

Production d'éthanol à partir de biomasse

Daniel Ballerini

Summary

Ethanol production from biomass

Ethanol is already used as biofuel in different countries such as Brazil, United States of America, Canada and France. Ethanol may be directly added to the gasoline or in ETBE (ethyl-tertio-butylether) form, synthesized with isobutene. In this paper, are presented different parameters which control the ethanolic fermentation and different schemes of processes using starchy vegetals (corn, wheat), sugar plants (sugar beet, sugar cane) and the lignocellulosic biomass. Some economical aspects are covered and the main characteristics of ethanol and ETBE as biofuel are summarized.

Mots-clés

Éthanol, fermentation éthanolique, substrats de fermentation, procédés de production d'éthanol.

Key-words

Ethanol, ethanolic fermentation, vegetal substrates, processes of ethanol production.

Le regain d'intérêt porté aujourd'hui à la production de bioéthanol est lié à la volonté de la communauté internationale de promouvoir, dans le cadre du développement durable, les sources d'énergie renouvelable, parmi lesquelles figure l'usage de biocarburants dans les transports.

L'éthanol peut être ajouté directement dans les essences ou indirectement sous forme d'éthyl-tertio-butyléther (ETBE), synthétisé à partir d'éthanol d'origine agricole et d'isobutène. Ces produits oxygénés, qui possèdent un bon indice d'octane, ont aussi pour effet d'améliorer la qualité des émissions des moteurs.

L'éthanol est déjà largement utilisé comme biocarburant dans plusieurs pays, dont le Brésil, les États-Unis, le Canada et la France, et des programmes sont en cours de développement en Europe, principalement en Suède et en Espagne. La production mondiale de bioéthanol avoisine les 20 millions de tonnes dont 70 % à usage carburant.

L'exemple brésilien est le mieux connu avec son programme « Proalcool » mis en place depuis 1975, à partir de la canne à sucre. La production annuelle d'éthanol est en moyenne de l'ordre de 12 millions de m³ avec des pics de 15 millions de m³. L'alcool est ajouté soit en mélange dans les essences à un taux de 24 %, soit utilisé pur.

Aux États-Unis, où dès 1973 on utilisa le « gasohol » (gasoline-alcohol) contenant 10 % d'éthanol déshydraté, les essences reformulées avec de l'éthanol sont employées essentiellement dans les états du Middle West. A Chicago, 95 % des essences commercialisées sont additivées avec du bioéthanol [2]. Ce marché est en pleine mutation, avec la remise en cause du méthyl-tertio-butyléther (MTBE), mélangé à grande échelle avec les carburants et à l'origine de nombreux cas de contamination des nappes phréatiques et des lacs [3]. De ce fait, le remplacement du MTBE par l'éthanol est envisagé.

En France comme en Europe, plusieurs mesures furent décidées. Ainsi l'arrêté du 16 septembre 1987, pris en application de la directive européenne du 5 décembre 1985, autorisait l'incorporation d'éthanol et d'ETBE dans les

essences, respectivement au taux maximal de 5 et 15 % en volume.

En France, les essences reformulées avec des composés oxygénés le sont avec de l'ETBE dont la production actuelle est de 200 000 t/an. Les éthers-carburants sont généralement préférés aux alcools pour leur moindre pouvoir corrosif et pour l'absence des problèmes de séparation de phases.

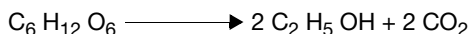
Le développement de la production d'éthanol va dans le sens de la proposition de la directive de la Commission européenne qui souhaite imposer une part minimale de biocarburants vendus sur le marché, allant de 2 % sur l'ensemble essence et gazole en 2005, jusqu'à 5,75 % en 2010. L'éthanol, utilisé tel quel ou après transformation en ETBE, devrait représenter l'essentiel des biocarburants dans le cas des essences reformulées.

La fermentation éthanolique

L'éthanol, qui peut être produit par voie synthétique à partir d'éthylène, l'est essentiellement par voie biologique pour usages à des fins alimentaires et énergétiques.

Les rendements

Le glucose, ou tout autre hexose fermentescible, est converti en éthanol, selon l'équation simplifiée suivante dite équation stoechiométrique :



A partir de cette équation, est calculé le rendement théorique, dit rendement de Gay-Lussac, avec 51,1 kg d'éthanol produit à partir de 100 kg de glucose.

