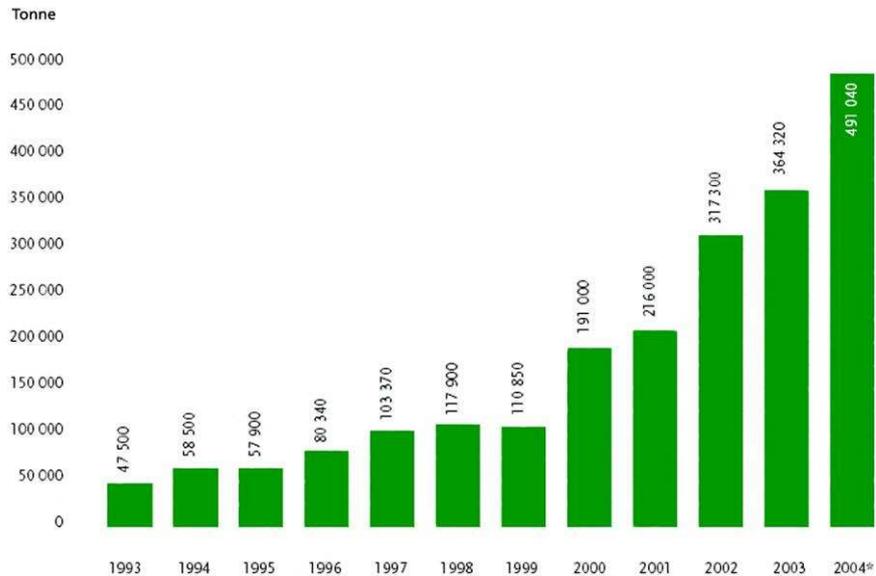


Fig. n°4 : Production de bioéthanol dans l'Union Européenne depuis 1993  
(Source de données : EurObserv'ER, 2005)

Le développement du marché des biocarburants est étroitement lié à l'exonération partielle, voire totale des impôts, sur les huiles minérales dans les différents pays. Les frais correspondants à ce type de stimulation ont provoqué dans certains pays l'adoption de quotas de production afin de limiter la quantité de biocarburants favorisés. Dans certains cas le résultat est que les biocarburants se sont trouvés dans un marché « fermé », c'est-à-dire un marché dans lequel les différents secteurs/chaînes de création de valeur se concurrencent entre eux. Cette limite n'est, en tout cas, que d'origine politique car la législation européenne accorde l'exonération totale de l'impôt sur les huiles minérales sans aucune limitation de production, après un accord préalable.

La comparaison entre les tendances actuelles du développement des biocarburants en Europe et l'objectif du Livre blanc montre clairement que jusqu'à la fin de 2010 les biocarburants n'atteindront pas le niveau souhaité de 5,75 % du marché. Pour l'Union Européenne, il est cependant encore possible d'atteindre cet objectif, si le marché des biocarburants s'impose dans certains pays comme la Grande-Bretagne, le Portugal, la Belgique, la Finlande et d'autres, parallèlement à la suppression des quotas de production.

Fig. n°5 : Comparaison entre la tendance actuelle et les objectifs du Livre blanc pour les biocarburants dans l'UE (Source de données : EurObserv'ER, 2005)



## I.2. Le Protocole de Kyoto et la législation de l'UE concernant la production des biocarburants

La préservation du climat est devenue un sujet de politique nationale et internationale. L'accord international le plus important est sans doute le protocole de Kyoto de 1997 par lequel les pays industrialisés s'engagent à partir de 2008 jusqu'en 2012, à réduire la totalité de leurs émissions de gaz à effet de serre les plus importants au minimum 5 % en dessous du niveau de 1990. L'Allemagne a ratifié le protocole, avec les autres pays membres de l'UE, en mai 2002, et dans le cadre d'une répartition des charges au sein de l'UE s'est engagée à une réduction de 21 % pendant la première période obligatoire (2008 – 2012) pour apporter sa contribution à la réalisation de l'objectif général de l'UE d'avoir une réduction de 8 %.

En 1997, la Commission Européenne dans son Livre blanc pour les énergies renouvelables s'est fixée comme objectif de doubler la part des énergies renouvelables dans la part totale de la consommation intérieure brute d'énergie de l'UE et de passer des 6 % de l'année 1997 à 12 % en 2010 ("Objectif : doubler la part des ENR »). Le volume absolu des énergies renouvelables doit cependant être augmenté deux fois et demie par rapport aux valeurs initiales pour pouvoir atteindre le doublement relatif.

On s'attend à avoir une croissance importante de l'utilisation de la biomasse. Le développement des énergies renouvelables doit être assuré à 80 % par la biomasse. Cela signifie que la part de ce secteur triplera et que la croissance absolue atteindra plus de trois fois et demie, le tout sera renforcé, entre autres, par la promotion des biocarburants.

La croissance absolue attendue des autres sources d'énergies renouvelables est moins importante. Mais, dans certains cas, cela pourrait donner des croissances relatives encore plus importantes que celles de la biomasse, comme par exemple pour l'éolien ou le solaire.

Au niveau national, l'Allemagne s'est aussi fixé comme objectif de doubler la croissance : la part des énergies renouvelables doit atteindre 4 % jusqu'en 2010 (en 2000 : 2 %) et garder cette tendance à la hausse. Cela doit lui permettre aussi d'atteindre un autre objectif qui est la réduction d'ici 2005 des émissions de dioxyde de carbone de 25% par rapport à 1990.

Sachant qu'un tiers de l'énergie dans l'UE qui a tendance à la hausse, est consommé par le secteur du transport, c'est ce domaine qui pourrait contribuer significativement à la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Citons à ce sujet le Livre vert "Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique" et le Livre blanc "Politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix d'orientations". Dans ces documents, l'exigence de pénétration de 6 % de la part des biocarburants dans toute l'Europe d'ici 2010 et de 20 % d'ici 2020 est soulignée.

### La directive européenne visant à promouvoir l'utilisation des biocarburants

La majorité des objectifs européens visant la préservation du climat ont été fixés comme juridiquement obligatoires. En relation avec l'utilisation des biocarburants au niveau européen il faut indiquer en premier, la *Directive 2003/30/UE du 8 mai 2003 visant à promouvoir l'utilisation des biocarburants ou autres carburants renouvelables dans les transports*. Il est prévu d'augmenter progressivement la part minimale de biocarburants sur le marché des combustibles de l'UE. La part biogène qui, à la fin de l'année 2005 dépasse les 2 %, doit représenter 5,75% à la fin de l'année 2010.

Les objectifs déclarés dans cette directive sont la diminution des émissions de gaz à effet de serre, la limitation de l'influence du transport sur l'environnement, l'augmentation de la sécurité de l'approvisionnement, ainsi que la promotion des sources d'énergies renouvelables. Le pourcentage minimal est fixé dans cette directive, dans les différents pays européens, afin de remplacer le carburant des moteurs Diesel par des biocarburants, pour la diminution des émissions polluantes, tout cela sans faire de différence entre les différentes formes de combustibles qui pourraient être utilisés comme des carburants purs, composés ou liquides.

Les pays membres avaient jusqu'en juillet 2004 pour annoncer à la Commission Européenne les valeurs approximatives à atteindre à la fin de l'année 2005. Ils devaient aussi communiquer les valeurs fixées au dessous des quantités minimales indiquées en les justifiant avec des critères objectifs.

Les pays membres présentent chaque année avant le 1<sup>er</sup> juillet leur rapport concernant les mesures prises en faveur de la promotion de l'utilisation des biocarburants et des autres énergies renouvelables ; les ressources d'Etat mises à disposition pour la production de



biomasse à application énergétique autres que celle du secteur des transports ; la quantité totale de combustible acheté durant l'année précédente pour le secteur des transports. A compter du mois de décembre 2006, la Commission fait des rapports biannuels sur les progrès réalisés dans chacun des pays européens qu'elle présente au Parlement européen et au Conseil.

Certains des pays membres n'ont pas encore déterminé leur taux de quantités minimales. En mars 2005, neuf des pays membres n'avaient pas annoncé à la Commission leurs objectifs à atteindre d'ici décembre 2005 : la Belgique, l'Italie, le Luxembourg, la Pologne, la Slovaquie, l'Estonie, Chypre, la France et le Portugal.

### **I.3. Les nouvelles directives PAC et les perspectives du développement de cultures énergétiques**

La politique agricole commune (PAC) date des années 50, lorsque dans la période de l'après-guerre, l'agriculture jouissait de subventions de production et de prix fixes garantis. Les changements dans la société et dans l'agriculture ont imposé d'adapter la PAC aux nouvelles circonstances, ainsi, au début des années 90, la politique agricole a commencé à se conformer aux règles du marché et à s'orienter vers la protection de l'environnement.

#### **La réforme de la PAC (Politique agricole commune) en 2003 / 2004**

En juin 2003, les ministres de l'agriculture des pays de l'UE ont adopté une révision générale de la PAC, garantissant le soutien agricole et la préservation, à long terme, des régions agricoles. Après la réforme de la PAC, les subventions sont accordées sur la base de standards obligatoires de qualité et de protection de l'environnement, de sécurité alimentaire, de santé des animaux et des plantes, y compris la préservation de la faune. Les aides directes ne sont plus liées à la production.

Les agriculteurs ont la possibilité de s'orienter par rapport à la demande du marché et de proposer de nouveaux produits agricoles par rapport aux opportunités de marché. En dehors de cela, pour des raisons de discipline budgétaire, il a été mis en place un mécanisme permettant d'éviter le déficit prévu par les prévisions budgétaires jusqu'en 2013 pour l'agriculture de l'UE des 25.

#### *Réglementation concernant les plantes énergétiques*

La réglementation concernant les plantes énergétiques qui fait partie de la PAC représente un intérêt particulier pour le secteur des biocarburants. La réforme de la PAC de 2003 a mis en place une nouvelle subvention favorisant leur culture pour un montant de 45 euros par hectare de cultures énergétiques. La culture de plantes énergétiques utilisables pour la production de biocarburants pour le transport (conformément à la définition de la Directive 2003/30/EO) et la production d'énergie électrique ou de chauffage à partir de la biomasse est favorisée.

Les agriculteurs font le choix d'apporter leur part de production de plantes énergétiques à travers la réglementation en vigueur concernant les terres agricoles en jachère (non alimentaire) ou bien sur la base de la nouvelle réglementation dont la mise en place était justifiée par la réduction des émissions de dioxyde de carbone.

Comme il a été déjà indiqué, la subvention d'un montant de 45 euros par hectare, garantie pour une surface de 1,5 million d'hectares sur toute l'UE, est octroyée à condition de cultiver les plantes énergétiques sur la base d'un contrat avec l'industrie de transformation si cette transformation n'est pas réalisée au sein de l'exploitation agricole.

### **I.4. Stratégies de développement des process liés aux biocarburants**

Pour pouvoir atteindre d'ici 2010 les objectifs fixés par la Directive pour les biocarburants, il faut associer tous les secteurs concernés. Actuellement, on trouve sur le marché du biodiesel et du bioéthanol. Les autres alternatives de biocarburants synthétiques, d'huiles végétales et de biogaz pour le transport doivent être encore améliorées. Dans tous les cas, à l'avenir, il faudra éviter de se limiter à un seul biocarburant spécifique et essayer de développer et mettre en pratique le spectre entier des différents biocarburants de manière à trouver la meilleure solution correspondant à chaque domaine d'application.

#### **La situation en Allemagne**

Depuis plusieurs années, l'industrie automobile et la construction mécanique, ainsi que quelques consortiums d'huiles minérales, ont des activités intenses dans le domaine de la recherche et du développement de futures conceptions alternatives pour le transport.



Il vous est présenté, ci-après, les stratégies de quelques constructeurs automobiles :

*Volkswagen* compte sur le développement de biocarburants synthétiques (des recherches sur les carburants GTL et les carburants BTL), qui peuvent être mélangés avec les combustibles Diesel traditionnels.

*Daimler Chrysler* (DC) travaille sur des stratégies de pénétration et d'utilisation de carburants alternatifs tels que les combustibles synthétiques et les BTL carburants, comptant sur l'hydrogène à long terme. DC travaille aussi sur des conceptions hybrides et des automobiles aux éléments combustibles (générateurs électrochimiques).

*BMW* prévoit à long terme l'utilisation de l'hydrogène comme combustible unique, en tout cas sans éléments combustibles (générateurs électrochimiques), à travers l'utilisation de moteurs hybrides à combustion interne.

Le plan d'étude de l'environnement en Allemagne aide à l'élaboration de stratégies communes de carburants alternatifs et de technologies d'adaptation. Dans ce domaine entre 2000 et 2004, 1,1 millions d'euros ont été investis surtout pour l'étude de technologies d'adaptation innovatrices et non nuisibles à l'environnement ainsi que l'étude de carburants alternatifs.

Dans le cadre du programme de promotion "matières premières renouvelables" du Ministère fédéral de l'alimentation, de l'agriculture et de la défense des consommateurs, la subvention actuelle pour les projets dans le domaine des combustibles biogènes est d'environ 4 millions d'euros.

Les premiers projets de création de combustibles synthétiques (surtout de BTL) sont déjà en réalisation. Les projets de production et d'application du biodiesel, ainsi que du bioéthanol à base de betterave sucrière et de céréales sont soutenus partiellement. Les subventions concernent surtout l'utilisation des huiles végétales dans l'agriculture.

### **La situation internationale**

Ces dernières années plusieurs projets d'élaboration, de mise en pratique et de diffusion des biocarburants ont été initiés en Europe. Le biodiesel et l'éthanol ont fait l'objet d'une aide particulière. Durant le sixième programme cadre de recherche seront soutenus, entre autre, les projets concernant la production de carburants BTL. De plus, l'activité de recherches pour la création de moteurs alternatifs tels que les éléments de combustion (des générateurs

électrochimiques) et des moyens de transport hybrides sera subventionnée.

En Amérique de Nord et au Japon, on compte plus sur les recherches dans le domaine des alternatives de mécanismes moteurs que sur les combustibles.

## **1.5. Les biocarburants et l'impact sur l'environnement**

Les produits issus de la biomasse sont désignés par le terme "matières premières renouvelables" qui s'est imposé avec le temps. Leur avantage est dans leur origine organique, puisqu'ils représentent de la biomasse enrichie. Ils se renouvellent tous les ans ou pendant des périodes bien déterminées. Les matières premières renouvelables sont totalement ou en partie utilisées dans l'industrie ou comme ressources énergétiques.

Avec la révolution industrielle, vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le besoin en matières premières de toute sorte a augmenté plus vite que les possibilités de leur production technique. De nombreux produits naturels ont été remplacés par des produits analogues artificiels. La production de matières premières extractibles a augmenté grâce aux nouvelles techniques. Durant les années 80, la réduction des matières premières fossiles et la surproduction agricole ont provoqué une prise de conscience quant aux possibilités de cultiver des matières premières renouvelables d'origine végétale sur des terres en jachère, sans perdre les droits de prime. Depuis, les raisons environnementales ont pris le dessus sur les arguments agricoles et politiques : les ressources fossiles limitées et l'augmentation de l'effet de serre due à leur exploitation avec l'accroissement des quantités de déchets, ont été décisives pour l'élaboration de nouvelles productions à partir de matières premières renouvelables. Grâce à ces nouvelles productions des cycles de production non nuisibles à l'environnement sont créés ce qui pourrait encore continuer dans l'avenir.

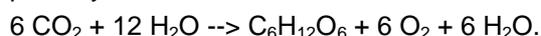
Les biocarburants issus de la biomasse ont un cycle hydrogène-dioxyde de carbone fermé. Il "commence" au moment du développement des plantes avec la photosynthèse et « se termine » avec le dégagement du CO<sub>2</sub> durant l'utilisation énergétique (la combustion).

Ce cycle se produit au moment de l'utilisation de la biomasse dans des périodes bien déterminées. Les plantes construisent leur structure à partir du dioxyde de carbone de l'air, de l'eau et du sol. Le soleil leur procure l'énergie nécessaire. De cette manière, le



contenu énergétique de la plante représente une forme chimique de l'énergie solaire.

La transformation du dioxyde de carbone et de l'eau en glucides et en oxygène, s'appelle la photosynthèse. La formule chimique de la photosynthèse est la suivante :



L'oxygène provient uniquement des molécules d'eau dégagées durant la photosynthèse, non pas du dioxyde de carbone, et représente un résidu.

Dans l'exemple précédent, on obtient le glucose ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) comme produit primaire à partir duquel, il se forme des lipides auxquels le dioxyde de carbone est lié durant le développement.

Durant la transformation des cultures, les lipides sont extraits sous forme d'huile liquide qui peut être utilisée, par exemple, comme carburant à application énergétique.

Lors de la combustion, le dioxyde de carbone lié à l'huile végétale est de nouveau libéré : l'huile végétale et l'oxygène de l'air brûlent et se transforment en dioxyde de carbone et en eau. La quantité de dioxyde de carbone dégagée correspond à la quantité accumulée

pendant la photosynthèse : l'utilisation énergétique des huiles végétales ne provoque donc pas d'effet de serre supplémentaire : elle est neutre par rapport au  $\text{CO}_2$ .

Pour évaluer l'impact environnemental d'un produit, il faut faire une analyse environnementale du cycle de vie du carburant. Il permet d'observer tous les processus importants de la production et de l'utilisation, ainsi que l'élimination des résidus. Lorsqu'il s'agit d'un carburant, la culture, la production, la distribution, l'utilisation et éventuellement les gaz d'échappement jouent un rôle important. Par exemple, pour la production du biodiesel, 40 % environ d'énergie est nécessaire pour la transformation et 30 % pour la production à partir du colza. Malgré cela, le bilan climatique et énergétique est très positif pour les biocarburants, comme vous pouvez le constater sur la figure n° 6 pour le biodiesel et l'éthanol, sachant que le résultat dépend aussi de l'utilisation ultérieure des dérivés (tels que les tourteaux d'extraction du colza et la glycérine).

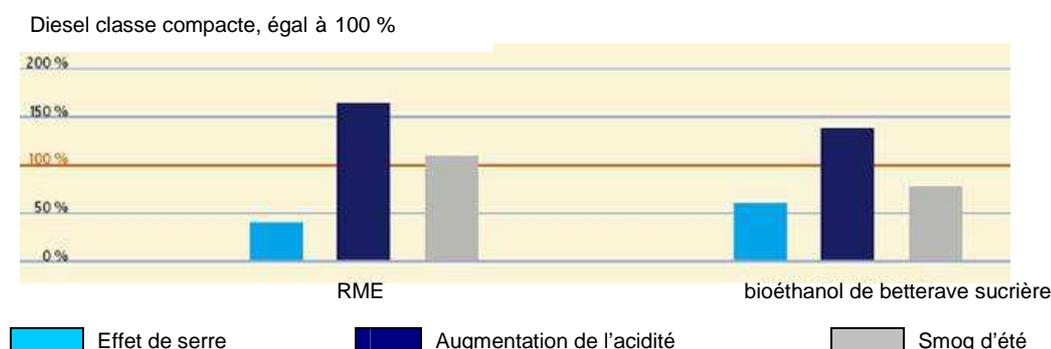


Fig. n°6 : Avantages et inconvénients environnemental des biocarburants par rapport à une voiture diesel, classe compacte

Une étude du bilan environnemental de Volkswagen et Daimler Chrysler montre qu'en utilisant le carburant BTL on économise 61–91 % de gaz à effet de serre durant sa vie par rapport au diesel conventionnel, et on pourrait avoir une réduction d'environ 90 % des émissions dues aux hydrocarbures.

Quelques uns des avantages de l'utilisation des biocarburants sont présentés ci-dessous :

- Chaque utilisation d'énergie renouvelable permet de retarder l'épuisement des réserves de fossiles tout en évitant les émissions polluantes.

- L'utilisation énergétique des biocarburants ne cause pas d'effet de serre supplémentaire. Le dioxyde de carbone dégagé durant la production d'énergie et sa capture par les plantes sont en équilibre par rapport au temps et à la quantité.
- Les risques d'accidents durant le transport et le stockage pour l'environnement sont considérablement inférieurs par rapport aux énergies fossiles (exemples : conduites de gaz non étanches, accidents de pétroliers).

- L'utilisation de la biomasse donne un bilan énergétique positif.

Les matières premières pour la biomasse proviennent généralement de la même région :

- De cette manière, on évite les longs transports.
- Des filières locales de création de valeur se constituent.
- Diminution de la dépendance énergétique.
- L'utilisation de la biomasse a deux grands avantages : cycle d'utilisation des matières premières fermé (neutralité par rapport au CO<sub>2</sub>), création de filières locales.
- L'utilisation de la biomasse a un potentiel technique à développer. Pour pouvoir le mettre en œuvre, il faut donner suite au travail de recherches. Pénétration de nouveaux marchés.
- Renforcement de la structure agricole : des emplois sont préservés et/ou de nouveaux seront créés.

## I.6. Les acteurs des projets

Les acteurs de la filière "biocarburants" sont nombreuses :

- Les producteurs de biocarburants
- L'agriculture
- Le marché automobile
- Le marché des huiles minérales
- La science
- La politique

Il est important de constituer au sein de ces secteurs de nouveaux partenariats stratégiques pour créer des possibilités d'action productive commune pour l'utilisation des synergies existantes et pour l'élaboration et l'application de stratégies communes.

Les producteurs de biocombustibles sont au début de cette chaîne. Ce qui est primordial pour ce secteur c'est l'offre de terres agricoles à la production de biocarburants. La réforme agricole européenne a créé une base et une

législation au niveau national et européen qui donnent un élan supplémentaire. L'agriculture y gagne grâce à la création de nouveaux emplois et à des sources de revenus supplémentaires. Les ressources locales donnent en plus la possibilité de créer une valeur ajoutée au sein de la région, accompagnée d'effets locaux liés aux investissements, aux revenus et à l'emploi. La pression innovante est intéressante pour les PME, puisque des technologies de pointe comme les technologies de combustion, les systèmes mécanisés de préparation des combustibles, etc. seront recherchés et il faudrait les préparer à leur arrivée sur le marché.

Les divers avantages des biocarburants sont aussi intéressants pour l'industrie automobile qui, depuis des années, travaille activement en collaboration étroite avec les scientifiques de différents domaines sur les recherches et l'élaboration de nouvelles stratégies et de conceptions alternatives.

## II. Culture de plantes à des fins énergétiques

### II.1 Des plantes énergétiques importantes

Sous le terme de plantes énergétiques, on entend les plantes cultivées surtout pour leur utilisation énergétique.

Leur culture sur des terres agricoles mises en jachère dans le cadre du programme de gel des terres de l'UE est permise. En général, on distingue trois conceptions de la culture des plantes énergétiques.

Tableau n° 2 : Terres cultivées (en hectares) de matières premières renouvelables en Allemagne, (Source de données : BLE, UFOP)

Matière première	2004			2005		
	Surface SCOP	Jachère	Terres avec des plantes énergétiques	Surface SCOP	Jachère	Terres avec des plantes énergétiques
Amidon	125 000	0	0	125 000	0	0
Sucre	7 000	0	0	7 000	0	0
Huile de colza	424 000	210 000	80 800	561 000	322 000	121 926
Huile de tournesol		750	0		1 900	
Céréales	0	3 400	31 500		43 534	118 531
Huile de lin	3 000	100	0	0	0	
Plantes textiles	2 000	0	0	1 500	0	
Substances curatives	4 000	400	0	4 000	182	
Autres	0	350	0		2 811	2 320
<b>Total</b>	<b>565 000</b>	<b>215 000</b>	<b>112 300</b>	<b>699 165</b>	<b>370 502</b>	<b>242 777</b>

#### *Céréales*

Toute la partie aérienne des plantes (graines et paille) est ramassée tous les ans et utilisée pour la production d'énergie. Les céréales donnent au producteur quelques avantages importants :

- Des méthodes culturales connues et bien mises en pratique.
- Pas besoin de changer le système de production.
- Les investissements supplémentaires nécessaires sont relativement faibles.

#### *Herbes pluriannuelles*

La biomasse aérienne des herbes, séchée après la période de croissance peut être utilisée comme combustible. L'avantage des herbes est qu'à la fin de la période végétative les substances nutritives des feuilles se déplacent dans les racines. Grâce à cela on peut diminuer l'application d'engrais.

Un inconvénient pour le producteur pourrait être le fait que les terrains soient engagés pour une période plus longue avec les cultures pluriannuelles ce qui limite l'adaptation rapide aux changements dans la politique agricole de l'UE.

#### *Taillis à courte rotation*

On peut utiliser l'accroissement aérien de la biomasse des arbres à croissance rapide, en cycles de plantation pluriannuelle. L'avantage est le coût, relativement bas de la culture des plantes. De plus, une plantation à courte rotation est réalisée une fois et donne ensuite plusieurs récoltes. L'inconvénient c'est aussi l'engagement prolongé des terrains.

L'utilisation de plantes énergétiques pour la production de combustibles est présentée dans le tableau n° 3, elle est traitée en détails dans le chapitre III.



