L'ESSENCE VERTE

L'éthanol ou alcool éthylique de formule chimique C_2H_5OH est de loin le premier biocarburant au monde. Son rendement énergétique est voisin de celui de l'essence : un litre et demi d'éthanol équivaut à un litre d'essence. Il est produit par fermentation des sucres présents dans des plantes sucrières telles que la betterave et la canne à sucre ou dans des céréales telles que le blé, le maïs ou l'orge.

L'éthanol est actuellement proposé aux automobilistes, soit pur (comme au Brésil), soit mélangé avec l'essence (entre 5 et 10 % en Europe), ou encore transformé en éther d'éthyle et de tertio-butyle, souvent désigné par le terme anglo-saxon ETBE. Depuis 2007, on peut utiliser en France le superéthanol (E85) qui comporte 85% d'alcool, ou l'ETBE qui présente des caractéristiques techniques plus intéressantes.
Les moteurs diesel utilisent classiquement des fiouls lourds (comme l'hexadécane $C_{16}H_{34}$ par exemple) contrairement aux moteurs à essence qui consomment des carburants plus légers (comme l'octane C_8H_{18} par exemple). Dans ce cas, on propose le « biodiesel » produit à partir d'huiles végétales (soja, palme, colza et tournesol) que l'on transforme par une réaction dite de transestérification pour obtenir des esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV). Ces derniers sont utilisés en mélange dans le gazole jusqu'à 30 % sans qu'il soit nécessaire d'adapter les moteurs diesel classiques. Cette filière est appelée « **filière classique** » ou « **biocarburants de première génération** ».

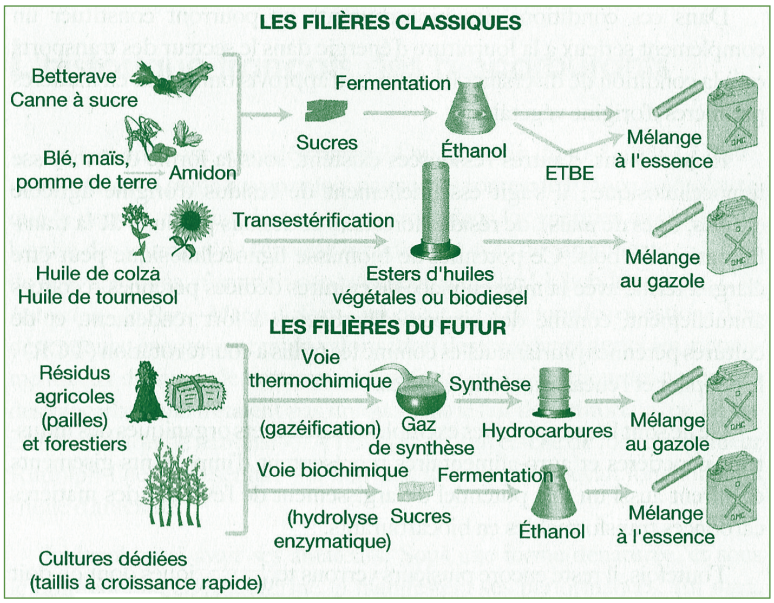


Fig. 1 - Schéma général de la fabrication de biocarburants
(d'après D.Ballerini, Institut Français du Pétrole)

Les limites au développement de ces deux types de biocarburants sont essentiellement liées à la concurrence à court terme entre les usages alimentaires et énergétiques des terres agricoles. L'accroissement de la population et de son niveau de vie deviendra vite incompatible avec les objectifs, même restreints (de l'ordre de 10 %), visant à substituer une partie des carburants fossiles (gazole ou essence) par les biocarburants, car ceux-ci requièrent de détourner d'importantes surfaces vouées à l'agriculture de subsistance.

Dans un tel contexte, il devient impératif et urgent de mettre au point de nouveaux procédés pour produire des biocarburants à partir d'autres ressources végétales. Cette nouvelle filière de production, permise par les récents progrès scientifiques en chimie et biochimie, utilise la **biomasse lignocellulosique** rassemblant résidus agricoles et forestiers, déchets du bois, taillis à rotations rapides, etc. Cette filière est appelée « **filière du futur** » ou « **biocarburants de seconde génération** ».

LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

La biomasse lignocellulosique (BLC) est composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ces trois polymères de la paroi cellulaire végétale (végétaux, bois, paille) sont étroitement associés entre eux, formant ainsi une matrice rigide difficile à déstructurer. La cellulose est le constituant le plus important (30 à 60 % de la matière sèche). La teneur en hémicelluloses varie d'un végétal à l'autre (entre 10 et 40 %), la lignine se situant entre 5 et 30 %.

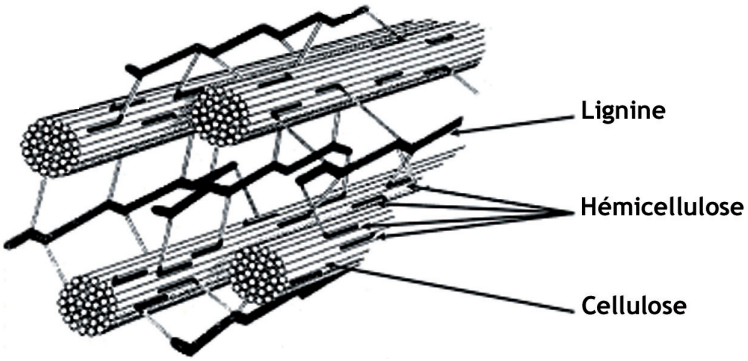


Fig. 2 - Vue d'ensemble de la structure de la biomasse lignocellulosique
(d'après l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)

I - CAS DES MOTEURS A ESSENCE

Le principe du procédé consiste tout d'abord à déstructurer la matrice cellulosique pour accéder aux parties formées à partir de sucres que sont la cellulose et les hémicelluloses. Il s'agit ensuite de convertir par hydrolyse enzymatique la cellulose en glucose, les hémicelluloses en pentoses. Puis une opération de fermentation transformera les sucres en éthanol. Il ne restera plus qu'à distiller et purifier l'éthanol. Quant à la lignine qui ne peut être fermentée en éthanol, elle constituera la source d'énergie nécessaire au bon fonctionnement du procédé (fig. 3).

