

## **L'industrie des hydrocarbures face aux enjeux de la transition énergétique**

Fabrice Bertoncini\*, Jean-Pierre Burzynski\*,  
Pierre Marion\*, Jérôme Sabathier\*

@ 45919

***Les transports — en particulier l'aérien et le fret — ainsi que le secteur pétrochimique resteront longtemps des débouchés importants de l'industrie pétrolière, qui doit également prendre sa part dans la lutte contre le réchauffement global. La raffinerie du futur permettra de satisfaire de manière durable la demande en hydrocarbures en exploitant les synergies avec les sites industriels adjacents, et en s'appuyant sur les progrès et la digitalisation de technologies de raffinage éco-efficientes. Son impact environnemental sera réduit par la croissance des biocarburants et bioproduits ainsi que le captage du CO<sub>2</sub>. Le maintien de ce secteur de haute technicité fera appel à des emplois qualifiés notamment en Europe.***

Au cours de la dernière décennie, les pays développés ont considérablement renforcé les législations portant sur la qualité de l'air. Le secteur du raffinage a su s'adapter, et a réduit de façon spectaculaire les teneurs en soufre des principaux carburants à 10-15 ppm et, plus généralement, a amélioré la qualité des carburants essence et gazole (normes Euro et normes C.A.F.E. aux États-Unis). Demain, cette industrie devra faire face aux nouvelles spécifications des fuels maritimes (réduction de la teneur en soufre à 0,5 % dès 2020) qui nécessiteront, entre autres solutions, l'adaptation du schéma de raffinage pour la purification et la conversion des fractions lourdes. Au-delà de l'amélioration continue de la qualité des produits raffinés, dans un monde de plus en plus tourné vers la protection de l'environnement, quels sont les défis qui attendent la filière raffinage ?

### **Une double demande sociétale**

Depuis la révélation auprès du grand public du réchauffement climatique au sommet de Rio en 1992, la montée en puissance de la conscience écologique collective s'est traduite par un double objectif. D'une part, un enjeu de santé publique et de préservation de la biodiversité, articulé autour de la lutte contre la pollution de l'air et de l'eau. Celui-ci s'est illustré notamment par les mesures concrètes prises par les grandes métropoles — sur tous les continents — pour lutter contre les émissions de particules fines, et par des objectifs ambitieux de recyclage des plastiques. D'autre part, un enjeu climatique qui s'est traduit au niveau européen et national en cibles de réduction des émissions des gaz à effet de serre qui s'imposeront aux particuliers comme aux secteurs industriels, dont celui du raffinage et de la pétrochimie.

Inversement, deux phénomènes en croissance forte sont à noter : d'une part, le

\* IFP Energies nouvelles (cf. biographies p. 83-84).

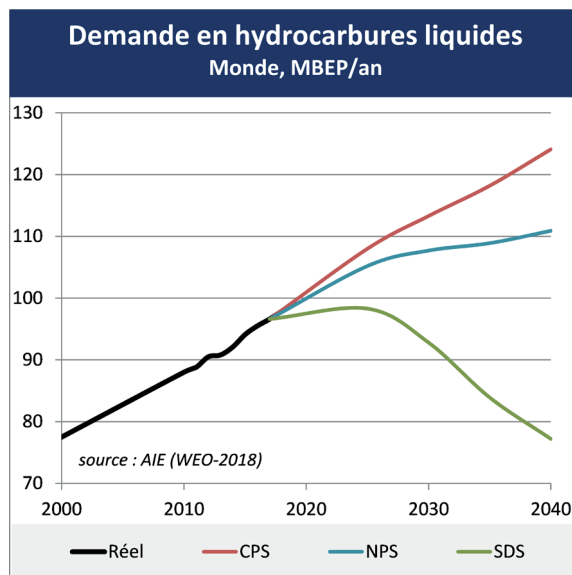


Figure 1. Évolution de la demande totale en hydrocarbures liquides

doublement à 2050 de la richesse moyenne des habitants de notre planète, qui va de pair avec une aspiration légitime à plus de confort et de loisirs via l'extension du modèle sociétal des pays développés actuels et, d'autre part, l'augmentation concomitante de 2 milliards d'individus de la population mondiale. Ils entraîneront mécaniquement des hausses de la consommation énergétique, tout particulièrement dans les pays en voie de développement.