Tableau n°3 : Matières premières pour les biocarburants en Allemagne (Source de données : FNR)

	Huile végétale	Biodiesel	Biométhane	Bioéthanol	DME	Hydrogène	BTL
Colza	x	x	X		x	x	x
Tournesol	x	x	X		x	x	x
Céréales			x	x	x	x	x
Paille				x	x	x	x
Maïs			x	x	x	x	x
Pommes de terre			X	x	x	x	x
Betterave sucrière			X	x	x	x	x
Bois				x	x	x	x
Autre biomasse			X		x	x	x

Les plantes suivantes sont les plus importantes pour la production de carburants en Allemagne :

#### Colza

La plante énergétique la plus importante en Allemagne est le colza de la famille des Brassicacées ou crucifères. Le colza est cultivé depuis le XVI<sup>e</sup> siècle. Aujourd'hui, il est planté en Europe comme colza de printemps et colza d'automne. L'espèce poussant en été est cultivée comme plante principale au nord jusqu'en Norvège tandis qu'en Europe centrale elle est le plus souvent utilisée comme fourrage vert ou comme culture intermédiaire. En Europe du Sud, les températures ne sont pas assez basses pour le pincement et la floraison du colza d'automne et le colza de printemps peut être semé dès l'automne. Les espèces hivernales et estivales dépendent de la nécessité génétique de températures basses (vernalisation). Il existe un certain rapport entre ce besoin de froid et la résistance au froid. Par exemple, les espèces hivernales, au lieu de former des ramifications longues, créent une rosette avec un point végétatif placé en profondeur et une racine en pivot pour augmenter la résistance au froid.



Figure n°7: Colza (Source : LWK Hanovre)

On distingue les variétés de colza érucique et les colzas 0 et 00. En 1974, par la sélection, l'acide érucique a été enlevée des produits d'alimentation humaine : les variétés de colza appelées simples 0 ont été créées. Puis, dans les années 80, le colza simple 0 a été remplacé par le colza double 00. La teneur en glucosinolate a été considérablement réduite, ce qui a amélioré la valeur nutritive du graine et du tourteau de colza. Excepté le colza érucique spécialement cultivée pour l'industrie (lessives, produits anti-mousse, etc.) on cultive surtout du colza 00.





Figure n°9 : Tournesol (source de données : [www.christian-vogt.de](http://www.christian-vogt.de))

Tournesol / *Helianthus annuus* L. Famille : Stéracées ou Composées. Le genre des *Helianthus* compte une grande variété de formes, mais parmi les 49 espèces seuls deux sont utilisées comme cultures agricoles : le tournesol et le topinambour. En Allemagne, le tournesol est semé sur de grandes surfaces uniquement dans les régions au climat favorable, vu son exigence envers la température. Comme le tournesol a besoin de chaleur, sa culture en Basse-Saxe serait risquée.

*Betterave sucrière* / *Beta vulgaris* L.

La betterave sucrière a été créée vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle à partir de la betterave fourragère, par une sélection ciblée pour un contenu en sucre plus élevé. C'est vers 1800 que les scientifiques réussissent à augmenter le contenu de sucre de 1,6 % à 16 %, pour atteindre aujourd'hui 18–20 %. Dans le monde entier, la betterave sucrière est l'une des plus importantes sources de matière première pour la production de sucre. La première sucrerie au monde a été ouverte en 1801 en Silésie. La betterave est cultivée surtout dans la zone tempérée et répandue surtout en Europe, mais aussi aux Etats-Unis, au Canada et en Asie. La betterave est aussi utilisée pour la production de bioéthanol, mais beaucoup moins qu'en tant que matière première pour la production industrielle de sucre.



Fig. n°10 : Betterave sucrière

*Blé tendre* / *Triticum aestivum* L.

Le blé tendre est la céréale la plus cultivée dans le monde. Il fait partie de la famille des céréales, son origine provient de l'épeautre à double graine (*Triticum dicoccum*) et de l'épeautre monograine (*Triticum monococcum*). Les plus anciens blés trouvés datent de la période entre 7800 et 5200 av. J.C. donc le blé est la deuxième céréale après l'orge. Le blé tendre est cultivé sur tous les continents et les plus grands producteurs sont la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et la Russie. En Allemagne, le blé d'automne occupe la plus part de la surface céréalière.

*Seigle* / *Secale cereale* L.

Ces dernières années, en Allemagne, la production de seigle a souffert beaucoup plus que les autres céréales de la baisse constante des prix. C'est en été 2004 que les prix ont atteint leur niveau le plus bas du marché, 6,50 euros uniquement pour 0,1 tonne.

Cependant, la demande en seigle s'accroît considérablement, particulièrement dans le domaine énergétique. Cette culture irremplaçable dans les sols secs, sableux et légers est en train de regagner du terrain.

Actuellement, ce sont surtout les producteurs de bioéthanol, dans les nouvelles provinces fédérales, qui sont les consommateurs les plus importants du secteur énergétique. Des installations sont spécialement créées pour le seigle, et dans les deux années à venir la demande sera de l'ordre de 1,5 millions de tonnes de grains. D'ici 2008, on prévoit un accroissement d'un million de tonnes. Cela représente un potentiel de terres cultivables d'environ 0,3 millions d'hectares ce qui représente 4 à 5 % de la surface en céréales.

Dans le même temps l'intérêt de l'utilisation du seigle comme substrat de fermentation pour les installations de biogaz ou comme fourrage en grains ou ensilé augmente. Le seigle possède l'aptitude de capter l'humidité pendant l'hiver et forme une biomasse considérable, même lorsqu'il fait plus frais au printemps.



Figure n° 11 : Seigle (source de données : LWK Hannover)

#### Maïs / *Zea mays L.*

Grâce au travail intensif de sélection, le maïs est une plante à haut rendement, robuste et résistante aux conditions climatiques de l'Allemagne du Nord. En 2004, le maïs occupait, en Allemagne, une surface de 1,71 millions d'hectares, répartis comme suit : 73 % pour l'ensilage, 22 % pour le grain et 5 % pour le Corn-Cob-Mix (CCM). Un cinquième du maïs est produit sur les sols de Basse-Saxe. En 2004, 336 161 hectares, soit 19,7 % étaient occupés par du maïs.

Par ses capacités à former une masse à haut rendement de substance sèche et à s'adapter aux substances nutritives et aux réserves d'eau (plante C4), le maïs fourrager présente un intérêt majeur pour les agriculteurs et les autres acteurs du domaine de la bioénergie, notamment pour la production d'énergie dans les installations de biogaz ou de biocarburants. La technique de production est aussi bien connue et ouvre des possibilités de développement.



Fig. n°12 : Maïs

## II.2 Qualités, productivité, milieu agricole

Ci-après, quelques plantes énergétiques avec leurs caractéristiques principales :

### Colza

#### *Botanique*

Le colza est une plante annuelle de 1,20 à 2,00 mètres de hauteur, formant une racine centrale atteignant 1,80 m de profondeur. Une de ses caractéristiques ce sont les poils absorbants relativement longs et regroupés près de la coiffe. Grâce à eux, la plante profite des moindres pores du sol pour se procurer les substances nutritives et l'eau nécessaires. Suite à cela se produit une scarification et une aération du sol qui fait du colza une plante intéressante pour l'assolement. Jusqu'à l'arrivée de l'hiver, le colza forme une rosette de feuilles couchée sur le sol. La croissance commence au printemps et durant cette phase les entre-noeuds s'allongent et forment au début une seule tige. La ramification ne commence qu'avec la floraison de la tige principale. Les feuilles sont larges, de couleur vert foncé et légèrement velues et sont situées uniquement dans la partie inférieure de la tige. Bien que la structure de ses fleurs soit complètement prédestinée pour une fécondation croisée, le colza se reproduit surtout par l'autofécondation. Après une floraison qui dure entre trois et cinq semaines, les fruits se développent et représentent des écales disposées verticalement autour de l'axe central.

Chaque écale contient entre 15 et 20 graines, leur poids variant entre 4 et 6 g pour mille graines (TKG). Elles se distinguent par leur surface réticulaire de couleur brun-noir. A l'état mûr elles contiennent entre 40 et 50 % d'huile contre 12 à 16 % d'écales, et la teneur en protéines est presque d'un quart.

#### *Implantation*

Le colza demande des sols profonds, dont la capacité utile est élevée, avec suffisamment d'humidité. Une humidité du sol trop élevée ainsi que la compacité sont mal supportées. Si les pluies sont réparties de façon régulière, il pourrait être cultivé dans des sols à texture argileuse ou des sols sablonneux contenant de l'humus à taux d'humidité inférieur à 45 %.



Le colza a besoin de vernalisation mais il n'est pas infiniment résistant au froid: il supporte des températures jusqu'à  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , à condition que durant son développement, il soit à la phase 6 à 8 feuilles en automne. Au printemps, on peut s'attendre à des gels en cas de froid sec. Avec la croissance la résistance au froid diminue.

#### *Rotation des cultures*

Le colza peut entrer dans la rotation tous les quatre ans. Il succède à des cultures qui apportent une bonne aération du sol et qui mûrissent tôt comme les pois, la jachère verte ou l'orge d'hiver. En règle générale, le colza doit être semé après l'orge d'hiver, souvent aussi après le blé d'hiver (pour ce dernier, après des moissons précoces). En cas de rotation fréquente des céréales, il faut tenir compte de l'effet positif du colza comme précédent cultural. En cas de culture de colza érucique, il faut faire attention à la pureté de la variété (besoin d'assolement particulier et conservation à part).

#### *Variétés*

La variété joue un rôle décisif dans la réussite de la culture de colza. Ces dernières années les variétés hybrides donnaient des récoltes plus importantes que les variétés non modifiées génétiquement. Il faut voir aussi les frais plus importants pour des semences hybrides et la teneur en huile relativement inférieure. Pour ces raisons, les variétés hybrides ne sont pas forcément meilleures que celles génétiquement non modifiées. Lors du choix de la variété, il faut tenir compte de la teneur en huile, de la quantité de grains, sans oublier la stabilité de conservation et la résistance aux maladies.

#### *Rendements*

La plante oléagineuse la plus productive et la mieux adaptée aux conditions agricoles de l'Allemagne du Nord est le colza. Avec un rendement moyen de colza d'hiver de 35 q/ha on obtient en moyenne 1 200 litres d'huile de colza par hectare. Le rendement pour le colza d'été varie entre 15 et 25 q/ha. Seuls 5 à 20 % des primordia se développent en fleurs. La moitié, environ forment des écales et uniquement les fleurs de la troisième semaine de la floraison apportent aux rendements. Le nombre d'écales et de graines dépend de la concurrence au sein du massif : le nombre d'écales par plante peut varier entre 150 et 800.

#### *Exigence qualité*

Pour l'industrie chimique, l'acide oléique (C-18 :1) est la matière première la plus importante de l'huile de colza.

De plus, l'acide érucique représente un intérêt non négligeable pour l'industrie, dont la part peut atteindre 50 % de leur huile pour des variétés de colza riches en acide érucique. Le contenu du colza en matière grasse dépend de la variété, de l'emplacement, du point de mûrissage de la récolte et des conditions climatiques durant la végétation (la somme thermique). Les grains de colza ont un contenu élevé en huiles, environ 40 %, le tourteau de colza avec ses 35 % de protéines représente un produit subsidiaire de haute qualité. Pour la culture du colza érucique, il faut sélectionner des variétés spéciales avec une teneur en acide érucique de 40 % minimum. En Allemagne, les variétés Erox (39,8 % d'acide érucique), Maplus (47,1 %) et Maruca (56,1 %). Toutes les variétés contiennent peu ou pas de glucosinolate.

#### **Tournesol**

La fécondation du tournesol est croisée. Le réceptacle floral charnu du tournesol est composé de plusieurs fleurs unitaires. Les fleurs du tournesol sont groupées en capitules de grandes dimensions. Suivant le temps, la durée de la floraison est de 4 à 12 jours. Dans un capitule, il y a entre 100–8 000 graines (akènes). L'écaïlle de l'akène est constituée de quatre couches et représente entre 10–60 % du fruit.

Pour un rendement élevé d'huile, il faut des akènes avec une part minime d'écaïlles. La teneur en matière grasse des akènes varie entre 30 % et 48 %. Leur composition est d'environ 10 % d'acides gras saturés et 90 % d'acides gras insaturés.

#### *Botanique*

En plus de la racine en pivot, le tournesol développe un système racinaire fasciculé de racines fines représentant entre 50–70 % de la masse racinaire totale. Le tournesol peut atteindre quelques mètres en hauteur, mais elle est limitée à 150-200 cm chez les variétés cultivées. La tige, tout comme les feuilles, est velue et chez les variétés cultivées, elle est très peu ramifiée. Les variétés sauvages par contre peuvent avoir des ramifications.

En général, une plante comporte entre 20 à 30 feuilles cordiformes. Elles sont velues et dentelées avec une queue.



Les jeunes feuilles sont sujettes à l'héliotropisme, c'est-à-dire qu'elles s'orientent par rapport à la position du soleil. Si le ciel est clair et sans nuages elles suivent le déplacement du soleil.

#### *Biologie des fleurs*

Jusqu'au début de la floraison le capitule du tournesol réalise des mouvements d'héliotropisme. Ensuite, il se pointe définitivement vers l'Est, position favorable à la pollinisation, la fécondation et le développement des akènes (diminution de la contamination cryptogamique). Le diamètre du capitule du tournesol est de 5 à 50 cm. Il comporte des fleurs jaunes ligulées qui sont stériles et des fleurs en tube qui sont fertiles. Les fleurs ligulées sont disposées au bord du capitule formant un ou deux rangs. 100 à 8 000 fleurs en tube sont disposées sur le réceptacle en spirales répondant aux règles de la phyllotaxie. La pollinisation se réalise surtout grâce aux insectes (abeilles ou similaires) et très rarement par le vent comme agent vecteur. Si la fécondation croisée ne se réalise pas, le filet continue de croître et s'enroule en réalisant ainsi son autofécondation. La défloraison du capitule se fait de l'extérieur vers l'intérieur. Durant toute la période de floraison, de 8 à 10 jours, chaque jour un à deux rangs du capitule subissent la défloraison.

En tant que plante C3 le tournesol jouit d'une photosynthèse de forte intensité. De par cette qualité, le tournesol s'apparente aux plantes C4. Grâce au nombre important de grands stomates, l'intensité de la photosynthèse est relativement élevée : 40–50 mg de CO<sub>2</sub> par dm<sup>2</sup> et par heure. Ainsi, le tournesol atteint le niveau du maïs, qui est une plante C4. Un autre facteur apporte de l'intensité à la photosynthèse : le mouvement héliotrope des jeunes feuilles : en ciel clair elles se tournent vers le soleil, donc vers la lumière et donc elles en absorbent plus.

#### *Fruit (Akène)*

Les fruits du tournesol sont les akènes, des petits fruits à graine unique dont le péricarpe est sclérifié, mais n'est pas soudé à la graine. Les dimensions des akènes diminuent à partir de la périphérie vers le centre du capitule : hauteur de 7 à 25 mm et largeur de 4 à 13 mm. La partie superposée est arrondie et en pointe en descendant vers le bas. Les akènes se composent du péricarpe et de la graine. Outre la taille des fruits pour leur utilisation et la production d'huile, le rapport entre l'écaille et

la graine a une grande importance : un petit pourcentage d'écailles signifie, en règle générale, une meilleure récolte de graines. Habituellement, les petites graines avec un petit pourcentage d'écailles ont une plus grande teneur en huile. La teneur en huile dans la graine peut atteindre 60 %, lorsque la part de l'écaille est entre 18 et 30 %. Les akènes ont une teneur en protéines relativement élevée : 9 à 24 %. C'est pour cette raison qu'elles jouent un rôle très important tant pour l'alimentation de l'homme que pour celle des animaux. La couleur des écailles varie de blanc, blanc à rayures, gris ou gris à rayures jusqu'à noir.

#### *Implantation*

Il est important de cultiver le tournesol uniquement dans des régions à climat relativement sec et chaud. Par rapport à la base de 6 °C, il faudrait pouvoir atteindre les sommes thermiques de 1 500–1 700 °C. La somme thermique est calculée en enlevant 6 °C de la température journalière moyenne et en additionnant les valeurs unitaires pour la période de la pousse à la récolte du tournesol. Actuellement, pour les variétés à forte teneur en acide oléique, qui mûrissent en moyenne 10 jours après les variétés traditionnelles, la règle suivante est valable : elles ne sont cultivables que là où une autre culture comparable comme le maïs à grains (indice FAO 250 au minimum) mûrit sans problème. Les régions du Sud de l'Allemagne et les régions au climat tempéré comme la Thuringe, la Saxe ou la Saxe-Anhalt sont favorables à condition que l'altitude élevée (au-dessus de 200 mètres du niveau moyen de la mer) ne retarde pas le début de la végétation. Les sols qui sont bons pour la culture du tournesol sont profonds, bien structurés (loess, loess argileux ou argilo-sableux).

#### *Assolement*

L'importance du tournesol comme précédent cultural est très limitée, car il épuise les réserves d'eau et les substances nutritives. Il tire du sol d'énormes quantités d'eau et beaucoup de potassium. Il faudrait garder des intervalles de rotation de 4-5 ans. Le tournesol n'a pas de grandes exigences envers la culture précédente. Pour éviter les contaminations (Sclerotinia, Botrytis), il ne doit pas être semé tout de suite après le colza ; il faut aussi éviter les précédents culturaux qui rajoutent beaucoup de d'azote. Par contre, le blé et le maïs sont très convenables.



### *Variétés*

Le potentiel de production des graines des variétés actuelles de tournesol est de 45 à 50 qx/ha. Dans des sols légers où la provision d'eau n'est pas favorable, le rendement baisse rapidement en-dessous de 25 qx/ha. Les bonnes variétés de tournesol peuvent atteindre une teneur en huile de 50 % et même plus. Lors du choix de la variété, le rendement et le contenu en huiles ont un rôle important dans la maturation précoce, la bonne résistance et la mortalité limitée. Il faut faire la différence entre les variétés traditionnelles riches en acide linoléique et les variétés riches en acide oléique.

### *Récolte*

Période : à la mi-septembre lorsque la couleur de la partie inférieure des capitules est brune à noire, les feuilles sont mortes et les pétales des fleurs commencent à tomber. L'humidité à la récolte des grains doit être, si possible, inférieure ou égale à 14 %. Pour la récolte, il faut des dispositifs spéciaux et effectuer des réglages spécifiques de la moissonneuse-batteuse, notamment une grande distance entre le contre batteur et le batteur, un nombre de tours du tambour entre 500–700 tours/min et une faible aspiration. Après les moissons, la moissonneuse-batteuse doit être bien nettoyée pour éviter la corrosion provoquée par les acides gras libres des graines de tournesol.

### *Rendement*

15–25 qx/ha (25–32 qx/ha dans des régions au climat favorable comme la France, Baden, Rhénanie). Dans la région de la Basse Saxe, même les variétés mûrissant tôt donnent des rendements sûrs uniquement durant les étés chauds. De même, pour les variétés riches en acide oléique.

### *Critères de qualité*

L'huile de tournesol a une teneur élevée en acide linoléique qui détermine la qualité pour une utilisation dans l'industrie alimentaire. La composition de son huile (acides gras essentiels 44-70 %) est favorable en termes d'alimentation et de physiologie. Ainsi la majorité de la production de tournesol est utilisée pour la production d'huile alimentaire et de margarine. Le tourteau (40-50 % de protéines) sert de fourrage après le raffinage. Grâce à son aptitude à bien sécher, l'huile de tournesol est utilisée aussi pour la production de peintures et de vernis. En France, il est utilisé pour la production de biodiesel (ester méthylique, HVP). En chimie, ce sont surtout

les variétés à forte teneur en acide oléique qui sont utilisées. La part de l'acide linoléique dans la totalité du contenu en huile dépasse les 80 % et parfois même les 90 %, pour les nouvelles variétés.

### *Tournesol à forte teneur en acide oléique*

Une attention spéciale doit être portée aux variétés de tournesol à forte teneur en acide oléique. Les variétés actuelles peuvent atteindre une teneur en acide linoléique supérieure à 90 %. Une part si importante d'un acide gras spécifique est très précieuse pour l'industrie de transformation, puisque l'augmentation de la concentration étant chère, les frais d'extraction de l'acide gras recherché (acide linoléique) pourrait être réduits au minimum. Actuellement, ces variétés sont : Aurasol, Olsavil, Olstaril, Sunny et PR64H61.

### **Betterave**

#### *Botanique*

La betterave sucrière est une plante bisannuelle formant ses graines la deuxième année. Durant la phase végétative la première année, elle forme des rosettes de feuilles de 20 cm de large et 30 cm de long au-dessus du sol ; la racine grossit et se transforme en tubercule blanc pouvant atteindre une profondeur de 1,5 m.

La deuxième année commence la floraison lorsqu'elle forme une tige jusqu'à 1,5m en hauteur avec des petites fleurs. La betterave sucrière est cultivée dans la zone tempérée et est très répandue en Europe, aux Etats-Unis, au Canada et en Asie.

#### *Implantation*

La betterave exige des températures douces, beaucoup de lumière et beaucoup d'eau. De plus, les sols doivent être profonds, riches en substances nutritives, avec une bonne perméabilité car les besoins en eau de la betterave sucrière sont importants, surtout durant les mois de juillet et août. Les sols les plus convenables sont les sols argileux riches en humus et les sols argilo-calcaïques. Les sols qui ne conviennent pas sont les sols légers : pauvres, secs et sableux, sols argileux solides ou sols peu profonds et humides.

#### *Récolte et rendements*

Le semis se fait entre mi-mars et début mai ; la semence, dont la préparation est techniquement compliquée, est semée avec un semoir monograinne sur des rangs distants de



30 à 50 cm et à une profondeur de 2-3 cm. En principe, il faut 9-10 kg de graines par hectare pour une machine Dribbel et 15-20 kg pour un semoir. On obtient entre 7 et 11 plantes par m<sup>2</sup>. La récolte est effectuée, la première année, lorsque la teneur en sucre est la plus élevée suite à l'accumulation de substances de réserve, dans la période entre mi-septembre et mi-novembre. Une récolte retardée a l'avantage suivant : grâce à la végétation plus longue, la teneur en sucre augmente. La récolte se passe en trois étapes : tailler en premier les feuilles et le collet de la betterave, arracher ensuite la betterave et en dernier la ramasser. Les rendements sont de l'ordre de 40 à 70 t/ha ; cela correspond à une production de 10 tonnes de sucre. Les feuilles peuvent être laissées sur les champs pour la fertilisation du sol ou bien être utilisées comme fourrages pour les animaux.

### **Céréales énergétiques (blé, seigle)**

Les céréales sont utilisées dans plusieurs domaines et leur utilisation pour la production d'énergie augmentera de plus en plus.

On distingue deux filières d'utilisation des céréales à des fins énergétiques :

Utilisation de la totalité de la plante, c'est-à-dire la paille et les grains à travers ce qu'on appelle la ligne du produit humide comme substrat (fourrage) pour les installations à biogaz, soit à travers la ligne du produit sec (en forme de balle) comme combustible.

La deuxième filière concerne l'utilisation de la graine pure. Pour utiliser les graines dans des installations à biogaz, on les stocke en silo soit sèches soit après les avoir écrasées à l'état humide. Une autre application est la production d'alcool à carburants (éthanol, ETBE), qui est une production utilisant surtout le blé et qui s'élargit actuellement à d'autres céréales. En principe, les céréales pourraient être directement utilisées comme combustible, mais pour le moment il existe, en Allemagne, des freins d'origine législative et technique concernant les petites installations de combustion (jusqu'à 100 kW).

#### *Exigences concernant les graines pour la production d'éthanol*

La matière première doit assurer une production abondante d'éthanol, ce qui est garanti par la teneur en amidon. La teneur élevée en amidon est liée à la faible teneur en protéines qui n'est pas forcément nécessaire pour la production d'éthanol. En tout cas, ce fait provoque un conflit d'objectifs puisque la pâte résiduaire est utilisée comme fourrage.

En plus de la bonne activité des enzymes, il faut tenir compte du poids de mille grains et du poids à l'hectolitre (poids hl) des céréales.

Pour la production de l'éthanol, la santé de la graine joue un rôle important. Les mycotoxines de *Fusarium* éventuellement présentes dans la graine ne se décomposent pas durant les traitements et se retrouvent dans les produits dérivés (fourrage). Les quantités DON doivent être inférieures à 0,35 ppm, et le seigle ne doit pas être ergoté.

#### *Arguments pour l'utilisation des céréales pour le bioéthanol*

Les céréales intéressantes pour la production du bioéthanol sont le blé et le triticales, car ils ont une teneur en amidon élevée. L'installation d'éthanol de Zeitz (Saxe), par exemple, utilisera surtout comme matière première le blé. 700 000 tonnes/an seront traitées.

En général, pour les opérateurs des installations, l'offre et le prix du blé comme matière première sont primordiaux. Théoriquement, toutes les céréales contenant de l'amidon pourraient être utilisées dans la production.

Le seigle est aussi une source intéressante d'amidon pour la production de bioéthanol, puisque dans les régions de l'Allemagne de l'Est il existe des conditions qui lui sont favorables et les rendements sont relativement élevés et sûrs. Comparé à d'autres céréales, le seigle donne de meilleurs rendements dans des conditions moyennes. De plus, les frais de production et de livraison sont moins importants que pour d'autres graminées. Le blé et le triticales contiennent plus d'amidon, mais la production d'éthanol à partir de ces cultures ne dépasse pas de beaucoup celle obtenue à partir du seigle, car durant les procédés industriels, le seigle permet une meilleure transformation de l'amidon. La teneur en amidon dans le seigle varie moins durant l'année, car le « remplissage » de la graine dépend moins de l'humidité. Durant les années à grande contamination par le *Fusarium* la contamination est beaucoup moins importante pour le seigle que pour les autres céréales, ce qui donne une meilleure qualité des fourrages (résidus : 11-14 litres par litre d'éthanol).

