

R. Gicquel, M. Gicquel, *Introduction aux problèmes énergétiques globaux*, Paris : Presses des MINES, 2^e édition, collection Les cours, 2013.

1^{re} édition : R. Gicquel, *Introduction aux problèmes énergétiques globaux*, Paris, Economica, 1992.

Édition anglaise : R. Gicquel, M. Gicquel, *Introduction to Global Energy Issues*, CRC Press/Balkema, sous presse.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2013
60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France
email : presses@mines-paristech.fr
www.pressesdesmines.com

© Photo de couverture : Photocomposition effectuée par les auteurs sur la base de photographies réalisées par Charles Cook (parc d'éoliennes), Chad Teer from Coquitlam Canada (plate-forme offshore), M.O. Stevens (panneaux solaires) et par la Nasa (Terre vue de l'espace).

ISBN : 978-2-35671-180-9

Dépôt légal : 2013

Achevé d'imprimer en 2013 (Paris)

Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

Introduction aux problèmes énergétiques globaux

Collection Les Cours

Dans la même collection :

Francis Maisonneuve
Mathématiques 3

Francis Maisonneuve
Mathématiques 1

J. Adnot, D. Marchio, Ph. Rivière
Cycles de vie des systèmes énergétiques

Brigitte d'Andréa-Novet, Benoît Fabre, Pierre
Jouvelot
Acoustique-Informatique-Musique

Jean-Claude Moisdon, Michel Nakhla
Recherche opérationnelle

Anne-Françoise Gourgues-Lorenzen,
Jean-Marc Haudin, Jacques Besson
Matériaux pour l'ingénieur

Renaud Gicquel
Systèmes énergétiques Tome 3

Renaud Gicquel
Systèmes énergétiques Tome 2

Renaud Gicquel
Systèmes énergétiques Tome 1

Thierry Weil
Stratégie d'entreprise

François Cauneau
Mécanique des fluides

Pierre Chauvet
Aide-mémoire de géostatistique linéaire

Dominique Marchio, Paul Reboux
Introduction aux transferts thermiques

François Engel, Frédéric Kletz
Cours de comptabilité analytique
François Engel, Frédéric Kletz
Cours de comptabilité générale

Jacques Bouchard, Jean-Paul Deffain,
Alain Gouchet
Introduction au génie atomique

Daniel Fargue
*Abrégé de thermodynamique : principes
et applications*

Georges Pierron
Introduction au traitement de l'énergie électrique

Bernard Degrange
Introduction à la physique quantique

Michel Cohen de Lara,
Brigitte d'Andréa-Novet
Cours d'automatique

Fixari Daniel
Les Imperfections des marchés

Jacques Lévy
Introduction à la métallurgie générale

Hugues Molet
Comment maîtriser sa productivité industrielle ?

Margaret Armstrong, Jacques Carignan
Géostatistique linéaire

Introduction aux problèmes énergétiques globaux

**Renaud Gicquel
May Gicquel**

2^e édition revue et augmentée

Préface de Jean-Arnold Vinois



À Fawzia, sans qui ce livre n'existerait pas.

Préface

*Jean-Arnold Vinois, directeur honoraire à la Commission européenne
Ancien directeur du marché interne de l'énergie au sein de la Direction générale de l'énergie*

L'ouvrage que vous avez sous la main est une mise à jour d'une première édition qui date de 1992, soit il y a un peu plus de vingt ans. Si les années quatre-vingt-dix n'ont pas été exceptionnellement marquantes sur le plan énergétique, on ne peut plus en dire autant du troisième millénaire qui a vu l'énergie passer à l'avant plan de l'actualité et devenir une composante majeure des budgets des ménages et de la compétitivité des entreprises. C'est dire qu'il était grand temps de rafraîchir cet ouvrage de base destiné aux étudiants de l'École des Mines, tout comme les méthodes pédagogiques interactives qui sont proposées par les auteurs en introduction et à l'annexe 1. Et c'est bien de pédagogie qu'il s'agit ici. Chaque chapitre de cet ouvrage pourrait à lui seul se transformer en ouvrage de 300 pages et c'est une prouesse des auteurs que de parvenir à synthétiser autant de notions, de principes et d'information dans un espace aussi restreint, en restant simple et accessible à tout lecteur. Précisément, sous des dehors simples, se cache une matière éminemment complexe qui évolue de plus en plus vite, sous l'impulsion de nouvelles technologies et de nouvelles politiques commandées par des impératifs environnementaux et des modifications géopolitiques profondes.

Fukushima, Macondo, Sandy sont des noms maudits, directement liés à la problématique énergétique, qui ont alarmé la planète entière et rappelé à l'homme que l'énergie peut être indomptable.

Fukushima, en mars 2011, a mis en évidence la vulnérabilité du secteur nucléaire aux catastrophes naturelles et a montré que les dommages peuvent se monter à des montants astronomiques qu'aucun pays ne peut supporter. Cet événement a remis en cause de façon radicale le bouquet énergétique de pays comme l'Allemagne, la Suisse, la Belgique et même la France. Celle-ci est d'ailleurs aujourd'hui engagée dans un débat sur la transition énergétique, auquel cet ouvrage peut contribuer en fournissant à ceux qui veulent le suivre et le comprendre tous les éléments d'information et de contexte nécessaires.

Macondo a rappelé que l'exploration pétrolière en mer profonde présente des risques majeurs qui doivent pouvoir être maîtrisés par tous les intervenants de la filière. Les dommages environnementaux provoqués par cet accident intervenu en avril 2010 dans le golfe du Mexique sont tellement importants que leur réparation est susceptible de causer la disparition de l'entreprise BP. Jamais les indemnisations pour un accident industriel de ce type n'ont atteint des sommets pareils. La prépondérance du pétrole dans l'économie actuelle, son rôle pour les

pays producteurs, son coût pour les consommateurs, les risques de pénurie et son importance géopolitique sont largement décrits dans cet ouvrage, en rappelant les données essentielles de ce qui est encore et pour un bon bout de temps la première source d'énergie.

Sandy qui a ravagé la côte est des États-Unis en novembre 2012 et plus particulièrement New York et son centre financier a rappelé que le changement climatique est à l'œuvre. Pour la communauté scientifique, il est la conséquence des activités humaines et en particulier des émissions de gaz à effet de serre produites par ces activités, que ce soit le transport, la production d'électricité ou d'autres activités industrielles ou encore simplement le mode de vie des êtres humains. La combinaison énergie et climat est sans doute la principale responsable de l'augmentation de la température sur terre qui provoque les dérèglements que nous subissons de plus en plus fréquemment. C'est la raison pour laquelle l'Union européenne a adopté dès 2007 une politique volontariste à l'horizon 2020 de réduction des gaz à effet de serre (20% par rapport à 1990), d'augmentation de sources renouvelables d'énergie (20% du bouquet énergétique) et d'amélioration de l'efficacité énergétique (20% par rapport au scénario du fil de l'eau en 2020).