Le défi posé aux industriels est donc de continuer à satisfaire la demande croissante des consommateurs en produits pétroliers — carburants ou dérivés — mais d'une manière écologiquement plus responsable.

### La demande en hydrocarbures sur le long terme

La filière raffinage traverse une période inédite d'incertitudes liées à la transition énergétique et à la croissance de la demande. La demande en hydrocarbures sera largement déterminée par des choix sociétaux à venir, que l'on peut rassembler en trois familles de scénarii bien distinctes (Figure 1).

Les scénarii tendanciels tels que le *Current Policies Scenario* de l'AIE qui aboutit à une consommation journalière d'hydrocarbures liquides de près de 124 millions de barils équivalents pétrole (124 MBEP/jour) en 2040, supposent le maintien des comportements et des règlements actuels. Outre leur impact sur le réchauffement global, de telles trajectoires accéléreraient l'avènement du fameux «*peak oil*», et provoqueraient de fortes tensions sur le cours du baril.

Inversement, les scénarii environnementaux, à l'instar du *Sustainable Development Scenario* de l'AIE mettent en œuvre tous les moyens pour limiter à 1,5-2 °C le réchauffement climatique en fin de siècle, ce qui implique de faire reculer entre 2025 et 2030 la demande globale en hydrocarbures. Mais la palette des leviers qu'il faudrait mobiliser pour y parvenir, tels que le doublement du parc nucléaire mondial, le stockage géologique du CO<sub>2</sub>, le recours à des technologies et des taxes relativement coûteuses pour les ménages, et enfin la remise en cause de notre modèle de mobilité individuelle poseraient un problème d'acceptabilité sociétale difficilement contournable que le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental

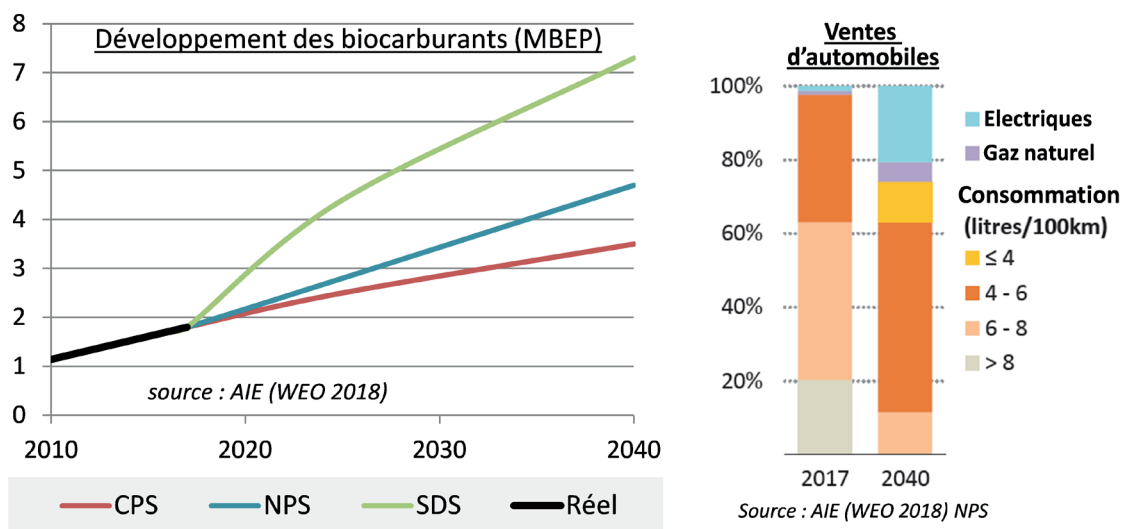


Figure 2. Développement des substituts au pétrole

sur l'évolution du climat) lui-même reconnaît : «Les lois de la physique et de la chimie permettent [de limiter la hausse à 1,5 °C], ainsi que les technologies, le changement des modes de vie et les investissements. La dernière chose, à laquelle les scientifiques ne peuvent répondre, c'est si c'est faisable politiquement et institutionnellement» [1].