Pasteur avait déjà montré que d'autres composés que l'éthanol et le gaz carbonique sont toujours synthétisés durant la fermentation. Les principaux sous-produits formés sont le glycérol, le succinate et les huiles de fusel (mélange d'alcools amylique et propylique et de leurs isomères), auxquels vient s'ajouter la production des cellules de

microorganismes capables de fermenter les sucres en éthanol.

Le rendement en éthanol, généralement considéré comme la valeur maximale que l'on peut atteindre en fermentation alcoolique est égal à 94,7 % du rendement théorique. C'est le rendement de Pasteur qui aboutit à la production de 48,4 g d'éthanol à partir de 100 g de glucose.

Les microorganismes

Les microorganismes les plus connus, capables de transformer les sucres en éthanol, tels que le glucose et le saccharose, sont des levures dont les plus performantes appartiennent aux genres *Saccharomyces* (*S. cerevisiae*, *S. uvarum* ou *carlsbergensis*, *S. bayanus*), *Schizosaccharomyces* (*S. pombe*) et *Kluyveromyces* (*K. fragilis*). Certaines de ces souches présentent des propriétés intéressantes : *S. uvarum* est floculante tandis que *S. pombe* est thermotolérante et osmotolérante.

On connaît aussi de nombreuses espèces bactériennes produisant de l'éthanol à partir de sucres. Parmi celles-ci, *Zymomonas mobilis*, la bactérie utilisée dans la fabrication du pulque mexicain à partir de jus d'agave, se détache nettement au vu de ses performances.

Les résultats relatifs au taux de croissance spécifique (h^{-1}) et à la productivité spécifique en éthanol [g. éthanol. (g. biomasse) $^{-1}$. h^{-1}] démontrent la supériorité de *Zymomonas mobilis*. En revanche, les souches de *Saccharomyces* apparaissent comme plus résistantes aux fortes teneurs en éthanol. Certaines espèces sont en effet capables de se développer en présence de concentrations en alcool allant jusqu'à 12 % (v/v), de survivre à 15 % (v/v) et de fermenter les sucres pour aboutir à des teneurs en éthanol pouvant dépasser 12 % (v/v).

Les vitesses de fermentation des levures sont pratiquement indépendantes des variations de pH dans l'intervalle 3,5-6 alors que l'optimum de pH pour *Z. mobilis* se situe entre 5 et 7. Cette différence de comportement entraîne des répercussions importantes au niveau des fermentations industrielles, essentiellement en ce qui concerne leur protection contre les contaminations. En effet, la croissance des principaux contaminants des fermentations alcooliques est sévèrement réprimée lorsque le pH est inférieur à 5. De ce fait, si l'acidité du milieu (pH = 4) protège naturellement la culture des levures de ces contaminations, ce n'est pas du tout le cas des fermentations avec *Z. mobilis* qui devront être réalisées dans des conditions de stérilité.

Enfin, si *Zymomonas* fermente correctement le glucose ou le fructose dans des milieux synthétiques, ses performances diminuent nettement en présence de substrats industriels. Avec les mélasses ou les jus de canne à sucre ou de betterave, la production de levanes et de sorbitol par *Zymomonas* abaisse le rendement éthanol qui ne dépassera pas 88 % de la valeur théorique.

Les principaux paramètres contrôlant la fermentation éthanolique

• L'éthanol

Au cours de la fermentation éthanolique, le premier facteur limitant est souvent l'éthanol lui-même, en agissant à la fois sur la croissance du microorganisme et sa capacité fermentaire. Au regard de la toxicité potentielle de l'éthanol, les souches appartenant aux genres *Saccharomyces* et

Schizosaccharomyces apparaissent comme les levures les plus résistantes.

• La température

La viabilité des cellules de levures est affectée par des températures élevées (> 35 °C). On observe aussi que la température maximale de croissance de *S. cerevisiae* diminue lorsque la teneur en éthanol dans le milieu de culture augmente et que pour des concentrations identiques en éthanol dans le milieu, la productivité spécifique en éthanol augmente avec la température.

• L'oxygène

L'influence de l'oxygène est multiple. Une légère aération du milieu favorise le renouvellement des cellules de microorganismes. On observe encore que le rendement en éthanol est sensiblement amélioré en présence d'une microaération. En revanche, une trop forte aération orientera préférentiellement le métabolisme vers la production de biomasse. Enfin l'apport d'oxygène en faible quantité augmente la tolérance des souches à des teneurs élevées en éthanol.

• Le pH

Les incidences du pH sur la fermentation éthanolique ont déjà été abordées dans un paragraphe précédent.