Le lecteur de cet ouvrage y trouvera encore une fois toutes les informations de base lui permettant de comprendre les forces en jeu, que ce soit l'évolution démographique, la croissance économique, le recours à certaines formes d'énergie, les impacts environnementaux, jusque et y compris la crise du bois de feu dans les pays en développement (chapitre 6.4.5), tout en prenant connaissance des politiques mises en œuvre ou en devenir.

Il faut rendre hommage aux auteurs pour avoir mis à la portée de tout un chacun toutes les notions essentielles qui gouvernent le secteur de l'énergie et pour avoir mis celui-ci dans la perspective plus globale car l'énergie est aujourd'hui au cœur du développement économique et de la gouvernance politique. C'est sans doute avec raison qu'ils considèrent que la planète dispose de suffisamment de ressources pour faire face à une demande croissante mais ils introduisent à juste titre tous les facteurs qui font que la politique énergétique sera toujours difficile à décider. Le bouquet énergétique est sans doute l'élément le plus difficile à mettre en parfaite adéquation avec la dimension environnementale, en particulier en raison des longs délais nécessaires pour modifier la composition du bouquet. L'Union européenne, aussi volontariste soit-elle, a réduit sa dépendance aux combustibles fossiles de 81 à 75% entre 1998 et 2011. À cette allure, combien de décennies faudra-t-il encore pour éliminer les gaz à effet de serre?

Il ne fait pas de doute que la dimension environnementale va jouer un rôle croissant dans l'évolution de l'usage de l'énergie. Il suffit de demander aux habitants de Pékin et de Shanghai ce qu'ils ont pensé du mois de janvier 2013, dominé par le «*smog*», une combinaison de brouillard et de fumées polluantes. La croissance économique ne pourra se faire qu'en prenant cette dimension

totallement en compte et l'internalisation des coûts externes tels que les coûts environnementaux va finir par s'imposer. Les comportements vont aussi changer et la gestion de la demande va prochainement être révolutionnée par la mise en œuvre des technologies de l'information dans l'ensemble de la chaîne de production, transport et distribution d'électricité. Éviter de consommer l'énergie est aujourd'hui la première priorité.

L'Union européenne fonde sa politique énergétique en très rapide devenir (voir le chapitre 7.12) sur trois piliers : compétitivité et prix abordables, durabilité et sécurité d'approvisionnement. L'équilibre entre ces trois piliers est à rechercher en permanence dans un environnement où les variables sont nombreuses. Comprendre ce qui se passe, pourquoi et comment est la première étape de la définition de toute politique. C'est le mérite des auteurs de cet ouvrage d'y contribuer avec modestie et compétence. Nul doute que les étudiants, mais beaucoup d'autres également, pourront alimenter leur débat sur les questions fondamentales de notre époque dans le domaine de l'énergie, en connaissance de cause grâce à ce « petit » ouvrage, dont l'ambition première est certainement de mettre en appétit. Et je crois pouvoir dire que c'est réussi.

Introduction

1.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE

Depuis la maîtrise du feu jusqu'à celle de l'atome, le développement des sociétés humaines s'est largement fondé sur la conquête de l'énergie. Dans tous les pays, l'énergie est ainsi progressivement devenue l'un des facteurs essentiels du développement économique et social, au même titre que le capital, le travail ou les ressources naturelles, et nul ne saurait désormais s'en passer.

Après des décennies pendant lesquelles l'énergie bon marché coulait à flots sans problème particulier, nous sommes depuis une quarantaine d'années entrés dans une période où les crises sont devenues la règle. Ce bouleversement du paysage énergétique est particulièrement préoccupant du fait que l'impact des crises énergétiques sur les sociétés humaines est devenu considérable : récession économique, augmentation du chômage, conflits internationaux pour les chocs pétroliers, pénurie de combustibles traditionnels pour la crise du bois de feu, diminution de la couche d'ozone, renforcement de l'effet de serre et pluies acides pour les rejets énergétiques.

Ce livre cherche à fournir une base de réflexion sur l'ensemble des problèmes énergétiques globaux, en proposant une analyse des principaux aspects à prendre en considération : l'offre d'énergie, dépendante des ressources et des filières technologiques disponibles, les implications macroéconomiques de la demande d'énergie, les questions géopolitiques, les particularités de la situation des pays en développement. Il ne fait qu'aborder la problématique environnementale, dont l'étude plus poussée déborde des limites que nous nous sommes fixées.

Ce livre constitue la deuxième édition d'un ouvrage publié en 1992, à une période où obtenir des données énergétiques et économiques était beaucoup plus difficile qu'aujourd'hui où de nombreuses bases de données sont librement accessibles sur Internet. Dans ce nouveau contexte, nous espérons qu'il aidera le lecteur à se situer dans la masse considérable des informations disponibles.

La carte mentale de la figure 1.1.1 présente de manière synthétique les sujets qui sont abordés dans cette introduction aux problèmes énergétiques globaux, avec indication des chapitres correspondants.

Les principales données du problème peuvent être énoncées de la manière suivante :

- nous vivons dans un monde dont la population augmente très fortement, bien que de manière différenciée dans les pays en développement et industrialisés ;