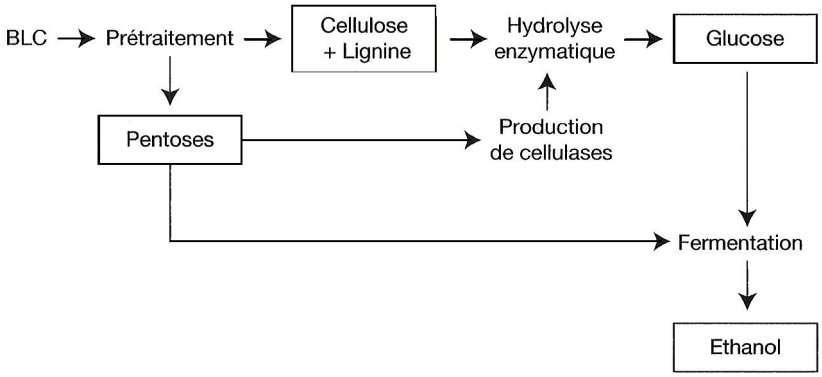


Fig. 3 - Ensemble du processus de production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique
(d'après D.Ballerini, Institut Français du Pétrole)

II - CAS DES MOTEURS DIESEL

Les procédés utilisés sont dits de « conversion thermochimique ». Ils combinent une conversion thermique ou pyrolyse (action de la chaleur) et une conversion chimique (réaction entre deux corps gazeux : le monoxyde de carbone CO et l'hydrogène H_2) appelée la gazéification. L'opération de pyrolyse transforme la biomasse lignocellulosique en huiles dites « de pyrolyse ». La gazéification transforme ces huiles en gaz dits « de synthèse ». Puis une unité dite de « Fischer-Tropsch » (Annexe 1) permet de retransformer ce mélange gazeux en hydrocarbures liquides. Ces derniers, purs ou en mélange avec le gazole d'origine pétrolière, sont directement utilisables dans les moteurs.

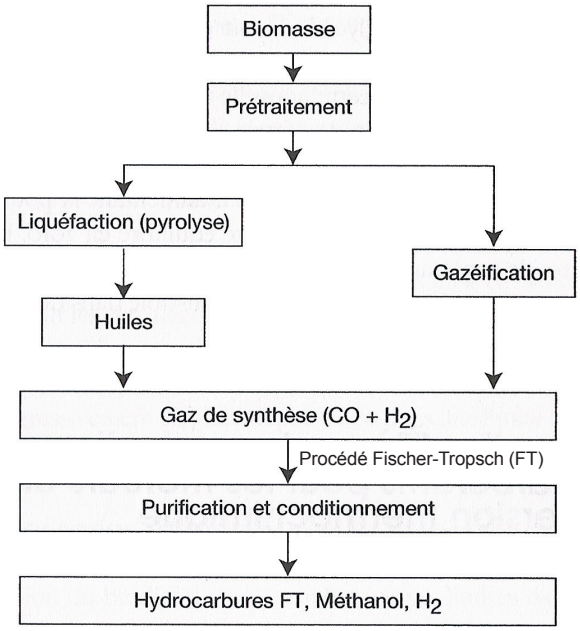


Fig. 4 - Ensemble du procédé de conversion thermochimique
(d'après D.Ballerini, Institut Français du Pétrole)

Pour la suite, nous nous limiterons volontairement à la description de la filière biomasse lignocellulosique pour la production d'éthanol, dite « filière biochimique ».
Cette filière doit permettre d'assurer à faible coût l'approvisionnement en éthanol à grande échelle, tout en valorisant des résidus agricoles (comme les bagasses de canne à sucre, les rafles et tiges de maïs, les pailles de céréales), des plantations rapidement renouvelables (taillis à très courte durée, espèces pérennes type miscanthus), des résidus de l'exploitation forestière et de l'industrie de la transformation du bois.

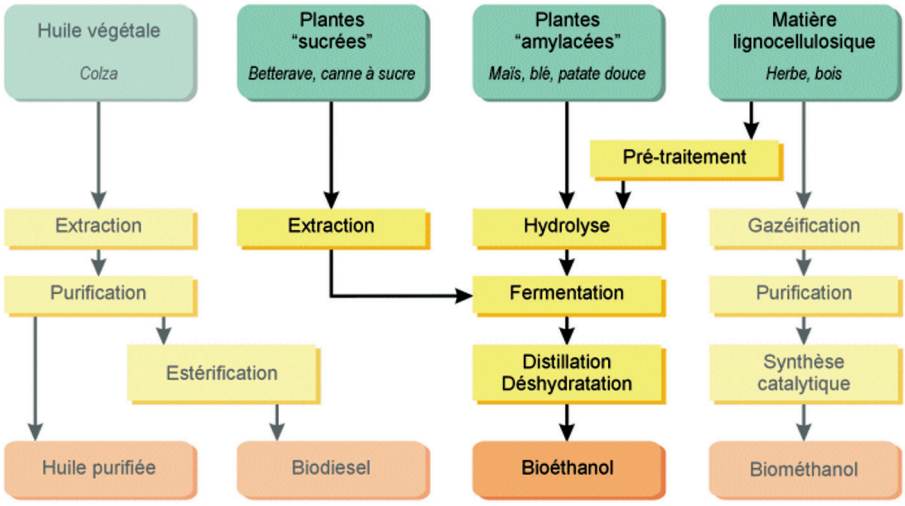


Fig. 5 - Ensemble des filières « biocarburants » et les principales opérations qu'elles font intervenir
(d'après l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne)

CONSTITUTION CHIMIQUE DE LA MATIERE LIGNOCELLULOSIQUE

Les proportions de chacun des trois constituants principaux de la biomasse lignocellulosique (en % de matière sèche) varient de manière considérable selon le type de biomasse envisagé :

Biomasse	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Herbes	30-50	15-40	5-20
Bagasse decanne à sucre	40-55	25-40	5-25
Bois dur	40-50	20-30	15-30
Bois tendre	40-55	10-15	25-30
Résidus agricoles (pailles, etc.)	30-40	10-40	10-30
Moyenne	**40-60**	**20-40**	**10-25**

Les molécules de cellulose se présentent sous la forme de longues chaînes de molécules de glucose (sucre à 6 atomes de carbone ou C_6, fig. 6), organisées en faisceaux cristallins pouvant présenter quelques régions amorphes. Le degré de polymérisation moyen est d'environ 100 000 pour le bois.

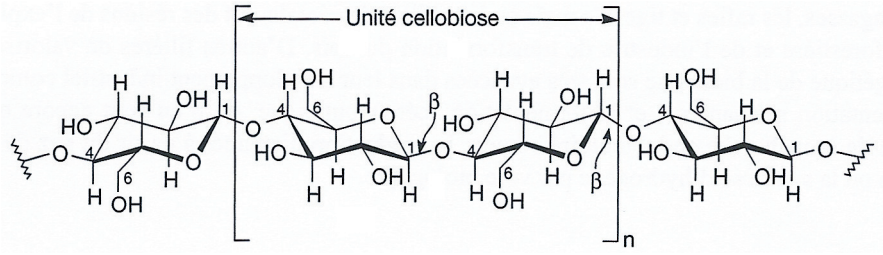


Fig. 6 - Schéma de la cellulose

Ces molécules de cellulose sont reliées entre elles au moyen de molécules d'hémicellulose (voir **Annexe 2**), chaîne polymérique formée principalement par des molécules de pentoses (sucres à 5 atomes de carbone ou C_5), d'hexoses (sucres C_6) et des acides uroniques. Le degré de polymérisation moyen est beaucoup plus faible (150 à 200).
La lignine effectue la liaison entre les faisceaux de cellulose. C'est une chaîne polymèrique constituée d'alcools, les monolignols, fortement réticulée (**Annexe 2**), ce qui confère à la plante sa structure particulière. Les trois polymères constitutifs sont intimement associés entre eux, formant ainsi une matrice très rigide (voir fig. 2).