• Les éléments minéraux

Comme source d'azote, les souches productrices d'éthanol utilisent, dans un ordre préférentiel, l'azote provenant des aminoacides, l'azote ammoniacal et enfin l'azote de l'urée. Parmi les autres macroéléments, les plus importants sont le phosphore, le potassium et le magnésium.

• Le gaz carbonique

L'effet inhibiteur du gaz carbonique sur la croissance et l'activité fermentaire a été démontré pour des concentrations relativement importantes en CO₂ dissous.

Les substrats de fermentation

Les principaux substrats de fermentation peuvent être classés en trois grandes catégories :

- les plantes amylicées : blé, maïs et des tubercules tels que le manioc, la pomme de terre ;
- les plantes sucrières : betteraves sucrières et canne à sucre ;
- la biomasse lignocellulosique pour laquelle les essais ne sont encore qu'au stade pilote ou préindustriel.

Les rendements en éthanol ramenés à l'hectare cultivé avec chacune de ces différentes plantes sont regroupés dans le *tableau I*. Ils font apparaître des différences significatives, avec les plus fortes valeurs obtenues avec la canne à sucre.

Tableau I - Rendements à l'hectare.

Plante	Rendement éthanol (m ³ .ha ⁻¹)
Betterave	6,0-7,5
Blé	2,7-3,5
Canne à sucre	7,5-11,0
Maïs	2,7-3,5

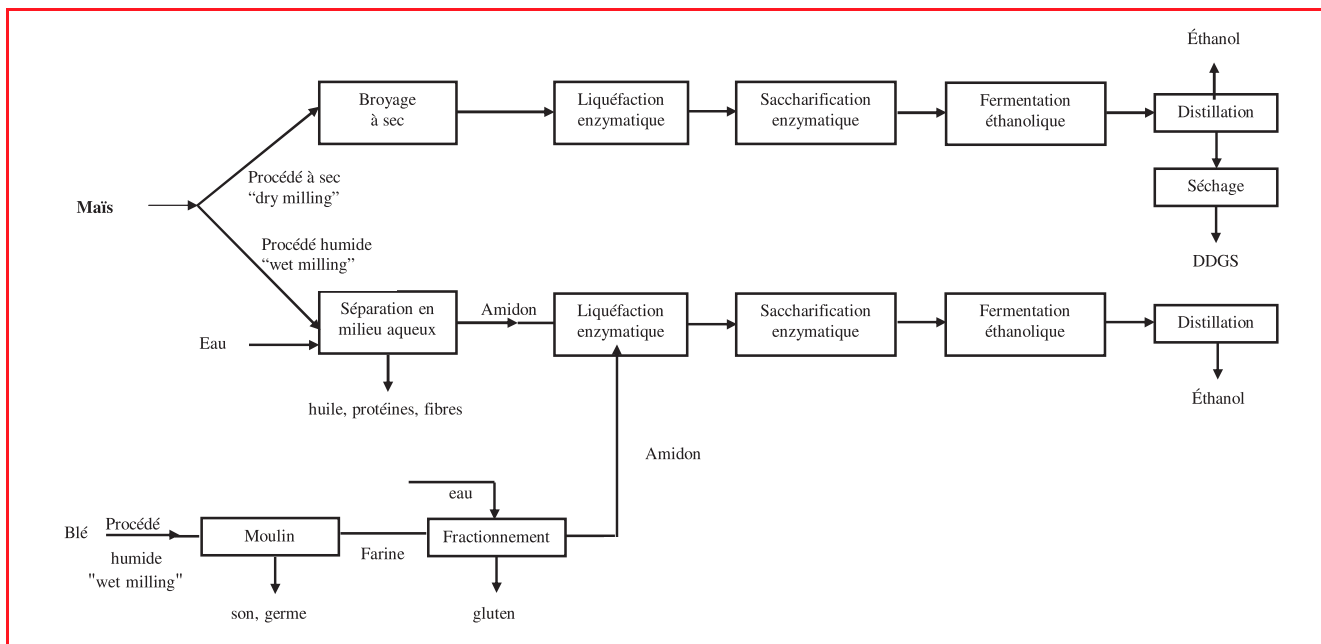


Figure 1 - Fermentation des substrats amylicés.

Les plantes amylicées

Les plantes amylicées peuvent être traitées selon deux procédures mettant en œuvre des moutures sèches ou humides (figure 1).