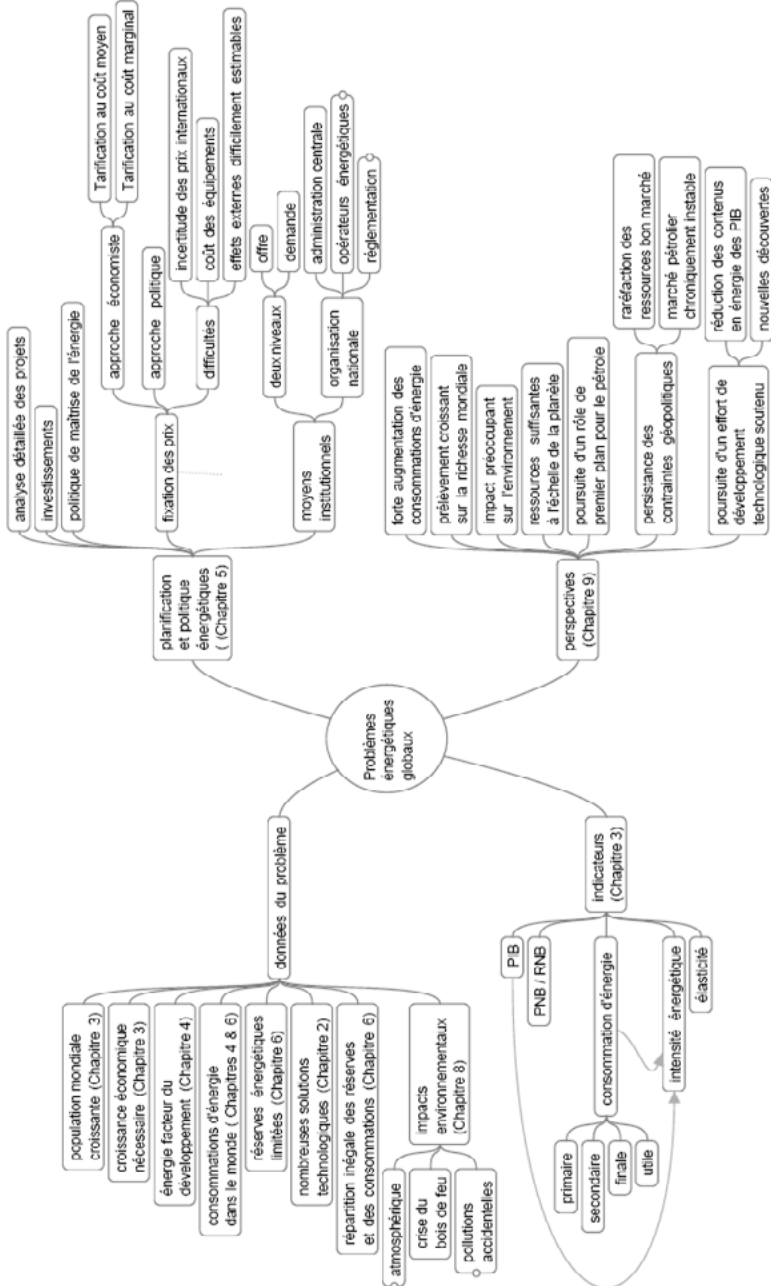


Figure 1.1.1: Problématique de l'énergie

- la croissance économique est considérée partout dans le monde comme une nécessité impérieuse, et elle demande de l'énergie ;
- l'énergie apparaît ainsi comme un facteur incontournable du développement ;
- sa consommation devrait continuer à croître sensiblement ;
- les réserves et ressources d'énergie fossiles sont limitées, et le relais par les énergies renouvelables demandera plusieurs décennies au moins ;
- la répartition inégale des réserves et des consommations d'énergie induit des échanges internationaux qui peuvent être sources de tension ;
- les fortes consommations d'énergie ont un impact environnemental préoccupant.

Pour évaluer quantitativement les liens entre l'énergie et l'activité économique, quelques indicateurs peuvent être utilisés. Leur étude est fondamentale pour mener une réflexion sur la planification énergétique et mettre en place des politiques énergétiques avisées en matière de maîtrise de la demande, de fixation des prix et de choix institutionnels.

Ce livre présente ces sujets dans ses différents chapitres, et esquisse en guise de conclusion quelques perspectives :

- il faut s'attendre à une forte augmentation des consommations d'énergie dans les prochaines décennies ;
- le prélèvement sur la richesse mondiale ira croissant ;
- l'impact de l'énergie sur l'environnement restera préoccupant ;
- à court et moyen termes, il n'y a pas de risque de pénurie, les ressources étant suffisantes à l'échelle de la planète ;
- le pétrole continuera de jouer un rôle de premier plan ;
- il faut s'attendre à une persistance des contraintes géopolitiques ;
- seule la poursuite d'un effort de développement technologique soutenu permettra de réduire les désordres associés à l'ensemble de ces contraintes.

1.2 STRUCTURE DU LIVRE

L'énergie est un vaste domaine qui peut être abordé sous des angles multiples. L'approche proposée ici est de commencer par fournir au lecteur une base technique sur l'énergie, et donc l'offre d'énergie, avant de s'intéresser à la demande, c'est-à-dire aux dimensions macro et socio-économiques, puis d'aborder les grandes questions mondiales relatives à l'énergie, et enfin de terminer par l'étude des principales questions qui se posent aujourd'hui dans ce secteur.

Ce livre synthétise les principales questions liées à l'énergie et ne nécessite aucune connaissance particulière préalable, que ce soit en économie, en sciences de l'ingénieur ou en relations internationales. Il comporte neuf chapitres.

Le chapitre 2 introduit les principales filières énergétiques (pétrole, gaz naturel, charbon, hydrocarbures de synthèse, nucléaire, électricité, énergies renouvelables, stockage thermique ou pneumatique), c'est-à-dire la manière dont les principales sources d'énergie peuvent être exploitées. Par moments assez technique, il s'agit du chapitre le plus long du livre ; il pourra être simplement survolé lors d'une première lecture.

Le troisième chapitre présente les principaux indicateurs macroéconomiques et énergétiques qui sont couramment utilisés pour évaluer la situation énergétique des pays. Les concepts qui y sont introduits étant ensuite utilisés de manière systématique dans les autres chapitres, il est essentiel de bien en comprendre les définitions et les limites.

Le quatrième chapitre analyse les impacts de l'énergie au niveau macroéconomique, et notamment les liens entre l'activité économique et la consommation d'énergie. Il dresse une rétrospective historique qui permet de comprendre pourquoi l'énergie est devenue une composante incontournable du développement économique et social.

Le cinquième chapitre introduit les grands principes généralement retenus pour l'élaboration des politiques énergétiques et leur planification, puis discute des aspects institutionnels.

Le sixième chapitre est centré sur la géopolitique : consommations actuelles d'énergie, réserves et ressources énergétiques mondiales, commerce international de l'énergie, et problèmes spécifiques rencontrés par les pays en développement.

Le septième chapitre est consacré à l'étude de la situation énergétique de onze pays différents, illustrant le contraste qui existe entre eux, en fonction de leur niveau de développement économique, de leur démographie, de leurs dotations en ressources naturelles, etc. La liste de ces pays comprend à la fois des pays développés à haut revenu (France, États-Unis, Royaume-Uni), les pays émergents du groupe dit des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine, Afrique du Sud), un pays d'Afrique du Nord exportateur de pétrole (l'Algérie), un pays d'Afrique de l'Ouest (la Côte d'Ivoire), et un pays d'Asie exportateur de charbon et de gaz naturel (l'Indonésie). Une section est ensuite dédiée à l'Europe de l'énergie.

Le huitième chapitre traite des nouveaux enjeux liés à l'énergie, en particulier de sa relation à l'environnement et des succès des politiques de maîtrise de la demande.

Le neuvième et dernier chapitre commence par une étude prospective portant sur divers scénarios à moyen et long termes. Il synthétise ensuite les analyses présentées dans le livre en soulignant les principales questions actuelles.

1.3 UTILISATION PÉDAGOGIQUE DE CE LIVRE

Examinons maintenant la manière dont le contenu de ce livre peut être utilisé sur le plan pédagogique. Les questions abordées dans ce livre sont en effet enseignées depuis le début des années 1990 à l'École des Mines de Paris (Mines ParisTech) et dans d'autres écoles d'ingénieur, car il est apparu souhaitable de développer la culture générale des élèves ingénieurs intéressés par l'énergie en leur présentant les principales notions abordées ici.

Dans un premier temps, l'enseignement était dispensé de manière classique sous forme de cours magistraux abordant ces sujets en suivant peu ou prou l'ordre des différents chapitres, mais cette forme pédagogique n'était pas la plus appropriée.