PREMIERE OPERATION : LE PRETRAITEMENT DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

Il s'agit ici du traitement nécessaire pour rendre la cellulose et l'hémicellulose accessibles à l'hydrolyse. Plusieurs procédés peuvent être utilisés, le choix du procédé retenu dépendant fortement de la matière première (résidus de bois ou pailles de céréales par exemple). Les principaux sont :
• **la thermohydrolyse**, traitement par l'eau en autoclave (à des températures de 200-230 °C, sous une pression supérieure à 50 bar),
• **le prétraitement par l'acide dilué** (acide sulfurique ou acide chlorhydrique dilués en proportion de 0,5 à 3 % en masse par rapport à la matière sèche),
• **l'explosion à la vapeur ou auto-hydrolyse**, chauffage rapide (160-200 °C) par injection de vapeur saturée à haute pression (10 à 50 bar), suivie par une détente brutale jusqu'à la pression atmosphérique.

Par l'un ou l'autre de ces traitements, on obtient une destruction poussée de la structure de la matrice lignocellulosique.

DEUXIEME OPERATION : L'HYDROLYSE DE LA CELLULOSE EN GLUCOSE

Il s'agit maintenant de convertir les molécules de cellulose en glucose (sucre en C_6) et les molécules d'hémicellulose en xylose (sucre en C_5). C'est ce qu'on appelle une réaction d'hydrolyse :

$$\underset{\text{cellulose}}{(C_6H_{10}O_5)n} + nH_2O \rightarrow \underset{\text{glucose}}{nC_6H_{12}O_6}$$

Si l'hémicellulose est facilement hydrolysable, l'hydrolyse de la cellulose en glucose est plus difficile du fait de sa structure et de sa cristallinité. L'hydrolyse doit donc être catalysée, soit par un acide dilué ou concentré (hydrolyse chimique), soit par des enzymes spécifiques appelées cellulases (hydrolyse enzymatique).

- **L'hydrolyse chimique** par acide dilué ou concentré se déroule en deux étapes afin d'optimiser la libération des sucres, des hémicelluloses d'une part, de la cellulose d'autre part. La durée de chaque étape est assez courte, de l'ordre de 3 minutes à des températures voisines de 200 °C.
- **L'hydrolyse enzymatique** est la voie largement préconisée pour trois raisons : prix de revient plus favorable, peu d'effluents à traiter et pas de problèmes de corrosion acide, procédés en constante amélioration.

Dans la nature, la biodégradation de la cellulose est réalisée par des micro-organismes, essentiellement des champignons parmi lesquels « ***Trichoderma reesei*** » est l'espèce la plus étudiée pour la production de cellulases très actives. Il suffit donc de récupérer les enzymes produites par ce champignon dans le milieu de culture puis de mettre en contact le matériau prétraité avec la solution enzymatique dans les conditions de température (45 – 50 °C) et d'acidité (pH = 4,8) optimales. La description des principales cellulases et leur mode d'action sur les fibrilles de cellulose est en Annexe 3 ; on peut également se reporter à la fiche « **les enzymes mènent la danse** »).

TROISIEME OPERATION : LA FERMENTATION ALCOOLIQUE (OU ETHANOLIQUE)

Le glucose ainsi obtenu est transformé en éthanol par une réaction bien connue et exploitée depuis des siècles : la fermentation (transformation du jus de raisin en vin par exemple) :

$$\underset{\text{glucose}}{C_6H_{12}O_6} \rightarrow \underset{\text{éthanol}}{2C_2H_5OH} + 2CO_2$$

Cette réaction fait intervenir des **levures**, dont la plus connue est « Saccharomyces cerevisiae », la traditionnelle levure de boulanger. Le rendement de la réaction atteint industriellement 470 g d'éthanol par kg de glucose et les concentrations finales en éthanol avant distillation sont voisines de 10 %. Cependant, cette levure ne peut pas convertir les sucres provenant de l'hémicellulose en éthanol selon la réaction :

$$\underset{\text{xylose}}{3C_5H_{10}O_5} \rightarrow \underset{\text{éthanol}}{5C_2H_5OH} + 5CO_2$$

On utilise alors d'autres levures comme « Pichia stipitis » ou « Candida shehata », mais les rendements obtenus sont nettement inférieurs à ceux obtenus pour la fermentation du glucose.

Globalement, l'utilisation de ces levures présente de nombreux points faibles, par exemple l'inhibition par l'éthanol à partir de concentrations de l'ordre de 3 à 5% (l'éthanol détruit les micro-organismes ; on l'utilise entre autres pour la désinfection des plaies). Des **modifications génétiques des levures** pourraient permettre d'améliorer les rendements obtenus et d'éviter les inconvénients.

Ces difficultés peuvent être en grande partie résolues par l'utilisation de **bactéries** convenablement choisies. Ainsi de bons rendements en éthanol ont-ils été obtenus avec des souches d' « Eschericia coli », de « Klebsiella planticola », de « Zymomonas mobilis », surtout lorsqu'on a réussi, **grâce à des transferts de gènes**, à obtenir des mutants résistants à l'éthanol. Le tableaude la page suivante rassemble quelques uns des principaux résultats obtenus avec des souches de levures et de bactéries modifiées pour traiter les pentoses (sucres en C_5) :

Souche	Substrat	Rendement en éthanol
Eschericia coli	hydrolysat d'hémicelluloses de bagasse 100g/L xylose	0,49
	hydrolysat de pin 15g/L xylose, 20g/L glucose	0,42
Candida shehata	hydrolysat d'orge entier 54g/L xylose, 126g/L glucose	0,48
Pichia stipitis	hydrolysat de peuplier 28g/L xylose, 64g/L glucose	0,45
Saccharomyces cerevisiae	hydrolysat d'épicéa 6g/L xylose, 32g/L hexoses	0,43
	hydrolysat de fibres de maïs 40g/L xylose, 42g/L glucose	0,44

Afin d'améliorer le procédé de fermentation éthanolique, on cherche à **mener de façon simultanée les opérations d'hydrolyse enzymatique et de fermentation éthanolique** (procédé SSF).
L'ensemble des procédés testés est en cours d'opération au stade pilote (quelques tonnes de matériau traitées par jour).

