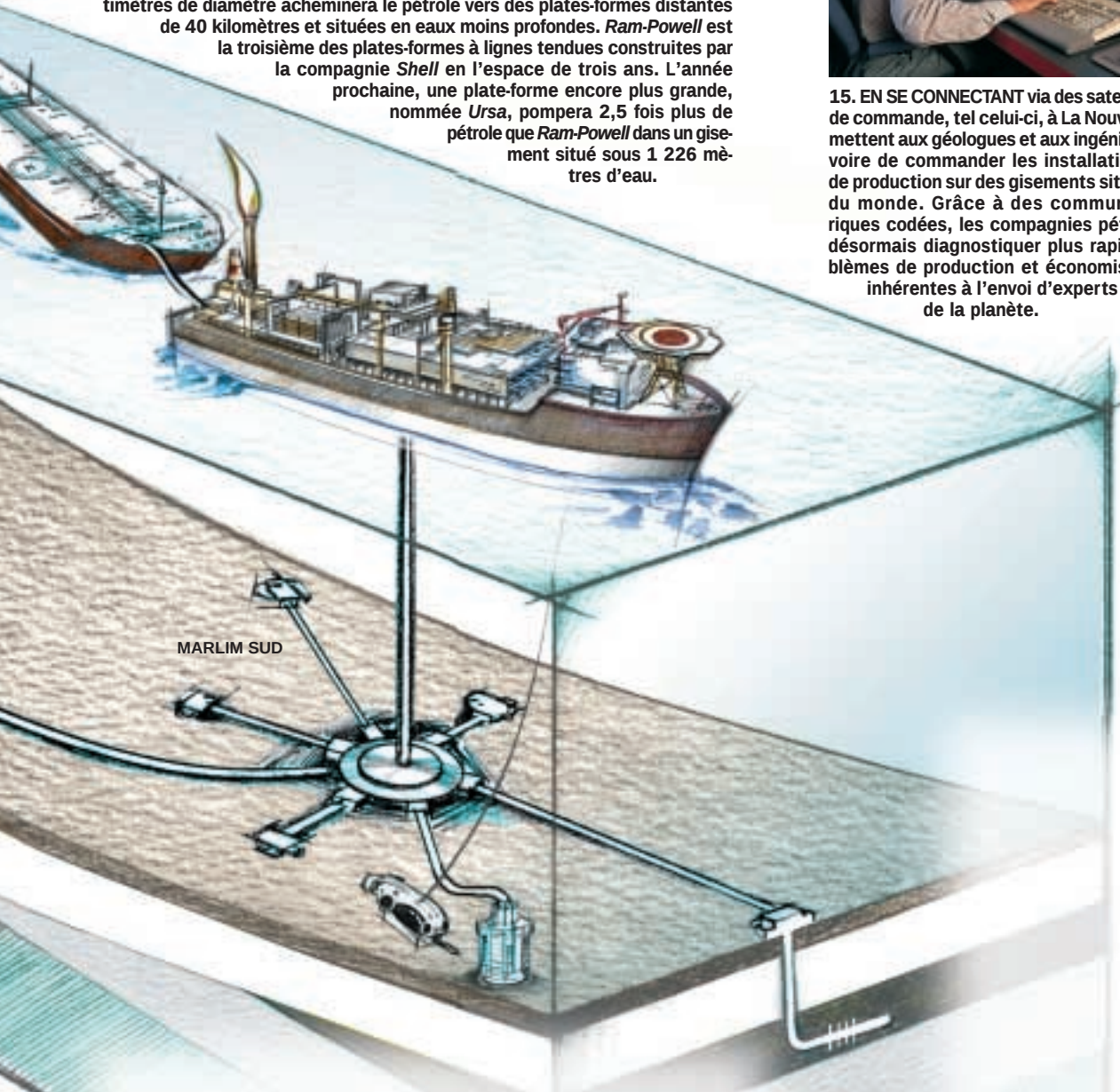


13. LA PLATE-FORME RAM-POWELL (au centre), construite dans le golfe du Mexique, par plus de 1 000 mètres de profondeur d'eau, par les compagnies Shell Oil, Amoco et Exxon, fonctionne depuis septembre 1997. Haute comme un immeuble de 46 étages, cette plate-forme est fixée sur des piliers de 270 tonnes, enfoncés dans le fond océanique, à 980 mètres au-dessous de la surface de l'eau. Avec ses douze lignes d'ancrage périphériques, chacune d'un diamètre de 71 centimètres, elle résisterait à des vagues de 22 mètres de hauteur et à des vents de 225 kilomètres par heure. Cette installation, qui a coûté cinq milliards de francs, peut percer des puits jusqu'à six kilomètres sous le fond océanique afin d'extraire les 17 millions de tonnes de pétrole qui, selon les estimations, sont récupérables dans le gisement. Un pipeline de 30 centimètres de diamètre acheminera le pétrole vers des plates-formes distantes de 40 kilomètres et situées en eaux moins profondes. Ram-Powell est la troisième des plates-formes à lignes tendues construites par la compagnie Shell en l'espace de trois ans. L'année prochaine, une plate-forme encore plus grande, nommée Ursa, pompera 2,5 fois plus de pétrole que Ram-Powell dans un gisement situé sous 1 226 mètres d'eau.



14. UNE DES TÊTES DE PUITS les plus profondes installées sous l'eau (ci-dessus) se trouve à plus de 1 709 mètres sous la surface de l'océan Atlantique Sud, dans le champ de Marlim, au large du Brésil. À elle seule, la zone Sud de ce champ contiendrait 1,4 milliard de tonnes de pétrole brut. Il y a peu, ces réserves étaient inaccessibles. Des sous-marins téléguidés installent aujourd'hui un équipement de production sur le fond océanique. Le pétrole sera alors soit acheminé vers une plate-forme voisine située en eaux moins profondes, soit stocké provisoirement dans un navire en surface, avant d'être transvasé à bord de navettes. Les techniques d'immobilisation des navires de stockage, à la verticale du puits, ont beaucoup progressé. Quand le fond est à moins de quelques centaines de mètres de profondeur, on stabilise les navires par un système d'ancres. Au-delà, l'immobilisation doit être active : le navire doit utiliser le système de positionnement par satellite et des balises fixées sur le fond marin pour actionner ses moteurs et compenser sa dérive. Ces techniques devraient permettre d'exploiter des gisements sous-marins situés à plus de 3 000 mètres de profondeur d'eau.