1.3.1 Pédagogie préconisée

La formule qui est mise en place depuis 2006 consiste à supprimer les séances magistrales, en les remplaçant par des cours en ligne que les élèves étudient seuls, avant de travailler par petits groupes (typiquement de quatre) pour préparer l'analyse de la situation énergétique d'un pays, avec comme objectif une présentation orale devant leurs camarades et la remise d'un petit rapport écrit, d'une dizaine ou d'une vingtaine de pages. L'idéal est bien sûr que l'un des élèves du groupe soit lui-même citoyen du pays étudié.

Des données leur sont fournies (bilans énergétiques¹ nationaux AIE de consommation d'énergie finale et de production d'énergie, et *BP Statistical Review of World Energy*) mais ils doivent compléter leurs informations à partir d'autres sources, notamment nationales.

Il leur est demandé d'analyser un certain nombre d'indicateurs des pays étudiés et de les regrouper sous forme de tableaux récapitulatifs des évolutions au cours des dernières décennies : consommations d'énergie, émissions de CO₂, consommations par tête, intensités en énergie et en carbone, PIB par tête en valeur courante et constante... Le volume horaire à consacrer à cette activité est d'environ 12 à 18 h.

Dans cette forme d'enseignement, les élèves apprennent par eux-mêmes l'ensemble des notions qu'ils doivent maîtriser pour pouvoir réaliser leur étude de cas. Deux types de supports sont pour cela à leur disposition :

- d'une part le livre qui constitue leur manuel au format papier ;

1 On appelle bilan énergétique un tableau ou un graphique donnant la répartition par source des consommations d'énergie dans un pays ou une région, pour une ou plusieurs années. On parle aussi couramment de bouquet énergétique ou de mix énergétique, cette dernière expression provenant de l'anglais.

- d'autre part des séances sonorisées de formation à distance (appelées Diapason pour Diaporama Pédagogiques Animés et Sonorisés), destinées à introduire les principales notions.

Les séances Diapason sont un environnement générique utilisable dans de nombreux contextes pédagogiques. Leur spécificité est d'associer une bande son à un écran, permettant aux élèves d'obtenir des explications orales contextuelles.

L'annexe 1 fournit au lecteur des informations complémentaires pour mettre en œuvre une telle pédagogie.

1.3.2 Séances Diapason disponibles

La liste des séances Diapason disponibles² traite des sujets indiqués ci-dessous :

- filières et indicateurs globaux ;
 - filières énergétiques ;
 - comptabilité économique et énergétique ;
- aspects géopolitiques ;
 - situation énergétique mondiale ;
 - problèmes énergétiques des pays en développement ;
 - réserves et ressources ;
 - marchés de l'énergie.
- évolutions récentes ;
 - aspects environnementaux ;
 - changement technologique ;
 - objectifs et impacts des politiques énergétiques.

1.4 STATISTIQUES ÉNERGÉTIQUES ET ÉCONOMIQUES

Ce livre fait appel à de nombreuses données sur les consommations et production d'énergie et sur les indicateurs macroéconomiques dans le monde. Vous trouverez sur le portail Thermoptim-UNIT une page contenant des liens vers des organismes qui recensent et publient des statistiques énergétiques et économiques.

Les données énergétiques et économiques que nous avons utilisées dans ce livre proviennent de nombreuses sources. Les principales sont cependant :

- la Banque mondiale, qui propose un accès gratuit en ligne à diverses bases de données très complètes, et notamment les Indicateurs du Développement

² <http://www.thermoptim.org/sections/logiciels/divers-portail/seances-disponibles>

dans le Monde (*World Development Indicators*, WDI en anglais : <http://databank.worldbank.org/data/home.aspx> ;

- la Division Population du Département des Affaires Économiques et Sociales des Nations unies collecte des informations très détaillées sur les populations mondiales, qu'elle fournit librement sous forme de tableurs (<http://www.un.org/esa/population/>) ;
- les statistiques énergétiques publiées annuellement en juin par BP : *BP Statistical Review of World Energy*, qui comprennent de nombreuses séries de données sur le pétrole, le gaz naturel, le charbon, les énergies renouvelables, rassemblées sous forme de tableur (<http://www.bp.com>).

L'AIE publie aussi des bilans énergétiques très détaillés, mais ils ne sont pas accessibles gratuitement.

D'une manière générale, nous utiliserons les unités du Système International ou celles qui en dérivent directement. Chaque fois que possible, nous fournirons aussi les valeurs correspondantes dans le système britannique, par exemple en ajoutant une échelle supplémentaire aux figures présentées.

L'annexe 2 fournit différentes informations sur les équivalences énergétiques.

Filières énergétiques

2.1 PRÉSENTATION

Ce chapitre fournit au lecteur une base technique sur l'énergie en présentant succinctement ce que l'on appelle l'offre d'énergie ou encore les différentes filières énergétiques. Après avoir indiqué quelles sont les formes d'énergie existantes et expliqué les modes possibles de conversion entre elles, il introduit les principales caractéristiques de ces filières, en commençant par celles qui concernent les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, hydrocarbures de synthèse). Viennent ensuite le nucléaire, la production d'électricité, les énergies renouvelables (géothermie, solaire, éolien, hydraulique, énergie de la mer) et enfin le stockage thermique ou pneumatique.

Le lecteur intéressé par une analyse en profondeur de la conversion thermique de l'énergie peut se référer à [Gicquel, 2009], qui fournit une présentation plus exhaustive de la thermodynamique appliquée aux systèmes énergétiques.

Ce chapitre se termine par une section récapitulative qui, avant de comparer les différents types d'énergie essentiellement du point de vue économique, résume les principales caractéristiques du secteur énergétique : longs délais de mise en œuvre, diversité, rigidité, remise en cause de l'acceptation sociale.

2.2 DIVERSES FORMES D'ÉNERGIE

L'énergie peut être définie comme la faculté que possède un corps de fournir du travail mécanique ou son équivalent.

Elle se présente sous différentes formes (figure 2.2.1) :

- mécanique ;
- chaleur ;
- rayonnement électromagnétique ;
- électricité ;
- chimique ;
- nucléaire.

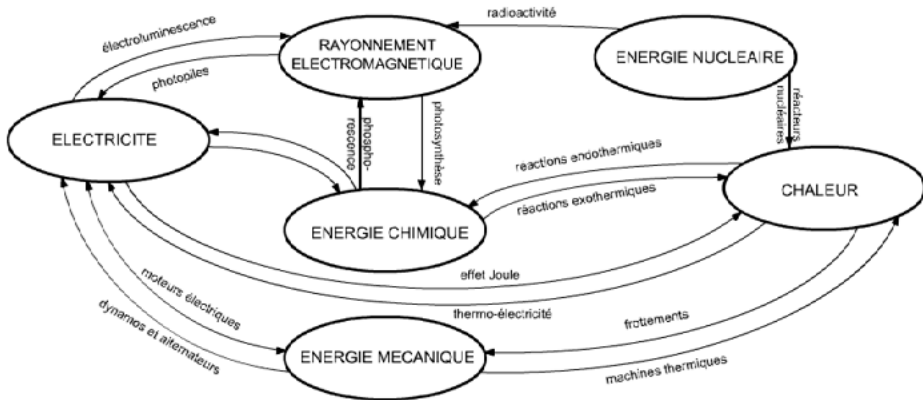


Figure 2.2.1: Différentes formes d'énergie

L'énergie mécanique se présente sous deux formes principales :

- L'énergie potentielle, provenant essentiellement de l'attraction de la gravitation terrestre, est celle que possède un corps au repos situé en altitude : énergie contenue dans l'eau d'un barrage, contrepoids des anciennes horloges, etc.
- L'énergie cinétique est celle que possède un corps en mouvement : énergie du vent, des cours d'eau, arbre moteur, volant d'inertie, etc.