Dernière operation : la distillation du melange ethanol-eau

Il s'agit d'obtenir un éthanol contenant le moins d'eau possible. Deux séquences doivent être effectuées :
- une première distillation classique porte la teneur en éthanol à 92 %, teneur insuffisante pour son utilisation comme carburant,
- une seconde distillation plus poussée de cet alcool à 92 %, avec emploi de solvants intermédiaires comme le cyclohexane, permet de produire un éthanol pratiquement anhydre (99,8 %). Cette qualité est nécessaire pour la production d'ETBE ou l'emploi en mélange avec l'essence (E85). On peut aussi remplacer cette seconde opération par l'usage de tamis moléculaires destinés à séparer l'eau de l'alcool.

Remarque sur l'utilisation de la lignine

La lignine, ne pouvant donner lieu à une transformation en sucres, est récupérée comme combustible pour produire la vapeur d'eau qui servira de source d'énergie. Les quantités récupérées suffisent largement à fournir l'énergie nécessaire aux différentes étapes du procédé. Ainsi ces procédés deviennent-ils auto-suffisants énergétiquement tout en améliorant le bilan CO_2 de la filière.

Conclusion et perspectives

L'utilisation de la biomasse lignocellulosique pour la production d'éthanol-carburant présente de multiples avantages, du point de vue environnemental (bilan en émissions de CO_2 plus favorable que l'éthanol issu des plantes sucrières ou amylacées, valorisation des coproduits et déchets) comme des points de vue socio-économiques (pas de compétition avec les terres agricoles à usage agroalimentaire, moindre coût de la matière première).
Cependant certaines étapes du procédé à mettre en œuvre sont complexes et leur amélioration nécessite de progresser, notamment sur l'enzymologie et la physiologie des levures et bactéries.
Actuellement, on arrive, dans le cas des conifères ou des feuillus, à obtenir de 200 à 300 litres d'éthanol par tonne de bois sec. Par exemple, l'usine pilote suédoise ETEK produit, par ce procédé, 2 tonnes d'éthanol par jour

avec un rendement de 200 litres d'éthanol par tonne de bois sec. La productivité en éthanol atteint des valeurs voisines pour la paille de blé (250 litres par tonne de paille) : une unité pilote de 400 tonnes d'éthanol par an est en fonctionnement en Espagne. De nombreux projets de construction d'unités pilotes et commerciales ont vu le jour aux Etats-Unis et au Canada. En France, la dynamique du Grenelle de l'Environnement a permis le soutien du projet FUTUROL, localisé dans la région Champagne-Ardennes sur le site de bioraffinerie de Pomacle Bazancourt près de Reims. Ce projet consiste à développer et valider un procédé éco-efficient permettant de produire du bioéthanol à partir de la biomasse lignocellulosique (co-produits agricoles, forestiers, de résidus ou de biomasse dédiée). Ce projet en est actuellement au stade pilote et produit environ 500 litres d'éthanol par jour (soit environ 160 tonnes par an). La réalisation d'un prototype permettant d'atteindre une production de 3 000 tonnes par an est en cours. L'étape d'industrialisation est prévue à l'horizon 2015-2020.

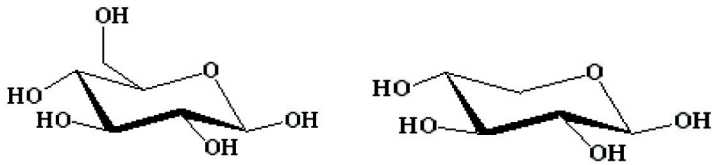
ANNEXE 1 : LA SYNTHESE FISCHER-TROPSCH

La synthèse Fischer-Tropsch convertit le gaz de synthèse (mélange H_2/CO) en un mélange d'hydrocarbures de différentes longueurs de chaîne carbonée selon la réaction suivante :

$$(n + m/2)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_m + nH_2O$$

Cette réaction, catalysée par le fer ou le cobalt, s'opère à des pressions élevées (10 à 40 bar) et des températures modérées (200 à 350°C). Les produits de cette transformation constituent un ensemble de composés carbonés comprenant :
des hydrocarbures légers (n = 1 et 2), des gaz de pétrole liquéfiés (n = 3 et 4), des naphtas (n compris entre 5 et 11), des gazoles (n compris entre 12 et 20), des cires (n > 20).
Les procédés sont généralement optimisés pour la production de cires, qui peuvent être par la suite transformées en carburant type gazole par hydrocraquage. Le rendement massique de la conversion du gaz de synthèse en hydrocarbures liquides est d'environ 65 % ; les gaz non convertis ainsi que les produits en C_3 et C_4 peuvent servir à la production d'électricité.

ANNEXE 2 : REPRESENTATIONS MOLECULAIRES



β-D-glucose β-D-xylose

Fig. A_1 - Représentations de la molécule de glucose (sucre en C_6) et de la molécule de xylose (sucre en C_5)

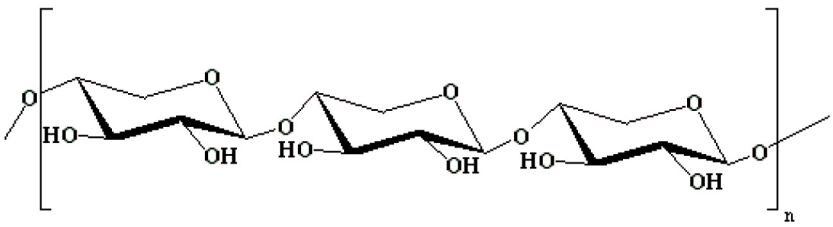


Fig. A_2 - Représentation de la chaîne polymérique d'hémicellulose

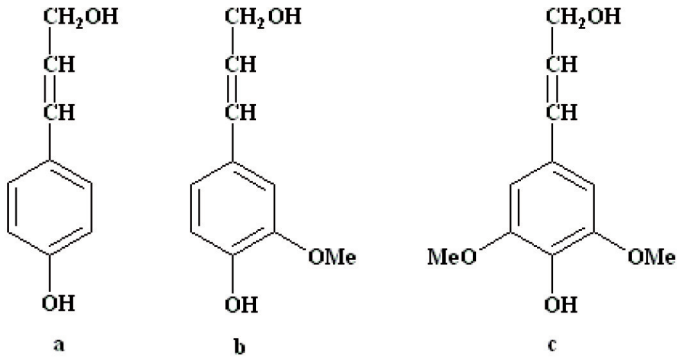


Fig. A_3 - Représentation de la structure de 3 monolignols
a : alcool coumarylique, b : alcool conifér ylique, c : alcool sinapylique

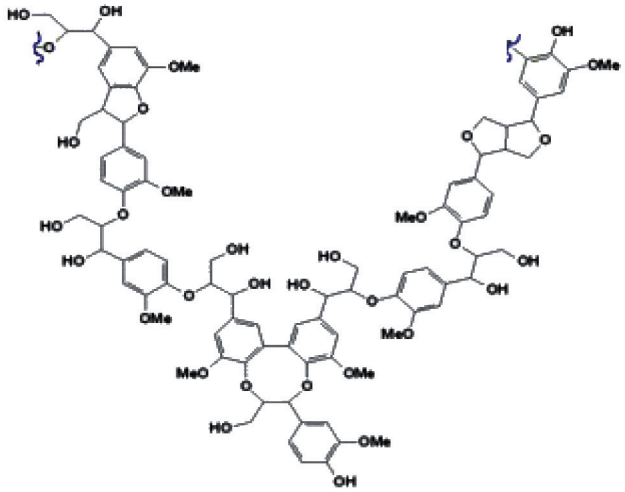


Fig. A_4 - Polymère formant la lignine

ANNEXE 3 : LES ENZYMES

Les enzymes de type cellulases sont classées selon leur mode d'action catalytique pour l'hydrolyse totale de la cellulose :

- les endogluconases (EG) qui coupent la cellulose au niveau des zones amorphes, générant ainsi de nouvelles extrémités de chaînes,
- les cellobiohydrolases (CBH) qui agissent sur les extrémités libres des chaînes de cellulose pour libérer du glucose, du cellobiose, et des cellodextrines,
- les ß-glucosidases (BGL) qui hydrolysent le cellobiose et les cellodextrines en glucose.