15. EN SE CONNECTANT via des satellites, des centres de commande, tel celui-ci, à La Nouvelle-Orléans, permettent aux géologues et aux ingénieurs de surveiller, voire de commander les installations de forage et de production sur des gisements situés à l'autre bout du monde. Grâce à des communications numériques codées, les compagnies pétrolières peuvent désormais diagnostiquer plus rapidement des problèmes de production et économiser les dépenses inhérentes à l'envoi d'experts aux quatre coins de la planète.

Roger Anderson est directeur du Groupe «Pétrole» du Centre de l'énergie, à l'Université Columbia.

George A. COOPER, *Le forage dirigé*, in *Pour la Science*, juillet 1994.

Deepwater Technology, Gulf Publishing, supplément de *World Oil*, août 1997.

World Oil's 4-D Seismic Handbook : The Fourth Dimension in Reservoir Management, Gulf Publishing, 1997.

Des carburants liquides à partir du gaz naturel

SAFAA FOUDA

*Le gaz naturel est plus propre et plus abondant que le pétrole.
De nouveaux procédés chimiques le transforment en carburants liquides
aussi efficaces et bon marché que l'essence.*

Depuis peu, des véhicules consomment du gaz naturel : des véhicules utilitaires, des camions, des autobus et des automobiles s'approvisionnent en gaz sous une pression de 200 atmosphères et stockent ce carburant dans des réservoirs spéciaux, qui libéreraient immédiatement leur contenu en cas d'accident, afin d'éviter les risques d'explosion. Ces véhicules sont silencieux, leur moteur s'utilise moins que les moteurs à essence, et ils polluent moins, car le gaz naturel ne contient ni composés soufrés, ni composés azotés, ni métaux lourds.

Toutefois, une autre mutation est en cours : dans quelques pays, les automobilistes ont changé de carburant... sans s'en rendre compte : leur gazole, liquide, a été produit en partie à partir de gaz naturel. Un tel carburant, aujourd'hui fabriqué par la Société *Sasol*, en Afrique du Sud, satisfait aux plus strictes réglementations sur la pollution de l'air.