#### *Contenu en amidon et production d'éthanol*

La quantité d'amidon dans la graine détermine la production d'alcool, ainsi que le prix de revient. Dans les premiers contrats de culture d'après « l'Union », une différence de teneur en amidon de 1 % dans les graines représentait 0,17 euros par quintal. Pour une



récolte de 70 tonnes/hectare, cela correspond à une différence de revenu de 12 euros par hectare ; au prix du producteur de 9 euros/hectare cela donne 1,9 % de différence en récolte. Toutes les mesures améliorant la formation des graines tout en diminuant la teneur en protéines crues favorisent la teneur en amidon. Il faut, de plus, éviter la germination car c'est alors que l'amidon se transforme en sucre. Le sucre est aussi utilisable pour la production d'alcool, mais la décomposition fait baisser la teneur en amidon, d'où une réduction du prix de revient.

#### *Qualité sanitaire*

Le résidu de pâte issu de la production d'éthanol est aussi utilisé. La pâte séchée sert de composant contenant des protéines pour la nourriture des animaux ruminants. C'est l'une des raisons pour lesquelles on tient beaucoup à la qualité des produits de base (exemple le triticale, le seigle, le blé).

La première priorité est la qualité sanitaire des graines, puisque les mycotoxines ne se décomposent pas durant la fermentation et restent dans la bouillie utilisée comme nourriture pour les animaux. Concernant les fusariums, le niveau du DON (Deoxynivalenon) et du ZEA (Zearalenon) doit être maintenu le plus bas possible. Le seigle possède, d'origine, une résistance génétique mais il faut malgré tout, éviter la contamination avec l'ergot de seigle par des mesures productives et mécaniques pour ne pas risquer d'avoir des prix bas. Les valeurs de DON doivent être inférieures à 0,35 ppm.

#### **Maïs**

Le maïs est d'une grande variété génétique. Le travail de sélection qui dure depuis plusieurs années a permis de créer une large gamme de moyens de production utilisés de manière très efficace pour la sélection d'hybrides. Les entreprises les plus avancées dans ce domaine espèrent bientôt obtenir une augmentation significative des rendements de matière sèche du maïs ainsi qu'une production d'énergie par hectare plus élevée. Le maïs appartient au groupe de plantes en C-4 avec un métabolisme de carbone spécial permettant d'accroître l'efficacité de la photosynthèse, en été lorsque les températures sont plus élevées et la lumière plus intense. De cette façon, la plante produit plus de matière sèche et exige une humidité plus faible par rapport à celle des autres cultures (plantes en C-3).

#### *Labour et semis*

Les labours d'automne ou de printemps sont possibles, le principal est de les réaliser au bon moment, lorsque l'humidité n'est pas trop élevée, pour éviter de tasser le sol par le passage des machines. L'avantage du labour de printemps est que l'introduction d'engrais organiques dans le sol est réalisable à ce moment-là.

Les faux-semis, des cultures intermédiaires, réalisés uniquement avec une herse à disques et qui servent de fertilisation sont aussi très convenables et équivalents aux méthodes traditionnelles de semis.

Le semis direct – dans un sol non labouré – est aussi possible, à condition de ne pas laisser la graine non-couverte de terre sur le profil conique formé par le pied du semoir. Si par le semis direct, les grains sont déposés dans un sillon fraisé de 10 cm de large et 10 cm de profondeur, les rendements s'approchent de ceux obtenus avec la technique traditionnelle de labour.

#### *Conseils par rapport à la densité des plantes*

Définir correctement la densité des plantes est l'une des conditions les plus importantes concernant la culture tant du maïs grains que du maïs ensilage. Compte tenu des particularités des sols et du climat, des conditions favorables au mûrissage et à la pousse dans les régions de production allemandes, il est conseillé de semer entre sept et onze plantes au mètre carré. A la différence des zones pluvieuses, dans les sols secs et sablonneux, il faut équilibrer le nombre de plants, surtout dans le cas de variétés mûrissant plus tard. Ainsi, outre la densité de semis, la répartition des plants joue un rôle important.

On peut choisir de réduire la distance entre rangs à 35 cm (pour un semis traditionnel la distance entre rangs est de 75 cm). A cet égard, les premiers essais pratiques sur des terrains convenables, avec une densité inférieure, ont donné de meilleurs rendements en masse. D'autres avantages du semis à rangs serrés sont par exemple, la meilleure utilisation des terres et la meilleure protection contre les mauvaises herbes, suite à l'ombrage rapide. Les inconvénients de ce type de semis sont les coûts supérieurs : du travail, du matériel spécifique de semis et de récolte et impossibilité de réaliser une lutte mécanique contre les mauvaises herbes (buttage, etc.).

En conclusion, on peut dire que si l'on a ce matériel de semis et de récolte (quand on ne fait pas de frais supplémentaires pour louer le



matériel) le rendement obtenu avec une distance raccourcie entre les rangs est au minimum équivalent à celui obtenu avec une distance traditionnelle de 75 cm. La réduction de densité pour les semis serrés est compensée par les rendements en masse plus élevés.

#### *Récolte*

Le choix de la variété ainsi que le choix optimal du moment de la récolte ont une influence très importante sur les rendements. La récolte trop avancée limite la possibilité d'augmenter les rendements et la récolte trop retardée réduit les rendements en masse, suite à la perte d'une partie des plantes. La partie des substances inutilisables qui se sont transformées en bois augmente rapidement, et le rendement de masse sèche par kilogramme baisse d'environ 20 % entre la maturité incomplète et la maturité complète. Les essais ont montré que pour une production optimale de biogaz, la récolte doit être faite au début du stade pâteux. Le contenu en matière sèche doit être d'au moins 28 %, voire de 30 - 34 %. Les mêmes variétés et les mêmes techniques de culture peuvent donner des niveaux de production de méthane variables (allant jusqu'à 25% de différence), dus uniquement à la date de récolte. Cela signifie que les effets négatifs d'une récolte tardive sont souvent plus importants que ceux d'une récolte précoce.

Le maïs doit être récolté à l'aide d'une faucheuse-hacheuse (hache-fourrages) précisément réglée à distances les plus courtes possibles (2-4 mm).

#### *Assolement*

Avec le large choix de variétés de maïs existantes, il est relativement facile d'obtenir des rendements de 150 à 200 qx par hectare et des productions de méthane dans des installations à biogaz de 4 500 à 6 000 m<sup>3</sup> par hectare. Cependant, pour atteindre les objectifs de la production d'énergie durable, il faudrait élaborer un assolement équilibré. On pourrait se servir de manière efficace des périodes où la terre est laissée en jachère avec des cultures intermédiaires s'il y a suffisamment de ressources d'eau.

En rotation avec le maïs, les cultures intermédiaires d'hiver poussent durant la période de mars – avril. Le ray-grass d'Italie (*Lolium multiflorum* Lam.) donne de bons rendements lors des moissons début mai et avec le semis de maïs comme deuxième culture (en présence d'humidité et de substances nutritives), d'où une production

maximale en méthane par hectare et par an. Il reste des questions : quel est le moment optimal pour faucher l'herbe, quelles variétés de maïs choisir et quelle technique appliquer à ce type d'assolement.

Il est conseillé de faire très attention, dans le cas du colza d'hiver et du colza d'hiver sauvage qui contiennent un taux élevé de soufre après le début de la floraison, car ils peuvent causer des problèmes au biogaz.

L'influence du précédent cultural sur le rendement du maïs varie beaucoup et le taux d'humidité est déterminant.

#### *Variétés*

Actuellement, il n'existe pas de variété spéciale de « maïs énergétique », mais comme de nombreux sélectionneurs travaillent intensément dans ce domaine, on peut espérer des résultats rapides. Actuellement, on peut choisir entre les variétés de maïs fourrager, en particulier les variétés à rendements exceptionnellement élevés en masse. La teneur élevée en matière grasse, en protéines et en glucides procure une plus grande quantité de gaz de meilleure qualité. Il faut éviter les teneurs élevées de lignine dues au mûrissement et responsables du vieillissement de la plante. Pour cette raison, il faut choisir de préférence les variétés chez lesquelles la plante garde sa verdure plus longtemps.

Comme les variétés cultivées actuellement peuvent être récoltées avec une matière sèche entre 28 % et 30 % sans risque que la sève s'égoutte, il est possible de choisir des variétés mûrissant tardivement pour profiter efficacement de la période végétative : les variétés ayant un éventail de maturation approximativement entre +30 à +50 par rapport à l'éventail de maturation des variétés fourragères locales. Par exemple, là où sont cultivées habituellement les variétés S-250, l'éventail de maturation maximale possible est celui des variétés S 290–S 300.



### *Sélection*

Actuellement, la sélection des variétés énergétiques de maïs se développe intensément. L'objectif est d'accroître les rendements des variétés à maturation tardive par une utilisation complète par la plante de l'intensité de la lumière durant l'été avancé et par la prolongation possible de la phase végétative. La résistance au froid de ce type de variétés à maturation tardive d'origine d'Europe du Sud est encore problématique en Allemagne. La pousse des jeunes plantes de ces variétés ralentie par le froid doit être améliorée par croisement avec des groupes de sélection allemande possédant une bonne résistance au froid. Des essais sont aussi réalisés pour stimuler la croissance végétale intense en intégrant des gènes de journée courte à partir de populations de maïs exotiques.

En outre, les variétés, en particulier celles destinées à une culture "écologique", doivent pouvoir être cultivées de préférence sans produits phytosanitaires afin d'améliorer et de renforcer leur résistance.

L'objectif de la sélection est l'obtention de 200 à 300 qx de masse sèche par hectare pour une production de méthane maximale. L'humidité du sol est alors un facteur limitant.

C'est pourquoi, beaucoup de recherches sont réalisées pour la création de variétés résistantes au stress dû à la sécheresse et qui pourraient produire suffisamment de biomasse. Les premiers résultats montrent que le produit hongrois de sélection dans l'éventail de maturation tardive ainsi que le produit de sélection allemande dans l'éventail de

maturation précoce, présentent de bonnes qualités.

## **III. Les biocarburants comme sources d'énergie**

Dans ce chapitre, nous passerons en revue les biocombustibles des cinq domaines offrant le plus grand potentiel actuel de connaissances : l'huile végétale, le biodiesel, l'éthanol/ETBE, biométhane et carburants BTL. Tout cela est complété par une courte introduction sur l'utilisation de l'hydrogène.

Les biocarburants précités ont des propriétés, des exigences techniques et des potentiels économiques très différents, mais leur application dans des domaines différents est justifiée dans l'objectif d'une agriculture durable.

Les qualités les plus importantes des différents carburants qui sont l'objet de notre présentation détaillée ci-après, sont présentées dans le tableau n°4.

54,3 millions de tonnes de carburants ont été utilisées en Allemagne en 2004, dont 52 % de diesel et 46 % d'essence. La part des biocarburants est de 2 %, comme vous pouvez le voir sur la figure n°12, la part du biodiesel et de l'huile de colza est la plus importante.



Tableau n°4 : Caractéristiques des biocarburants ( Source : FNR)

	Densité	Pouvoir calorifique	Viscosité cinématique	Indice de cétane	Point d'arrêt	T° d'inflammation	Indice d'iode
Huile de colza	0,92	37,6	72,3	40	0 à -3	317	94 à 113
Tournesol	0,93	37,1	68,9	36	-16 à -18	316	118 à 144
Soja	0,93	37,1	63,5	39	-8 à -18	350	114 à 138
Lin	0,93	37,0	51,0	52	-18 à -27		169 à 192
Olive	0,92	37,8	83,8	37	-5à -9	-	76 à 90
Huile de semence du coton	0,93	36,8	89,4	41	-6 à -14	320	90 à 117
PurgirnuBöl	0,91	37,0	71,0	51	-	340	103
Kokosoel (graisse)	0,87	35,3	21,7	-	14 à 25	-	7 à 10
Palme (beurre)	0,92	37,0	29,4	42	27 à 43	267	34 à 61
Palmkernöl (graisse)	-	35,5	21,5	-	20 à 24	-	14 à 22

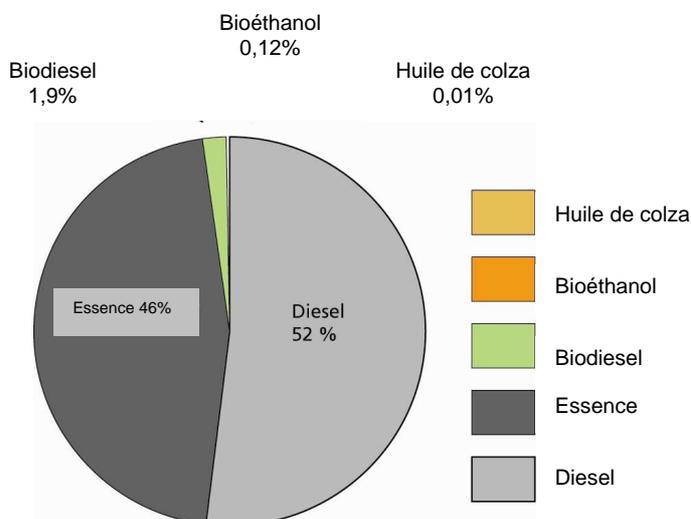


Fig. n°12 : Consommation de carburant primaire en Allemagne en 2004. (Source : FNR)

### III.1 Qualités énergétiques et techniques des biocarburants

#### Huile végétale

L'huile végétale a une application très variée. En tant que produit végétal elle fait partie de l'alimentation humaine comme huile alimentaire ou comme base pour d'autres

produits alimentaires ; elle procure des éléments constitutifs importants pour le métabolisme.

L'huile végétale peut être rajoutée au fourrage et les tourteaux peuvent être directement donnés aux animaux.

L'huile végétale est très convenable comme carburant grâce à son contenu énergétique :

dans les moteurs à combustion interne, l'huile végétale permet d'obtenir en même temps de l'électricité et de la chaleur, ou directement de la chaleur. D'autre part, l'huile végétale possède de bonnes qualités de lubrification.

Dans des zones qui ne sont pas très chargées pour la lubrification, on peut utiliser de l'huile végétale pure et dans des zones chargées on ajoute des additifs. Leurs qualités environnementales positives (exemple : risque minime de pollution des eaux) permettent leur utilisation comme lubrifiants qui après utilisation restent sur place : lubrifiants à scie, graisse pour des flèches à chemin de fer, etc. ; de même pour leur utilisation comme moyen de séparation dans le béton de construction. C'est toujours pour des raisons

environnementales qu'on les utilise dans le cas de risques importants de fuites des systèmes hydrauliques. Les huiles végétales, liquides ou solides, peuvent aussi remplacer les matières minérales dans plusieurs domaines de l'industrie chimique.

Toutes les plantes contiennent des matières grasses en quantités plus ou moins importantes. Elles se retrouvent surtout dans les graines des plantes et on les appelle des graines oléagineuses. C'est moins fréquent de trouver de la matière grasse dans la chair des fruits (par ex. des olives).

Tableau n°5 : Caractéristiques de différents huiles végétales (Source: FNR)

	Densité (kg/l)	Densité (MJ/kg)	Pouvoir calorifique	Viscosité	Indice de cétane	Point d'arrêt	Température d'inflammation.°	Combustible (équivalence)
Diesel	0,84	42,7	35,87	5,0	50	-	80	1
Huile de colza	0,92	37,6	34,59	74,0	40	-	317	0,95
Biodiesel	0,88	37,1	32,65	7,5	56	-	120	0,91
BTL	0,76	43,9	33,45	4,0	>70	-	88	0,93
Essence normale	0,76	42,7	32,45	0,6	-	92	>21	1
Bioéthanol	0,79	26,8	21,17	1,5	8	>100	>21	0,65
ETBE	0,74	36,4	26,93	1,5	-	102	>22	0,83
Biométhanol	0,79	19,7	15,56	-	3	>110	-	0,48
MTBE	0,74	35,0	25,90	0,7	-	102	-28	0,80
OME	0,67 <sup>(1)</sup>	28,4	19,03	-	60	-	-	0,59
Biométhane	0,72 <sup>(2)</sup>	50,0	36,00 <sup>(1)</sup>	-	-	130	-	1,4
Hydrogène	0,016	120,0	1,92	-	-	<88	-	2,8

(1) : 20°C (2) : kg/m<sup>3</sup> (3) : Biométhane en kg

La synthèse des huiles et des lipides nécessite des quantités énormes d'énergie apportées par le soleil. C'est la raison pour laquelle les plantes oléifères poussent traditionnellement dans les zones ensoleillées. Mais il est possible de cultiver des plantes oléifères sous les latitudes tempérées.

On distingue les graisses solides et liquides. Toutes les graisses liquides (huiles) sont constituées de composés hydrogénés. Les huiles végétales liquides ou solides contiennent du carbone (C), de l'hydrogène (H) et de l'oxygène (O) dans des proportions différentes. La part de carbone est la plus importante : 78 %, celle de l'hydrogène (12 %

environ) et de l'oxygène (11 % environ) est constante. Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène dans les huiles végétales sont sous forme de triglycérides. Ce sont des composés de la glycérine avec trois acides gras. Il y a aussi des substances des impuretés, surtout des phospholipides, des tocophérols et des stéarines.

#### Alcools

Du point de vue chimique, c'est un groupe de composés organiques contenant un ou plusieurs groupes hydroxyles, c'est-à-dire des groupes OH. L'alcool le plus simple est le méthanol :  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Suivent l'éthanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) et le propanol ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$ ).

Le nombre de groupes hydroxyles détermine la valeur de la molécule. Le méthanol, l'éthanol et le propanol sont monovalents. La formule de la glycérine est  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ , donc elle est trivalente. Sa formule structurelle est :



Le nom « correct » du point de vue chimique de la glycérine est propan-1,2,3-triol.

Les *esters* sont des composés chimiques entre l'alcool et l'acide. Les groupes OH de l'alcool et de l'acide donnent un atome d'oxygène dans l'ester. L'autre atome d'oxygène et les deux atomes d'hydrogène forment une molécule d'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) : alcool + acide = ester + eau.

Lorsque l'alcool est une glycérine, le composé d'ester obtenu s'appelle *triglycéride*. Si les acides qui y participent sont des acides gras ce triglycéride est une graisse solide. La forme de la structure du triglycéride ressemble à un E majuscule.

<b>Glycérine</b>	<b>Acide gras</b>
	<b>Acide gras</b>
	<b>Acide gras</b>

Fig. n° 13 : Structure de triglycéride

Les acides gras représentent des acides mono-carboxylés composés d'un groupe carboxilique et d'une chaîne hydrocarbonée et font partie du groupe des lipides.

Les propriétés différentes des divers acides gras sont dues à deux caractéristiques qui font la différence entre leurs chaînes hydrogénées : la longueur de la chaîne (nombre des atomes C), ainsi que le nombre et la place des doubles liaisons. Dans les acides gras, des doubles liaisons peuvent exister entre deux atomes de

carbone voisins s'ils ne sont reliés que par un atome d'hydrogène, c'est-à-dire s'ils ne sont pas "saturés". Suivant le nombre de doubles liaisons, on parle d'acides gras saturés (pas de doubles liaisons), des acides mono-insaturés (une double liaison) et d'acides gras poly-insaturés (deux ou plusieurs doubles liaisons).

Les huiles végétales liquides et solides sont composées de triglycérides, des acides gras dont la longueur de la chaîne est C 16 à C 18. Voici quelques uns : l'acide palmique et stéarique (C 16), ainsi que l'acide **oléique**, linoléique et linoléinique (C 18). Les huiles végétales solides avec dix à quatorze atomes de carbone, des acides gras à chaînes de longueur moyenne, représentent une partie relativement faible par rapport à l'ensemble des lipides connus. Ces "lauric fats" (acides caprique, laurique et myristique) n'existent pas en Europe et à cause de cela sont importés.

Pour indiquer la longueur de la chaîne et le nombre de doubles liaisons on a adopté un système d'écriture dans lequel après la lettre C (carbone), on met deux chiffres divisés par deux points, le premier chiffre indique le nombre d'atomes de carbone et le deuxième le nombre de doubles liaisons. L'acide linoléique par exemple a 18 atomes de carbone et deux doubles liaisons et s'écrit de la manière suivante : C 18:2.

Les matières grasses d'une plante contiennent toujours quelques acides gras différents. Mais dans cette variété, un acide déterminé est rencontré plus souvent que tous les autres. Cet acide dominant est indiqué comme acide gras principal de la plante. La composition proportionnelle des acides gras dans l'huile est appelée composition en acides gras. Elle est génétiquement prédéterminée, mais en même temps varie légèrement suivant l'année et le lieu de production.

Dans la majorité des cas, l'industrie recherche les qualités d'un acide gras précis. Plus cet acide gras principal domine, moins de procédés de transformation seront nécessaires pour l'utilisation optimale de ses qualités. Ce sont les raisons pour lesquelles sont sélectionnées les variétés 00 du colza et les variétés du tournesol à haute teneur en acide oléique.

Pour le colza, il faut y ajouter le fait que l'acide érucique qui est l'acide principal du colza traditionnel est néfaste pour l'homme. Au contraire, le colza des variétés 00 possède une composition en acides gras qui fait de son huile l'une des plus intéressantes du point de vue alimentaire et physiologique.

Elle est aussi utilisable comme carburant et comme lubrifiant.

A travers la sélection des variétés à haute teneur en acide oléique, l'huile de tournesol est utilisée non seulement comme produit alimentaire, mais aussi dans le domaine de la technique. La teneur élevée en acide oléique le rend utilisable comme lubrifiant à des températures élevées. L'huile de lin est une matière de base pour les peintures et les vernis, car elle sèche rapidement grâce à la teneur élevée en acides gras poly-insaturés.

#### *Propriétés caractéristiques*

Les caractéristiques d'une huile végétale donnée sont, dans une large mesure, constantes.

Par le terme de *densité* on entend la masse dans un volume de substance déterminée ; l'unité de mesure de la densité est le  $\text{kg/m}^3$ . A  $15^\circ \text{C}$  par exemple, la densité de l'huile de colza est autour de  $920 \text{ kg/m}^3$  et l'huile est plus légère que l'eau de 8 %.

La *température d'inflammation (point d'inflammation)* désigne la plus basse température à laquelle la substance dégage des vapeurs inflammables. En augmentant le contenu en acides gras libres dans l'huile, la température d'inflammation baisse. La température d'inflammation est donnée en  $^\circ\text{C}$  (ou bien  $^\circ\text{K}$ ). La température d'inflammation de l'huile de colza est de  $230^\circ \text{C}$ , celle du diesel de  $55^\circ \text{C}$  seulement.

La *valeur calorifique* est la quantité de chaleur dégagée par le combustible lors de sa combustion complète durant laquelle la vapeur d'eau qui s'est formée se retrouve à l'état gazeux dans les gaz d'échappement. Elle est donnée en kWh ou MJ par masse ou par volume (par ex. kWh/kg ou MJ/l). Dans le passé, cette propriété s'appelait pouvoir calorifique inférieure en opposition au pouvoir calorifique supérieure ; aujourd'hui on parle de pouvoir calorifique et de chaleur de combustion.

La *viscosité cinématique* est une mesure de fluidité ("élasticité") du liquide et se mesure en  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Plus la viscosité est élevée, plus la substance est compacte. Avec l'augmentation de la température, la viscosité diminue. A  $40^\circ \text{C}$ , la viscosité cinématique de l'huile de colza est autour de  $38 \text{ mm}^2/\text{s}$ , dix fois plus élevée que celle du diesel.

L'*indice d'iode* donne des informations sur le caractère non saturé des composés contenus dans les graisses. Il indique quelle quantité peut se mélanger avec 100 g d'huile (g

iode/100 g). La teneur en soufre est indiquée en %. Pour les huiles végétales, elle est très basse : 0,001 à 0,002%.

#### *Propriétés variables*

Les propriétés variables sont celles qui sont influencées par le choix de la variété, des méthodes de production et de conservation, elles jouent donc un rôle important dans la production.

La *contamination totale* indique la part des substances solides (particules) qui ne sont pas dissoutes dans l'huile. Elle représente le rapport massique entre les particules en grammes par un kilogramme d'huile.

L'*indice de neutralisation*, appelé aussi indice d'acide, donne des informations sur la quantité des acides gras libres et varie en fonction du degré de raffinage et de vieillissement. L'indice d'acide indique combien de composants acides peuvent neutraliser l'huile. La comparaison se fait par rapport au potassium : l'unité de mesure est donc le mg KOH/g. Pour l'huile de colza en tant que carburant, il est accordé une valeur maximale de 2,0 mg KOH/g.

La *stabilité à l'oxydation* décrit l'état de vieillissement et la propriété de conservation des huiles végétales. Pour tester l'huile, on y ajoute de manière intense de l'oxygène puis on mesure, après un temps déterminé, la stabilité d'oxydation. Dans les huiles végétales, le phosphore se trouve sous la forme de phospholipides. Pour une application dans des moteurs à combustion interne, la valeur exigée est inférieure à 15 mg/kg. La teneur en phosphore dépend du degré de raffinage. Pour les huiles végétales non raffinées, la teneur en phosphore peut être réduite par le biais d'un procédé technologique.

La *teneur en cendres* décrit la présence dans le combustible de substances organiques solides, telle que les particules. Lors de l'utilisation dans les moteurs, des teneurs élevées en cendres peuvent causer une panne du système d'injection. La valeur maximale pour les huiles végétales utilisées comme carburants est de l'ordre de 0,01 % du poids.