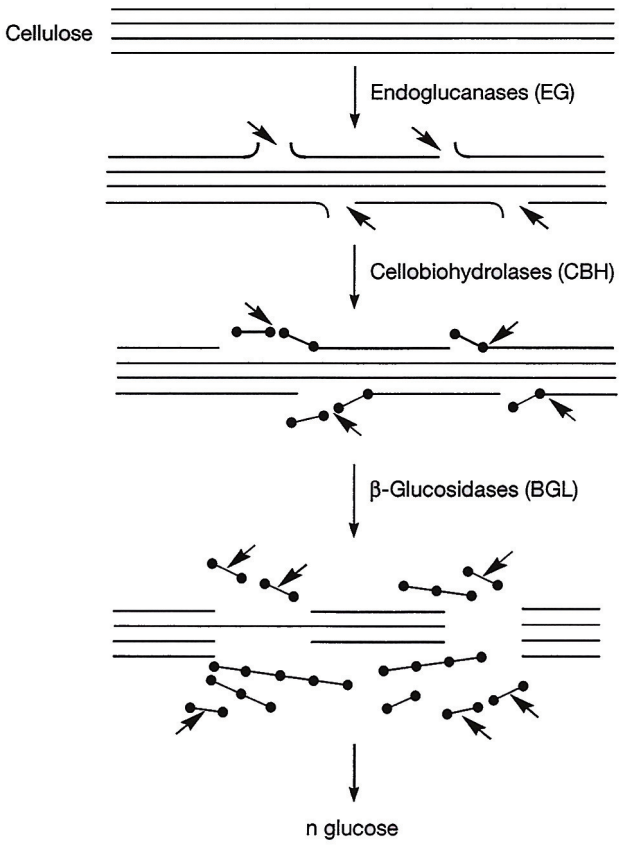


Fig. A_5 - Mode d'action des cellulases sur les fibrilles de cellulose

(d'après D.Ballerini, Institut Français du Pétrole)

Actuellement, d'importantes sociétés productrices d'enzymes industrielles cherchent à trouver de nouvelles enzymes et à en diminuer le coût de production.

PROPOSITIONS D'EXPERIENCES SUR L'ESSENCE VERTE

On illustre le thème de l'énergie, en particulier celui des énergies renouvelables (résidus agricoles et forestiers) pouvant remplacer les sources d'énergie fossile, tout en préservant les productions alimentaires pour les besoins de l'homme. Le fonctionnement du vivant est également abordé sous l'aspect des composés principaux du bois et des propriétés des bactéries (mode de travail des levures).

Les échanges transcrits ci-dessous, entre le professeur P et ses élèves E, sont donnés à titre indicatif pour illustrer les étapes possibles du travail de classe et pourront être adaptés si nécessaire à l'âge et au niveau de connaissance des élèves.

Remarque : on a écrit en italique les notions que le professeur peut aborder, sans toutefois que les connaissances et le vocabulaire spécifique correspondant soient à maîtriser et à retenir par les élèves.

I - MATERIEL REQUIS :

- une petite tige de forsythia ou de sureau,
- une loupe à très fort grossissement,
- une lampe de poche,
- un sachet de levure du boulanger (achetée au supermarché, levure vendue aux clients désireux de faire leur propre pain),
- un sachet de levure de bière Fermentis Safale s-04,
- 10 cL d'eau,
- 100 g de farine,
- trois petits verres de montre,
- un petit élastique,
- un sac plastique souple, du genre sac à salade des supermarchés,
- un marqueur,
- une feuille de papier graphique,
- un double-décimètre,
- 4 tubes à essais,
- une petite spatule,
- le tableau des consommations d'énergie dans le monde,
- le tableau des compositions des différentes sources de biomasse,
- le schéma de la décomposition de la cellulose en glucose,
- une reproduction de l'attaque d'une souche par des champignons,
- une reproduction de la plante triticale (Wikipédia),
- une reproduction de la plante miscanthus (Wikipédia),
- une reproduction d'une plantation de saules, de peupliers, d'eucalyptus (site internet).

II - CONNAISSANCES ABORDEES :

- Consommation mondiale d'énergie
- Réserves mondiales de pétrole
- Les unités : tonne, kilotonne, mégatonne, gigatonne
- La lecture des tableaux de données
- Les pourcentages
- Les propriétés énergétiques des différents carburants
- La composition microscopique du bois
- L'action des champignons et des levures sur la transformation de la matière
- Les ressources naturelles de la biomasse cellulosique (plantes, bois, pailles, tiges, etc.)

III - DUREE APPROXIMATIVE DE LA SEANCE COMPLETE : 1H30 À 2H

I - LA CONSOMMATION D'ENERGIE DANS LE MONDE

On illustre le thème de l'énergie.

P : nous allons parler de l'énergie, et tout d'abord du pétrole. Qui peut me dire comment se forme le pétrole ?
E : réponses diverses
P : ceux qui ont répondu que c'était une énergie fossile produite il y a des centaines de millions d'années à partir de la décomposition d'animalcules marins ont raison. Le pétrole est-il une énergie renouvelable ?
E : non.
P : vous avez parfaitement raison. Les ressources en pétrole sont donc limitées. On essaiera tout à l'heure de préciser cette notion. Commentons le tableau des consommations d'énergie dans le monde.