Entre ces deux limites, une série de scénarii médians (tels que le *New Policies Scenario* de l'AIE) sont construits à partir de la compilation des engagements politiques concrets déclarés par les États (mais non encore implantés). Ils aboutissent à une quasi-stabilisation de la demande mondiale à 105-115 MBEP/jour en 2030-2040 selon les auteurs.

Ainsi, même les trajectoires les plus écologiques font encore significativement appel aux hydrocarbures liquides en 2040, et donc au raffinage et aux sources alternatives d'hydrocarbures liquides bas carbone (telles que les biocarburants) dont la demande globale pourrait se stabiliser autour d'une valeur moyenne de 100 MBEP/jour, plus ou moins 25 MBEP/jour seulement selon le modèle de société sous-jacent. Désormais, l'ère de l'augmentation

uniforme et mécanique de la demande pétrolière semble donc appartenir au passé. Les produits pétroliers seront de plus en plus déplacés, soit par les biocarburants et la chimie bio-sourcée (substitution directe), soit via l'électrification des transports (Figure 2), les nouveaux modes de mobilité dont l'auto-partage, le télétravail, ou le recyclage des plastiques (dont on peut rappeler la cible européenne de 55 % pour les emballages plastiques en 2030).

### La production pétrolière : une incertitude de plus pour l'industrie du raffinage

Le secteur de la production pétrolière traverse lui aussi une période de forte instabilité résultant de troubles géopolitiques chez plusieurs acteurs majeurs et de l'émergence spectaculaire de la production de pétroles de schiste particulièrement légers aux États-Unis. Cette instabilité va impacter la capacité d'investissements de l'industrie, au moins régionalement, et donc accentuer les différences de rentabilité par zone. Sur le long terme, la qualité moyenne du brut mondial devrait néanmoins

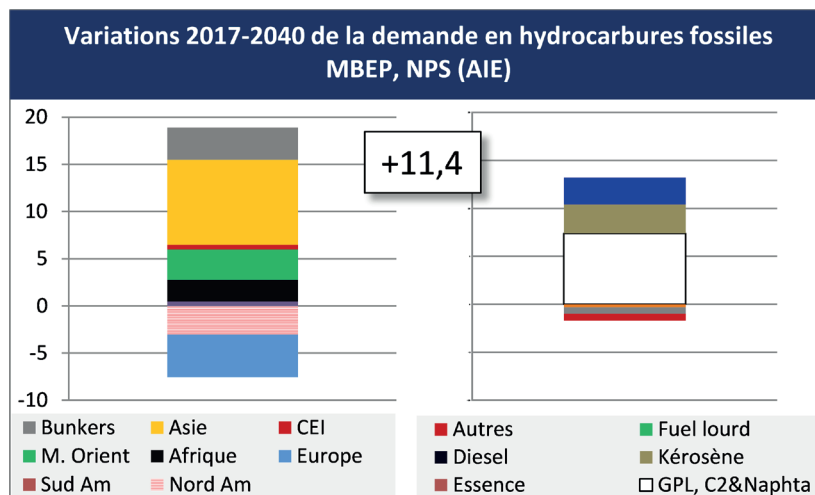


Figure 3. Croissance relative des différents carburants

rester relativement stable une fois rejoint le plateau de production des pétroles de schiste.

## Quelle sera la réponse technologique?

Nous nous sommes livrés à l'exercice prospectif consistant à imaginer la raffinerie du futur en intégrant l'ensemble de ces évolutions de fond.

Suivant les traces de l'Europe et de l'Amérique du Nord, où l'essence et le gazole ont déjà peu ou prou atteint leur niveau de qualité optimal, le Moyen-Orient, l'Amérique latine, l'Asie et demain l'Afrique vivent une période de réduction des teneurs en soufre, qui devraient passer sous la barre des 150 ppm d'ici 2030 dans une majorité de pays, tandis que les grades les moins raffinés (par exemple les essences à faible indice d'octane), incompatibles avec les moteurs modernes, seront progressivement chassés du marché. Dans 20 ou 30 ans, toutes les raffineries du monde devraient intégrer des procédés de raffinage hautement technologiques identiques à ceux que l'on rencontre aujourd'hui en Europe ou aux États-Unis.