Combustible fossile très propre, le gaz naturel est aussi très abondant : la Terre en renferme suffisamment pour que l'on produise facilement 80 milliards de mètres cubes d'hydrocarbures liquides, soit plus de deux fois la quantité de pétrole jamais découverte aux États-Unis. Certains gisements de charbon et d'autres formations géologiques en contiendraient même deux fois plus. Aujourd'hui, le gaz naturel sortant des puits de pétrole de nombreuses régions du monde a si peu de valeur qu'il est soit brûlé sur place, soit réinjecté dans le sol. En Alaska, par exemple, les compagnies pétrolières en réinjectent quotidiennement 200 millions de mètres cubes, principalement pour éviter que

le dioxyde de carbone formé lors de la combustion ne surcharge l'atmosphère en gaz carbonique, qui accroît l'effet de serre.

Toutefois, lorsque les réserves de pétrole brut diminueront, les combustibles liquides dérivés du gaz naturel pourraient prendre la relève pendant encore une décennie. Bien qu'abondant, le gaz naturel se trouve souvent dans des gisements éloignés des consommateurs. Or, en raison de sa faible densité, son transport par pipeline est quatre fois plus coûteux que celui du pétrole. Le gaz récupéré sur les gisements peut être liquéfié par refroidissement et compression, avant un transport par tanker, mais les installations nécessaires à une telle transformation sont massives et complexes ; en outre, les gaz naturels liquéfiés sont difficiles à manipuler. Ne pourrait-on en faire un carburant directement consommable par les véhicules existants, au prix d'un réglage des moteurs ?

De récentes découvertes techniques ont amené plusieurs compagnies pétrolières à envisager la construction de sites de transformation du gaz naturel, afin de le convertir en hydrocarbures liquides qu'elles achemineraient ensuite à peu de frais. En Louisiane, par exemple, la Société *Exxon* a fait fonctionner une unité de démonstration d'une telle conversion. Dans la péninsule d'Arabie, le Qatar négocie aujourd'hui avec trois compagnies pétrochimiques pour faire construire des usines qui transformeraient le gaz naturel extrait d'un énorme gisement de gaz sous-marin (un réservoir d'un seul tenant qui renferme environ un dixième de toutes les réserves

prouvées). De surcroît, la plus grande compagnie pétrolière norvégienne, la Société *Statoil*, projette de construire de petits modules, montés sur des plates-formes flottantes, pour convertir le gaz naturel de gisements en mer du Nord. Les divers projets utiliseront des techniques relativement différentes, mais ils seront tous confrontés au même problème de chimie : comment fabriquer de grosses molécules d'hydrocarbures à partir de molécules plus petites ?

La formule classique

Le principal composant du gaz naturel est le méthane, dont la molécule est constituée de quatre atomes d'hydrogène symétriquement disposés autour d'un atome de carbone. Cette symétrie tétraédrique rend le méthane particulièrement stable. Pour le transformer en hydrocarbures liquides, on doit d'abord rompre ses liaisons chimiques, ce que l'on fait en le chauffant sous pression ou en le mettant en contact avec des catalyseurs, c'est-à-dire des substances qui favorisent des réactions chimiques sans servir de réactif.

Pour transformer le gaz naturel, les chimistes ont d'abord testé la méthode la plus directe : dans un premier temps, on rompt les liaisons chimiques du méthane en le chauffant en présence de vapeur d'eau, grâce à un catalyseur à base de nickel. Ce «reformage à la vapeur» engendre un «gaz de synthèse», mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone. Puis, à partir de ce gaz de synthèse, on produit des hydrocarbures plus lourds (des molécules composées seulement d'atomes de carbone et d'atomes



1. CE GAZ BRÛLÉ en tête d'un puits de pétrole du Wyoming échauffe inutilement l'atmosphère. Des réserves de gaz naturel sont aujourd'hui gaspillées parce que le transport du gaz naturel par pipeline est bien plus coûteux que le transport du pétrole.

d'hydrogène), par une méthode qui fut inventée en 1923 par Franz Fischer et Hans Tropsch (ces deux chimistes voulaient donner une autonomie énergétique à l'Allemagne, lors de la Seconde Guerre mondiale : ils partaient également d'un gaz de synthèse, mais celui-ci était obtenu à partir de charbon et d'oxygène atmosphérique).