	2010	2020	2025	2030
Demande mondiale d'énergie (en MTep)	10 000	12 000	14 000	16 000
Energie fournie par le pétrole (en Mtep)	4 000	4 800	5 600	6 400
Consommation d'énergie dans le domaine des transports (en Mtep)	2 200	2 600	2 900	3 200

P : on peut voir tout d'abord que la demande mondiale en énergie ne cesse d'augmenter : de 10 000 en 2010 à 16 000 en 2030. Calculez maintenant le pourcentage d'énergie assurée par le pétrole en 2010.
E : 40 %
P : oui. Et il en sera de même en 2030. En 2010, 97 % de la consommation d'énergie dans le domaine des transports est assurée par le pétrole. On verra que d'autres sources pourraient être envisagées.
P : voyons maintenant ce que signifie l'unité d'énergie Mtep. M signifie Méga, t signifie tonne, ep signifie équivalent pétrole. Que veulent dire Méga et Giga ?
E : réponses diverses.
P : Ceux qui ont répondu un million pour Méga et un milliard pour Giga ont raison . Donc Mt signifie un million de tonnes. L'unité tep signifie tonne équivalent pétrole : c'est l'énergie fournie par la combustion d'une tonne de pétrole. Elle vaut 42 gigajoules, ou 11 630 kWh. Combien d'ampoules de 100 watts pourrait-on donc faire fonctionner pendant une heure avec l'équivalent d'une tonne de pétrole ?
E : réponses diverses
P : ceux qui ont répondu 11millions 630 mille ampoules ont raison, car une ampoule de 100 watts allumée pendant une heure consomme 100 Wh. C'est donc considérable…

II- LES RESERVES MONDIALES DE PETROLE

On illustre le thème de l'énergie

P : la production de pétrole est exprimée en une unité de volume particulière : le baril. Qui peut me dire ce que représente le baril ?
E : ?
P : le baril correspond au tonneau utilisé en Amérique au 19e siècle. Il contient exactement 159 litres. Si la densité moyenne du pétrole est d'environ 0,8, qui peut me dire la masse moyenne d'un baril de pétrole ?
E : 140 kg.
P : oui, c'est exact. En 2010, on consomme 73 millions de barils de pétrole par jour. Qui peut me calculer la consommation mondiale annuelle de pétrole en tonnes ?

E : 3,7 milliards de tonnes
P : oui. En 2030, on devrait en consommer 120 millions de barils par jour, soit environ 6 milliards de tonnes.
P : En 2005, les réserves prouvées étaient de 165 milliards de tonnes. Calculez combien il resterait de pétrole en 2030, en se fondant sur une consommation annuelle moyenne de 4,5 milliards de tonnes.
E : 52,5 milliards de tonnes.
P : oui. Au bout de combien de temps les réserves de pétrole seraient-elles épuisées ?
E : 9 ans après 2030, donc vers 2040.
P : oui. Et même si on trouve de nouvelles réserves, il est quasiment certain que cette source d'énergie ne sera plus utilisable dans le courant de la deuxième moitié du 21e siècle. De plus, il sera de plus en plus difficile d'extraire le pétrole, et cela coûtera de plus en plus cher… Il faudra par conséquent trouver de nouvelles sources d'énergie, en particulier pour les transports.

III - PROPRIETES ENERGETIQUES DE L'ESSENCE, DU CARBURANT DIESEL, DE L'ALCOOL

On illustre le thème de l'énergie. Ce paragraphe est à distribuer aux élèves.

Pour les transports, on utilise actuellement des moteurs à essence et des moteurs diesel. L'énergie est fournie par la combustion des molécules chimiques contenues dans le pétrole. Ces molécules contiennent de l'hydrogène H et du carbone C. Leur formule chimique (simplifiée) peut s'écrire : C_nH_{2n+2}
Si n = 1, on obtient le méthane CH_4 qui est gazeux
Si n = 3, on obtient le propane C_3H_8 qui est gazeux
Si n = 4, on obtient le butane C_4H_{10} qui est gazeux
A partir de n = 5, les composés sont liquides à la température ordinaire. C'est le cas de l'octane C_8H_{18}, le carburant utilisé dans les moteurs à essence. Sa combustion, par définition consomme des molécules d'oxygène O_2, dégage du dioxyde de carbone CO_2, de la vapeur d'eau H_2O, et s'accompagne d'un dégagement d'énergie très élevé (5 500 kilojoules) :

$$C_8H_{18} + 12{,}5\ O_2 \rightarrow 8\ CO_2 + 9\ H_2O + 5\ 500 \text{ kilojoules}$$

Dans les moteurs diesel, on utilise l'hexadécane $C_{16}H_{34}$, un carburant plus lourd. Sa combustion consomme aussi de l'oxygène et dégage du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau, avec également un dégagement d'énergie très élevé :

$$C_{16}H_{34} + 24{,}5\ O_2 \rightarrow 16\ CO_2 + 17\ H_2O + 6\ 000 \text{ kilojoules}$$

On peut aussi utiliser l'alcool éthylique (ou éthanol) comme carburant, ce qui permet de diminuer la consommation de pétrole. Cet alcool a pour formule chimique C_2H_5OH. Sa combustion dégage une énergie du même ordre de grandeur que celle de l'essence : un litre et demi d'éthanol équivaut à un litre d'essence :

$$C_2H_5OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 3\ 700 \text{ kilojoules}$$

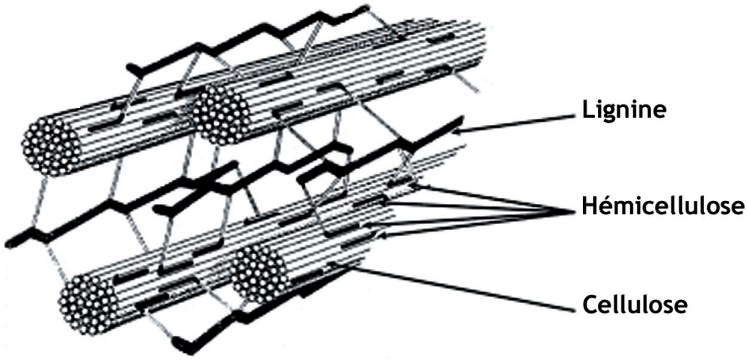
Comme l'éthanol peut être extrait des plantes et des cultures, on l'appelle biocarburant ou essence verte lorsqu'on l'utilise (pur ou en mélange) pour la combustion des moteurs.

IV- LE BIOCARBURANT OU ESSENCE VERTE

On illustre le thème de l'énergie, en particulier celui des énergies renouvelables (résidus agricoles et forestiers) pouvant remplacer les sources d'énergie fossile, tout en préservant les productions alimentaires pour les besoins de l'homme. Le fonctionnement du vivant est également abordé sous l'aspect des composés principaux du bois et des propriétés des bactéries (mode de travail des levures).

P : l'alcool est produit par fermentation des sucres présents dans des plantes sucrières. Pouvez-vous m'en citer quelques-unes ?
E : la betterave à sucre, la canne à sucre.
P : oui. On peut aussi utiliser des céréales. En connaissez-vous ?