Dans le procédé à sec (« dry milling »), le maïs par exemple, est broyé à une taille de particules inférieures au mm, avant d'intégrer directement l'unité de fermentation. Les produits non fermentescibles en éthanol sont valorisés après séchage sous forme de DDGS (distiller dried grain solubles) en alimentation animale. Ce type de procédé est généralement utilisé pour de petites unités.

Les plus grosses unités emploient le procédé par voie humide (« wet milling ») dans lequel différents composants tels que huiles, fibres et protéines sont séparés et valorisés tandis que l'amidon est transféré vers l'unité de fermentation éthanolique. Pour ce qui concerne le blé, le germe et le son sont d'abord séparés par voie mécanique avant de fractionner en milieu aqueux le gluten et l'amidon.

L'amidon est ensuite hydrolysé par voie enzymatique en deux étapes successives : liquéfaction à 100-105 °C avec des α -amylases, suivie de la saccharification à 50-55 °C avec l'amyloglucosidase libérant le glucose.

Les plantes sucrières

Les schémas de fermentation des jus sucrés et des mélasses issus de la betterave sucrière et de la canne à sucre sont représentés sur la figure 2. Les jus sucrés comme les mélasses sont directement fermentescibles en éthanol, sans avoir à procéder à des opérations préalables de saccharification. Les pulpes de betteraves sont utilisées en

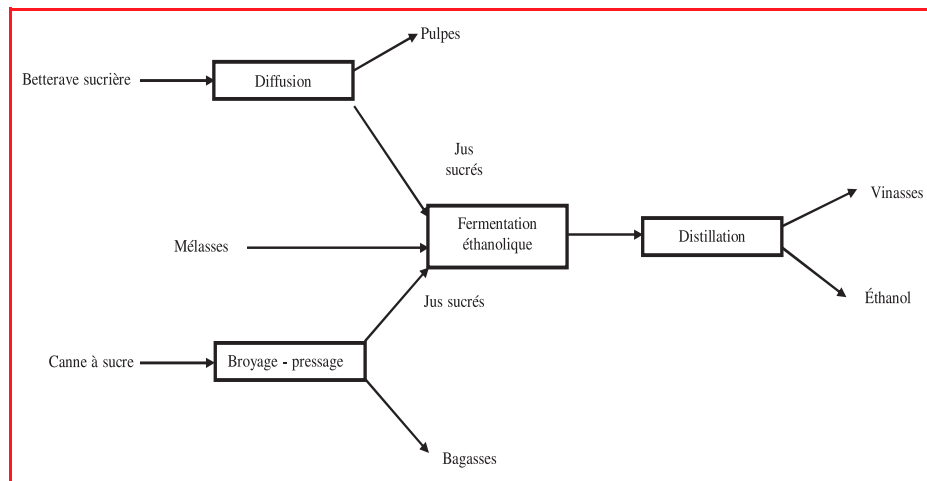


Figure 2 - Fermentation des substrats sucrés.

alimentation animale, comme une bonne partie des vinasses. Les bagasses de canne à sucre sont avant tout une source d'énergie renouvelable auxquelles les vinasses concentrées peuvent être ajoutées.

Les plantes lignocellulosiques

La biomasse lignocellulosique est un substrat complexe, constitué des trois principales fractions que sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Le procédé de production d'éthanol va consister à optimiser l'obtention de sucres monomères issus des fractions cellulosiques et hémicellulosiques, puis de les transformer en éthanol (figure 3).

Une première étape de prétraitement de la biomasse doit être réalisée pour améliorer la susceptibilité à l'hydrolyse des fractions cellulosiques et hémicellulosiques. Les méthodes de prétraitement répondant le mieux à ces objectifs sont le prétraitement à l'acide dilué, l'explosion à la vapeur et la thermohydrolyse puisqu'elles permettent de satisfaire aux