En Afrique du Sud, pendant plusieurs décennies, la Société *Sasol* a utilisé la méthode de Fischer-Tropsch pour fabriquer des carburants liquides en utilisant du gaz de synthèse dérivé du charbon. Aujourd'hui encore, cette société emploie la même technique : le gaz de synthèse est transformé en hydrocarbures liquides par un catalyseur composé de cobalt ou de fer. La réaction de Fischer-Tropsch libère de la chaleur, qui actionne les compresseurs d'oxygène nécessaires à l'obtention du gaz de synthèse. Les hydrocarbures formés dépendent de la température de réaction. Entre 330 et 350 °C, par exemple, on obtient principalement de l'essence et des oléfines (des hydrocarbures insaturés, souvent utilisés pour la synthèse des plastiques). À des températures inférieures (de 180 à 250 °C), on récupère surtout du gazole et des cires. Dans tous les cas, ces produits sont des mélanges qu'on doit raffiner pour obtenir des carburants utilisables. Toutefois, le raffinage est plus facile que celui du pétrole brut naturel : les mélanges contiennent très peu de soufre et beaucoup moins de composés cancérigènes que

le pétrole. Les produits finis sont des carburants de qualité, dont la combustion pollue moins que le gazole ou l'essence issus du pétrole.

Une solution partielle

Malgré sa fiabilité, la méthode précédente consomme beaucoup d'énergie. Le reformage à la vapeur classique s'effectue à une pression environ 30 fois supérieure à la pression atmosphérique et à des températures d'environ 900 °C. De surcroît, la réaction consomme de l'énergie, que l'on produit en injectant dans le mélange une petite quantité d'oxygène, qui brûle une partie du méthane (et, avantage supplémentaire, produit davantage de gaz de synthèse) : on effectue ainsi ce que l'on nomme une «oxydation partielle».

La composition exacte du gaz de synthèse fabriqué dépend de la part de reformage à la vapeur et de la part de l'oxydation partielle. Dans la plupart des cas, la fabrication consomme de grandes quantités d'oxygène, lequel coûte cher. Aujourd'hui, on sépare l'oxygène de l'air en le liquéfiant, par des cycles de compression et de détente : c'est un procédé coûteux. Pour obtenir du gaz de synthèse meilleur marché, on doit chercher des moyens moins coûteux de produire l'oxygène.

Malgré cette difficulté, la technique d'oxydation partielle est promise à un bel avenir. Des chimistes de la Société *Syntroleum* ont récemment pro-

posé un procédé de production du gaz de synthèse où l'air est la source d'oxygène : on effectue le reformage à la vapeur à partir d'un mélange d'air et de méthane, puis on effectue une réaction de Fischer-Tropsch avec les produits formés. Sur les sites où le gaz naturel est suffisamment bon marché (par exemple, sur les sites où il est aujourd'hui brûlé), le procédé pourrait devenir rentable. Les Sociétés *Texaco*, *Brown & Root* et *Syntroleum* projettent de construire, d'ici à deux ans, une unité qui utilisera cette technique.

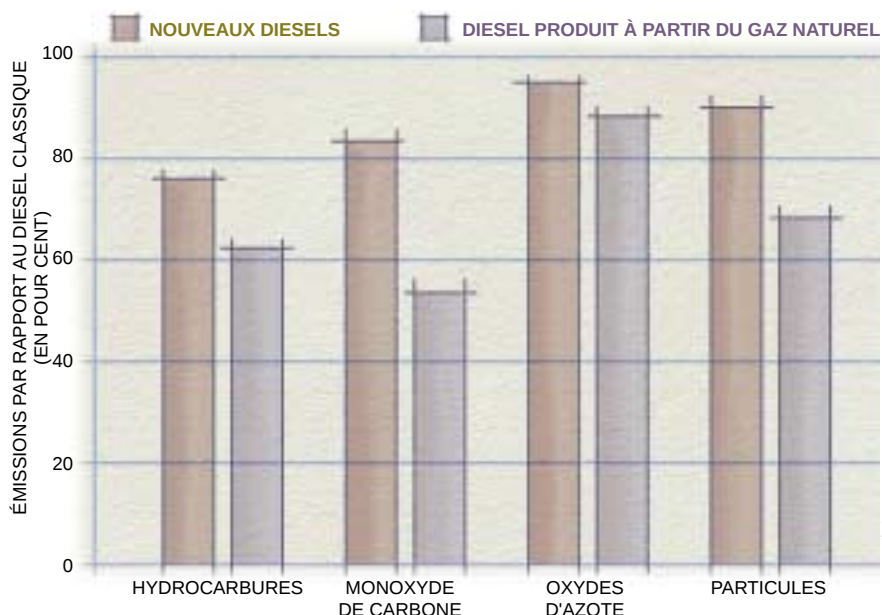
Plusieurs autres sociétés, ainsi que des laboratoires publics de recherche, testent aujourd'hui une approche radicalement différente, en utilisant des membranes céramiques spécifiquement perméables à l'oxygène : ces membranes se comportent comme des filtres, qui purifient l'air de son oxygène. Bien que d'une construction encore délicate et coûteuse, les prototypes fonctionnent parfaitement. Des unités à membrane devraient être opérationnelles dans une dizaine d'années.