E : ?
P : le blé, le maïs, l'orge, l'avoine. Mais, ce faisant, on diminue les ressources nécessaires à l'alimentation de l'homme. Un autre moyen de produire de l'alcool biocarburant utilise l'extraction des sucres contenus dans la *lignocellulose*, constituant principal du bois, des résidus ou déchets agricoles et forestiers. Ainsi, cette filière ne consomme pas les ressources nécessaires à l'alimentation humaine, mais il faut toutefois veiller à reconstituer les réserves de bois en replantant des arbres.
P : on va observer avec la loupe à fort grossissement un exemple de paroi cellulaire végétale (végétaux, bois, paille) qui constitue la *biomasse lignocellulosique*. Pour cela, vous coupez en coin une petite branche de forsythia et l'observez à la loupe, en prenant soin de l'éclairer avec la lampe de poche. Que voyez-vous ?
E : des genres de fibres.
P : *oui. La biomasse lignocellulosique est constituée de 3 composés différents en forme de fibres : la cellulose, l'hémicellulose, la lignine*. Seuls, les deux premiers contiennent des sucres.



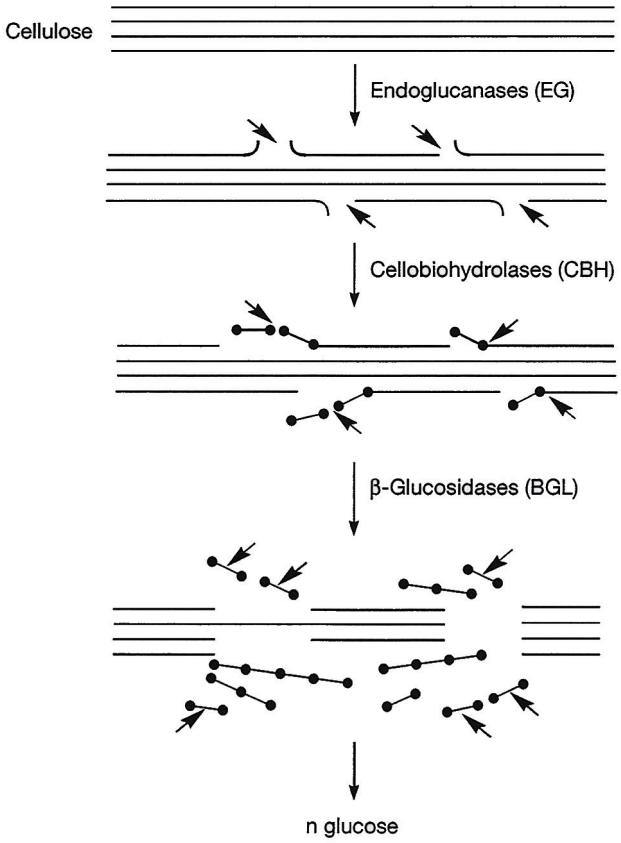
A l'aide du tableau suivant, vous pouvez évaluer le pourcentage moyen de ces 3 composés dans les différents types de biomasse. Combien trouvez-vous ?

Biomasse	Cellulose	Hémicellulose	Lignine
Herbes	30-50	15-40	5-20
Bagasse de canne à sucre	40-55	25-40	5-25
Bois dur	40-50	20-30	15-30
Bois tendre	40-55	10-15	25-30
Résidus agricoles (pailles, etc.)	30-40	10-40	10-30
Moyenne	?	?	?

E : réponses diverses
P : vos résultats sont bons. Ainsi, vous voyez que 75 à 90 % de la biomasse contiennent des composés de structure apparentée à celle des sucres et peuvent donc être transformés en alcool. Pour cela, on doit procéder à 4 opérations différentes.

Première opération : on traite la biomasse par la vapeur d'eau sous pression à chaud dans un appareil appelé autoclave. Qui peut me citer l'exemple d'un tel appareil ?
E : une cocotte-minute
P : oui. *On sépare ainsi la cellulose et l'hémicellulose de la lignine.*

Deuxième opération : on convertit la cellulose et l'hémicellulose en sucres comme le glucose. *On effectue ce qu'on appelle une hydrolyse enzymatique qui reproduit exactement ce que fait la nature : la biodégradation de la cellulose par des micro-organismes, des champignons comme « Trichoderma reesi » qui coupent de manière progressive les chaînes de cellulose en petites molécules de glucose.* Quels sont ceux qui ont déjà observé ce genre de réaction et où ?
E : dans les bois, lorsqu'on voit plein de petits champignons blancs attaquer les vieilles souches d'arbres.
P : oui. Vous avez raison. A une exception toutefois : ici, on force la réaction à aller plus rapidement.



Mode d'action des cellulases sur les fibrilles de cellulose

(d'après D.Ballerini, Institut Français du Pétrole)

Troisième opération : *on transforme ce sucre en alcool par une réaction de fermentation.* On utilise pour cela des levures, comme la levure de boulanger ou la levure de bière, pour obtenir 470 g d'éthanol par kg de sucre.

P : vous allez vous-mêmes réaliser une telle réaction de fermentation, mais avec de la farine, exactement comme fait le boulanger.

Pour chaque type de levure (levure de boulanger et levure de bière), préparer un mélange levure/farine de concentration voisine de 8 %. Pour cela, vous utiliserez des tubes à essais de forme cylindrique de 10 mm de diamètre et d'environ 70 mm de haut, présentant ainsi une contenance d'environ 5 mL. Si l'on suppose que la levure et la farine ont une masse volumique identique, il suffit donc de mesurer les hauteurs pour déterminer les concentrations. Si le mélange à 8 % correspond à une hauteur de 4 mm pour la levure, quelle sera la hauteur à considérer pour la farine ?

E : réponses des élèves

P : oui, environ 50 mm

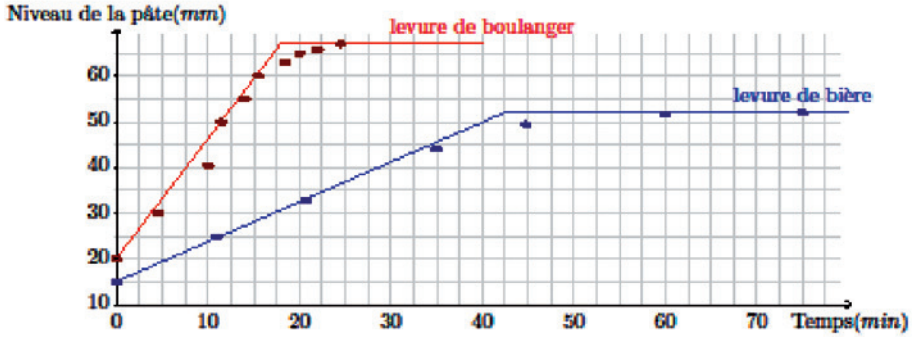
E : les élèves mesurent les 2 mélanges et les disposent dans 2 petits verres de montre

P : mélangez maintenant les 2 poudres (farine + levure) avec la petite spatule dont vous disposez et ajoutez de l'eau, goutte par goutte, jusqu'à former une pâte bien visqueuse et homogène. Prenez une partie de la pâte (farine + levure de boulanger) et disposez-la dans le fond d'un des tubes à essai (tube I). Ce premier tube doit être hermétiquement fermé à l'aide d'un film plastique serré par un élastique. Prenez une autre partie de cette même pâte (farine + levure de boulanger) et disposez-la dans le fond d'un deuxième tube noté tube II . Prenez une partie de la pâte (farine + levure de bière) et disposez-la dans le fond d'un troisième tube noté III. Pour les 2 tubes notés II et III, repérez l'évolution de la hauteur du mélange en fonction du temps et reportez vos résultats sur un graphique. Pour comparaison, vous réalisez une pâte composée uniquement de farine et d'eau, donc sans levure, que vous disposez dans un quatrième tube, noté IV.