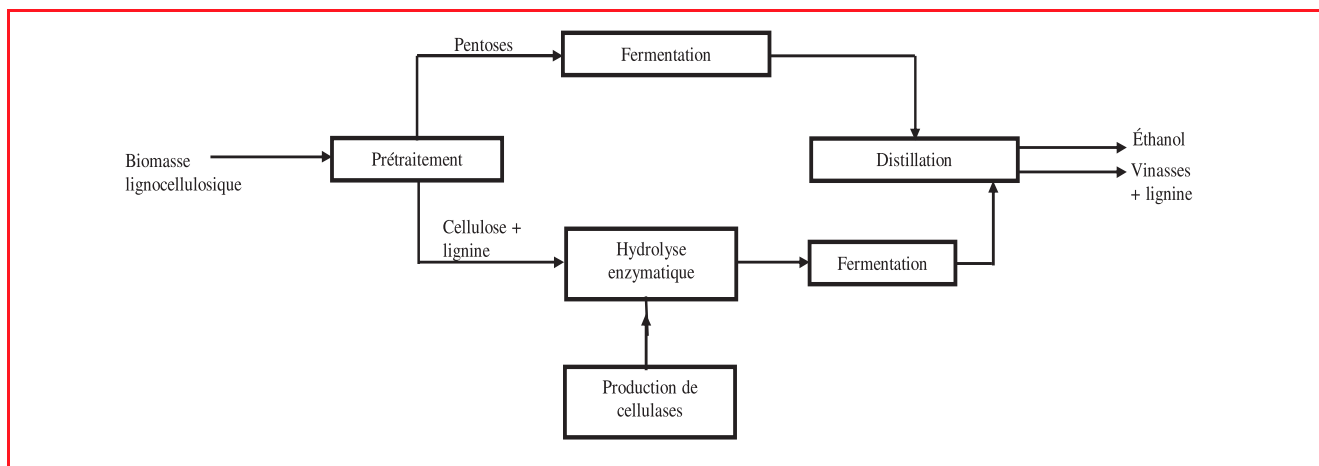


Figure 3 - Fermentation des substrats lignocellulosiques.

objectifs fixés tout en minimisant la formation de composés de dégradation des sucres.

Des actions de recherche doivent encore porter sur l'amélioration de l'activité des enzymes, les cellulases, afin de réduire le coût de l'hydrolyse enzymatique. Un autre verrou technologique du procédé concerne la fermentation alcoolique des pentoses qui n'est toujours pas vraiment applicable à l'échelle industrielle. Ce dernier point impose de développer de nouvelles souches capables de démontrer des performances voisines de celles démontrées sur glucose par *Saccharomyces cerevisiae*.

Les procédés

Pour donner un exemple, au Brésil, 70 % des unités de production utilisent des procédés discontinus pour des capacités allant jusqu'à 1 500 m³ d'éthanol/jour. Les autres unités fonctionnent en continu. Dans les deux cas, les levures, après fermentation, sont séparées par centrifugation, lavées en présence d'acide sulfurique dilué pour réduire la contamination bactérienne, et recyclées.

Les productions en batch sont limitées par l'effet inhibiteur de l'éthanol sur la croissance des microorganismes et la productivité en éthanol. Cette inhibition peut être

sensiblement diminuée en utilisant des systèmes continus avec plusieurs réacteurs en cascade (figure 4). Les productivités en éthanol passent de 2-3 g.l⁻¹.h⁻¹ en batch à 10-20 g.l⁻¹.h⁻¹ en continu. Les plus grosses unités de production d'éthanol fonctionnent généralement en continu. D'autres améliorations aux procédés peuvent être apportées en utilisant des cellules immobilisées ou des levures floculantes, ou bien encore en éliminant l'éthanol synthétisé au fur et à mesure de sa production (extraction sous vide, pervaporation). Cependant, ces améliorations techniques potentielles se traduisent aussi par une augmentation des coûts. De ce fait, peu d'entre elles sont mises en œuvre à l'échelle industrielle à l'heure actuelle.

Les aspects économiques

Les contributions respectives des coûts de matières premières et des coûts industriels de production sur le prix de revient de l'éthanol sont regroupées dans le tableau II [6]. Dans leur ensemble, à l'exception de la biomasse lignocellulosique, les prix des matières premières interviennent pour plus de la moitié du coût de l'éthanol.

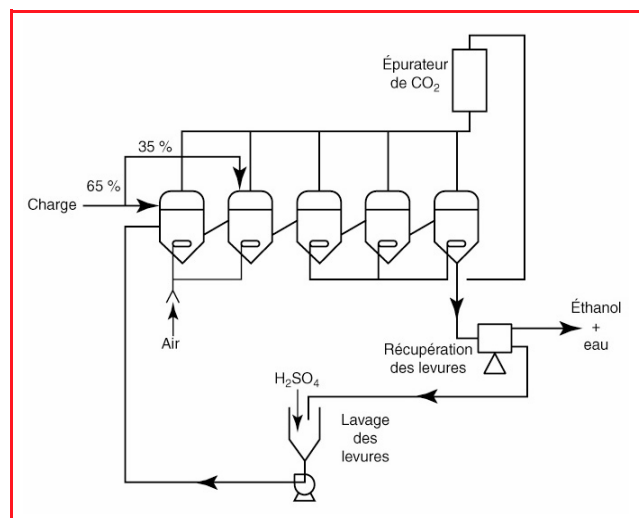


Figure 4 - Fermentation en cascade [5].