La *teneur en eau* des huiles végétales est influencée surtout par l'humidité de la graine, mais peut augmenter en cas de mauvaise conservation de l'huile.

*L'huile végétale comme carburant et combustible*



L'huile végétale naturelle possède une valeur énergétique (valeur calorifique), légèrement inférieure à celle du diesel, mais elle est plus facile à produire et considérablement moins chère. L'huile végétale se distingue particulièrement du diesel produit dans les raffineries par deux caractéristiques :

- L'huile végétale a une viscosité supérieure (fluidité difficile).
- L'huile végétale a une température d'inflammation supérieure à celle du diesel qui rend son inflammation plus difficile.

Comme le moteur diesel n'a pas été conçu à l'origine pour travailler uniquement avec du diesel, les moteurs actuels, produits en série à moindre frais, peuvent être améliorés en les faisant "reculer" d'un point de vue technique. Les moteurs pourraient fonctionner avec de l'huile végétale pure comme cela a été présenté par Rudolf Diesel à l'exposition universelle de Paris en 1900 : le moteur qu'il a présenté fonctionnait avec de l'huile liquide d'arachide. Les moteurs conçus spécialement pour fonctionner avec du carburant végétal liquide pourraient être une alternative. Ils peuvent brûler de l'huile végétale pure de qualité déterminée. D'après les experts, l'utilisation de l'huile végétale pure comme combustible concernera surtout les matériels fixes (par exemple pour la cogénération) et pour les machines agricoles ou forestières.

L'utilisation directe des huiles végétales pures dans des moteurs diesel produits en série est freinée par leurs caractéristiques qui les distinguent beaucoup du diesel. Pour compenser ces différences, on travaille, en ce moment, dans deux directions différentes :

- Adapter le carburant au moteur et
- Adapter le moyen de transport au carburant.

La forme d'adaptation du carburant la plus répandue est la trans estérification de l'huile végétale. La glycérine est séparée de l'huile et les acides gras s'estérifient de nouveau avec le méthanol.

Le produit obtenu est l'ester méthylique de l'huile végétale (PME), dit "biodiesel", et possède des qualités très proches de celles du diesel.

Pour utiliser l'huile végétale pure comme combustible, il faut adapter le moyen de transport. Un tel équipement est proposé dans les ateliers spécialisés pour les moteurs à chambres, moteurs à injection directe et systèmes pompe-buse/injecteur. Suivant la

conception de l'adaptation, on distingue des systèmes à un ou deux réservoirs. Les moteurs spéciaux créés pour les carburants d'origine végétale représentent une alternative. Ils sont proposés comme des moteurs à chambre et à injection directe et sont très convenables pour une utilisation en fixe.

Par rapport au diesel, les deux méthodes une réduction de la pollution par le CO<sub>2</sub>. En plus, les deux ne contiennent pas de soufre et sont moins dangereux pour les eaux. L'infrastructure de l'alimentation avec l'huile végétale est sans frais supplémentaire énergétique pour le carburant et présente un avantage, du fait des courtes distances de transport. A cause de leur nombre limité, les investissements dans l'adaptation du moteur sont plus élevés que ceux pour l'adaptation du carburant, c'est à dire pour l'utilisation de biodiesel.

#### *Production d'huile végétale*

Durant les moissons avec une moissonneuse-batteuse, les grains du colza se séparent de la paille. Dans la majorité des cas, la paille reste sur les champs alors qu'elle devrait être utilisée, par exemple comme matériaux de digue, engrais, fourrage ou pour une application énergétique (biogaz, combustion).

Cependant, ce n'est pas actuellement rationnel d'un point de vue économique. La matière première pour l'huile est les graines.

Comme d'un point de vue économique l'idéal serait d'organiser en continu le travail, le délai de conservation pourrait être d'un an.

Pour avoir à la fois de bons rendements et une qualité correcte, il faut surtout un bon séchage.

La production efficace d'huile comprend les phases de préparation, pressage et raffinage.

La production industrielle sépare chacune de ces phases en plusieurs étapes, parmi lesquelles il y a aussi des procédés chimiques. Les co-produits obtenus sont le tourteau qui est pauvre en huile et le gâteau d'extraction qui en contient encore moins.

La production d'huile en petites installations décentralisées est plus simple. Comme les procédés ne sont que mécaniques, le nombre d'étapes techniques diminue. Le degré de pressage est inférieur par rapport au traitement centralisé des graines, mais le tourteau est plus riche en substances nutritives.



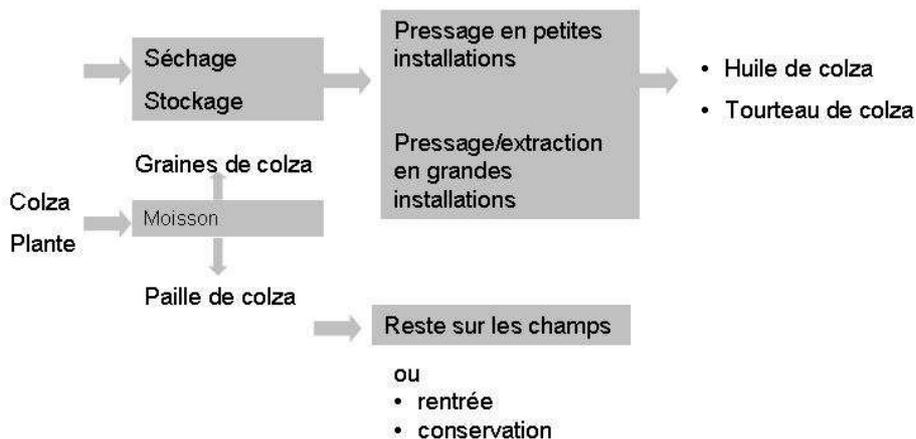


Fig. n°14 : Production d'huile végétale et des coproduits

### Traitement industriel des graines

En Allemagne, la majorité des graines sont traitées dans de grandes installations centrales en quantité importante. Les installations de ce type traitent plus de 500 tonnes par jour. Actuellement, en Allemagne 14 huileries centralisées sont en fonctionnement. La préparation des graines dans des installations industrielles comprend le nettoyage et le séchage, mais aussi le conditionnement. C'est un procédé qui permet « d'adapter » le taux d'humidité et la température des graines aux exigences des procédés techniques suivants. Les graines sont éventuellement décortiquées et écrasées.

Dans la majorité des cas, l'extraction réelle de l'huile dans les grandes installations représente une combinaison de pré-pressage et d'extraction. Après le pressage, la quantité d'huile contenue dans le tourteau est extraite à l'aide d'un solvant. Le résidu qui reste contient très peu d'huile et s'appelle gâteau d'extraction. L'huile brute obtenue est ensuite raffinée. La figure n° 15 montre les différentes étapes du raffinage chimique : dégommeage, neutralisation, décoloration et nettoyage à la vapeur. Le produit fini du traitement industriel des graines oléagineuses est l'huile végétale raffinée : raffinat.

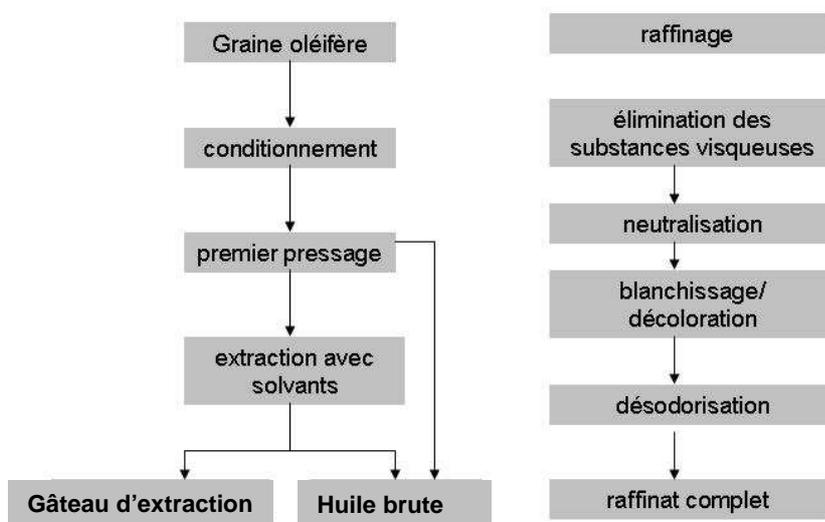


Fig. n°15 : Production d'huile en huileries industrielles (centralisée)

### Production d'huile en petites installations

Pour une production d'huile économique et écologique dans des huileries décentralisées, il est nécessaire d'avoir un procédé technique le plus simple possible. Il est exigé aussi que la consommation d'énergie soit minimale. C'est en suivant ce principe, qu'actuellement en République Fédérale, en Allemagne du Sud en particulier, que sont traitées plus de 25 tonnes de graines par jour dans plus de 200 huileries.

La préparation des graines dans les installations décentralisées est réduite au minimum. Avant leur stockage, les graines sont déjà suffisamment nettoyées et possèdent le taux d'humidité adéquat et entrent en production sans autre traitement préparatif.

Certaines des variétés oléagineuses sont broyées et décortiquées, mais le colza n'exige pas de telles opérations.

Le conditionnement qui est courant dans l'industrie n'est pas justifié du point de vue économique dans les petites huileries. Le pressage dans les installations décentralisées se fait mécaniquement et sans introduction supplémentaire de chaleur.

Par pressage à froid, on obtient de l'huile et du tourteau relativement riche en matières grasses. La seule opération réalisée dans ces installations est la purification de l'huile. Ce sont des méthodes de décantation et de filtration qui sont appliquées. Les produits finis du traitement décentralisé des graines oléagineuses sont l'huile végétale pressée à froid et le tourteau riche en substances nutritives.

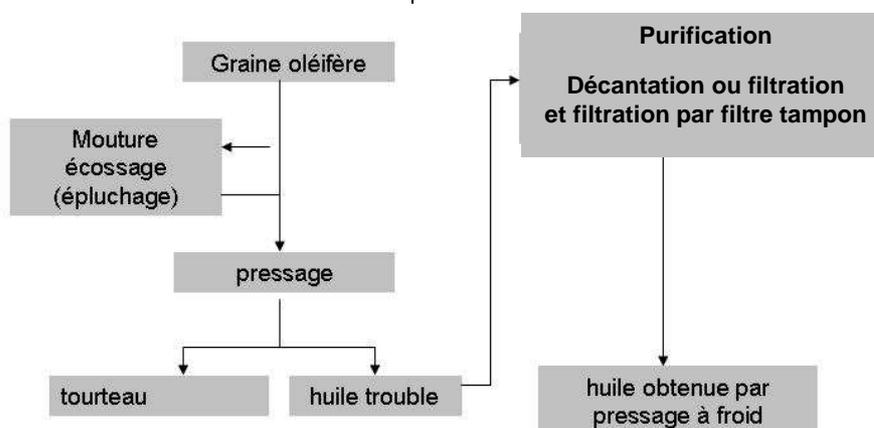


Fig. n°16 : Production d'huile en petites huileries (décentralisées)

La différence entre les installations de traitement de graines oléagineuses centralisées et décentralisées par rapport aux investissements est fondamentale. La technique performante de production centralisée d'huile permet d'avoir une capacité élevée, mais limite considérablement la souplesse d'adaptation. Le nombre limité d'opérations et leur caractère surtout mécanique, dans les petites installations, permettent de réagir rapidement aux changements des conditions. Les cultures oléagineuses rarement cultivées sont traitées surtout de manière décentralisée.

Le degré de pressage dans les installations centralisées est très élevé. Le gâteau d'extraction, résidu de la production industrielle, est donc moins riche en matières grasses que celui des petites installations. Or, le gâteau d'extraction des petites installations

pourrait être mieux utilisé ensuite, par exemple dans l'alimentation animale.

La conception chère du traitement centralisé des graines entraîne des besoins énergétiques importants : pour le traitement d'une tonne de graines, 1,7 GJ d'énergie est nécessaire sous différentes formes, surtout pour le raffinage et pour la production de vapeur. Comme dans les installations décentralisées il n'y a pas ces opérations, la consommation d'énergie y est considérablement inférieure. De plus, il n'y a ni production d'eaux polluées ni utilisation de solvants.

Les frais de transport représentent une autre grande différence entre les deux conceptions. Tandis que la version centralisée impose de longs trajets, le traitement décentralisé permet d'avoir des frais de transport minimes.

Les grandes huileries nécessitent des quantités de matières premières, provenant



souvent de l'étranger. La livraison des graines est réalisée par des transports de fort tonnage et les stockages intermédiaires sont assez courants. C'est la raison pour laquelle les installations centralisées doivent être proches des grands axes de transport. En Allemagne, les grandes huileries sont presque toutes situées au bord des grandes voies fluviales (fleuves ou canaux) et souvent ont accès aux voies ferrées. Dans le monde, les ventes des huiles raffinées se font aussi en grands convois nécessitant souvent des stations intermédiaires.

Les petites huileries sont proches de leurs fournisseurs et de leurs clients. Idéalement, les transports sont limités à la région. Les quantités sont peu importantes et peuvent être transportées en camion et moins souvent en train. Dans la plupart des lieux de production, dans l'Allemagne du Sud, les distances entre les producteurs de graines, l'huilerie et les marchés sont de l'ordre de 50 km au maximum.

L'analyse des aspects économiques permet de différencier clairement le traitement décentralisé et le traitement centralisé des cultures oléagineuses.

Dans la majorité des cas, les huileries centralisées sont des sociétés à capitaux, reliées avec les grands consortiums agissant sur le plan international, contrairement au traitement décentralisé des cultures oléagineuses qui se fait soit dans des entreprises privées, soit en coopératives, par exemple de producteurs.

Dans ce cas, il n'y a pas de commerce intermédiaire et du point de vue de l'organisation l'huilerie est soit directement, soit indirectement intégrée à la production agricole.

Les huileries centralisées fonctionnent différemment : concernant les livraisons des matières premières et la vente des huiles produites ce sont des agents du commerce qui interviennent.

La rentabilité de la production en traitement industriel des graines oléagineuses peut être considérée comme réelle, vu les grandes régions où la matière première est produite. La participation aux grands marchés internationaux et les nombreuses possibilités de stockage garantissent la fourniture permanente en matières premières et la sécurisation de la commercialisation. Ce n'est qu'à ces conditions que le service des marchés présents en nombre limité pourrait être profitable et pourrait donner la possibilité d'accroître la valeur ajoutée pour l'agriculture et d'alimenter des filières régionales.

#### *Qualité des graines oléagineuses*

Bien que l'ensemble des procédés de production d'huile commence par le choix et le semis des plantes, en terme de matières premières on entend souvent les graines oléagineuses, notamment les graines des plantes, et non les fruits oléagineux à partir de la chair desquels l'huile est obtenue (ex. olives).

De 1997 à 2002 les rendements moyens en Allemagne étaient de 2,97 à 3,69 t graines/ha. Au moment de la maturation maximale, les graines contiennent le plus de matière grasse. Les graines de colza de la variété 00 peuvent atteindre 40-44 % de teneur en matière grasse.

Pour réduire au minimum la dégradation de la qualité durant le stockage et donc les frais supplémentaires pour les opérations suivantes, il faut tenir compte de quelques conditions importantes. L'une des exigences est d'avoir le minimum d'impuretés, corps étrangers et une part minime de graines cassées. L'humidité et la température de stockage ont aussi une grande importance, c'est l'humidité qui exerce la plus grande influence sur la qualité des graines.

Les huileries demandent une qualité précise pour les graines. Ces conditions de réception sont actualisées tous les ans, mais en général elles sont soumises au principe suivant : on soustrait au prix d'achat un pourcentage lié aux taux d'impuretés/corps étrangers et à la proportion de graines cassées. D'autre part, il faut que la production ait un bon taux d'humidité afin qu'elle ne subisse aucune réduction supplémentaire de prix. On peut trouver des informations sur les conditions de réception actuelles, directement auprès des huileries.

#### *Stockage des graines*

Durant le stockage des graines, il se passe différents processus de décomposition et de transformation durant lesquels les glucides et surtout les lipides se transforment en dioxyde de carbone, en eau et en produits intermédiaires en dégageant de la chaleur. Les détériorations des écales des graines constituent un sérieux problème car c'est une voie de pénétration éventuelle de microorganismes et de champignons. La chaleur et l'humidité forment des conditions idéales pour leur dissémination rapide. Cela dégrade la qualité et peut abîmer tout le stock.



L'humidité est une condition déterminant la conservation. L'humidité optimale pour la graine est située entre 7-9 %. Au-dessus de ce taux, le risque de perte et de formation de moisissures toxiques (mycotoxines, surtout des aflatoxines) augmente. La désactivation technique des aflatoxines n'est pas pratiquée.

En plus de l'humidité, le niveau de contamination (les impuretés présentes) joue un rôle très important pour la conservation. Par exemple, des graines sans impureté, avec une humidité de 9 %, ne perdent environ que 0,4 % de leur matière sèche au bout d'un an. Si le taux d'humidité est inférieur, les pertes peuvent être encore réduites.

Les graines des différentes plantes oléagineuses ont une durée potentielle de stockage différente. Les graines du lin oléagineux, par exemple, sont beaucoup plus sensibles que celles du colza à cause de leur teneur élevée en acides gras polyinsaturés et doivent donc être traitées très soigneusement durant le stockage.

#### *Stockage des huiles végétales*

Dans les huiles végétales, il se passe différents processus moléculaires de dégradation et de transformation. La qualité de l'huile peut alors se dégrader, les changements peuvent être si importants que l'huile peut perdre la qualité requise pour certaines applications. Divers facteurs peuvent jouer sur les processus de dégradation et de transformation qui endommagent l'huile durant son stockage ainsi que leur vitesse.

Ce qui s'est passé avant joue un rôle important sur la qualité de l'huile durant son stockage : de la récolte en passant par le séchage et le stockage des graines, à la qualité du traitement. L'avantage est la teneur élevée en tocophérols obtenue conservée à travers la bonne maturation et le traitement.

Durant le stockage, l'huile végétale peut subir des influences extérieures, comme la température, le contact à l'eau, l'oxygène, la lumière, la matière de la citerne et les autres pièces avec lesquelles l'huile est en contact. Les changements de l'huile les plus importants, pouvant se produire durant le stockage, sont la décomposition des lipides, l'auto-oxydation et la polymérisation.

Par le terme de *décomposition des lipides*, on entend la séparation des acides gras de la molécule de glycérine. C'est le résultat de la présence de micro-organismes et de molécules d'eau dans l'huile.

La réaction d'hydrolyse qui se passe est l'inverse de la condensation (les triglycérides se forment durant la végétation) : les acides gras et la glycérine se séparent de nouveau.

*L'auto-oxydation* est la réaction en chaîne qui commence au contact de l'oxygène. Elle dégrade le goût et l'odeur de l'huile. La lumière et la chaleur maintiennent ce mécanisme en lui procurant de l'énergie. Les métaux lourds tels que le fer ou le cuivre réagissent comme des catalyseurs au contact de l'huile, la réaction nécessitant alors moins d'énergie. Des antioxydants (par ex. les tocophérols) peuvent empêcher l'auto-oxydation à condition que l'huile en contienne.

*La polymérisation* est une issue probable de l'auto-oxydation. Comme une partie des molécules se lient en formant d'autres composés, la viscosité de l'huile augmente et sa couleur devient plus sombre.

En conclusion, citons encore une fois les facteurs de risque qui pourraient dégrader la qualité de l'huile stockée :

Le contact avec l'oxygène est le point de départ pour l'auto-oxydation, la chaleur et la lumière procurant l'énergie nécessaire à ce processus. Les ions des métaux lourds, comme le fer et le cuivre, agissent comme des catalyseurs à l'oxydation. Cela signifie qu'en présence d'une telle matière l'enthalpie de la réaction baisse, donc l'oxydation est favorisée. Au contact de l'eau, on peut avoir une dégradation hydrolytique des lipides. Les enzymes et les microorganismes contenus dans l'huile peuvent provoquer la séparation des chaînes des acides gras de la glycérine; alors un atome d'hydrogène de l'eau se lie avec la glycérine et le groupe OH avec l'acide gras. L'hydrolyse est en effet, le processus inverse de la condensation durant laquelle le triglycéride s'est formé.

Durant le stockage des huiles végétales, il faut limiter au minimum les possibilités d'influence des facteurs de risque indiqués.

La température optimale dans les citernes de stockage est comprise entre 10 et 15 °C. Il faut éviter que l'huile se refroidisse ou se réchauffe, sous l'influence de la température ambiante.

Les huiles végétales doivent être stockées, si possible, loin de la lumière puisque celle-ci est source d'énergie et elle favorise donc les processus de décomposition et de transformation. Dans tous les cas, il faut éviter l'exposition directe au soleil. Il est préférable d'utiliser des citernes non transparentes. Dans le cas de citernes transparentes en plastique, il est donc nécessaire de les recouvrir.



L'introduction d'oxygène doit être très limitée et pour éviter cela, il suffit de bien remplir la citerne ou d'utiliser des aménagements flottants qui recouvrent l'huile. Si les exigences de qualité sont plus strictes, on crée une atmosphère protectrice d'azote. Au moment du remplissage, il est nécessaire d'éviter les chutes d'huile d'une grande hauteur pour éviter l'écumage et la pénétration d'oxygène. Le remplissage se fait, si possible, par le bas.

Le contact avec de l'eau peut se produire par le biais de la condensation. Il faut donc prendre des précautions surtout au moment de verser l'huile, quand les températures extérieures sont basses.

Les ions des métaux lourds agissent comme catalyseurs des processus de décomposition et de transformation. Les citernes en acier noble sont préférables.

La tuyauterie ne doit pas comporter de pièces en laiton ou en cuivre. Les huiles raffinées sont plus sensibles à l'oxydation que les huiles pressées à froid, à cause de leur teneur en antioxydants naturels.

#### *Transport des huiles végétales*

Par rapport à d'autres combustibles, le transport des huiles végétales, tout comme leur stockage ne pose relativement pas de problèmes. Vu la température élevée d'inflammation et le faible potentiel de pollution des huiles, il n'est pas obligatoire d'appliquer des mesures de sécurité sévères.

En théorie, durant le transport, les huiles végétales subissent les mêmes risques que lors de leur stockage. La chaleur, la lumière, l'oxygène, l'eau et les ions des métaux lourds sont aussi des facteurs de risque lors du transport et peuvent causer un vieillissement rapide de l'huile.

Durant le transport, le contact avec l'oxygène et l'eau "cachée" peut dégrader la qualité du produit. L'écumage, par exemple, est équivalent à un apport d'oxygène intense et, pour cette raison, il faut l'éviter. Le contact avec l'eau pourrait se produire au moment où l'huile est versée d'un récipient à un autre, soit parce que la différence de températures des deux récipients provoque une condensation, soit parce que le récipient recevant l'huile a été mal séché, après son nettoyage.

Il faut veiller à ce que l'huile garde sa consistance liquide pendant toutes les étapes. Lorsque la température de l'huile baisse, celle-ci devient trouble (point de trouble) puis dense et ne peut plus être pompée (point d'écoulement). En conditions normales, l'huile de colza est liquide et il n'est pas nécessaire

de la réchauffer. Si durant le transport la température baisse jusqu'à la température de durcissement, l'huile doit être réchauffée pour qu'elle puisse être pompée. Les huiles doivent être chauffées et atteindre quelques degrés de plus que les températures de la journée. Sinon, il y a un risque de rancissement ou d'autres transformations néfastes. L'huile de colza après pressage, pourrait être réfrigérée provisoirement. Dans le cas d'un long stockage au frais, l'huile se durcit en formant une masse blanche sans rien perdre de sa qualité.

#### *Norme de qualité de l'huile de colza utilisée comme carburant*

En Allemagne, l'élaboration d'un standard concernant l'application de l'huile de colza comme carburant a commencé en 1996. Les années suivantes, des instituts scientifiques en partenariat avec des experts et des entreprises produisant de l'huile ou des moteurs ont élaboré une norme de qualité pour l'huile de colza utilisée comme carburant (RK-Qualitätsstandard 05/2000). Le leader dans ce domaine était l'Agence régionale de technique agricole à Waienstefan, d'où le nom de "Norme de Waienstefan". Depuis l'automne 2003, on travaille sur une norme nationale DIN (Deutsche Industrienorm).

Le carburant d'huile de colza est produit surtout dans des huileries décentralisées sans raffinage. Dans le cadre d'une recherche menée entre décembre 2002 et mai 2003, 31 huileries décentralisées de capacités différentes ont été étudiées, dont 16 étaient des fournisseurs du « Programme des 100 tracteurs ». Seulement quatre de ces huileries produisaient de l'huile de colza correspondant à tous les indices du standard de Waienstefan ; six autres ne dépassaient qu'une valeur limite. Cinq huileries présentaient de grands écarts. Les écarts les plus fréquents concernaient les valeurs maximales de contamination globale et l'indice d'acide.

Les scientifiques ont conclu que de l'huile de colza correspondant à la norme de qualité RK pouvait être produite dans des installations de toute dimension à condition d'appliquer cette norme. D'après cette étude, l'utilisation de filtres adéquats permet de réduire sensiblement la contamination globale. De plus, la condition préalable pour l'obtention d'un carburant de qualité est l'utilisation de graines de colza de bonne qualité.