La chaleur ou énergie thermique est l'énergie contenue dans un corps dont la température est supérieure à celle de son environnement.

On distingue la chaleur sensible mise en jeu lors d'une variation de température sans changement d'état, et la chaleur latente dégagée (respectivement absorbée) sans variation de température, lors de la solidification (resp. la fusion) et lors de la condensation (resp. l'ébullition).

La chaleur peut être transmise selon trois modes de transfert principaux : la conduction et la convection, qui agissent par contact, et le rayonnement thermique, qui permet une transmission à distance.

Le rayonnement électromagnétique, dont fait partie le rayonnement thermique, est une autre forme d'énergie, capable d'agir à distance, même sans milieu matériel intermédiaire.

L'énergie chimique correspond à l'énergie de liaison entre les molécules d'une substance. Les hydrocarbures (pétrole, gaz, charbon) sont des formes d'énergie chimique qui jouent un rôle fondamental dans les bilans énergétiques mondiaux actuels.

L'énergie électrique est un phénomène produit par le déplacement d'électrons libres dans les conducteurs. C'est une forme d'énergie « noble » (voir plus bas) qui, à partir de trois effets, calorifique, magnétique et chimique, correspond à

une multitude d'usages, dont certains lui sont spécifiques : éclairage, moteurs électriques, électrolyse, chauffage à induction, acquisition, traitement et transmission de l'information, etc.

L'énergie nucléaire est l'énergie de liaison entre les particules qui constituent le noyau d'un atome. La théorie de la Relativité a montré l'équivalence de la matière elle-même et de l'énergie, selon la célèbre formule $e = mc^2$. L'énergie nucléaire peut être dégagée par la fission, qui consiste à fendre le noyau d'un atome lourd (uranium, plutonium), ou par la fusion de noyaux légers (hydrogène, deutérium). Aujourd'hui, seule la fission est maîtrisée dans des réactions contrôlées, la fusion ne pouvant encore être réalisée que dans des bombes atomiques, même si d'importants programmes de recherche comme ITER se donnent pour objectif de la maîtriser. Un développement significatif de la fusion avant 2050 est peu probable.

2.3 CONVERSIONS D'ÉNERGIE

Entre ces différentes formes d'énergie, de multiples conversions sont possibles (cf. figure 2.2.1), ces conversions étant soumises aux deux grands principes de la thermodynamique.

Le premier principe, ou principe de conservation de l'énergie, énonce que, dans un système fermé, la quantité d'énergie soumise à un processus de transformation se retrouve intégralement sous d'autres formes lorsque ce processus a pris fin.

Si le premier principe pose que toutes les formes d'énergie sont équivalentes en valeur, le second principe introduit une notion de qualité de l'énergie, celle-ci se dégradant d'énergie noble (mécanique, électrique), en chaleur. Selon ce principe, la quantité d'énergie utilisable (énergie noble) diminue obligatoirement dans un système isolé, du fait de l'existence d'irréversibilités. De plus, la limite supérieure du rendement de transformation de l'énergie thermique en travail mécanique est égale au rendement de Carnot : $\eta = 1 - T_f/T_c$, T_c étant la température de la source d'énergie thermique (source chaude), et T_f celle de l'environnement ambiant (source froide), toutes deux étant exprimées en Kelvin.

Sur le plan pratique, les principales conversions mises en jeu sont les suivantes :

- la photosynthèse assure la transformation du rayonnement solaire en biomasse végétale et plancton, ce qui, au cours des millénaires, a donné le jour à l'ensemble des réserves mondiales de combustibles fossiles ;
- la combustion du charbon, des hydrocarbures et de la biomasse permet de fournir de la chaleur, utilisée dans de nombreux procédés industriels, pour le chauffage, etc. La quantité de chaleur qu'un combustible peut fournir est appelée son pouvoir calorifique ;

- les machines thermiques permettent de transformer soit de la chaleur en énergie mécanique (cycles directs), laquelle peut être utilisée directement ou convertie en énergie électrique, soit de l'énergie mécanique en chaleur (cycles inverses), pour produire du froid (machines frigorifiques) par exemple ;
- les dynamos et alternateurs, mus par une source d'énergie mécanique (moteur, turbine), produisent de l'électricité ;
- les frottements et l'effet Joule convertissent en chaleur l'énergie mécanique ou électrique ;
- les réacteurs nucléaires transforment les réactions de fission en chaleur, laquelle peut ensuite être utilisée pour générer de l'électricité.

Compte tenu des irréversibilités dont les conversions d'énergie sont le siège, les rendements des transformations sont en pratique inférieurs aux rendements maximaux théoriques.

Ainsi, lors de la combustion quand les produits de réaction se retrouvent à l'état gazeux, il est possible, à basse température, que certains d'entre eux se liquéfient ou même se solidifient, en dégageant une chaleur de condensation ou de solidification.

C'est notamment le cas lors de la combustion des hydrocarbures, de l'eau apparaissant parmi les produits. Le maximum de dégagement d'énergie est obtenu lorsque l'eau contenue dans les fumées est liquéfiée. La valeur de la chaleur de réaction complète prend alors le nom de pouvoir calorifique supérieur, ou PCS. Dans le cas le plus général où toute l'eau produite reste à l'état de vapeur, on lui donne le nom de pouvoir calorifique inférieur ou PCI.

Le tableau 2.3.1 indique quelles sont les limites actuelles et théoriques pour quelques modes de conversion de l'énergie.

TABLEAU 2.3.1 PRINCIPALES CONVERSIONS D'ÉNERGIE

	Conversion de	en	Meilleur rendement pratique (%)	Meilleur rendement théorique (%)
Production d'électricité à partir de combustibles	énergie chimique	électricité	32-42 (> 50 CC)	85
Production d'électricité hydraulique	énergie mécanique	électricité	95 - 98	100
Pile à combustible	énergie chimique	électricité	50	80-100
Conversion photovoltaïque	rayonnement électromagnétique	électricité	20	50
Chauffage solaire	rayonnement électromagnétique	chaleur	30 - 50	100
Moteur à combustion interne pour les transports	énergie chimique	énergie mécanique	30 - 40	75 - 85
Photosynthèse	rayonnement électromagnétique	énergie chimique	1-3	6

2.4 PRINCIPALES SOURCES D'ÉNERGIE

La nature met à la disposition de l'homme deux grandes catégories de sources d'énergie : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables.