Grâce à ces progrès, le coût de fabrication du gaz de synthèse pourrait être réduit de 25 pour cent environ ; le coût de production des hydrocarbures liquides formés à partir du gaz naturel serait alors réduit de 15 pour cent. D'autres économies sont possibles si l'on parvient à fabriquer le gaz de synthèse à des températures d'environ 200 °C seulement. Mieux encore, si l'on disposait d'oxygène abondant et bon marché, l'oxydation partielle permettrait d'obtenir du gaz de synthèse sans reformage à la vapeur ; la réaction dégagerait de l'énergie au lieu d'en consommer.

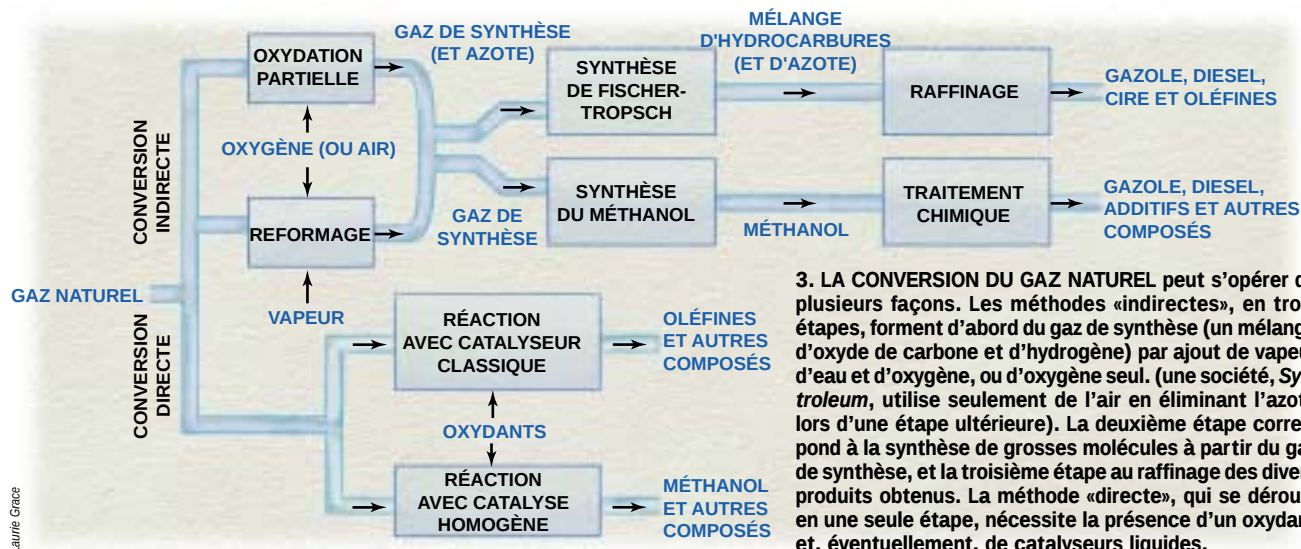
Moins cher que le pétrole?

Avec mes collègues et des physico-chimistes de l'Université de Floride, nous tentons de mettre au point une membrane céramique qui éliminerait l'hydrogène du mélange gazeux tout en activant l'oxydation partielle du méthane. L'hydrogène éliminé servirait soit à raffiner les produits finis, soit comme source d'énergie.

De nouveaux catalyseurs devraient encore augmenter la rentabilité de la transformation du gaz naturel en hydrocarbures liquides. Notamment, des chercheurs de l'Université d'Oxford étudient des carbures métalliques, tandis que nous nous intéressons aux zéolites, des silicates à gros pores. Ces deux matériaux devraient réduire



2. LES ÉMISSIONS DE POLLUANTS par les véhicules à moteur ont été réduites lorsque les législateurs ont imposé une reformulation du gazole. Le carburant de synthèse dérivé du gaz naturel par la méthode de Fischer et Tropsch est encore moins polluant que les nouveaux gazoles.



la quantité de suie produite lors du reformage à la vapeur : on évitera l'encrassement des réacteurs, ainsi que la contamination des catalyseurs.