La demande sera fondamentalement tirée par 3 marchés en croissance : la pétrochimie

(malgré l'effet du recyclage croissant des plastiques), le transport aérien où peu de substituts au carburéacteur sont possibles, et dans une certaine mesure, les frets maritime et terrestre, logiquement arrimés à l'évolution du PIB. L'évolution de ces secteurs soutiendra la demande en naphta, carburéacteurs et distillats moyens. Inversement, on s'accorde sur une croissance faible ou négative de l'essence principalement en raison de la saturation du taux d'équipement automobile dans les pays développés, et de l'électrification à venir du parc automobile particulier (Figure 3). Les régions en voie de développement, Asie et Afrique en tête, connaîtront les plus fortes hausses de demande, tandis que les économies les plus avancées subiront un recul significatif (Figure 3). Plutôt asiatique (40-45 % de la demande globale en 2040), la raffinerie du futur sera orientée carburéacteur et production de coupes pour la pétrochimie, la croissance soutenue de ce dernier secteur (2,5 à 3,5 % par an à long terme selon le scénario) permettant de concevoir des « raffineries pétrochimiques », où les deux activités sont totalement intégrées. Plusieurs projets industriels de ce type sont déjà en cours de réalisation, généralement désignés sous l'appellation « *Crude to Chemicals* », en Asie et en Arabie saoudite notamment. Ces projets géants permettent de tirer avantage de bruts légers adaptés à une conversion maximale vers la pétrochimie, de

## L'industrie des hydrocarbures face aux enjeux de la transition énergétique

mettre en œuvre des économies d'échelle et de favoriser les meilleures synergies sur le plan de l'intégration thermique, énergétique et de la valorisation des sous-produits.

En parallèle, les biocarburants avancés arrivent à maturité technologique et pourront se substituer aux sources fossiles, en particulier pour les carburants en croissance tels que le carburéacteur ou les distillats moyens. Beaucoup plus performants sur le plan environnemental que ces carburants conventionnels (réduction de plus de 80 % des émissions de gaz à effet de serre «du puits à la roue»), leurs usines de production trouveront naturellement place sur les sites de raffinage, avec lesquels ils présentent de fortes similitudes technologiques.

Ainsi, le projet BioTfuel vise à développer et mettre sur le marché une chaîne complète de procédés permettant de produire, par voie thermochimique, du biogazole et du biokérosène avancés. Ces carburants de très grande

qualité seront exempts de soufre et de composés aromatiques et seront utilisables, seuls ou en mélange, dans tous types de moteurs diesel et turboréacteurs d'avion. BioTfuel développera les technologies de conversion de la biomasse lignocellulosique (paille, résidus forestiers, cultures dédiées...) en carburants de synthèse, en validant leur faisabilité technique et économique sur des installations de démonstration, et en optimisant les bilans énergétiques et environnementaux avec un objectif à plus de 90 % de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. À l'issue du projet BioTfuel, fin 2020, la chaîne de procédés pourra être transposable à l'échelle industrielle (Figure 4).

Au-delà des biocarburants avancés, les procédés tels que BioTfuel ou encore Futurol (procédé de transformation de résidus lignocellulosiques en éthanol) produisent également des molécules qui peuvent être engagées dans des procédés de transformation ultérieurs vers des intermédiaires chimiques bio-sourcés.

**Figure 4. Unités pilotes du procédé BioTfuel**



Unité de démonstration de Venette



Unité de démonstration de Dunkerque

Données clés du projet :

Partenaires : Avril, Axens, CEA, IFP Energies nouvelles, ThyssenKrupp Industrial Solutions, Total.

Budget : 178 millions d'euros dont 33,2 millions de financement public.

Date de commercialisation de la chaîne de procédés : à l'horizon 2020.

Localisation du pilote de prétraitement de la biomasse : site de Sofiprotéol à Venette.

Localisation du pilote de gazéification, purification et synthèse : site de Total à Dunkerque.

Ainsi, le procédé ATOL transforme en bio-oléfines l'éthanol produit à partir de dérivés lignocellulosiques. Ce type de combinaison, décrit de manière plus générale sur la Figure 5, revient à établir des bioraffineries satisfaisant à la fois le marché des biocarburants ou des intermédiaires chimiques.