Les énergies non renouvelables sont principalement les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), qui sont des formes d'énergie chimique provenant de la biomasse, stockées au cours des millénaires passés, ainsi que la fission nucléaire dérivée de l'uranium. Comme leur nom l'indique, les réserves correspondant à ces sources d'énergie sont limitées et ne se renouvellent pas, du moins pas dans des périodes de temps à l'échelle de l'homme.

Leur exploitation correspond à l'utilisation d'un capital déjà largement entamé, de telle sorte qu'à moyen terme, le relais devra être pris par d'autres sources.

Les énergies renouvelables ont quant à elles été les premières employées par l'homme et continuent de l'être largement dans les sociétés traditionnelles. Ce vocable recouvre des formes d'énergie très diverses, comme la géothermie, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie marémotrice, ou encore l'énergie des animaux de trait. Se présentant sous forme de flux et non de stock, leur mise en valeur présente des avantages mais pose aussi des problèmes spécifiques qui seront évoqués plus loin. En revanche elles sont pratiquement inépuisables.

2.4.1 Pétrole

Depuis la première mise en production de pétrole en 1859 par Drake aux États-Unis, la consommation des produits pétroliers a connu un développement considérable (1Gt en 1960, 2,9Gt en 1987, et 4Gt en 2007) ce qui s'explique par les avantages certains que présente cette énergie du fait de sa forme liquide, de sa forte capacité énergétique volumique, et de sa nocivité relativement faible.

Liquide, le pétrole est transportable facilement et distribuable en quantités très variables, les réseaux de transport et de distribution des produits pétroliers, après départ de raffinerie, étant les moins coûteux et les plus souples. En particulier, le pétrole est de nos jours la forme d'énergie la plus adaptée pour les transports routiers, aériens et maritimes, qui constituent un marché quasiment captif pour les carburants liquides.

Un autre avantage offert par le pétrole est que la multiplicité de ses usages s'est progressivement développée au cours des cent dernières années, et couvre aujourd'hui une gamme considérable de produits, comme le montre la figure 2.4.1. La polyvalence du pétrole en fait ainsi une source d'énergie particulièrement attractive, et explique le fort développement de son marché au XX^e siècle.

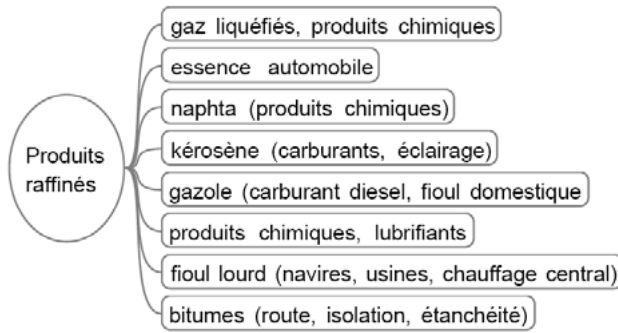


Figure 2.4.1: Différents usages du pétrole

Le pétrole et le gaz naturel, mélanges de carbone et d'hydrogène, ou hydrocarbures, ont pour origine des micro-organismes végétaux et animaux accumulés au fond des mers, qui, par suite de bouleversements géologiques, ont été transformés en boues progressivement filtrées par des roches sédimentaires poreuses, et déplacées jusqu'à ce que, bloquées par des couches de terrain imperméables, elles forment des gisements.

Les gisements sont constitués d'étendues de dimensions très variables à des profondeurs allant d'affleurements à la surface jusqu'à près de 5 000 m. Leur composition géologique correspond à des roches poreuses dans lesquelles les hydrocarbures sont emprisonnés, la porosité (et donc la concentration en pétrole) étant au mieux égale à 25 %. Ces roches sont appelées roches-réservoirs ou roches-magasins, par opposition aux roches-mères où les hydrocarbures se sont formés à l'origine.

Les pétroles sont des huiles minérales de compositions et de qualités très variées. Ils sont souvent caractérisés par leur densité, exprimée en degrés API selon l'*American Petroleum Institute*. Ce degré varie entre 80° API pour les plus légers et moins de 10° pour les plus visqueux. Au-delà de 20° API, on parle de pétrole classique, ou tout simplement de pétrole, en-deçà, entre 10 et 20°, de pétrole lourd.

Le degré API ne doit pas être confondu avec la densité physique, qui varie de 0,7 (pétroles légers) à environ 1 (pétroles lourds). La relation liant le degré API à la densité physique est :

$$d_{\text{API}} = 141,5/d_{16^{\circ}\text{C}} - 131,5$$

2.4.1.1 La chaîne pétrolière

Comme indiqué dans la figure 2.4.2, la filière pétrolière comprend cinq maillons principaux.

Pour extraire le pétrole des gisements, il faut forer des puits dont le coût unitaire est très élevé, surtout lorsqu'il s'agit de gisements sous-marins (offshore).

Pour limiter le nombre de forages, la prospection a développé des **méthodes d'exploration** qui relèvent de la géologie et de la géophysique.

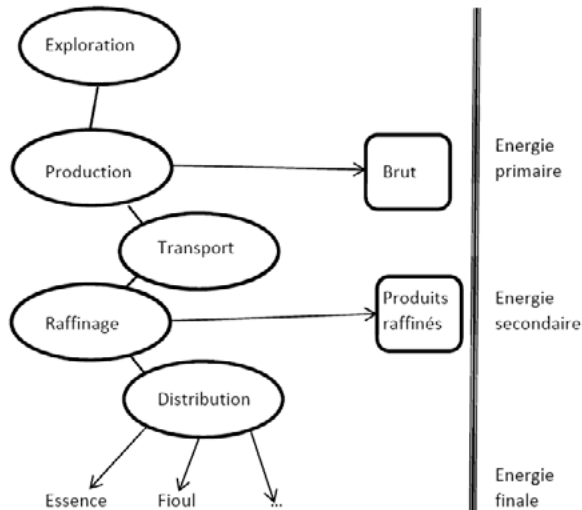


Figure 2.4.2: Filière du pétrole

Les études géologiques, sur la base de l'observation de surface, éventuellement assistée de photographies aériennes, permettent de repérer la structure du terrain et de localiser les zones à potentiel pétrolier.

La **prospection géophysique** permet de caractériser les propriétés d'un terrain, grâce à des mesures de gravimétrie (variations locales du champ de la pesanteur), de magnétométrie (variations du champ magnétique), de résistance électrique, et surtout grâce à des études de sismique, qui consistent à suivre le trajet souterrain d'ondes de choc provoquées artificiellement (explosifs ou vibrosismique). Le dépouillement informatique des relevés permet aujourd'hui des interprétations très fines.

Lorsque les études de prospection laissent penser qu'un gisement existe, on entreprend des **forages d'exploration** dont la profondeur varie généralement entre 800 et 5 000 m et peut même dépasser 10 000 m.