## Biodiesel

L'ester méthylique d'huile végétale (EMHV) se forme à partir de l'huile végétale et de l'alcool éthylique. Lors de cette transformation moléculaire, les acides gras se détachent de la molécule de glycérine et se lient avec l'autre alcool.

On utilise le plus souvent de l'huile de colza et du méthanol pour l'obtention d'un ester méthylique d'huile (EMHV) par trans estérification. Dans le triglycéride de l'huile végétale, la glycérine trivalente est remplacée par trois molécules monovalentes de méthanol.

Actuellement, le méthanol obtenu surtout à partir du pétrole et de la glycérine est une matière assez recherchée par l'industrie chimique.

L'ester méthylique de colza est appelé biodiesel. L'abréviation FAME (anglais : Fatt Acid Methyl Ester) est aussi utilisée.

Les qualités de fluidité et de combustion du biodiesel correspondent approximativement à celles du diesel conventionnel issu des matières fossiles. La condition la plus importante pour l'utilisation dans les moteurs diesel avec les systèmes d'injection actuels est remplie. Ajoutons à cela l'indice de cétane élevé et la teneur en oxygène de 11 %.

Le biodiesel est classifié comme légèrement nuisible pour l'eau (WGK 1) et à dégradation biologique rapide. Lors de sa combustion, les émissions de particules sont diminuées d'un tiers par rapport au diesel traditionnel. A cause de la température de combustion supérieure, les quantités d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) présentes dans les gaz d'échappement du biodiesel

dépassent les valeurs limites indiquées dans les normes EURO V qui rentreront en vigueur à partir de 2008. Probablement, dès l'application des normes Euro IV en 2005, une des améliorations devrait être le réglage du moteur sur la base d'un capteur de carburant : ce capteur détermine le rapport entre les deux types de carburants en cas de mélange de diesel et biodiesel, en déclenchant, de manière optimale, l'injection.

La composition et les qualités du carburant biodiesel sont fixées par la norme DIN EN 14214. Ainsi, une qualité constante est garantie au consommateur. En Allemagne, une vingtaine d'installations produisent plus d'un million de tonnes de biodiesel par an. Le biodiesel est vendu dans plus de 1900 stations service.

D'après l'évaluation de l'UFOP (Union pour la promotion des plantes oléagineuses et des plantes riches en protéines), le biodiesel peut remplacer 6-7 % du carburant diesel en Allemagne, et jusqu'à 10 % dans l'UE. Ces quantités limitées résultent des exigences du colza par rapport à l'assolement. A cet égard, en Allemagne le potentiel de culture du colza pourrait atteindre 1 million d'hectares.

La comparaison entre les six caractéristiques principales des carburants (voir tableau n° 6) montre que la majorité des propriétés du biodiesel sont très proches de celles du carburant diesel fossile. L'huile végétale, par contre, est très différente des deux autres carburants sur plusieurs points.

Paramètres	Diesel DIN EN 590		EMHV DIN EN 14214		Huile de colza	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Densité (15°C) kg/m <sup>3</sup>	820	860	860	900	900	930
Viscosité cinématique mm <sup>2</sup> /s (à 40°C)	2	4,5	3,5	5	38	38
Température d'inflammation °C	55	-	> 101	-	220	-
Contenu en soufre mg/kg	-	350	-	20	-	10
Indice de cétane	49	-	51	-	~ 39	~ 39
Propriété calorique MJ/kg	42,7	42,7	37,9	37,9	35	-

Tableau n°6 : Caractéristiques des différents carburants



Il existe de grandes différences entre le diesel traditionnel et le biodiesel (EMHV) en ce qui concerne la température d'inflammation et la teneur en soufre.

Le carburant diesel a la température d'inflammation la plus basse et le contenu en soufre le plus élevé.

Les différences par rapport à la propriété calorifique diminuent, si on les indique par rapport au volume et non, comme il est indiqué ici, par rapport à la masse: dans ce cas la propriété calorifique de l'EMHV est inférieure d'environ 7 % à celle du carburant diesel. La propriété calorifique de l'huile de colza définie par rapport au volume n'est inférieure que de 2 % par rapport à celle du diesel, et donc elle est presque du même ordre.

Pour le carburant diesel (DIN EN 590) et le biodiesel (DIN EN 14214) il existe des valeurs limites fixées dans les normes européennes. Ainsi, le consommateur utilise un carburant aux caractéristiques définies et de qualité constante. Pour les huiles végétales pures, il existe une norme uniquement pour l'huile de colza, mais elle n'est pas d'application obligatoire. Elle représente un accord entre les propriétaires des huileries, les motoristes et les scientifiques, qui garantit une qualité respectant des valeurs limites déterminées. Très souvent, les exigences de cette "norme de Waienstefan" ne sont pas respectées. Le biodiesel est le premier carburant appartenant à la famille « des carburants standards », accepté par le marché.



Fig. n°17

a) La marque DIN EN 14214 pour le biodiesel

b) La marque Gestion de la qualité du biodiesel aux distributeurs (AGQM) (Source : FNR)

En Allemagne, elle est contrôlée par les services régionaux, les stations services publiques sont obligées d'indiquer le standard qualité du carburant en mettant les autocollants DIN sur les pompes. Les

producteurs allemands et autrichiens se sont unis en association de travail pour la gestion de la qualité du carburant biodiesel (Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel - AGQM) pour garantir le respect de la norme. Environ 1 400 stations services publiques pour le biodiesel en Allemagne, sur une totalité de 1 900, font partie de l'AGQM et cela est indiqué sur les marques de contrôle des distributeurs. (voir figure n° 17 b).

#### *Transport du biodiesel*

Pour conserver la qualité du biodiesel, il faut avoir une coopération entre tous ceux qui sont engagés dans le secteur du biodiesel. Le transport se fait avec des camions citernes. En Allemagne, le véhicule doit avoir un permis supplémentaire valide pour sa construction, un certificat B-3 et doit être testé conformément au § 29 StVZO.

Les contaminations et l'infiltration d'eau peuvent causer des problèmes : il est donc conseillé de bien contrôler les véhicules et les citernes avant le chargement.

Comme, d'après les exigences de la norme DIN EN 14214, le biodiesel doit avoir une température d'inflammation minimale de 120 °C, il n'est pas classé parmi les matières dangereuses ni parmi les charges dangereuses pour le transport routier. Il faut savoir qu'un ajout de diesel minéral de l'ordre de 1-2 % peut considérablement faire baisser la température d'inflammation (au-dessous de 100 °C). Dans ce cas, le biodiesel est classifié comme matière et charge dangereuses. C'est la raison pour laquelle il ne faudrait pas utiliser des moyens de transport et des citernes ayant servi à transporter des produits dont la température d'inflammation est inférieure à 55 °C, sans les nettoyer auparavant. Il faut aussi exclure les moyens de transport ayant transporté des acides ou des bases de tous types, ou de la glycérine ou des huiles végétales.

La règle est qu'il faut exclure le mélange biodiesel/carburants minéraux, ainsi que les mélanges avec de l'eau.

Le biodiesel a certaines caractéristiques intéressantes que pourraient avoir les carburants fossiles, uniquement en ajoutant divers adjuvants ou par le biais de procédés onéreux.

Ces caractéristiques sont les suivantes :



Le biodiesel ne contient presque pas de soufre, améliore le pouvoir lubrifiant, s'enflamme facilement grâce à son indice de cétane élevé et possède une teneur élevée en oxygène (11 %) qui assure une meilleure combustion. De plus, le biodiesel peut être utilisé en hiver à des températures de -12 °C à -20 °C, en y ajoutant des additifs.

### Bioéthanol

A l'avenir, on utilisera du biodiesel produit surtout à partir du colza, mais aussi du bioéthanol produit à partir de graminées. En Allemagne, le bioéthanol est produit surtout à partir de seigle, de blé ou de triticale.

Le maïs, les pommes de terre et la betterave sucrière, qui pourraient aussi servir de matière première pour la production de bioéthanol ne sont pas utilisés actuellement en Allemagne pour des raisons techniques et de productivité : par exemple la durée de stockage limitée de la betterave ou des pommes de terre et leur teneur élevée en eau. Pour le maïs grain, il existe des facteurs d'incertitude concernant la récolte retardée et les frais supplémentaires pour le séchage, d'où la préférence accordée aux céréales pour la production de bioéthanol. En France, en Suède et aux Etats-Unis le bioéthanol s'est imposé depuis des années ce qui n'est pas le cas pour l'Allemagne. Avec les évolutions réglementaires concernant les taxes sur les huiles minérales, les conditions de développement du marché du bioéthanol se sont considérablement améliorées. L'exonération fiscale sur les composés biogènes des carburants mélangés aura une influence positive sur l'utilisation du bioéthanol comme carburant, dès les prochaines années.

Matières premières	Récolte (masse fraîche) t/ha	Production de carburant l/ha	Biomasse nécessaire pour un litre de carburant l/t
<b>Maïs grains</b>	9,2	3520	2,6
<b>Blé</b>	7,2	2760	2,6
<b>Seigle</b>	4,9	2030	2,4
<b>Triticale</b>	5,6	2230	2,5
<b>Pomme de terre</b>	44,0	3550	12,4
<b>Betterave sucrière</b>	61,7	6620	9,3

Tableau n° 7 : Récolte de matière première pour la production de bioéthanol (Source : FNR)

Tandis que l'huile végétale et le biodiesel peuvent être utilisés pour les moteurs Diesel, le bioéthanol se substitue aux carburants utilisés dans les moteurs à carburateur (essence, super et super plus). D'après les normes actuelles, les producteurs d'huiles minérales peuvent additionner jusqu'à 5 % de bioéthanol dans les carburants pour moteurs à carburateur. En Allemagne, il n'est pas proposé d'automobiles de série qui pourraient fonctionner avec un plus grand pourcentage de bioéthanol.

Pour cela, il faut modifier le moteur afin d'utiliser des mélanges contenant jusqu'à 85 % en volume d'éthanol (E 85). Les automobiles avec de tels moteurs sont dites "flex fuel". L'éthanol pur peut être utilisé uniquement pour des moteurs spéciaux.

Dans les moteurs à carburateur, l'ETBE peut être additionné, en supplément, jusqu'à 15 % en volume. L'ETBE est un éther produit à partir de l'éthanol (47 %) et de l'isobutène (carburant fossile)(53 %), qui peut être utilisé à la place de l'adjuvant fossile qui remonte l'indice d'octane MTBE pour les carburants à moteurs à carburateur (essence). Les automobiles flex fuel sont actuellement utilisées surtout au Brésil, aux Etats-Unis et en Suède. Le bioéthanol est obtenu par la fermentation de plantes contenant du sucre, de l'amidon et de la cellulose. En Allemagne, ce sont le blé, le seigle et la betterave sucrière qui sont le plus utilisés, tandis que dans les autres pays européens et aux Etats-Unis, l'éthanol est produit à partir du maïs. Au Brésil, l'éthanol est produit à partir de la canne à sucre. Le



développement actuel des techniques utilisant les enzymes adéquates rendra possible la production d'éthanol à partir du bois, des plantes énergétiques et de la paille ; mais ces techniques sont encore en cours d'élaboration. L'éthanol est produit par fermentation du sucre contenu dans la plante, à l'aide de levures et d'enzymes. Si le produit de base est l'amidon ou la cellulose, ces derniers se transforment en sucre grâce aux enzymes. Le sous-produit qui reste après la production de l'éthanol est utilisé comme fourrage ou comme substrat pour les installations de méthanisation.

Les propriétés du bioéthanol permettent une amélioration de la qualité des carburants pour moteurs à carburateur, puisque l'éthanol a un indice d'octane plus élevé que celui des essences traditionnelles et favorise donc les propriétés anti-détonation du carburant. Les défauts du bioéthanol sont : le contenu énergétique inférieur à celui des essences fossiles (1 litre d'éthanol est équivalent à environ 0,66 litre d'essence) et l'augmentation de la pression des vapeurs dans le cas d'un mélange avec le carburant fossile, ce qui doit être évité, surtout en été.

La production traditionnelle de bioéthanol est un processus énergivore, mais l'équilibre énergétique est cependant positif pour ce biocarburant. Entre 0,8 à 1,5 kg de CO<sub>2</sub> par litre sont ainsi épargnés par rapport aux carburants fossiles. De plus, grâce à sa dégradation biologique, l'éthanol n'est pas dangereux pour les sols et les eaux.

L'éthanol pur (E 100) est utilisé surtout au Brésil, mais là aussi il est de plus en plus remplacé par l'E 85. L'utilisation d'E 100 présente quelques défauts par rapport aux mélanges (par ex. E 85) comme l'inflammation difficile et sa capacité d'absorber l'humidité ambiante.

**Tableau n°8 : Description du carburant éthanol**

Description du carburant d'éthanol	
Matières premières	Céréales, sucre, (bois)
Récolte annuelle par hectare	2.500 l/ha
Equivalent de combustible	1 l d'éthanol est équivalent à environ 0,66 l d'essence
Prix du marché	approximativement 0,50 euros/l
Réduction de CO <sub>2</sub> *	30-70 %
Indications techniques	Peut être mélangé avec un combustible jusqu'à 5 %

\* Par rapport à l'équivalent d'essence

## Bio-méthane

Le biogaz est un vecteur énergétique qui peut être utilisé pour les voitures à gaz. Il existe des voitures qui roulent au gaz « fossile » uniquement et d'autres qui sont hybrides et sont proposées en série par plusieurs constructeurs.

Le biométhane produit à partir du biogaz peut être aussi utilisé sans modification des moteurs. En tout cas, le biogaz doit avoir les mêmes qualités que le gaz « fossile ». Les méthodes utilisées pour son traitement sont relativement récentes et ne sont pas encore totalement au point.

Description du biométhane	
Matières premières	Plantes énergétiques ; purin et résidus organiques
Récolte annuelle par hectare	4 700 m <sup>3</sup> /hectare *
Equivalent de combustible	1 kg de méthane remplace environ 1,4 l d'essence
Prix du marché	Manque de données
Réduction de CO <sub>2</sub> *	Manque de données
Indications techniques	Le biométhane peut être utilisé par les voitures comportant des dispositifs à gaz sans adaptation des moteurs

\* Base : Récolte de maïs 45 t/ha ; production de biogaz 190 m<sup>3</sup>/t ; contenu en méthane 55 %

Récolte de matière première	Production de biogaz	Contenu en méthane	Production de biogaz	Production de méthane
Env. 45 *	Env. 190 *	55 %	4 700	3 384

\* Base : maïs fourrager, une récolte par an

**Tableau n°9 : Récolte de matières premières pour la production de biométhane**

Le biométhane est obtenu à partir du biogaz, par la fermentation d'engrais liquide et de fourrage de maïs. En Allemagne, le biométhane est produit principalement, par des filières agricoles.



Le biogaz est composé d'environ 55 % de méthane, de dioxyde de carbone et de petites quantités de sulfure d'hydrogène et d'autres microgaz. Le méthane est le seul composant du biogaz qui pourrait être utilisé comme combustible, son profil chimique ressemblant beaucoup au gaz « fossile ». La condition préalable pour l'utilisation du biométhane est sa séparation des autres composants, ce qui le rend actuellement économiquement inintéressant.

Le biométhane étant un carburant gazeux, il est plus difficile à stocker et à transporter que les carburants liquides et il nécessite plus d'espace de stockage, à cause de sa densité énergétique considérablement inférieure.

Les véhicules transportant du gaz naturel doivent avoir une citerne à pression, supplémentaire, pour conserver le méthane à une pression de 200 bars.

D'autre part le méthane possède des qualités de combustion intéressantes qui permettent de réduire, par rapport aux carburants diesel et l'essence, jusqu'à 80 %, les émissions des différents polluants, comme les oxydes d'azote ou les hydrocarbures réactifs. Le bilan CO<sub>2</sub> est aussi positif, car le CO<sub>2</sub> dégagé a été auparavant en grande partie absorbé par les plantes et est donc lié dans la chaîne de production du biogaz.

En Allemagne, environ 15 000 véhicules, soit 0,03 % de la flotte, roulent au gaz naturel et pourraient, sans modifications techniques supplémentaires, passer au biométhane. Par contre, il manque encore l'infrastructure adéquate de stations-services pour ces carburants.

Pour créer l'infrastructure pour ce type de carburant, il existe en principe deux possibilités :

Soit livrer le biométhane au consommateur à travers le réseau de gaz naturel qui existe avec ses 500 stations service ; mais, pour le réaliser, il y a encore des difficultés techniques à surmonter pour que le biogaz corresponde aux mêmes exigences de qualité que le gaz naturel.

Soit vendre le biométhane de manière décentralisée dans des stations service situées à proximité des installations de biogaz.

## Les biocarburants synthétiques

Les carburants synthétiques appelés Biomass-to-Liquid (BTL) sont des carburants liquides avec des propriétés similaires à celles du diesel. Ils sont relativement nouveaux et leur production n'est pas encore prête pour la commercialisation. Pour le moment, ils ne sont obtenus que dans de petites installations pilotes de recherche, mais ils représentent un grand espoir pour le secteur des transports.

Description des combustibles BTL	
Matières premières	Plantes énergétiques et bois
Récolte annuelle par hectare	4 050 l/hectare *
Equivalent de combustible	1 l de combustible BTL remplace environ 0,93 l d'essence
Prix sur le marché	Manque de données
Réduction de CO <sub>2</sub> **	> 90 % *
Indications techniques	Peuvent être utilisés purs ou en mélange sans adaptation des moteurs

\* Les données reposent sur des calculs

\*\* Par rapport au diesel

Tableau n° 10 : Description des biocarburants synthétiques (Source : FNR)

Différentes matières premières peuvent servir à la production de carburants BTL : les résidus (paille, résidus biologiques et forestiers), les plantes énergétiques (des taillis à courte rotation, des herbes énergétiques). On estime qu'à partir d'un hectare de terre agricole, environ 4 000 l de carburants BTL peuvent être produits, ce qui correspond à 20 à 25 % environ de la consommation totale de carburants (culture de plantes énergétiques sur une surface de 4–6 millions d'hectares). En Europe, ce potentiel est encore plus important (40 % de la consommation totale de carburants).

La technologie de production des carburants BTL doit passer par deux stades :

En premier, sous l'influence de la chaleur, la pression et l'oxygène, la matière première se transforme en gaz de synthèse dans un réacteur spécial. Par la suite la synthèse des éléments constitutifs du carburant a lieu, puis la transformation en carburant BTL ayant les mêmes qualités que le diesel ou l'essence.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la synthèse du carburant, parmi lesquelles la synthèse de Fischer – Tropsch et la synthèse de Méthanol-Synfuels.



Des gaz de synthèse utilisés pour la fabrication de différents produits (matières plastiques, produits chimiques, carburants) sont produits depuis longtemps à partir d'énergie fossile. Ce qui est nouveau dans la méthode BTL, c'est la possibilité de se servir de la biomasse, à condition de surmonter quelques difficultés techniques.

L'hétérogénéité des matières premières représente l'un des problèmes qui conditionne la qualité du produit fini.

La logistique pose un autre problème, puisque l'offre en matières premières d'origine végétale est décentralisée.

La combustion des carburants BTL se réalise de manière très efficace et complète grâce aux qualités chimiques des hydrocarbures qu'ils contiennent.

Un avantage important des biocarburants synthétiques est leur adaptation possible aux conceptions de moteurs actuelles grâce à des réglages de différents paramètres comme la pression, la température et les catalyseurs lors de la synthèse et le traitement supplémentaire. Ainsi, les carburants BTL peuvent être immédiatement utilisés et sans modification des moteurs, l'approvisionnement pouvant se faire via les infrastructures existantes. L'inconvénient est le coût, encore très élevé, de leur production.

En général, on peut dire que les carburants BTL offrent une option favorable pour l'avenir, sachant que la « maturité » du marché ne pourra être atteinte avant 2010. De tous les biocarburants, ce sont les biocarburants synthétiques BTL qui ont le plus grand potentiel de développement, grâce à leurs qualités citées ci-dessus.

### **Hydrogène**

Une grande partie de la société se représente l'hydrogène comme l'énergie de l'avenir, à cause de ses très bonnes caractéristiques environnementales (absence d'émission de CO<sub>2</sub>) et de son omniprésence en quantité illimitée. L'utilisation de l'hydrogène est intéressante comme source d'énergie future dans le cadre du développement des nouvelles énergies, comme nouveau carburant et pour la production d'électricité à l'aide de piles à combustible.

Les caractéristiques qui devraient permettre une utilisation durable de l'hydrogène sont : son origine, ses bonnes propriétés environnementales et les coûts minimes de sa

production. L'hydrogène est l'élément le plus répandu sur notre planète, mais, à cause de sa réactivité, on le retrouve uniquement en liaison avec d'autres éléments (par ex. l'eau, les hydrocarbures, la biomasse, le gaz terrestre, etc.). Et comme l'hydrogène ne peut être isolé qu'en utilisant de l'énergie, la durée de son exploitation et sa « pureté » se déterminent par le process de production.

Actuellement, l'hydrogène est obtenu à 80 % à partir de l'huile minérale, à 15 % à partir des gaz de charbon et à 5 % environ par la méthode de l'électrolyse. Quand l'hydrogène est produit à partir du gaz terrestre, la quantité des émissions spécifiques du gaz liquide dépasse toujours la quantité du produit de base puisque d'une part la dégradation des hydrocarbures nécessite de l'énergie et d'autre part, lors de ce process, il se dégage inévitablement du dioxyde de carbone. Du point de vue énergétique et environnemental, la production d'hydrogène à partir de biogaz n'est pas intéressante.

L'hydrogène produit à partir du gaz naturel est moins cher que celui produit à partir de sources renouvelables : le prix de l'hydrogène produit à partir du gaz naturel est de 4 centimes/kWh, et pour celui qui est produit à partir des sources renouvelables 12 à 13 centimes/kWh.

Le carburant hydrogène peut être utilisé dans deux types de moteurs : dans les chambres à combustion et dans les moteurs à combustion interne modifiés.

## **III.2 Production des biocombustibles : trans estérification, distillation, pressage**

Dans cette partie seront traitées les méthodes de production des différents types de biocarburants. Une place importante est laissée à la production des huiles végétales et du biodiesel, puisque, ce sont actuellement les principaux biocarburants, en Allemagne.

### **Huiles végétales**

Pour obtenir de bons rendements et une qualité correcte des huiles végétales il faut veiller lors du pressage à ce que la teneur en eau des graines soit de 7 % environ en poids. Pour avoir une bonne qualité de l'huile végétale, il est exigé, en plus, un degré élevé de pureté. Les graines doivent être très bien nettoyées des impuretés et des corps étrangers tels que les pierres ou les objets métalliques, afin de protéger aussi le matériel. Pour le tri, on se sert de séparateurs



magnétiques, d'installations de triage et de tamis.

Le séchage et le tri des graines se font habituellement avant le stockage. S'ils sont bien réalisés et si les graines sont conservées dans des conditions optimales, il n'est pas nécessaire de répéter le séchage et le nettoyage avant la production de l'huile.

La production industrielle des huiles végétales exige de décortiquer les graines comme pour le cas du tournesol. Ensuite, les graines sont broyées dans des broyeurs à rouleaux puis la masse moulue est conditionnée, c'est-à-dire que la teneur en eau et la température sont amenées à un niveau optimal. Dans le cas d'une production décentralisée des huiles végétales, les graines ne sont pas décortiquées au préalable afin d'éviter les dépenses supplémentaires en énergie. Très souvent, le conditionnement de la masse moulue ne se fait pas à cause des dépenses énergétiques élevées et de la nécessité de raffinage, qui est un processus à part.

La production d'huile dans les huileries décentralisées se réalise à travers un seul processus. Les graines oléagineuses alimentent en continu la presse où elles sont traitées de manière complètement mécanique. Après pressage, on obtient de l'huile végétale et du tourteau (la masse pressée).

Des presses à vis sans fin sont utilisées pour le pressage à froid, tout comme pour le traitement industriel des graines oléagineuses. Les presses comportent une vis qui, en tournant, amène les graines vers un cylindre où se forme la pression. Dans ce cylindre pressant, il y a des orifices répartis radialement par lesquels l'huile s'écoule comme par un tamis, et les particules solides restent à l'intérieur. Suivant le type d'orifices, on distingue deux types de presses à vis sans fin : filtre-tamis et cylindres grillagés. Les particules solides arrivent au bout du cylindre et de là sortent par une ouverture. Ces particules solides, appelées tourteaux, sont sous forme de petites plaques ou de lamelles en fonction du type de presse.

Le tourteau obtenu par pressage à froid contient entre 11 % à 18 % de matière grasse. Cela correspond à un rendement d'huile et donc à un degré de pressage de l'ordre de 75 à 85 %. Le tourteau et l'huile ont un rapport approximatif de 2 pour 1, c'est-à-dire qu'à partir d'une tonne de graines oléagineuses sont obtenus 330 kg d'huile environ, soit 1,2 de tonnes d'huile environ, par hectare (pour des terres avec des rendements importants). L'huile végétale obtenue par pressage à froid contient encore des résidus solides. Il s'agit de

résidus des graines qui sont passés par les orifices du cylindre de presse. On les appelle des "troubles" : des substances qui doivent être éliminées lors du processus d'épuration suivant.

Quelle que soit l'utilisation ultérieure de l'huile végétale, la pureté de l'huile est un critère de qualité important. Pour la séparation mécanique des résidus solides de l'huile, il existe deux méthodes qui sont :

La décantation : cette méthode est basée sur la différence de densité entre l'huile et le sédiment. Les appareils simples de décantation sont basés sur la gravité. Les particules solides se déposent dans le fond du réservoir, on parle alors de "précipitation grâce à la gravité".