Malgré les progrès réguliers de ces méthodes, des techniques plus ingénieuses devraient bientôt former des hydrocarbures liquides en une seule étape. Par ces techniques, le coût de la conversion serait divisé par deux, rendant les carburants liquides dérivés du gaz naturel moins chers que les produits similaires obtenus par raffinage du pétrole classique.

Les chimistes avaient été déçus par les premiers essais de conversion «directe», par l'emploi de catalyseurs et de grandes quantités d'oxygène : les hydrocarbures formés, plus réactifs que le méthane fourni, se consumaient plus vite qu'ils ne se créaient. À moins d'une extraction immédiate des hydrocarbures, les rendements étaient trop faibles pour que ce procédé soit appliqué industriellement.

Les chimistes ont contourné ce problème en effectuant la réaction à des températures relativement faibles, à l'aide de catalyseurs nouveaux, ou en stabilisant chimiquement les produits de réaction. À l'Université d'État de Pennsylvanie, par exemple, une équipe a directement transformé du méthane en méthanol, à l'aide d'un catalyseur «homogène», un fluide qui, aux températures inférieures à 100 °C, se mélange intimement aux réactifs. La Société *Catalytica* a obtenu des rendements de 70 pour cent par un procédé similaire ; son catalyseur liquide forme un intermédiaire stable, un ester de méthyle qui ne s'oxyde pas. Le produit final, un dérivé du méthanol, s'obtient

facilement lors d'une étape ultérieure. Le méthanol est intéressant, car c'est une molécule qui stocke efficacement l'énergie : il peut être consommé dans un moteur ou être ajouté à un carburant pour augmenter son indice d'octane (on évite que le moteur «cogne»). Si des difficultés techniques gênaient son utilisation en consommation directe, on pourrait le transformer en hydrogène gazeux, afin de l'utiliser dans des piles à combustible.

En outre, les réactions qui conduisent à la synthèse du méthanol peuvent être facilement adaptées à la production de nombreuses autres molécules énergétiques qui, tel le diméthyléther, polluent nettement moins que l'essence, lors de leur combustion. Jusqu'ici, le diméthyléther a été peu utilisé comme carburant automobile : aux températures et aux pressions ordinaires, il se présente à l'état gazeux. En revanche, ces derniers temps, les Sociétés *Air Products*, *Haldor Topsoe* et *Amoco* ont annoncé la synthèse d'un dérivé du diméthyléther qui reste liquide aux températures et aux pressions ordinaires ; ce substitut du gazole classique réduirait les émissions de polluants si l'on ajoutait aux moteurs classiques un système d'injection spécifique.

Roulerons-nous bientôt au gaz?

Scientifiques et ingénieurs étudient aujourd'hui de nombreux autres moyens d'améliorer le procédé de conversion du gaz naturel. Par exemple, des Sociétés telles que *Exxon*, *Sasol*, ou l'Institut français du pétrole (IFP) perfectionnent les enceintes où s'opère la réaction de

Fischer-Tropsch afin de mieux contrôler la température et le mélange.

Une approche plus ambitieuse consiste à remplacer les catalyseurs par des bactéries qui transforment le méthane en méthanol, en présence d'oxygène. Ces fermentations, qui s'effectuent à basse température, sont prometteuses, parce qu'elles consomment peu d'énergie.

À ce jour, le gaz naturel transformé en carburant liquide coûte encore plus cher que le pétrole brut, mais les perfectionnements techniques modestes qui seront mis en œuvre dans les prochaines années pourront en faire des carburants remarquablement propres et qui, en se mélangeant facilement aux produits plus polluants dérivés des pétroles bruts plus lourds, se conformeront à une législation écologique de plus en plus stricte.

Safaa FOUADA est directeur de recherche au Centre de technologie énergétique de l'Ontario.

Methane Conversion by Oxidative Processes : Fundamental and Engineering Aspects, sous la direction de E.E. Wolf, Van Nostrand Reinhold, 1992.

J.M. FOX III, *The Different Catalytic Routes for Methane Valorization : An Assessment of Processes for Liquid Fuels*, in *Catalysis Reviews : Science and Engineering*, vol. 35, n° 2, pp. 169-212, août 1993.

Patrick CHAUMETTE, *Conversion chimique du gaz naturel*, in *Revue de l'Institut français du pétrole*, n° 51, pp. 711 et suivantes, septembre-octobre 1996.

Remote Gaz Strategies. Site Internet de la Société *Zeus Development Corporation* à l'adresse : <http://www.remotegasstrategies.com/>