Les technologies de raffinage de pétrole ne seront pas en reste. Bien que le raffinage ne représente que 15 % environ des émissions totales de CO<sub>2</sub> de la filière carburant, l'augmentation progressive des niveaux de taxation incitera les opérateurs à s'équiper de technologies bas carbone. Il est encore possible d'améliorer l'efficacité énergétique de cette industrie pourtant déjà bien optimisée. En se basant sur les procédés les plus efficaces (la «*Best Available Technology*» du Parlement européen), ce qui, outre une intégration thermique poussée, inclut la régulation électronique des moteurs et la cogénération systématique des utilités, on estime qu'une raffinerie neuve permettrait des économies potentielles d'énergie de plus de 35 % par rapport à la raffinerie moyenne européenne actuelle [2]. Le secteur de la catalyse constitue également un puissant levier de progrès : depuis le début des années 2000, il faut se rappeler que

les performances des catalyseurs de raffinage ont été multipliées par 2,5, ce qui a permis de réduire la taille des réacteurs et les pertes de charge associées ainsi que les températures opératoires, le tout conduisant à une moindre consommation énergétique. Cette tendance devrait se poursuivre dans les années à venir compte tenu des efforts menés actuellement en recherche.

Des progrès sensibles sont également possibles dans le domaine de la production d'hydrogène. Dans les raffineries équipées d'un hydrocraqueur, l'hydrogène, aujourd'hui très majoritairement produit par vaporeformage, est responsable d'environ un tiers des émissions totales de CO<sub>2</sub>, ce que le remplacement de ce procédé par des électrolyseurs alimentés par de l'électricité renouvelable ou nucléaire permettrait d'éviter. Certes, des problèmes demeurent, tels que la disponibilité industrielle d'électrolyseurs de très grande taille ou le coût d'approvisionnement en électricité, mais un pilote de 10 MWe est déjà en cours de construction dans la raffinerie Shell-Rhineland, en Allemagne. L'abattement du CO<sub>2</sub> émis par les procédés de vaporeformage est également réalisable grâce aux procédés de lavage aux

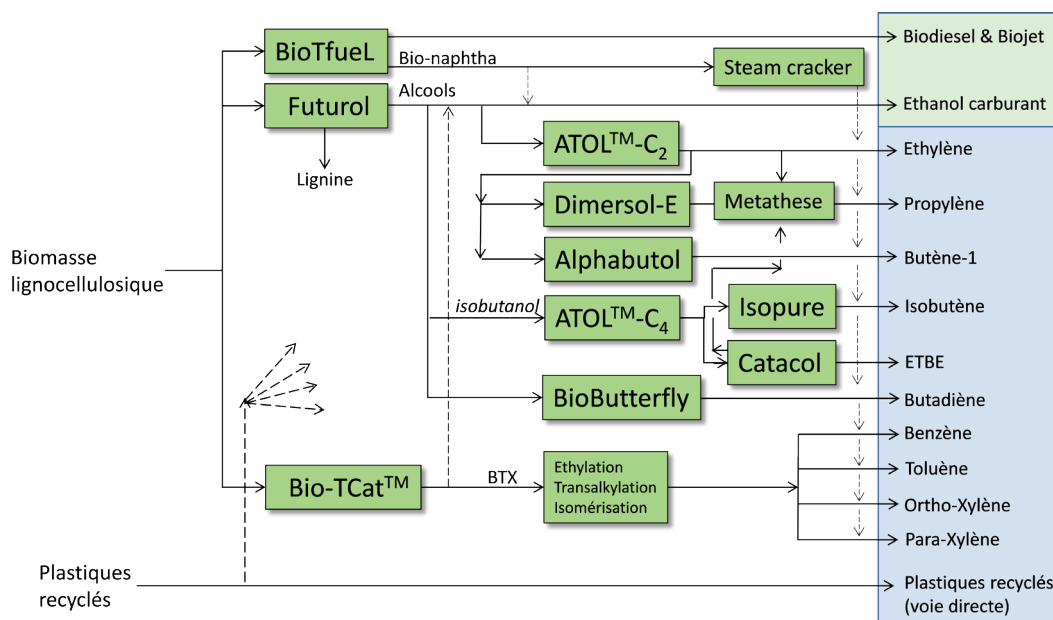


Figure 5. Exemple de bioraffinerie



amines, diminuant ainsi les émissions de GES du vaporeformage.