La filtration : Dans ce cas, le liquide à épurer s'écoule à travers une matière poreuse qui retient les résidus solides.

Quelle que soit la méthode d'épuration appliquée, pour plus de sécurité, l'huile est ensuite filtrée à travers un filtre fin supplémentaire ("filtration de sécurité").

### **Production industrielle des huiles végétales**

Pour la production d'huiles végétales dans les grandes installations industrielles (capacité de 1000 – 4000 tonnes de graines/jour), les graines passent d'abord par de la vapeur chaude et durant ce procédé, la moitié de l'huile est extraite par pressage. Ensuite, l'huile restée dans le tourteau est extraite à l'aide d'hexane, puis la solution d'huile et d'hexane est distillée. L'huile brute est soumise à l'épuration, la décoloration et la désodorisation afin de la raffiner pour l'obtention d'une huile végétale de qualité supérieure. L'application de cette méthode exige une dépense d'énergie d'environ 1,7 GJ/tonne de graines et donne un rendement d'huile pouvant atteindre 99%.

### Traitement préliminaire

Le traitement préalable comprend le nettoyage des graines des corps étrangers à travers leur tamisage (tamis, séparateur pneumatique ou magnétique, etc.) et leur lavage. Après le lavage, on fait sécher les graines dans des séchoirs à passage en ligne ou à tambour, à une température de 25 à 50 °C jusqu'à ce que l'humidité soit de l'ordre de 6 à 8 %.

Dans certains cas, on décortique les graines avant leur pressage. Cela concerne par exemple les graines de tournesol dont les écales ont une teneur en cire élevée, la cire ne devant pas se retrouver dans l'huile. Dans l'huilerie de Tëtoburger, par exemple, les graines du colza se font aussi décortiquer. A cette fin, on se sert d'une combinaison de



rouleaux et de broyeurs qui sont réglés de manière à casser les écales et à les séparer à travers l'aspiration.

Avantages :

- Réduction de l'usure du matériel,
- Augmentation de la capacité de travail et du rendement,
- Meilleure qualité grâce aux températures inférieures dans les chambres de pressage,
- Moins de fibres dans le tourteau,
- Utilisation possible supplémentaire des écales.

Défauts :

- Frais d'investissement élevés,
- Besoin d'avoir des lieux de stockage pour les écales et du transport,
- Perte en graines durant le décortiquage.

A travers le pressage ciblé, à l'aide de rouleaux à mouvements opposés, les graines sont écrasées et serrées sous forme d'écaillés dans ce qu'on appelle la machine à floculation. En conséquence, il se produit un déchiquetage supplémentaire des cellules; ainsi le passage dans la presse où elles se forment en écaillés est optimisé.

#### Pressage

Par le traitement thermique avec de la vapeur chaude, les cellules des grains se déchirent encore plus et on obtient une viscosité inférieure de l'huile produite. Cette humidification est réalisée, dans la majorité des cas, dans la "bassine à chauffer".

La production effective de l'huile se réalise, en fait, lors du pressage préalable. Les graines sont pressées dans la presse à vis, à partir de laquelle on obtient de l'huile et du tourteau avec une teneur en huile résiduaire de 11 à 25 %.

Pour l'extraction de l'huile résiduaire du tourteau pressé, on utilise l'hexane comme solvant. L'hexane fait dissoudre l'huile des cellules du tourteau jusqu'à ce qu'il ne reste que 0,5 % de quantité d'huile résiduaire.

Deux méthodes d'extraction sont principalement utilisées : la méthode de percolation et la méthode d'immersion. Les deux méthodes sont basées sur l'extraction à contre-courant, c'est-à-dire que l'agent d'extraction (l'hexane) et les graines avancent en sens opposés. De cette manière, le contact permanent de l'agent d'extraction non saturé, avec les graines dont la teneur en huiles est basse est considérablement réduit et celui des graines non traitées avec l'agent d'extraction saturé en huile est assuré. La méthode de percolation est souvent appelée méthode d'extraction continue et repose sur le

principe de l'humidification constante de la matière soumise à l'extraction.

L'agent d'extraction coule près de la matière soumise à l'extraction qui l'absorbe. A travers l'alimentation continue de la substance extractrice, on fait écouler le solvant saturé en le remplaçant par un solvant insaturé.

*La méthode d'immersion* s'applique dans les cas où l'extraction de l'huile de la matrice est difficile ; c'est surtout le cas quand la matière est très riche en pâte humide. Par méthode toute la matière oléagineuse est immergée dans l'extracteur. Ce système n'a pas de mouvement forcé provoquant le remplacement du solvant saturé en huile (micelle) par un solvant insaturé. Pour cette raison, il faut assurer l'équilibre de la concentration à travers l'agitation.

L'huile brute obtenue se sépare de la substance extractrice (l'hexane) à la distillation. Pour cela, on profite de la différence des températures d'ébullition des deux liquides. L'hexane s'évapore le premier et se dégage ainsi du mélange. Ensuite, on le capte, et par une réfrigération, on le rend de nouveau liquide, ainsi il peut être réutilisé.

#### Préparatifs

Lors de la "cuisson" du tourteau se dégagent les résidus du solvant restés après l'extraction et la distillation. Dans le "toaster", le tourteau est purifié à travers une deuxième distillation. Ensuite, le tourteau doit être refroidi et séché de nouveau avant son stockage. D'après l'Union des Huileries Allemandes, un autre effet positif de ce procédé est la réduction de plus des deux tiers de la teneur en glucosinolate du tourteau (grâce à sa décomposition sous l'influence de la chaleur).

#### Raffinage de l'huile brute

L'huile brute contient des substances contaminantes, des phospholipides, des protéines, des hydrocarbures, des produits de l'oxydation, des colorants etc., qui peuvent avoir une influence négative sur le goût, l'odeur et la conservation de l'huile. Ces substances sont enlevées lors des différentes étapes du raffinage.

Les huiles brutes obtenues par pressage à chaud contiennent jusqu'à 0,5 % (500 mg/l) de phospholipides (lécithine). Ces matières visqueuses sont thermiquement instables et polymérisent, quand la température dépasse 200°C. Les produits de la dégradation et de la décomposition altèrent le goût et la conservation de l'huile raffinée et peuvent boucher les filtres.

Les méthodes d'élimination des matières visqueuses (dégommage) doivent permettre la réduction de la teneur en phospholipides



jusqu'à une valeur inférieure à 10 mg/l pour rendre possible le process suivant d'aromatation et de réduction de l'acidité. Pour les phospholipides sensibles à l'hydratation, on se sert de l'élimination par l'eau pour les matières visqueuses.

L'huile réchauffée à des températures entre 60 et 90°C se mélange avec 1-3 % d'eau. 30 minutes plus tard environ, les phospholipides gonflés sont éliminés par centrifugation. En ajoutant de l'acide (tartrique ou phosphorique) ou grâce à des enzymes, les phospholipides qui ne peuvent être hydratés sont transformés en composés semi-hydratés et se déposent au fond. Le dépôt d'huile peut être centrifugé par la suite.

#### Réduction de l'acidité

Les acides gras libres de l'huile sont éliminés par neutralisation avec une solution de 15 % d'hydroxyde de sodium ou par la distillation: La neutralisation des acides gras libres peut être réalisée avec des bases alcalines et on obtient alors des savons et de l'eau. Les savons sont entraînés par l'eau et centrifugés, puis les huiles sont séchées.

Les acides gras libres peuvent être aussi séparés à la vapeur chaude, après le process de décoloration. La vapeur d'eau est utilisée comme substance-porteuse à des températures entre 180°C et 260°C et à une pression de 3 à 5 mbar. Les acides gras libres représentent des "produits de dégradation" des lipides et sont un indicateur du degré de détérioration de l'huile. Une grande quantité d'acides gras libres peut provoquer le rancidité de l'huile.

La décoloration (ou blanchiment) consiste à isoler les colorants (chlorophylles, carotènes, etc.), d'enlever les phospholipides, savons et composés soufrés résiduels à travers leur absorption dans l'argile actif, ainsi qu'à dégrader les peroxydes éventuellement présents. L'huile ainsi purifiée, neutralisée et séchée est réchauffée à 90-120°C et mélangée avec l'argile. Après une trentaine de minutes, la terre de blanchissement se sépare du process par filtration. On peut utiliser simultanément du charbon actif.

Les composés volatiles aromatiques et gustatifs (hydrocarbures, aldéhydes, cétones, acides gras libres) sont séparés à 250°C à travers l'utilisation de la vapeur d'eau comme substance-support. Suite aux températures élevées et à l'application, pendant plusieurs heures, de la vapeur d'eau, on pourrait arriver, d'une part, à la dégradation (formation d'acides trans) et d'autre part, à retirer de

l'huile des substances grasses désirées comme les tocophérols (vitamine E).

Le conditionnement à froid s'applique aux huiles à teneur élevée en cire comme par exemple l'huile de tournesol. A travers la réfrigération lente de l'huile jusqu'à des températures inférieures à 10°C, la cire cristallise, ce qui permet de l'enlever mécaniquement.

#### ***Production des huiles végétales dans des installations décentralisées***

En principe, les huileries décentralisées ont une capacité de l'ordre de 0,5–25 tonnes de graines/jour et sont le plus souvent exploitées par des associations ou coopératives agricoles. Le process beaucoup plus simple par rapport à celui des installations centralisées est limité aux étapes techniques suivantes : nettoyage et séchage des graines, pressage et épuration de l'huile obtenue. D'une part, cela permet de garder les substances souhaitées, mais aussi des composés non désirés, comme les phospholipides, en quantités très limitées. Le pressage dans ces installations permet des rendements entre 75 et 90%, les dépenses énergétiques étant approximativement de 0,1GJ/t de grains.

Des graines de bonne qualité et une bonne maîtrise du process sont nécessaires pour obtenir une bonne qualité du produit. Les installations décentralisées permettent la production sur place, ce qui entraîne des avantages par rapport au stockage et au transport et ce qui permet aussi une adaptation rapide aux exigences variables du marché (par exemple changement de graines oléagineuses). Avant la construction et les aménagements de telles installations, il est très important de bien étudier les marchés des produits obtenus.

200 huileries, en Allemagne, travaillent actuellement, selon cette méthode.

#### Traitement préalable

Dans les installations décentralisées, le traitement préalable est réduit :

- Nettoyage
- Séchage,
- Eventuellement, décorticage des graines.

Ces procédés correspondent aux procédés des installations industrielles centralisées et pour cette raison, ils ne seront pas traités de nouveau dans cette partie.

La fragmentation et le traitement jusqu'à l'obtention d'écaillés ont une importance uniquement pour les plus grosses graines, comme celles de tournesol, et visent à empêcher la formation d'une voûte dans l'entonnoir d'alimentation de la presse. Pour



ces étapes, on se sert de deux rouleaux normaux pour fragmenter les graines.

### Pressage

Il est courant de se servir de presses-tamiseur à vis sans fin, qui sont proposées avec des capacités différentes.

D'après le type des graines, la vis a une forme et des hélices différentes. Lors du passage par la vis, les graines sont pressées contre les parois. La séparation de l'huile se fait le long de la section entonnoir par les orifices de la tôle, montée sur les parois inférieures. Par des réglages variables de pression et de temps passé par les graines dans la presse, on peut jouer sur la teneur en huiles résiduelles dans le tourteau et donc sur le degré de pressage. La pression peut changer par réglage de l'orifice de sortie du tourteau et le temps est réglé par les tours de la vis sans fin. Des valeurs trop élevées de pression et de temps de passage dans la presse donnent une productivité faible de la presse avec des dépenses énergétiques élevées.

### Caractéristiques de l'huile brute

Lors de la clarification les matières solides restées après le pressage dans l'huile sont éliminées.

Pour l'huile de colza, cela peut représenter environ 0,5–6,0% en poids de matières solides (sans teneur en huile), provenant des parties solides des graines oléagineuses. Pour l'huile brute, cette teneur en impuretés dépend, entre autres, du niveau d'usure de la presse, de la productivité, de l'humidité des graines et de leur nettoyage préalable. Les matières solides doivent être éliminées si possible complètement, puisque pour la majorité des utilisations il est exigé d'avoir une teneur minimale en matières solides. L'huile brute contient environ 11 à 13 % de substances provoquant des ternissures; ce pourcentage doit être réduit, afin d'obtenir la qualité désirée du produit final.

Par exemple, pour être utilisée comme carburant, l'huile de colza ne peut avoir que 25 mg/kg d'impuretés et la taille des particules doit être inférieure à 5 µm, sinon elles auraient un effet abrasif sur les injecteurs des moteurs.

L'huile végétale obtenue directement après le pressage s'appelle de "l'huile brute". "L'huile brute" est un mélange biphasé de substances liquides et solides. Les indicateurs physiques importants pour la séparation de ces deux phases sont la densité et la viscosité cinématique. La viscosité de l'huile de colza par exemple est de 920,0 kg/m<sup>3</sup> à 15°C.

### Décantation

Tout comme la filtration, la décantation est une méthode de séparation des produits solides des produits liquides. Dans l'industrie huilière, ces méthodes sont utilisées pour la purification de l'huile brute. Dans le cas de la décantation, on se sert de la différence de densité entre le liquide et les matières solides, soit à l'aide de la gravitation, soit par centrifugation. Les deux procédés peuvent être appliqués en continu ou périodiquement. Le comportement lors de la décantation dépend entre autres de la différence de densité, de la taille et de la forme des particules, de la viscosité du liquide et des interactions entre particules.

La décantation exige un stockage prolongé de l'huile dans un réservoir, d'où la nécessité de stockage de l'huile brute. C'est pour cette raison que ce principe est appliqué surtout dans les petites huileries (50 kg graines/h.). Pour réaliser la décantation il suffit de remplir un réservoir et de le vider après une période déterminée. Il existe le système de "Weihestephan" où plusieurs réservoirs de sédimentation sont liés. Le temps de passage de l'huile est de 3-4 jours.

Dans le cas des séparateurs et des décanteurs, la force provoquant la sédimentation peut être augmentée de façon artificielle et ainsi, on réduit le temps que l'huile passe dans le réservoir. Dans les huileries décentralisées, cette méthode était jusqu'à présent très peu répandue.

Après la décantation, il y a une filtration de sécurité à travers un filtre dont la taille des pores est bien définie.

### Filtration

L'huile brute trouble passe dans un filtre. Les matières solides de la suspension sont retenues par le filtre en formant un dépôt pressé. Les moyens de filtration utilisés sont, par exemple, des membranes, des fibres, des tissus. Le liquide qui passe dans le filtre s'appelle *filtrat* et est extrait séparément.

Pour empêcher le bouchage rapide du filtre ainsi que pour favoriser la formation du gâteau de filtration, on utilise des moyens de filtration auxiliaires comme par exemple la cellulose ou les infusoires.

Dans les petites huileries on utilise surtout des filtres-presses à chambres ou à cadres, mais aussi des ampoules verticales de filtration.

Les filtres-presses à chambres et à cadres sont composés de plaques de filtration suspendues parallèlement avec des tissus de filtre entre elles. Les plaques de filtration sont fixées entre deux plaques de pression dont l'une est immobile et l'autre mobile utilisant la force hydraulique, dans la majorité des cas.



Dans le cas des filtres-presses à cadres, le dépôt s'accumule dans la cavité entre le cadre et la plaque de filtration, grâce à la concavité bilatérale du corps des plaques. L'alimentation en huile brute se fait par un orifice sur le côté en face du milieu des plaques qui, au montage, forme un canal. Les surfaces des plaques de filtration sont assemblées de façon à permettre l'écoulement et la sortie du filtrat. Le filtrat passe, par la suite, par le canal formé par les orifices ou par un chenal. L'enlèvement du dépôt peut se faire de manière automatisée ou à la main.

#### La méthode FRIOLEX

La méthode FRIOLEX se distingue radicalement des méthodes universelles de production d'huiles végétales : le pressage des graines n'est pas mécanique. Les graines sont moulues et ensuite l'huile est séparée du tourteau de façon complètement physique.

Les graines bien nettoyées et séchées sont broyées; on obtient une pâte qui est mélangée avec de l'eau et envoyée vers un récipient de décantation, appelé encore *bain*, où est réalisée aussi la centrifugation; ce récipient est aussi appelé *décanteur-centrifuge*. Comme, entre l'huile et l'eau se forme une émulsion qui ne peut pas être séparée par centrifugation, il faut ajouter de l'alcool. Ce moyen auxiliaire décompose l'émulsion de telle façon que lors de la centrifugation il se produit une séparation rapide de la phase huile et de la phase solide. La phase d'huile contient uniquement les composants solubles dans l'huile. Elle est plus pure que l'huile "brute" obtenue par la méthode du pressage, donc il n'y a pas besoin d'épurer les produits visqueux résiduels. L'huile et la pulpe, dénomination de la phase solide, sont uniquement séchées et lors de ce séchage, l'eau est extraite et la substance auxiliaire ajoutée.

Le process entier se fait dans une atmosphère de gaz de protection. La couche d'azote garantit la protection nécessaire pour le travail avec de l'alcool et empêche la création de phénomènes d'oxydation. De cette manière, on garantit l'obtention des vitamines intéressantes et d'acides gras insaturés.

La méthode FRIOLEX est un produit du travail scientifique commun de Vestfalia Séparateur et du docteur Frische SARL ; elle est brevetée et protégée en Europe, au Canada et aux Etats-Unis. Suivant le type de matière première, cette méthode rend possible des rendements d'huile de 90 à 95 %. Des procédés de production pour plus de 40 types d'huiles ont déjà été élaborés.

#### **Biodiesel**

La production du biodiesel est réalisée à travers la trans-estérification de l'huile végétale. Pour cette réaction chimique, l'huile végétale est mélangée avec du méthanol dans un rapport de 1:9 et avec différents catalyseurs (surtout des métaux alcalins, des hydroxydes alcalins et des alcoolates alcalins). Les composés d'ester des triglycérides de l'huile végétale se décomposent à pression ambiante avec une température de 50 à 80°C; les acides gras se lient avec le méthanol et le biodiesel se forme. La glycérine, co-produit par cette méthode, doit être séparée du biodiesel. La glycérine est un alcool qui peut être utilisé dans l'industrie pharmaceutique et alimentaire, ou bien dans l'oléochimie.

En règle générale, on utilise du méthanol en excès car le process de production de biodiesel présenté ci-dessus est basée sur une réaction d'équilibre : la réaction s'arrête lorsque presque deux tiers des composants de base ont réagi. L'excès en méthanol augmente alors le rendement.

Pour le déroulement normal de la réaction, il est important que les produits de base soient très bien mélangés, puisque la solubilité de l'éthanol dans l'huile est limitée.

Comme la glycérine est d'une densité différente, à la fin de la réaction, elle se dépose au fond du réacteur et doit être sortie. La séparation de la glycérine doit se faire rapidement et complètement pour ne pas avoir de réactions inverses. Et, en même temps, on peut récupérer le méthanol.

L'utilisation d'un catalyseur est primordiale pour le déroulement des réactions, sinon il faudrait des températures de l'ordre de 300°C, et cela provoquerait la dégradation thermique des triglycérides.

Après la réalisation de la trans-estérification le catalyseur doit être désactivé ou neutralisé, par exemple par des acides. Avant de procéder à l'utilisation du biodiesel et de la glycérine, ils doivent subir un traitement primaire. Ce process dépend du catalyseur utilisé pour la réaction de trans-estérification.



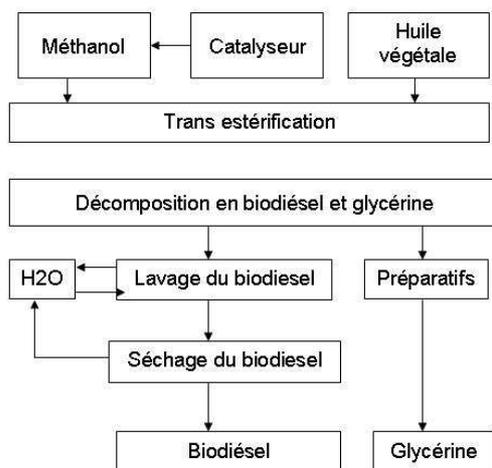


Figure n° 18 : *Process de production du biodiesel*

Pour le déroulement normal du process, il faut une bonne qualité de l'huile végétale: avant la trans-estérification il faut qu'elle contienne des composants comme les phospholipides, les stérols, les tocophérols, les composés de cire et les acides gras libres.

### Bioéthanol

A la différence des huiles végétales, le bioéthanol ne peut être obtenu directement à partir des plantes. Les matières premières pour la production du bioéthanol sont obtenues à partir des plantes après fermentation ; durant la fermentation, les micro-organismes décomposent les hydrocarbures et les transforment en éthanol.

La fermentation alcoolique se fait suivant la formule  $C_6H_{12}O_6 \Rightarrow 2 CO_2 + 2 C_2H_5OH$ .

La pâte fermentée mûre est le produit de base pour la production d'éthanol. La pâte fermentée est chauffée jusqu'à ébullition : l'éthanol dégagé est sous forme de vapeur et mélangé avec les vapeurs d'eau ; il est capté puis, par refroidissement, ces vapeurs sont condensées pour obtenir une solution aqueuse d'éthanol. Cette solution contient des produits résiduels éliminés par la rectification (distillation supplémentaire permettant d'améliorer la qualité d'un alcool en éliminant les produits les plus volatiles). La rectification aide aussi à augmenter la concentration de l'éthanol jusqu'à 96 % ; une meilleure qualité du produit fini est obtenue à travers un process avec plusieurs étapes de rectification.

La production d'éthanol passe par les étapes suivantes : préparation de la matière première, fermentation du sucre transformé, distillation et rectification, récupération de l'eau, traitement

des substances résiduelles, stockage et transport des produits.

En premier lieu, il faut réaliser la dégradation des matières premières contenant de l'amidon et du sucre. Ce process est différent en fonction du type de matière première. Pour le traitement des matières premières contenant de l'amidon, ce dernier est transformé par hydrolyse et addition d'enzymes, en sucre à faible masse moléculaire. Pour l'utilisation de matières premières contenant du sucre, celui-ci, qui se présente sous forme de disaccharide, est dégradé en monosaccharides à l'aide d'une levure, avant la fermentation.

Pendant la fermentation, les monosaccharides sont transformés en éthanol et en acide carbonique, grâce à l'enzyme produite par la levure. Pour cette transformation, on peut utiliser plusieurs méthodes (méthode des lots, en cascade ou méthode de production continue).

Pour récupérer l'éthanol de la pâte fermentée mûre, on utilise la colonne de distillation. Le mélange d'éthanol et d'eau obtenu dans la colonne doit avoir une teneur en éthanol de l'ordre de 97,2 %, concentration obtenue en utilisant un appareil de rectification. Cet appareil est un système fermé dans lequel la pression et la température peuvent être réglées.

En tant qu'additif au carburant pour les moteurs à essence, l'éthanol ne doit pas contenir d'eau. Or le processus de distillation ne permet pas de descendre au-dessous de 4 % d'humidité. On doit donc appliquer une autre technique pour enlever les 4 % d'eau restant. Pour cela, on peut appliquer la distillation avec des agents porteurs ou des méthodes utilisant des membranes et des tamis moléculaires. La pâte à distillation est le produit résiduel de la production d'éthanol et peut servir de fourrage ou d'engrais.

### Biocarburants synthétiques

Comme il a déjà été indiqué, les carburants BTL sont obtenus à travers un process comprenant deux étapes. On peut se servir de différentes matières premières qui ont l'avantage par rapport aux biocarburants traditionnels d'être produites non seulement à partir des graines, mais aussi de la plante en entier.

Pour pouvoir donner l'aspect d'un carburant liquide à la matière première, il faut d'abord la transformer en gaz synthétique.

La formation du gaz est réalisée par des procédés thermo-chimiques dans un réacteur sous pression et en ajoutant de la chaleur et de l'oxygène.



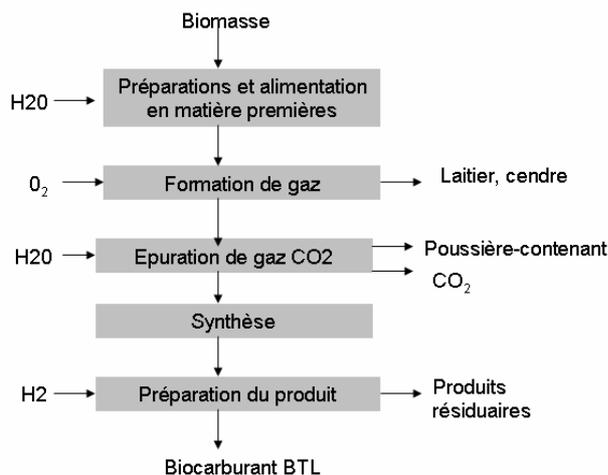


Figure n° 19 : Schéma de production des biocarburants synthétiques

Le gaz synthétique obtenu est composé d'hydrogène (H<sub>2</sub>), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). La méthode décrite n'est pas encore complètement élaborée et nécessite encore des recherches pour trouver les solutions aux problèmes techniques existant.

Avant de pouvoir faire la synthèse des éléments constitutifs des carburants, le gaz synthétique doit être épuré. Les composés sulfuriques et nitriques, ainsi que d'autres composés, doivent être enlevés pour ne pas endommager les catalyseurs utilisés pour la synthèse.