E : les élèves obtiennent un graphique traduisant le gonflement de la pâte sous l'action de la levure.

P et E commentent les résultats et comparent levure de boulanger (tube II) et levure de bière (tube III). Les commentaires du professeur peuvent varier en fonction du niveau de la classe. Deux faits sont à signaler pour les deux types de levure :

Les courbes d'évolution sont des droites (on dit qu'elles sont **linéaires**), sauf à la fin. Dans la partie linéaire, il y a croissance continue des populations de levures en fonction du temps. Puis, la courbe devient horizontale : il y a saturation, la vitesse maximale de croissance de la population de levures est atteinte ; la levée de la pâte a atteint son maximum.



On voit enfin que la levure de bière a un effet moindre sur le gonflement de la pâte à pain. C'est normal, puisque cette levure est principalement utilisée pour la fabrication de la bière (fermentation du houblon).

P : qu'observez-vous sur le 1er tube hermétiquement fermé ?
E : le film plastique a bombé, la pâte a monté.
P : oui, pour quelle raison ?
E : ?
P : parce qu'au cours de la réaction, il se forme un dégagement gazeux, du dioxyde de carbone CO_2, libéré par la réaction de fermentation.
P : qu'observez-vous sur le 4e tube ne contenant pas de levure ?
E : la pâte n'a pas bougé.
P : ainsi, vous pouvez facilement déduire que c'est l'action de la levure qui fait monter la pâte : on dit que la pâte a fermenté sous l'action de la levure.

Quatrième opération : on distille le mélange eau-éthanol obtenu pour produire un alcool anhydre, donc totalement exempt d'eau, qui sera mélangé à l'essence ou bien utilisé à l'état pur dans des moteurs adaptés. L'opération de distillation consiste à séparer deux liquides l'un de l'autre : on fait bouillir le mélange à une température déterminée ; le liquide qui bout à une température inférieure à celle de l'autre se condense le premier : on peut ainsi le recueillir dans un récipient.

IV- SOURCES DE BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

P : Il existe 3 sources de biomasse lignocellulosique : les résidus agricoles et forestiers, les sous-produits de transformation du bois, les cultures uniquement dédiées à cette filière biomasse.

P : voyons tout d'abord les déchets et résidus agricoles. Pouvez-vous en citer quelques-uns ?
E : la paille, les tiges inutiles, autres réponses
P : oui. On peut donc citer les pailles de céréales (blé, orge, seigle, avoine), de colza, de lin, les tiges de tournesol, les fanes, les résidus de canne à sucre, de riz, de maïs, etc. ainsi que la partie non comestible des plantes laissées sur place après la récolte.
En France, on peut estimer le tonnage de ces résidus à 115 millions de tonnes par an, et à 5 000 millions de tonnes par an dans le monde. Le potentiel énergétique annuel de ces déchets agricoles serait de l'ordre de 1,8 Gtep. A comparer avec les 10 Gtep d'énergie annuelle consommés actuellement dans le monde.

P : examinons maintenant les résidus forestiers. Pouvez-vous me dire de quoi ils sont constitués ?
E : branches, rameaux, feuilles, troncs abîmés, etc.
P : oui. Ce sont tous les déchets laissés sur place lors de l'exploitation de la forêt. On peut estimer qu'à 1 m³ de bois emporté de la forêt on laisse sur place 1 m³ de déchets. Ce potentiel énergétique est d'environ 1 Gtep par

an pour le monde.

P : voyons les sous-produits de transformation du bois. Pouvez-vous m'en citer quelques-uns ?
E : la sciure, les morceaux de bois inutilisables après sciage, les débris de bois, les granulés de bois, etc.
P : oui. Vous avez raison. Mais dans ce cas, on les utilise en grande partie pour réaliser la production des panneaux de bois, le chauffage et dans l'industrie du papier. Compte tenu de ces données, on peut estimer que le potentiel énergétique mondial de ces résidus se monte à 0,3 Gtep par an.

P : voyons maintenant les cultures dédiées à ce type de biomasse. Trois types de cultures sont envisageables :

***** Les cultures annuelles que l'on peut faire sur les terres réservées à la jachère. Qui sait ce que signifie jachère ?***
E : réponses diverses.
P : en fait, ce terme a deux significations légèrement différentes : l'une, classique, qui décrit une terre qu'on laisse temporairement se reposer en ne lui faisant pas porter de récolte, l'autre , au regard de l'Union Européenne, qui décrit une terre que l'on n'a pas le droit de cultiver sous peine de surproduction, c'est-à-dire des productions que l'on ne pourra pas vendre. On pourrait donc les cultiver avec des plantes spécialement dédiées à la transformation en biocarburant : une plante qui pousse vite et qui porte des graines riches en composés de structure voisine de celle des sucres. Un exemple est le triticale qui possède un pouvoir énergétique élevé. On estime que dans l'Union Européenne, l'utilisation de jachères pourrait représenter l'équivalent énergétique de 6 à 8 Mtep par an. Se reporter à la description de la plante triticale trouvée sur Internet (Wikipédia).

*****Les cultures pérennes qui sont récoltées chaque année. Que signifie pérenne ?***
E : ?
P : une plante pérenne est une plante qui repousse chaque année. On n'a donc pas besoin de la semer à nouveau chaque année. La plus énergétique de ces plantes est le miscanthus, et plus particulièrement le miscanthus géant. Se reporter à la description de la plante miscanthus géant sur internet (Wikipédia).

****Les espèces pérennes qui sont récoltées de manière pluriannuelle. Que signifie pluriannuelle ?***
E : une plante que l'on ne peut pas récolter chaque année.
P : oui. Il faut attendre qu'elle devienne assez grande pour la récolter. C'est par exemple le cas des arbres qui poussent assez rapidement, et qu'on exploite lorsqu'ils sont encore de petite taille, ce sont les taillis. Pouvez-vous m'en citer quelques exemples ?
E : les peupliers, les saules.
P : oui. On peut ajouter les eucalyptus qui poussent dans des régions plus chaudes que les nôtres. Comme ces arbres poussent très vite, on peut les exploiter assez rapidement : tous les 2-3 ans pour les saules, tous les 7 ans pour les peupliers. Et on peut bien entendu les planter de manière très dense puisqu'on ne souhaite pas les voir trop grandir…Se reporter à la description du saule, du peuplier et de l'eucalyptus trouvée sur internet (Wikipédia).