Une autre piste suivie par la recherche est le captage du CO<sub>2</sub> émis par les fours. Le procédé de *Chemical Looping* ou CLC semble particulièrement adapté à l'environnement du raffinage, et devrait présenter des coûts de captage compétitifs, sans aucune pénalité énergétique en dehors de la compression du CO<sub>2</sub>. Pouvant s'accommoder de charges résiduelles, il permet de valoriser sans impact environnemental des résidus ultimes du raffinage, comme le coke de pétrole, pour couvrir les besoins énergétiques du site sous forme de vapeur ou d'électricité. La possibilité de valoriser l'azote et l'eau, sous-produits naturels du procédé, accroît encore l'attractivité du CLC qui pourrait devenir l'élément central pour la production d'utilités de la raffinerie du futur. Des efforts soutenus de recherche sont financés à l'échelle mondiale pour concevoir des filières industrielles de stockage et/ou d'utilisation de plus en plus économiques de ce CO<sub>2</sub> ainsi piégé.

Enfin, comme pour le reste de la société, la digitalisation va révolutionner les raffineries. Une étude récente évalue les gains potentiels de la digitalisation à près de 9 % de la consommation énergétique totale d'une raffinerie et à près de 0,5 \$/baril pour ce qui concerne son impact sur la marge de raffinage [3], soit 15 % à 20 % des marges usuelles en Europe. Au-delà de ces gains d'efficacité, la transformation digitale devrait permettre d'intensifier les opérations industrielles à travers le recours massif aux objets industriels connectés (IIOT), aux capteurs de supervision des unités, aux plateformes numériques industrielles et à l'exploitation des données par les approches cognitives. Ces outils et méthodes devraient contribuer à rendre les sites plus profitables, plus efficaces et plus sûrs pour les opérateurs.

### Une vision de la raffinerie du futur

Pour faire face à la demande — toujours croissante — d'énergie pour le transport et de produits pour la pétrochimie, l'industrie mondiale du raffinage restera un secteur industriel majeur en 2050, avec un basculement d'une partie de l'activité vers les pays émergents créateurs de croissance et les déploiements de solutions pour accompagner la transition énergétique et réduire l'empreinte environnementale. Ainsi, la raffinerie du futur sera plus orientée vers la qualité environnementale de ses productions que vers la quantité. Situés au cœur d'un *hub* énergétique multi-produits associant au raffinage de pétrole la production de biocarburants, la chimie, biosourcée ou non, et le recyclage des matières plastiques, ces sites géants exploiteront toutes les synergies offertes par leur grande complexité pour atteindre une efficacité optimale (Figure 5). Les procédés mis en œuvre, naturellement éco-efficaces, seront opérés sous optimisation en temps réel et pourront tirer profit de sources d'énergie intermittentes bas carbone, d'hydrogène renouvelable ou décarboné via le captage de CO<sub>2</sub>. Bien entendu, cette évolution se fera sur de nombreuses années. Malgré la montée en puissance des sites en Asie et au Moyen-Orient, le secteur industriel du raffinage et de la pétrochimie présentera encore une réelle opportunité pour notre pays et pour l'Europe car il fera appel à des emplois qualifiés — tant dans le secteur industriel proprement dit que dans celui des fournisseurs de technologie (secteur parapétrolier) — et contribuera au maintien de notre indépendance énergétique. Et c'est notre responsabilité d'institut de recherche que d'offrir à l'industrie les technologies du futur qui lui permettront de relever le défi de la transition énergétique.

#### RÉFÉRENCES

- [1] Jim Skea, membre du GIEC, *Le Monde*, 08/10/2018.
- [2] Données IFPEN/Concawe utilisées dans le rapport «EU ETS : last call before the door close on the negotiations for the post-2020 reform», Projet COPEC II, I4CE, 2017.
- [3] Bloomerg Energy.