Il est nécessaire d'avoir du monoxyde de carbone pour obtenir le rapport adéquat entre l'hydrogène et le monoxyde de carbone dans le gaz synthétique. Une réaction chimique dans laquelle l'eau et l'oxyde de carbone se transforment en hydrogène et en dioxyde de carbone (ce dernier est ensuite éliminé) permet d'obtenir une augmentation de la teneur en hydrogène dans le gaz obtenu.

Pour obtenir des biocarburants synthétiques, il existe deux méthodes : la synthèse Fischer-Tropsch et la méthode méthanol-carburant synthétique. La première méthode est la plus connue et a été inventée en 1925. C'est une réaction chimique qui se déroule sous haute pression et à des températures comprises entre 200 et 350 °C entre le CO<sub>2</sub> et l'H<sub>2</sub> à l'aide de catalyseurs métalliques. L'autre méthode permet de transformer le gaz synthétique en méthanol et ensuite en carburant.

### Hydrogène

L'hydrogène est produit à partir de biomasse par un processus de gazéification connu depuis plus de 100 à partir de charbon, huiles ou gaz. Durant ce processus, la matière de

base est chauffée avec de l'eau jusqu'à 800°C et le gaz synthétique obtenu est composé d'hydrogène (H<sub>2</sub>), de monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), qui est ensuite transformé dans un réacteur en hydrogène et dioxyde de carbone. Les gaz obtenus ainsi peuvent être facilement séparés les uns des autres.

### III.3 Utilisation des biocarburants : utilisations potentielles, solutions techniques

Comme tous les carburants, les biocarburants peuvent être utilisés comme carburant pour les moteurs et comme combustible pour le chauffage. L'utilisation des biocombustibles pour le chauffage vise la production de chaleur. Les biocarburants peuvent remplacer les carburants de chauffage (le mazout) dans les installations de chauffage. Le fonctionnement de centrales thermoélectriques de cogénération pour le chauffage, avec des biocombustibles comme le biodiesel ou l'huile végétale pure, est techniquement réalisable. Dans les centrales de cogénération de chauffage, la transformation de l'énergie se fait dans un moteur à combustion interne dont la chaleur dégagée est utilisée pour du chauffage et son énergie mécanique sert à la production d'électricité à l'aide d'un générateur.

L'utilisation des biocombustibles comme carburant pour les moteurs sert à produire de l'énergie mécanique utilisée comme force motrice, par exemple pour les voitures, les camions, les chalands, les bateaux (secteur des transports). Les générateurs pour la production d'électricité, les sondes à pétrole ou les pompes sont des exemples d'utilisation des biocarburants comme carburants pour du matériel fixe. Lorsqu'il s'agit d'appareils mobiles comme les pompes à eau, les presses à huile, les faucheuses à herbes ou les hacheuses, on parle de matériel mobile.

Parmi toutes ces possibilités d'utilisation de biocombustibles, il est préférable d'utiliser l'huile végétale pure dans des lieux écologiquement fragiles.

### Huiles végétales

L'huile végétale permet des utilisations variées. En tant que produit végétal, elle est surtout utilisée dans l'alimentation humaine soit sous forme d'huile soit comme ingrédient pour d'autres produits alimentaires : l'huile procure à l'organisme des éléments très importants pour son métabolisme. Elle peut

être aussi ajoutée aux fourrages et les résidus de sa production peuvent être directement utilisés pour l'alimentation animale.

Grâce à sa teneur énergétique exceptionnellement importante, l'huile végétale peut être un carburant adéquat, ainsi qu'un combustible. Elle peut donc être utilisée soit dans les moteurs à combustion interne soit pour la production simultanée d'énergie électrique et thermique, soit directement pour la production d'énergie thermique.

D'autre part, l'huile végétale possède de bonnes propriétés en tant que substance lubrifiante. L'huile végétale pure peut servir de lubrifiant dans des lieux pas très chargés. Pour des chargements plus intenses, on lui rajoute des additifs.

Les propriétés environnementales positives de l'huile végétale, comme son faible potentiel à polluer les eaux, permettent son utilisation comme lubrifiant pour les fendeuses de bois ou pour les flèches de chemins de fer, c'est-à-dire dans des situations où l'huile se retrouve dans la nature. De même, elle est utilisée dans le secteur du bâtiment ou pour les systèmes hydrauliques où il y a des fuites.

Les huiles végétales sont utilisées dans l'industrie chimique pour remplacer les matières premières minérales, dans différents domaines.

Puisque les huiles végétales, tout comme le diesel, sont des *carburants liquides*, il est possible de les utiliser dans les moteurs diesel. Bien sûr, les huiles végétales présentent des propriétés différentes de celles du diesel puisqu'elles possèdent une structure chimique différente. De ce fait, ces caractéristiques doivent être compensées par des modifications des moteurs.

Quelles que soient les méthodes de production et de préparation, la viscosité des huiles végétales est quelquefois plus élevée que celle du diesel. Ainsi, ce n'est qu'à des températures relativement élevées que les valeurs de viscosité des deux carburants se rapprochent. L'huile végétale est plus dense, ce qui pose des problèmes à l'injection.

A des températures basses, la densité de l'huile végétale la rend difficile à pomper.

L'indice de cétane de l'huile végétale est inférieur à celui du diesel, son inflammation est donc plus difficile, ce qui nuit à l'allumage des moteurs. C'est pour cela que, durant la phase d'allumage et de réchauffement des moteurs, la combustion du carburant n'est pas complète.

Un autre fait qui rend plus difficile la combustion des huiles végétales dans les moteurs traditionnels est le risque de formation de dépôts carbonés, c'est-à-dire la cokéfaction. Cela peut se produire, car les

huiles végétales qui ne sont pas distillées contiennent des substances qui se décomposent thermiquement à des températures inférieures à la température d'ébullition de l'huile. Le risque de cokéfaction est néfaste pour les injecteurs et pour les parois de la chambre de combustion. Les conséquences éventuelles sont le blocage des segments de pistons.

Pour pouvoir utiliser l'huile végétale dans des moteurs diesel, il est nécessaire de réaliser des modifications, en particulier une plus grande chambre de combustion, une plus forte turbulence du mélange de combustion dans la chambre et/ou une combustion à des températures plus élevées.

### **Moteurs spéciaux pour les huiles végétales**

L'utilisation de l'huile végétale pure comme carburant nécessite l'adaptation des moteurs à ses propriétés. Il s'agit de modifications importantes pour avoir une meilleure pulvérisation de l'huile à l'injection, des températures de combustion plus élevées et une plus grande chambre de combustion.

Les moteurs en série qui fonctionnent d'après la méthode antichambre et chambre de précombustion à turbulence peuvent être plus facilement modifiés.

Les moteurs spéciaux pour les huiles végétales sont surtout à injection directe.

Le nom de la société ELSBET est inséparablement lié aux moteurs pour huile végétale, car elle a présenté le premier moteur fonctionnant avec de l'huile végétale à la fin des années 70. Une particularité spéciale du moteur de la société Elsbet est la méthode appelée "Duotherm" : le carburant est injecté dans la chambre de combustion tangentiellement afin de créer une turbulence. Cela crée une zone centrale relativement chaude et une zone extérieure plus froide. Suite à cela, le moteur nécessite moins de refroidissement. Au début, de tels moteurs étaient proposés uniquement pour les voitures et les camions. Depuis, la société Elsbet s'est spécialisée dans le domaine des technologies de modification des moteurs. Des moteurs spécialisés fonctionnant à l'huile végétale sont utilisés aujourd'hui exceptionnellement pour une application fixe. Il existe des sociétés qui proposent des moteurs à injection directe adaptés aux propriétés spécifiques des huiles végétales et avec un coefficient d'efficacité de 40 %. Deux de ces moteurs spéciaux sont présentés sur la figure n°20.



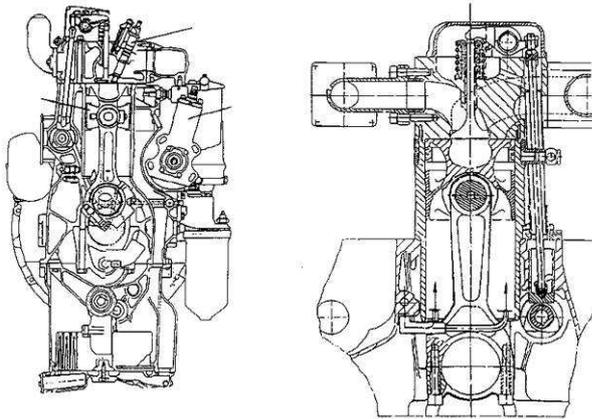


Figure n° 20 : Deux exemples de moteurs à huiles végétales

La chambre de combustion est dans le piston qui est fabriqué avec une matière moins diathermique que celle du cylindre. De cette manière, on atteint des températures plus élevées durant la combustion.

#### **Systemes à un seul réservoir**

Au contraire des systèmes à deux réservoirs, les voitures modifiées pour fonctionner avec un seul réservoir ne peuvent rouler qu'avec de l'huile végétale. Dans ce cadre, les moteurs techniquement plus anciens à injection indirecte de l'huile dans la chambre de combustion sont plus facilement adaptables. Pour appliquer ce principe, des modifications de l'injection directe sont aussi proposées. L'automobile doit-elle uniquement fonctionner avec de l'huile végétale ou pas ? La décision doit être prise au cas par cas.

Les adaptations nécessaires sont différentes suivant l'automobile, le type et l'état du moteur ; souvent les détails techniques sont un secret commercial de l'entreprise. Les conceptions sont par contre identiques.

Pour les automobiles avec des moteurs à chambre, les modifications se limitent surtout au système d'alimentation en carburant et à l'électronique, au remplacement des matériaux non compatibles avec les huiles végétales (risque d'usure, à cause de certains matériaux réagissant comme catalyseurs !). Pour garantir l'alimentation correcte du moteur en carburant on fait aussi d'autres modifications : cela peut être un préchauffage du carburant (bien sûr pas dans le réservoir !) ou bien l'utilisation d'une pompe plus puissante pour le carburant ; souvent il faut mettre un filtre pour le carburant d'une plus grande capacité. Principalement pour les moteurs à injection directe, il faut aussi faire des modifications dans le système d'injection et d'atomisation de l'huile. Même si certaines pompes se sont montrées incompatibles avec l'huile végétale, l'injection de l'huile peut se faire soit par des buses

chauffées, soit par des buses à pression et temps d'injection modifiés. On peut faire aussi des modifications des bougies. Il y a des sociétés qui réalisent des modifications sur des parties du moteur comme la culasse, les soupapes, les douilles de guidage des soupapes, les pistons, les segments etc.

#### **Systemes à deux réservoirs**

Les problèmes chez les automobiles traditionnelles diesel fonctionnant à l'huile végétale sont principalement causés par la viscosité supérieure et la température d'inflammation plus élevée de l'huile végétale. Ils peuvent être facilement réglés par l'installation d'un deuxième réservoir. On parle alors de *bicarburant* (utilisation de deux types de carburants). Pour la phase d'allumage du moteur, on utilise du diesel. Après l'allumage et le réchauffement du moteur, on utilise l'huile végétale en régime de travail. A la fin de l'utilisation, on passe de nouveau au diesel, pour un court temps, afin de purger les restes de l'huile végétale du système.

On installe un deuxième réservoir pour le diesel et le réservoir principal sert pour l'huile végétale. L'allumage se fait avec le carburant diesel du réservoir auxiliaire. Suit la phase de chauffage durant laquelle l'huile est préchauffée dans un deuxième circuit de circulation et devient moins dense. Quand la température de travail est atteinte, on change de régime de travail et on passe à l'huile végétale. Le changement se fait automatiquement grâce à une valve magnétique branchée sur un capteur de température ou manuellement à partir du tableau de commande. Sur le tableau de commande, il y a des appareils de contrôle encastrés pour avoir des informations sur l'état et le type de carburant utilisé. A la fin de l'utilisation de l'automobile, afin de nettoyer le système des huiles végétales restées on doit de nouveau passer au diesel, afin d'enlever les restes d'huile végétale du circuit.

Les modifications dans le système d'alimentation pour le carburant sont identiques à celles des systèmes à un seul réservoir. Il faut cependant ajouter un court-circuit de la chaîne pour le carburant qui, en combinaison avec la valve magnétique, permet de réaliser le préchauffage de l'huile végétale.

#### **Types de moteurs**

Pour l'utilisateur de l'automobile modifiée pour travailler avec de l'huile végétale, peu de choses changent. Les différences de puissance et de consommation sont minimes et il y a peu d'usure supplémentaire. En outre, l'utilisateur peut toujours n'utiliser que du diesel, s'il ne trouve pas d'huile végétale.

En Allemagne, les biocarburants sont exonérés de l'impôt sur les huiles minérales, ce qui est un avantage. Comme l'automobile peut aussi fonctionner avec du diesel, les économies d'impôt sur l'automobile elle-même ne sont pas possibles.

Les modifications *des moteurs à chambres de turbulence* pour travailler avec des huiles végétales pressées à froid sont peu onéreuses. Pour ces moteurs, il existe les deux types de systèmes : avec un ou deux réservoirs.

Des dépenses plus importantes sont nécessaires pour modifier les automobiles avec des moteurs diesel à injection directe. Les moteurs à injection directe avec des pompes consécutives et distributives d'injection peuvent être modifiés en utilisant aussi le système à deux réservoirs.

Pour les *moteurs à injecteur-pompe*, seuls les systèmes à deux réservoirs de carburant sont a priori proposés. Pour les modifier sans ajouter de deuxième réservoir, un très haut niveau technique est nécessaire, mais de tels moteurs sont aussi proposés au marché.

Les adaptations des moteurs *Common-Rail* ne sont proposées que par quelques entreprises et ce ne sont que des systèmes à deux réservoirs. Cependant, il n'y a pas assez de recul sur leur utilisation et l'existence d'un marché n'est pas prouvée.

#### *Application fixe*

Dans des lieux fragiles du point de vue écologique, on choisira, de préférence, comme carburant l'huile végétale. D'après l'opinion de certains spécialistes, l'utilisation des huiles végétales doit se concentrer dans ces endroits car comme combustibles, elles émettent moins de CO<sub>2</sub> et leur biodégradabilité est un atout dans les zones écologiquement fragiles. Limiter l'utilisation des huiles végétales dans certaines zones est d'autant plus nécessaire qu'il n'est pas possible de remplacer tout le diesel utilisé dans le transport de passagers et de marchandises car cela demanderait des superficies agricoles immenses.

Citons comme exemples d'utilisation fixe les générateurs électriques, les chaudières et les centrales thermoélectriques à cogénération. Les zones écologiquement fragiles sont, par exemple, les zones agricoles et forestières, les régions menacées d'inondations, les parcs naturels protégés et les hautes montagnes. Ces régions ne sont pas toujours desservies par les réseaux publics d'électricité et de chauffage et peuvent être approvisionnées grâce à des centrales thermoélectriques.

Cependant, l'exploitation des centrales thermoélectriques avec de l'huile de colza n'est pas toujours économiquement rentable.

La mauvaise qualité de l'huile peut diminuer le temps d'exploitation total et augmenter les coûts de maintenance. Un haut niveau d'impuretés peut donc entraîner des coûts d'exploitation et de maintenance prohibitifs. C'est aussi une raison pour laquelle l'utilisation de l'huile de colza est surtout conseillée dans des marchés de niche où les aspects environnementaux sont plus importants que les aspects économiques.

#### **Biodiesel**

L'ester méthylique de colza (EMHV) ou biodiesel est le biocarburant le plus répandu en Allemagne. Il est produit à partir de l'huile végétale pure par une trans-estérification et le carburant obtenu est très proche par ses propriétés physico-chimiques et sa structure moléculaire du diesel. De toute façon, il n'est pas conseillé de l'utiliser sans limite dans les moteurs diesels sans autorisation spéciale du motoriste.

Le biodiesel dissout les sédiments formés durant une longue utilisation du diesel et c'est pour cela qu'il est conseillé de changer le filtre de carburant après avoir rempli plusieurs fois le réservoir avec du biodiesel. Beaucoup de constructeurs automobiles recommandent d'augmenter la fréquence des vidanges. Comme les surfaces vernies sont sensibles, il faut éviter leur contact avec le biodiesel, ou après tout contact éventuel, bien nettoyer ces surfaces. Un autre inconvénient possible est la dilution de l'huile moteur, qui se produit rarement, surtout après une exploitation prolongée à faible charge. Les vidanges doivent être faites régulièrement.

Les pertes de puissance sont inférieures à ce que l'on pourrait attendre vu la teneur énergétique inférieure par rapport au diesel (entre 0 % et 5 %) et cela s'explique par les autres propriétés du biodiesel.

Le biodiesel – tout comme le diesel – a besoin d'additifs pour être utilisé en hiver. En Allemagne, l'utilisation de ces additifs se fait en respectant l'Accord entre la Communauté Ouvrière pour la gestion de la qualité "biodiesel" (AGQM) et les stations-service qui en font partie (environ 1 400) un mois avant le délai indiqué dans la norme. Le biodiesel résiste au froid jusqu'à -20 °C. Les expertises confirment la réduction de 2,2 kg de gaz à effet de serre par litre de biodiesel utilisé (par rapport au diesel). Cependant, d'après la norme DIN EN 14214 applicable aux moteurs récents, le biodiesel ne pourrait pas répondre aux normes européennes concernant les émissions polluantes.



Il est techniquement possible de mélanger le biodiesel avec le diesel, quelles que soient les proportions. Mais les mélanges proposés sur le marché sont limités. Un carburant ne peut être vendu, dans les stations-services allemandes, que s'il correspond aux exigences de la norme DIN EN 590. Pour cette raison l'addition de l'EMHV est limitée à 5 %.

La réglementation pour les consommateurs est différente. Ils peuvent mélanger dans un réservoir du biodiesel et du diesel sans être obligés de payer un impôt, à condition qu'il n'y ait pas de vente ensuite. Il faut, par contre, savoir que le mélange obtenu ne correspond ni au standard du diesel (DIN EN 590), ni à celui du biodiesel (DIN EN 14214). La responsabilité pour le mélange est donc supportée par le consommateur. Ces exigences concernent aussi les livraisons du diesel normal et du biodiesel dans le réseau commercial. Pour ne pas être obligé de payer d'impôt, les deux carburants doivent être transportés dans des réservoirs différents.

### **Bioéthanol**

Le bioéthanol pur ne peut pas être directement utilisé dans les moteurs classiques, uniquement dans les moteurs spécialement conçus pour l'éthanol et fonctionnant avec de l'alcool pur.

Le bioéthanol peut être mélangé au diesel jusqu'à 30 % et après modification du moteur.

Le mélange de l'essence ne présente pas de difficulté et est devenu une pratique courante. Pour ce type de moteurs, le bioéthanol peut être additionné à l'essence jusqu'à 20-25 %, sans modification du moteur. Une teneur plus élevée en alcool pourrait provoquer la séparation des composants du mélange, d'où des problèmes. Le bioéthanol peut être utilisé comme carburant après sa transformation en *éthyl tertio butyl éther (ETBE)*.

#### *Utilisation comme carburant pur*

L'utilisation du bioéthanol pur comme carburant est possible uniquement dans des moteurs à combustion interne spécialement conçus, dans lesquels on peut utiliser un mélange d'éthanol et d'eau de 70 à 100 % en volume d'éthanol. Il faut ne pas oublier que toutes les parties du moteur qui seront en contact avec le carburant doivent lui résister. Sinon, une corrosion est possible puisque une grande partie des matériaux utilisés pour l'étanchéité sont sensibles à l'alcool. Cela ne concerne pas les matières comme l'acier, le nylon, le polyéthylène HD et le polypropylène. L'adaptation des moteurs à essence à l'éthanol est relativement aisée : il faut surtout faire attention de ne pas provoquer des problèmes de fonctionnement. Le démarrage à froid se fait grâce à l'installation d'un réservoir

auxiliaire pour le carburant auxiliaire de démarrage. L'air aspiré au démarrage doit être réchauffé au préalable à 90 °C, mais cela réduit la puissance maximale du moteur.

En conclusion, l'adaptation d'un moteur à essence pour une utilisation avec de l'éthanol pur n'est pas conseillée, puisque elle demanderait une plus grande compression et d'autres adaptations supplémentaires.

#### *Utilisation comme carburant en mélange*

L'addition d'éthanol à l'essence ou au diesel est possible mais, dans le cas du diesel, ce n'est pas économiquement justifié par rapport à la réglementation actuelle.

Comme il a déjà été dit, un mélange d'éthanol et d'essence avec 20-25 % en volume d'alcool ne pose pas de problème et ne demande pas de modification supplémentaire du moteur. Mais, la réglementation limite à 5 % la part d'éthanol. Le mélange d'éthanol avec les carburants classiques dans les moteurs à carburateur peut entraîner des changements rapidement présentés ci-dessous.

La teneur en éthanol-eau peut menacer la stabilité des phases et provoquer leur séparation ; cela peut être évité en ajoutant des solvants.

Les matériaux du moteur doivent résister à ce mélange, car ce dernier possède des propriétés de solvant pour les matières élastomères et peut entraîner la corrosion des métaux.

Ces problèmes peuvent être résolus en ajoutant certains additifs.

#### *Utilisation comme éthyl tertio butyl éther (ETBE)*

Grâce à une transformation chimique à partir de l'éthanol, l'éthyl tertio butyl éther est produit : c'est un additif ajouté en principe à l'essence pour améliorer l'indice d'octane. Il est produit par estérification dans des installations pétrochimiques, en ajoutant de l'isobutène issu des énergies fossiles.

#### *Biocarburants synthétiques*

Comme les carburants BTL sont produits synthétiquement, leurs qualités peuvent être spécialement modifiées par rapport à la méthode de combustion. Ainsi, ils pourraient répondre au futur développement de la technique.

### **Hydrogène**

Le carburant hydrogène est utilisé pour deux types de moteurs : générateurs électrochimiques avec un moteur électrique ajouté et moteurs à combustion interne modifiés.



*Générateurs électrochimiques* : Dans les générateurs électrochimiques, l'hydrogène peut être transformé en électricité avec un coefficient d'efficacité élevée. Ces générateurs peuvent être fixes (petites filières d'électricité et d'énergie thermique) ou être utilisés dans le secteur des transports. Dans ce secteur, ils ont l'avantage d'avoir un haut coefficient d'efficacité à faible charge (exploitation en ville). Il existe encore des problèmes en ce qui concerne le stockage pour des raisons techniques ou économiques. L'industrie automobile est très active par rapport aux recherches scientifiques et dans un délai très court, on devrait trouver sur le marché des solutions intéressantes.

#### *Moteurs à combustion interne*

En principe, l'hydrogène peut être utilisé comme carburant dans les moteurs essence comme dans les moteurs diesel, mais son utilisation dans les moteurs diesel n'est pas économiquement rentable. Dans les moteurs essence classiques, la préparation du mélange peut être réalisée selon deux méthodes : la préparation du mélange à l'extérieur permet une construction plus simple et la pression d'injection est plus faible, mais la cylindrée des moteurs est plus petite et la combustion est irrégulière. La préparation du mélange à l'intérieur demande une plus grande pression d'injection et nécessite plus de coûts techniques.

La large gamme de biocarburants et biocombustibles présente un potentiel énorme. Malgré cela, il est peu probable que, dans les vingt prochaines années, l'on puisse remplacer plus de 20 % des carburants fossiles (essence ou diesel) par les biocarburants ou d'autres combustibles alternatifs. Le gouvernement allemand, en coopération avec un groupe d'experts, a élaboré quatre autres options qui, pour des raisons environnementales et économiques, représentent une alternative durable aux carburants traditionnels. Il a été prouvé que c'est surtout l'optimisation des moteurs classiques et la mise au point de moteurs efficaces, innovants et à faible consommation de carburant qui permettront la réduction des émissions polluantes et garantiront la sécurité énergétique. Les options prévues sont l'augmentation de l'efficacité des moteurs essence et diesel, le futur développement de la production des biocarburants synthétiques, la mise sur le marché des moteurs hybrides et la mise en place d'une filière hydrogène.

## IV. Aspects économiques

### IV.1 Rentabilité de la production agricole

La création d'un marché national pour les biocarburants est primordial pour l'agriculture afin de diminuer l'importation de ces carburants, créer de nouvelles sources de revenus et de nouveaux emplois.

La bioénergie peut faire partie d'une politique économique agricole active.

L'augmentation de la productivité et la diminution de la population entraînent une surproduction alimentaire d'où une diminution des prix du marché. L'embavement des terres avec des plantes et cultures énergétiques peut être une solution pour les terres agricoles qui ne rapportent plus de revenus via les cultures alimentaires.

D'après une évaluation du Ministère allemand de l'environnement, le secteur des énergies nouvelles pourrait créer environ 130 000 emplois, dont presque 50 000 dans le domaine de la bioénergie.

Pour que les huileries et les installations d'estérification soient effectivement rentables d'un point de vue économique, la vente de la production principale, respectivement l'huile végétale ou le biodiesel, doit être complétée par la vente des coproduits que sont le tourteau de colza ou la glycérine. Les quantités de coproduits sont proportionnelles à celles des produits principaux. La demande pour les coproduits est différente de celle pour l'huile de colza ou le biodiesel, puisque les utilisations potentielles du tourteau et de la glycérine sont différentes.

A titre d'exemple sur des huiles végétales, nous allons examiner ci-dessous le modèle d'une filière régionale.