Tableau II - Distribution des coûts de production de l'éthanol.

Matières premières	Part matières premières (%)	Coût industriel de production (%)
Canne à sucre	50-83	17-50
Betteraves	50-68	32-50
Blé	53-87	13-47
Maïs	60-70	30-40
Biomasse lignocellulosique	9-23	77-91

Au Brésil, l'État diminue progressivement ses subventions. Aux États-Unis, le mélange E10 (10 % d'éthanol dans l'essence) bénéficie d'une réduction des taxes qui est reconduite jusqu'en 2007, moyennant une diminution progressive pour arriver à 51 cents/gal. Des exonérations venant de certains États, pouvant aller jusqu'à 20 cents/gal., s'ajoutent à ces réductions de taxes.

En France, les dispositions fiscales en faveur des biocarburants, qui existaient depuis 1987, ont été significativement augmentées par les lois des finances pour 1992 et 1993 qui fixaient un plafond de défiscalisation de la taxe intérieure sur

les produits pétroliers, toujours en vigueur, à hauteur de 50,23 /hL (329,50 F/hL) pour l'éthanol.

L'éthanol biocarburant

Près de 25 % des terres mises en jachères sont aujourd'hui cultivées grâce aux biocarburants.

Le bioéthanol et son dérivé ETBE représentent une production de 92 550 tonnes d'éthanol en 2000. La fabrication d'ETBE est réalisée, à partir d'éthanol ex betteraves et blé cultivés sur 27 800 ha, dans trois unités industrielles.

La filière éthanol présente un bilan environnemental contrasté :

- l'éthanol comme l'ETBE ont de bons indices d'octane ;
- les rejets de CO et d'hydrocarbures dans les émissions des moteurs sont légèrement améliorés ;
- par rapport aux NO_x, leur utilisation est neutre ou légèrement négative ;
- si l'éthanol est biodégradable, l'ETBE l'est aussi mais beaucoup moins aisément et rapidement ;
- ce sont des produits qui génèrent des aldéhydes.

C'est cependant en priorité dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO₂) que les biocarburants pourront bénéficier d'incitations au développement. Les bilans d'émission de CO₂, exprimés en grammes de CO₂ par km parcouru [7] sont respectivement de 216 pour les essences, 183 pour l'ETBE et 111 pour l'éthanol. Ces deux dernières valeurs prennent en compte le crédit de CO₂ de l'ordre de 70 % du fait de l'origine de l'éthanol issu de la biomasse produite en grande partie grâce à la photosynthèse. Ceci a pour conséquence de rendre

attractifs les biocarburants en apportant un bilan CO₂ favorable.

Références

- [1] La Rovere E.L., Vingt cinq ans d'éthanol au Brésil, *Biofutur*, **1999**, 195, p. 20.
- [2] Powers S.E., Rice D., Doohar B., Alvarey P.J.J., Will ethanol-blended gasoline affect groundwater quality?, *Environmental Science and Technology New*, **2001**, January 1, p. 24.
- [3] United States Environmental Protection Agency. Achieving clean air and clean water: the report of the blue ribbon panel on oxygenates in gasoline, EPA 420-R-99-021, US Government Printing Office, Washington DC, **1999**.
- [4] Ogier J.C., Ballerini D., Leygue J.P., Rigal L., Pourquoié J., Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique, *Oil and Gas Science and Technology, Revue de l'IFP*, **1999**, 54 (1), p. 67.
- [5] Arlie J.P., Ballerini D., Nativel F., Les procédés modernes de fabrication de l'éthanol de fermentation, *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **1984**, 39 (6), p. 781.
- [6] Kosaric N., Vardar-Sukan F., Economic and Energy Aspects of Ethanol Fermentation, *The Biotechnology of Ethanol-Classical and Future Applications*, M. Roehr (ed.), Wiley VCH Weinheim, Allemagne, **2001**, p. 187.
- [7] Douaud A., Quelles énergies pour l'automobile de demain ?, *Pétrole et Techniques*, **2001**, 435, p. 104.

Daniel Ballerini

est chef de Département à l'Institut Français du Pétrole*.



* Institut Français du Pétrole, 1-4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison Cedex.
Tél. : 01 47 52 62 88. Fax : 01 47 52 70 01.
E-mail : daniel.ballerini@ifp.fr