La durée d'exécution d'un forage se situe entre 15 jours et plusieurs mois, à un rythme de progression de quelques mètres à l'heure. En moyenne seule 1 sur 5 voire 1 sur 10 des zones explorées recèle réellement des ressources pétrolières. Lorsque c'est le cas, la tour de forage est démontée et il ne reste au sol qu'un ensemble de vannes caractéristique, appelé arbre de Noël. Sinon, le forage est refermé.

Même en se fondant sur les techniques géologiques et géophysiques les plus modernes, l'exploration pétrolière reste fortement aléatoire et demeure une

activité à haut risque financier, réservée à des entreprises de grande taille. De plus, l'exploration ne peut être menée qu'en période où ces entreprises dégagent un excédent suffisant, c'est-à-dire lorsque les prix du pétrole sont élevés. Le rythme des découvertes suit donc sensiblement celui des prix, ajoutant un facteur fluctuant supplémentaire à l'équation d'équilibre offre/demande.

Au niveau mondial, on observe d'importantes disparités dans le rythme d'exploration pétrolière : pour une moyenne de 95 puits forés par zone de 10 000 km², la densité des forages d'exploration est de 500 en Amérique du Nord, 90 en Europe de l'Est (ex-URSS), 45 en Europe de l'Ouest, 12 en Amérique Latine, 7 au Moyen-Orient, 5,5 en Asie /Océanie, et 4,5 en Afrique.

Ces écarts sont liés à de nombreux facteurs, notamment au taux de succès probable, meilleur dans des zones relativement bien connues, au régime de propriété du sous-sol (qui peut appartenir soit au propriétaire du terrain, soit à l'État³), et surtout au risque politique en cas de découverte. De nombreuses compagnies internationales, échaudées par les risques de nationalisations, hésitent en effet à se lancer dans des programmes d'exploration dans certains pays en développement.

Enfin, si le taux de succès de l'exploration a tendance à croître du fait des progrès réalisés dans les méthodes de prospection, la taille des gisements découverts a quant à elle tendance à décroître. On définit pour mesurer le résultat de l'activité exploratoire un indice de découverte, qui représente la quantité de pétrole découvert divisée par l'effort d'exploration et qui s'exprime en baril par pied foré (b/ft). Les courbes représentant les évolutions de l'indice de découverte sont très nettement orientées à la baisse, avec une plage de répit correspondant à la période 1950 - 1970 au cours de laquelle la prospection offshore a connu un grand essor. Les valeurs atteintes sont très variables selon les zones géographiques. Aux États-Unis, elles sont aujourd'hui particulièrement faibles, de l'ordre de 20 b/ft, alors que la moyenne mondiale se situe autour de 500 b/ft.

Cette forte réduction de la taille des découvertes laisse penser qu'il est peu probable que l'on découvre dans l'avenir beaucoup de champs «super-géants» comparables à ceux du Moyen-Orient.

Au total, dans le monde, entre 30 et 35 000 bassins pétroliers ont été découverts. La plupart sont de petite taille, tandis que 1 % d'entre eux contient 90 % des réserves mondiales. On recense aujourd'hui environ 600 bassins de grande capacité ; 200 d'entre eux n'ont jamais été explorés, et 240 l'ont été plus ou moins, mais ne sont pas productifs. Sur les 160 grands bassins productifs, 25 ont une capacité supérieure à 10 milliards de barils (10 Gb), 6 supérieure à 50 Gb, et un seul contient plus de 50 % du pétrole mondial. Parmi les 200 non explorés, on estime que 12 à 15 auraient une capacité supérieure à 10 Gb, mais qu'aucun ne serait capable de rivaliser avec le Moyen-Orient.

3 C'est le cas le plus général, la législation des États-Unis étant l'exception.

2.4.1.2 La production

La mise en exploitation d'un gisement est réalisée en forant plusieurs puits. Selon la pression naturelle au sein du gisement, la production peut se faire spontanément ou doit être assurée par l'emploi de pompes (pompes de surface aspirantes/refoulantes à balancier, ou, de plus en plus, pompes électriques au fond du puits).

Ces moyens correspondent à la **récupération primaire**, qui ne permet généralement pas de recueillir plus de 20 % du potentiel du gisement.

Pour améliorer le rendement, il faut passer à la **récupération secondaire**, qui consiste à injecter de manière systématique de l'eau ou du gaz sous pression en un ou plusieurs endroits, facilitant ainsi la remontée du pétrole par le puits de production. En moyenne, le taux de récupération peut alors être porté à 33 %.

Enfin, la phase de **récupération tertiaire**, beaucoup plus coûteuse et en cours de développement technologique, devrait permettre de porter le taux d'extraction à 40 ou 50 % grâce à l'injection de vapeur, d'hydrocarbures miscibles ou de produits chimiques dilués dans l'eau. Il est alors nécessaire de décanter le pétrole extrait pour en séparer les gaz et les eaux salées. Ces techniques ont un coût élevé et ne se justifient donc que si les prix dépassent certains seuils.

La mise en exploitation complète d'un champ pétrolier s'étend sur plusieurs années et peut demander jusqu'à 15 ans pour un grand gisement offshore. Dans ce dernier cas, on doit utiliser des plates-formes posées ou ancrées au fond de la mer selon la profondeur.

Le développement de l'exploration et de la production en mer a été rendu nécessaire par le rapide épuisement des réserves à terre. Les océans représentant 70 % de la surface de la Terre, les potentiels pétroliers qu'ils recèlent sont en effet considérables, même si l'environnement y est beaucoup plus hostile.

Développées initialement à proximité des côtes où se situaient les grands gisements, l'exploration et la production offshore se sont ensuite étendues à des zones d'accès beaucoup plus difficile comme la Mer du Nord, le Labrador, etc. Environ 30 % du pétrole produit dans le monde provient aujourd'hui du fond des mers, et ce chiffre devrait rester stable dans l'avenir proche.

2.4.1.3 Le transport vers les raffineries

Du puits de production aux raffineries, le transport du pétrole brut est assuré soit par navire pétrolier, soit par oléoduc.

L'intérêt de l'acheminement par voie maritime est qu'il permet de modifier à tout moment la destination de la cargaison. En revanche, les pétroliers doivent retourner à vide sur les lieux de chargement. Nous verrons plus loin que cette souplesse a permis le développement d'un marché concurrentiel du pétrole, le **marché spot**.

Notons que le trafic pétrolier international représente encore une part très importante du commerce maritime mondial (36,6 % en 2009 contre plus de 50 % de 1950 à 1980 [CNUCED, 2012]).

La principale contrainte technique est que le pétrole brut ne peut guère être utilisé tel quel, et qu’il est donc nécessaire de le raffiner, pour produire des «dérivés» ou «produits», qui correspondent aux usages très variés, soit énergétiques, soit chimiques.

2.4.1.4 Le raffinage

Le raffinage a pour but de séparer les différents hydrocarbures composant le pétrole. On utilise pour cela des procédés physiques et physico-chimiques qui permettent d’obtenir quatre grandes catégories de **produits** ou «**coupes**»: les gaz de pétrole liquéfiés (GPL), les essences, les distillats moyens (fioul domestique, gazole), et les fiouls lourds, comme indiqué sur la figure 2.4.3.