Ce modèle de filière régionale en circuit fermé est situé dans une région géographique limitée : sur la figure n° 21 est présenté le circuit de l'huile végétale de la récolte à ses utilisations possibles, en passant par la production. Le circuit est bouclé par la pousse de la nouvelle culture.

Jusqu'à la récolte, ces plantes utilisent la même quantité de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) que celle dégagée lors de la combustion des huiles végétales. Pour que le cycle du CO<sub>2</sub> soit réellement fermé, le transport doit être limité à de courtes distances. Idéalement, les graines sont traitées dans une unité décentralisée, à 50 km au maximum. Les transports limités à de courtes distances non seulement réduisent



les émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi permettent d'équilibrer financièrement la filière.

Ce type de filière régionale crée localement de la valeur ajoutée : l'argent qui auparavant partait pour des régions ou provinces éloignées reste dans la région et peut être réinvesti localement. Cette circulation de fonds permet de sauvegarder, voire de créer, des emplois. Bien sûr, pour que cette filière locale se développe, la structuration du marché local doit le permettre. Pour une huilerie par exemple, il faut garantir l'approvisionnement en graines, mais aussi un marché pour l'huile et le tourteau.

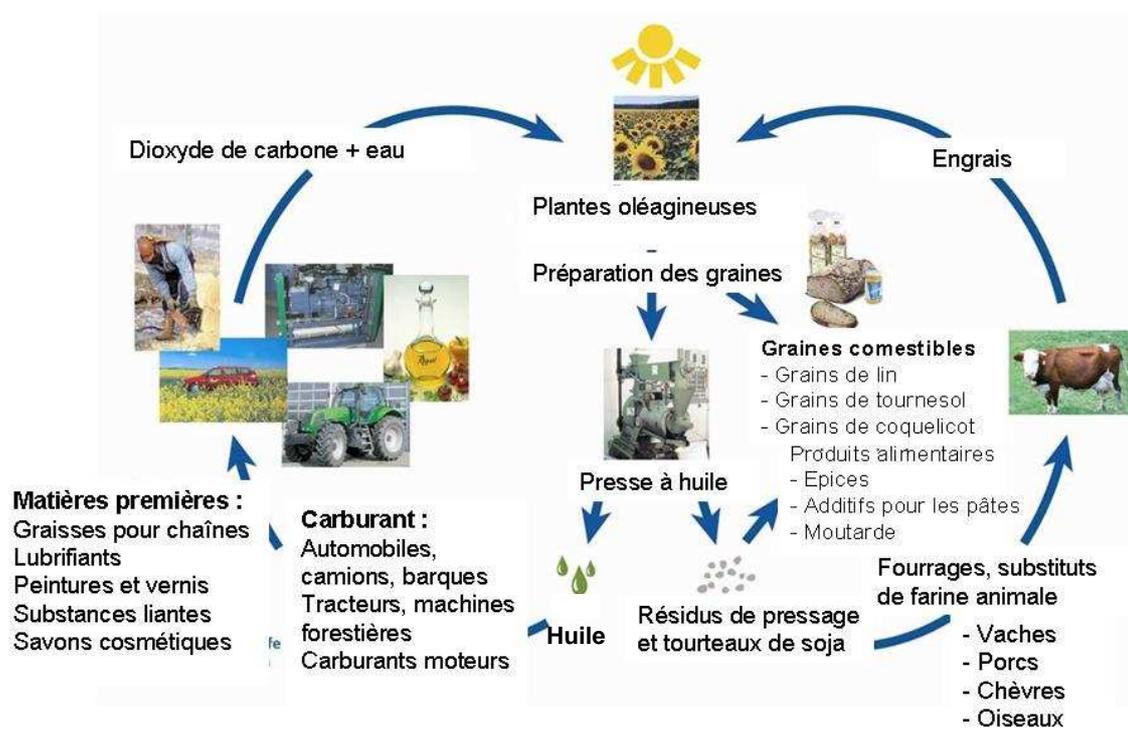
Sur les marchés nationaux et internationaux, le cours du colza et de l'huile de colza est déterminé en fonction de facteurs extérieurs. Cela signifie que le prix n'est pas principalement influencé par la demande et l'offre pour ces produits, mais aussi par l'offre en produits de substitution. Au sein de l'Union européenne, l'Allemagne est l'un des plus gros producteurs de colza et de dérivés du colza. Malgré cela, le cours des graines dépend de facteurs internationaux. Dans le monde, le cours des différents oléagineux et de leurs dérivés dépendent des marchés internationaux et de l'interchangeabilité des différents produits. Pour les cultures, les cours dépendent principalement de celui du soja et le cours des huiles et graisses végétales

dépend de celui des huiles de soja et de palme.

Régionalement, les agriculteurs, les propriétaires des huileries et le vendeur (celui qui met le produit sur le marché) ont des positions différentes. En théorie, ces trois acteurs déterminent ensemble, avec les consommateurs, le prix de l'huile de colza et du tourteau de colza en respectant le principe de l'offre et de la demande.

Il semblerait actuellement que ce sont les propriétaires des huileries qui seraient en position de force. En effet, le prix de l'huile de colza est principalement fixé par la demande de l'industrie alimentaire et de la pétrochimie (biodiesel) et pas vraiment par l'offre en colza. Si le colza est bon marché et l'huile de colza chère, cela entraîne des bénéfices pour les huileries. Les producteurs de graines oléagineuses doivent constamment surveiller le marché pour pouvoir réagir à temps en fonction des fluctuations de ce dernier. Mais, même dans ce cas, les anticipations par rapport aux évolutions du marché n'ont qu'un effet marginal sur les prix. Les mécanismes de bourse comme les cotations futures, les contrats à terme d'instrument financier offrent aux agriculteurs l'opportunité de garantir le prix et prennent donc une importance croissante pour ce marché.

Figure n°21 : Cycle d'une filière régionale



## IV. 2 Calcul coûts–bénéfices

Les biocarburants doivent être concurrentiels par rapport aux carburants classiques non seulement d'un point de vue environnemental et technique, mais aussi économique. Pour le moment, les biocarburants restent plus chers que les carburants fossiles. Grâce à l'exonération de la taxe sur les carburants, les biocarburants ont un marché et sont attractifs par rapport aux carburants conventionnels.

La majorité des nouvelles techniques de production des biocombustibles est encore en phase de développement et n'est pas encore assez adaptée pour le marché. Les opinions concernant l'effet économique sont encore craintives surtout par rapport aux biocarburants appelés biocarburants de deuxième génération.

Concernant les huiles végétales et le biodiesel il y a une expérience excellente depuis plusieurs années : ci-après sont présentées quelques observations de coûts et de revenus, concernant les huiles végétales.

(Bh = heures d'exploitation)

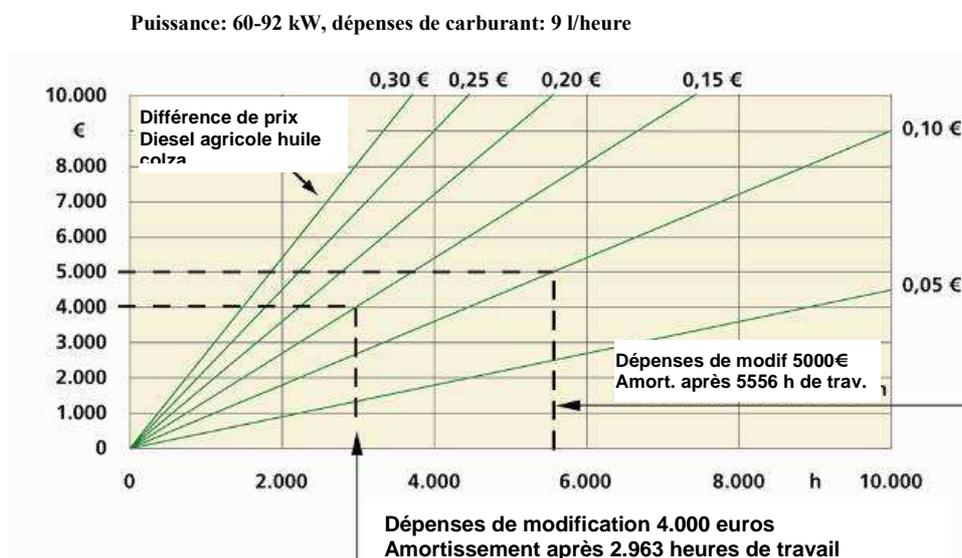


Fig. n°22 : Amortissement de la modification d'un tracteur

Puissance : 60-92 kW, consommation en carburant : 9 l/heure  
 Différence de prix  
 Diesel agricole – huile de colza  
 Dépenses de modification 5.000 euros  
 Amortissement au bout de 5.556 heures de travail  
 Dépenses de modification 4.000 euros  
 Amortissement au bout de 2.963 heures de travail



**Tableau n° 10 : Bénéfices à partir des ventes de produits finis des huiles végétales**

Huile végétale comme carburant (machines mobiles et fixes)	0,45 – 0,65 €/l
Huile végétale comme huile comestible	Environ 2,50 €/l
Huile végétale pour le domaine de la chimie et la technique	0,38 – 0,56 €/l
Huile à chaînes de scie et comme moyen de séparation	Environ 1,00 €/l
Tourteau alimentation animale	11,20 – 17,90 €/ql
Utilisation thermique du tourteau	5,00 – 8,00 €/ql
Tourteau comme engrais organique	2,60 – 6,10 €/ql
Tourteau comme co-produit de la production de biogaz	0,00 – 6,00 €/ql

#### *Revenus de la vente des produits finis*

Dans le tableau n° 10, sont indiquées les bénéfices de l'huile végétale et des dérivés de l'huile végétale, ainsi que du tourteau. Les investissements pour la construction d'une installation moderne de production d'huile végétale et les coûts de fonctionnement sont primordiaux pour évaluer la rentabilité économique, évaluer les bénéfices et la création potentielle de valeur. En examinant les revenus possibles, on voit que les différences sont très importantes. Cela signifie que la rentabilité du traitement décentralisé des graines oléagineuses est fortement liée avec les prix du produit et marchés potentiels. Le développement de marchés pour le colza et ses dérivés est de nouveau lié aux marchés globaux du soja et du tourteau de soja.

#### *Amortissement de la modification d'un tracteur*

Sur la figure n°22 est montrée la relation entre les frais de modification d'un tracteur et les heures d'utilisation pendant lesquelles cette modification est amortie. On considère que l'amortissement a lieu lorsque les économies réalisées par l'utilisation de l'huile de colza au lieu du diesel agricole couvrent les dépenses engendrées par la modification du tracteur. Ainsi, la durée de l'amortissement dépend de la différence de prix entre l'huile de colza et le diesel agricole. Prenons l'exemple d'une consommation en carburant de neuf litres par heure : la somme de 4 000 euros sera épargnée après 4 000 euros / 0,15 euros/l / 9 l/h = 2 963 heures d'utilisation si la différence des prix entre les deux carburants est de 0,15

euros. Ce calcul est, bien sûr, très simplifié car il ne tient compte que de la différence des prix, mais pas des aspects productifs et économiques comme les intérêts manqués, etc. Par contre, les relations de cause à effet deviennent plus claires : plus le prix de l'huile de colza baisse est inférieur à celui du diesel agricole, plus le coût de la modification du tracteur est vite amortie.

Depuis début 2005, avec les changements réglementaires concernant le diesel agricole, l'utilisation de l'huile de colza est plus attractive économiquement. Cela concerne principalement les exploitations agricoles qui consomment plus de 10 000 litres de diesel par an, car, dans ce cas, la taxe sur le diesel n'est pas remboursée. La différence entre les deux prix a encore augmenté (plus de 0,20 euros par litre), d'où une diminution importante de la durée d'amortissement. Presque les mêmes explications sont valables, pour le biodiesel.

Les exploitations agricoles consommant beaucoup de carburant devraient essayer l'utilisation du biodiesel comme une alternative sérieuse au diesel agricole.

#### *Comparaison des frais : excavateur*

Prenons l'exemple d'un excavateur avec un volume d'huile hydraulique de 300 litres. Un filtre normal au prix de 100 euros est monté ; un filtre de bio-huile coûte 150 euros. Le coût de la vidange est de 100 euros ; les frais d'analyse en laboratoire de l'huile sont aussi de 100 euros. L'huile minérale coûte 1,50 euros/litre, la bio-huile la plus chère est à 5 euros/litre. L'utilisation d'huile minérale classique pour un chargement entraîne les frais suivants : 300 l x 1,50 euro / litre = 450 euros. Il faut y ajouter les 100 euros pour un nouveau filtre et le coût de la vidange, on obtient un coût total de 650 euros, auquel il faut ajouter 22,50 euros pour les pertes dues aux fuites de carburant (= 672,50 euros).

Si la bio-huile est d'une capacité d'exploitation de 1 000 heures d'utilisation, alors le coût par heure est de 0,67 euros/h. L'utilisation de bio-huile coûte pour un approvisionnement 300 l x 5 euros/l = 1 500 euros pour l'huile. Il faut y ajouter 150 euros pour un filtre fin et le coût de la vidange : on obtient un coût de 1 750 euros pour le premier chargement. Toutes les 750 heures de travail, on fait une analyse en laboratoire d'un échantillon d'huile et on change le filtre ; cela coûte 250 euros. Compte tenu du fait que la bio-huile peut être utilisée pendant 3 000 heures, on devra répéter trois fois cette opération (après 750 heures d'utilisation, après 1 500 heures et après 2 250 heures) et cela coûtera 750 euros. Pour les



pertes dues aux fuites il faut ajouter encore 225 euros et on obtient au total 2 225 d'euros. Cela correspond à un coût par heure de 2,225 euros / 3000 h = 0,91 euros/h. Donc, malgré une capacité d'exploitation trois fois plus grande, l'utilisation d'huile hydraulique, qui se dégrade biologiquement vite, augmente les coûts d'à peu près un tiers par rapport à l'huile minérale. Cet écart pourrait être diminué en prolongeant la capacité d'exploitation.

#### *Comparaison des frais : cogénérateur*

A titre d'exemple prenons un co-générateur ayant un volume d'huile hydraulique de 100 litres ; un filtre normal au prix de 70 euros est installé ; un filtre fin pour l'huile biologique coûte 100 euros. Les frais pour la vidange sont de 100 euros ; les frais pour une analyse en laboratoire de l'huile sont aussi de 100 euros. L'huile minérale coûte 1,50 euros / litre, la bio-huile la plus chère coûte 5 euros / litre. En utilisant de l'huile minérale classique, les frais pour un chargement sont : 100 l x 1,50 euros / litre = 150 euros pour l'huile. Il faut y ajouter 70 euros pour un nouveau filtre et le coût de la vidange, d'où un total de 320 euros, auquel on doit ajouter encore 15 euros pour les pertes dues aux fuites d'huile (= 335 euros).

Supposons que l'huile minérale peut être utilisée pendant 1 000 h, alors le coût par heure est de 0,34 euros. Un chargement avec de l'huile biologique coûte 100 l x 5 euros/l = 500 euros pour l'huile. Il faut y ajouter 100 euros pour un nouveau filtre fin et encore 100 euros de coût de vidange, d'où un total de 700 euros pour le premier chargement. Après 750 d'heures d'exploitation, on doit faire une analyse en laboratoire du carburant, qui coûte à peu près 200 euros. Si l'on considère que les biohuiles peuvent être utilisées pendant 3 000 h, cette analyse en laboratoire devra être répétée trois fois : après 750 h, après 1 500 h et après 2 250 h et coûtera au total 600 euros. Pour les fuites, on prévoit encore 150 euros et ainsi le coût total est de 1 450 euros. D'où un coût par heure = 1.450 euros/3000 h = 0,48 euros / heure d'utilisation.

Malgré une capacité d'exploitation trois fois plus grande, l'utilisation d'une huile hydraulique à dégradation biologique rapide au lieu d'une huile minérale fait augmenter les coûts d'environ 40 %. Cet écart pourrait être réduit en prolongeant la capacité d'exploitation.

## V. Etudes de cas

### "Le programme des 100 tracteurs"

Pour valoriser le succès de l'utilisation des huiles végétales comme carburant agricole, le Ministère allemand de la défense des consommateurs, de l'industrie alimentaire et de l'agriculture (BMVEL) et l'Agence spécialisée en ressources renouvelables (FNR) ont réalisé en Allemagne une étude en conditions réelles. 110 tracteurs, modifiés pour travailler avec de l'huile de colza, de différents producteurs et modèles étaient fournis par sept sociétés différentes. De septembre 2002 à septembre 2005, avec le pilotage scientifique de l'Université de Rostock, ces tracteurs ont été observés en relevant les paramètres de travail principaux, ainsi que les pannes. En juin 2004, un bilan intermédiaire a été réalisé : après 1 360 heures d'exploitation en moyenne, on manque encore d'une expérience de terrain assez longue pour savoir si cette utilisation est possible et lancer une production en série. La méthode d'adaptation a été considérée comme non réussie pour cinq tracteurs, qui ont été sortis du projet. Presque 30 % des tracteurs fonctionnaient impeccablement ; le nombre de tracteurs avec des pannes légères (< 1 000 euros) était un peu au dessus de 30 %, ainsi que le nombre de tracteurs avec des pannes moyennes à graves (> 2 000 euros). Huit tracteurs avaient subi des dommages, dont la réparation avait coûté plus de 15 000 euros. Les problèmes étaient la perte de puissance, des soupapes bouchées, des problèmes au niveau des pompes d'injection et au démarrage à froid. Les problèmes sur les moteurs avec un *distributeur - pompe d'injection du carburant* étaient plus graves que ceux chez les moteurs *pompe-conduite-buse*. Une grande partie des problèmes était liée à la qualité insuffisante du carburant. Plus de la moitié des échantillons ne correspondaient pas à la norme de qualité RK, et seulement 10 tracteurs ont toujours eu de l'huile de colza de bonne qualité dans leur réservoir. En prélevant des échantillons au hasard, la conformité à la norme pour les gaz d'échappement COM 1 a été vérifiée. Pour pouvoir être conforme par rapport aux normes COM 2 (encore valable) et COM 3, il est encore nécessaire que les sociétés spécialisées dans l'adaptation des moteurs et que les producteurs mènent des recherches. Cependant, les producteurs ne se montrent pas très coopératifs.



### **Modèle décentralisé de cycle de production de Degendorf**

Dans la région de Degendorf en Basse Bavière – Allemagne, l'entreprise Maschinenring Buchhofen a une huilerie de colza décentralisée. Cette huilerie a été mise en exploitation à l'été 2001 avec une capacité de traitement initiale de 150 kg de graines de colza par heure (soit presque 1 000 tonnes/an). La capacité de traitement pourrait augmenter pour atteindre 5 000 tonnes par an. L'huilerie fonctionne comme une société en commandite avec presque 70 actionnaires (surtout des agriculteurs mais aussi quelques privés) qui, avec un apport en capital d'au moins 3 000 euros, ont financé l'huilerie. A la fin de l'année financière, les bénéfices sont distribués entre les membres de la société en commandite. Cet argent peut être considéré par les actionnaires comme des intérêts du capital investi.

La société en commandite est dirigée par l'opérateur de l'huilerie et le gérant de la société Maschinenring.

L'huilerie de Degendorf est située tout près de l'installation préexistante de séchage du maïs. De là, quelques synergies qu'il faut souligner : par exemple l'utilisation commune de certains équipements et aménagements comme la balance, l'appareil de mesure de l'humidité, le séchage des grains et l'épuration des échantillons. Ce bâtiment sert pour le stockage temporaire du tourteau pressé et de l'huile végétale.

La station-service pour l'huile de colza est située sur le même terrain, la citerne a une capacité de 5 000 litres et est munie d'un distributeur automatique à cartes. Dans la région de Degendorf, il y a aussi quelques stations services pour l'huile de colza. Il y a aussi une société spécialisée dans l'adaptation des moteurs en bicarburant. Elle a modifié les deux tracteurs de la société Maschinenring pour qu'ils puissent fonctionner à l'huile de colza et elle participe au programme des 100 tracteurs.

### **CEP (Clean Energy Partnership) Partenariat pour une énergie pure**

En juin 2002, avec le soutien du gouvernement dans le cadre d'un projet démonstratif européen en Allemagne a été fondée l'organisation CEP (Partenariat pour une énergie pure), à laquelle appartiennent les sociétés suivantes : ARAL, BMW, Berliner Verkehrsbetriebe, DaimlerChrysler, Ford, GM/Opel, Hydro, Linde, Vattenfall Europe, et, depuis 2005, la société TOTAL. L'objectif de

ce projet est d'aider activement et de favoriser la mobilité durable à travers la conception de solutions permettant l'utilisation du carburant hydrogène.

En novembre 2004, à Berlin, a commencé un projet démonstratif : dans une station-service conventionnelle, située à Berliner Messedamm a été installée une pompe à hydrogène où les véhicules roulant avec ce carburant (16 voitures ont été prêtées par les fabricants d'automobiles) peuvent s'approvisionner. Une partie du carburant est produite sur place et l'autre livrée et stockée.

Ce projet doit permettre de démontrer la possibilité de regrouper de nombreuses technologies élaborées pour expérimenter la possibilité d'une production décentralisée d'hydrogène gazeux sur place à la station-service (par électrolyse ou par reformage du gaz liquide), et d'une livraison de carburant produit ailleurs. Et, bien sûr, il faut aussi illustrer vérifier la possibilité d'une utilisation courante d'hydrogène comme carburant.

L'origine du carburant jouant un rôle important, ce projet a testé aussi la rentabilité économique de la production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables, en conditions réelles.

En parallèle, un essai est mené afin d'optimiser les procédures administratives et les moyens d'obtenir les permis nécessaires pour la construction d'une telle infrastructure énergétique.

La société TOTAL prévoit, pour le mois de mars 2006, l'ouverture d'une deuxième station pour l'hydrogène de l'organisation CEP (Partenariat pour une énergie pure), à Berlin.



## VI. Bibliographie

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit „Erneuerbare Energie – Innovationen für die Zukunft“, Mai 2004; *Ministère de l'environnement, la protection de la nature et la sécurité nucléaire*

„Energies nouvelles – Innovations pour le futur“, mai 2004

Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft „Biokraftstoffe – Strategie für Mobilität von morgen, Juli 2005; *Ministère de la défense des consommateurs, de l'agro-alimentaire et l'agriculture* „Les biocarburants – une stratégie pour la mobilité de demain“, juillet 2005

Bundesverband WindEnergie „Neue Energie“ 11/2005; *Association* „Energie éolienne“, „Energie nouvelle“, 11/2005

Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport ; *Directive 2003/30/CE du Parlement européen et du Conseil du 8 mai 2003 concernant la promotion des biocarburants pour le transport*

EurObserv'ER "Biofuels Barometer" – Juni 2005; *EurObserv Baromètre des biocarburants – juin 2005*

Europäische Kommission, Generaldirektion Landwirtschaft und ländliche Entwicklung „Gap – die Gemeinsame Agrarpolitik erklärt“, 2005; *Commission européenne, Direction générale pour l'agriculture et le développement rural* „PAC – La politique agricole commune expliquée“, 2005

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. „Bioethanol in Deutschland“, 2003; *Agence spécialisée dans les matières renouvelables, "Le bioéthanol en Allemagne", 2003*

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. „Biokraftstoffe – Pflanze, Rohstoffe, Produkte“, 2005; *Agence spécialisée dans les matières renouvelables, "Biocarburants – plantes, matières premières, produits", 2005*

Informations sur les sites internet suivants :

[http:// de.wikipedia.org](http://de.wikipedia.org), janvier 2006

[http://europa.eu.int/comm/agriculture/capreform/infosheets/energy\\_de.pdf](http://europa.eu.int/comm/agriculture/capreform/infosheets/energy_de.pdf)

[http://europa.eu.int/comm/agriculture/lisbon/index\\_de.htm](http://europa.eu.int/comm/agriculture/lisbon/index_de.htm), décembre 2005

<http://www.agqm-biodiesel.de>, janvier 2006

<http://www.bioenergie.de>, décembre 2005

<http://cep-berlin.de/cep.html>, janvier 2006

[http://www.energieportal24.de/fachberichte\\_artikel\\_l8htm](http://www.energieportal24.de/fachberichte_artikel_l8htm), janvier 2006

<http://www.fnr.de>, janvier 2006

<http://www.k-tz.de/tz3/Magdeburg1001.pdf>

<http://www.ndchwachsende-rostoffe.de>, décembre 2005

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. „Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren“, 2001; *Kaltschmitt, M. ; Hartmann, H. "L'énergie issue de la biomasse – Conditions générales, techniques et méthodes", 2001*

Landwirtschaftskammer Niedersachsen; target GmbH „Pflanzenöle als Kraft- und Schmierstoffe“, 2005; *La chambre d'agriculture de Nidexsaxen Basse-Saxe, Target- SARL "Les huiles végétales utilisées comme carburants et comme lubrifiants", 2005*

Landwirtschaftskammer Niedersachsen; target GmbH „Energiepflanzen – Anbau und Verwendungsmöglichkeiten“, 2004; *La chambre d'agriculture de Nidexsaxen Basse-Saxe, Target- SARL: " Les plantes énergétiques – culture et utilisations possibles, 2004*

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung „Fortschrittsbericht 2004 – Perspektive für Deutschland. Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung“, 2004; *Office de presse et d'information du Gouvernement fédéral : "Rapport d'avancement 2004 - Les perspectives pour l'Allemagne. Notre stratégie pour le développement durable", 2004*