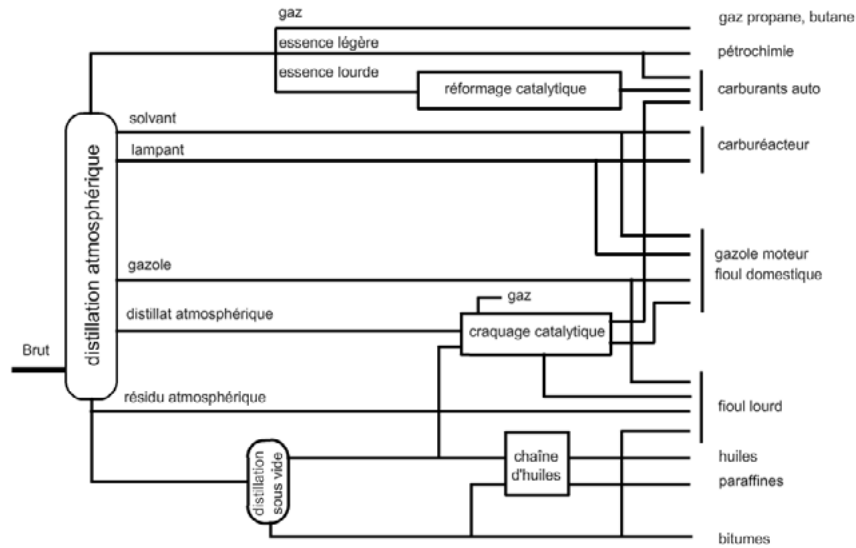


Figure 2.4.3: Schéma du raffinage

L’unité de distillation atmosphérique ou primaire permet de séparer les produits, à pression atmosphérique, en fonction de leur volatilité. Le pétrole y est introduit à 380°C, et les vapeurs sont ensuite séparées par condensation à des températures variant de 120°C à 255°C. Au fond, subsiste un résidu lourd, appelé résidu atmosphérique.

Pour le récupérer, on le distille sous vide à 480 °C, ce qui fournit un distillat que le craquage catalytique permet de séparer en produits plus légers. On obtient ainsi plus d’essence carburant.

Le réformage a quant à lui pour but de transformer de l'essence lourde en carburant à indice d'octane élevé. Il est obtenu en faisant passer l'essence sur un catalyseur en platine à 500 °C.

On notera que le raffinage constitue un problème fortement contraint, les produits dépendant dans une large mesure de la composition du brut entrant. Les raffineries ne sont pas capables d'ajuster facilement leur production à une évolution forte de la demande, et une grande partie des difficultés de ce secteur provient de cette rigidité.

En effet, le souci croissant de réserver l'utilisation du pétrole à ses usages spécifiques (transports routiers et aériens), a eu pour effet de réduire considérablement la demande mondiale en produits lourds depuis les premiers chocs pétroliers. Pour faire face à cette évolution, et pour mieux valoriser le pétrole, des technologies de conversion profonde sont en cours de développement dans les raffineries les plus performantes.

Très coûteuses, elles permettent de «craquer» les molécules lourdes afin d'obtenir plus de produits légers. Il est ainsi possible de réduire la production de produits lourds d'un facteur trois par rapport à une raffinerie sans unité de conversion, et d'un facteur deux par rapport à une raffinerie munie d'une unité de conversion classique.

À titre d'exemple, le tableau 2.4.1 donne l'effet d'une unité de conversion classique (craquage catalytique) sur la structure de production d'une raffinerie.

TABEAU 2.4.1 STRUCTURE DE LA PRODUCTION DE DEUX RAFFINERIES

	Raffinerie sans unité conversion	Raffinerie avec craquage catalytique
Gaz et GPL	3,5	5,3
Essence carburant	15,2	23,3
Gazole et fioul dom.	35,4	36,4
Fioul lourd	42,5	29,1
Consom. raffinerie	3,4	5,9

Au cours des dernières décennies, l'industrie du raffinage des pays importateurs a été confrontée à une nécessaire restructuration du fait d'une part de la baisse de la demande de pétrole qui s'est traduite par des pertes de marchés, d'autre part de l'évolution de la demande de produits finis vers des coupes plus légères, et enfin d'une délocalisation des capacités de raffinage dans les pays producteurs.

L'ensemble de ces problèmes s'est traduit, pour de nombreux pays, par la nécessité d'importer davantage de «**produits blancs**» (essence, gazole). Au plan mondial, les échanges de produits finis ne représentaient cependant en 2010 que 30 % du total des échanges de pétrole (brut et produits) en volume, et 20 % de la consommation.

2.4.1.5 La distribution

Alors que production et raffinage demeurent des activités centralisées, la distribution des produits pétroliers peut être plus largement décentralisée.

Le mode de distribution dépend de l'importance du consommateur :

- les gros consommateurs sont généralement livrés directement par les raffineries ;
- la livraison finale aux petits consommateurs se fait uniquement par route. On dénombre en France 32 000 stations services alimentant les 21 millions de voitures particulières et les transports routiers, et 6 000 négociants en fioul, qui approvisionnent plus de 6 millions de chauffages centraux.

Les compagnies pétrolières disposent de surcroît de dépôts, utilisés comme stockage stratégique (90 jours de consommation pour les États membres de l'Union européenne et d'importations pour ceux de l'AIE), et économique pour répondre aux fluctuations de la demande. Ils sont généralement situés à proximité des zones de consommation. La France compte par exemple 500 dépôts dont la capacité varie de 1 000 m³ à plus de 10 000 m³.

2.4.1.6 Structure des coûts techniques

Le coût du pétrole peut être décomposé en quatre facteurs : production, transport, raffinage et distribution. À l'ensemble de ces coûts techniques, il faut bien sûr ajouter la rente pétrolière chez le producteur et les taxes fiscales chez l'importateur, qui peuvent représenter une part très importante du prix supporté par le consommateur final.

Au Moyen-Orient, le **coût de production** est très faible, de l'ordre de 1 à 7 \$/b. En zone plus difficile (offshore), il est de 15 à 30 \$/b [IEA World Energy Outlook 2008].

Le **coût de transport** du pétrole reste faible, que ce soit par oléoduc ou par voie maritime. On estime qu'il représente de l'ordre de 1,5 à 2 \$/b.

Nous avons vu qu'une raffinerie produit nécessairement toute une gamme de produits finis. Bien que certaines techniques de détermination du coût marginal de chacun des produits existent (théorie de la dualité en programmation linéaire), les raffineurs se refusent généralement à définir une clé de répartition des coûts de raffinage trop rigide.

Il est donc difficile de ventiler les **coûts de raffinage**. Globalement, cependant, on peut estimer le coût de raffinage entre 2,5 et 4,5 \$/b selon les qualités du brut et le degré de craquage.

Le **coût de distribution** dépend fortement du réseau emprunté pour livrer le produit fini.