





# **Le pétrole**

**quelles réserves,  
quelles productions  
et à quel prix ?**



Denis Babusiaux • Pierre-René Bauquis

# Le pétrole

## quelles réserves, quelles productions et à quel prix ?

Avant-propos de Patrick Pouyanné,  
Préface d'Olivier Appert



DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2017

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-077305-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Cet ouvrage reprend une communication à l'Académie des technologies du Groupe de travail Pétrole

Commission énergie et changement climatique, Académie des technologies

## **Groupe de travail « Pétrole »**

Nathalie Alazard-Toux (IFP Énergies nouvelles)

Pierre Castillon (Académie des technologies)

Pierre-Noël Giraud (Académie des technologies)

Frédéric Lasserre (Total)

Pierre Sigonney (Total)

Bernard Tissot (Académie des sciences et Académie des technologies)

Animateurs :

Denis Babusiaux (Professeur associé, IFP School)

Pierre-René Bauquis (Professeur affilié, IFP School)

## **Remerciements**

En dehors des membres du Groupe de travail, les auteurs remercient pour leurs remarques et suggestions Olivier Appert, Jean-François Minster (Académie des technologies), Guy Maisonnier (IFPEN), ainsi que François Lefaudeaux (Académie des technologies) pour sa mise en page et l'ensemble de sa contribution.

## **Avertissement**

Certains points sont repris en plusieurs endroits différents de ce texte. Nous avons essayé de limiter les redites, mais nous en avons introduit quelques-unes pour faciliter la tâche d'un lecteur qui souhaiterait parcourir certaines parties de ce document sans en faire une lecture complète.



# Prologue

Ce livre didactique étudie en détail les ressources de pétrole, les conditions de leur production, la demande et, enfin, les prix qui résultent de la combinaison des facteurs précédents.

Ces quatre thèmes, intimement liés, s'inscrivent dans un enchaînement temporel logique. Les ressources existantes sont ensuite produites pour satisfaire une demande à un prix donné. Cette chronologie a pourtant une particularité singulière ; chacune des étapes a une relation bien spécifique à un facteur essentiel pour notre industrie : le temps.

Les sources d'énergie solaire ou éolienne datent de l'origine du monde. Elles sont là, disponibles, offertes, depuis toujours et pour toujours. Les énergies fossiles, elles, se sont constituées au travers de la maturation des sédiments et se sont endormies, piégées dans des roches depuis des millions d'années.

La mise en production industrielle de ces réserves de pétrole n'a commencé à l'échelle du temps que très récemment, au XIX<sup>e</sup> siècle. Depuis le début de leur exploitation, l'intelligence des ingénieurs n'a cessé de chercher à raccourcir le temps nécessaire entre la découverte et la première production afin de satisfaire les consommateurs et d'améliorer l'économie des projets. Ces derniers se développent sur plusieurs années, voire dizaines d'années.

Au fur et à mesure que l'on avance dans l'ouvrage, l'échelle de temps se resserre. La demande, elle, est le plus souvent analysée par les instituts économiques sur une base annuelle, voire quinquennale, avec des estimations d'évolution suivant un même pas de temps.

Une certaine ironie intervient alors lorsqu'est abordé le sujet des prix ! L'étonnante volatilité des prix du pétrole conduit à des changements de prix à la fréquence de la seconde. Le paroxysme semble atteint lorsque l'on regarde les évolutions du prix de l'électricité, qui peut varier très rapidement, dans des proportions inédites, en fonction des pics ou chutes de la demande par rapport à l'offre disponible.

C'est alors qu'il faut louer le risque pris par les auteurs d'arrêter le temps à la date de parution de cet ouvrage et de livrer leurs réflexions sur les évolutions futures des marchés du pétrole.

*Le Pétrole. Quelles réserves, quelles productions et à quel prix ?* fait le lien entre le passé, le présent et le futur. Cette synthèse de grande qualité est utile pour un monde qui ne cesse de voir ses besoins en énergie croître, mais qui doit adapter sans cesse ses modes de production et de consommation pour les rendre plus efficaces, plus respectueux de l'environnement de façon à combiner son développement légitime et les exigences climatiques qui restent au cœur de la responsabilité des acteurs du secteur de l'énergie.

Patrick Pouyanné

Président-directeur général de Total



# Préface

Dans le domaine de l'économie des hydrocarbures, il y a des références incontournables : le « Frankel » ou le « Giraud-Boy de la Tour ». Le « Babusiaux-Bauquis » arrive à temps pour nous éclairer sur les fondamentaux d'une source d'énergie dont le monde aura besoin longtemps dans un contexte énergétique mouvant.

Cet ouvrage est né de la rencontre de deux auteurs qui ont commencé à travailler ensemble à l'IFP en début de carrière. Durant leur période commune au Service d'études économiques de l'IFP, ils publient déjà un manuel pratique de calcul économique. Ils ont eu ensuite des parcours très différents, plus académique pour l'un, industriel pour l'autre au sein du groupe Total avec des postes de responsabilité variés. Ils se sont rejoints dans le cadre du groupe de travail « Pétrole » de l'Académie des technologies, où la complémentarité de leurs expériences a été précieuse pour l'analyse et la rédaction du présent ouvrage.

Malgré la nécessaire diminution des consommations d'énergie fossile pour lutter contre le changement climatique, le pétrole sera indispensable pendant encore des décennies pour répondre à une demande d'énergie toujours croissante, en particulier dans les pays émergents. S'il peut être substitué à l'horizon des années 2030, au moins en partie, dans le secteur du transport de passagers et dans celui des véhicules légers grâce à la pénétration de l'électricité, il peut difficilement être remplacé dans le transport routier de marchandises et comme matière première de la pétrochimie. La venue d'un « pic de la demande » n'est pas synonyme de la possibilité de se passer des hydrocarbures.

Les produits pétroliers ont un atout majeur, ils sont liquides donc faciles à transporter, à stocker et à utiliser, avec un contenu énergétique élevé par unité de volume ou de masse. C'est pourquoi le pétrole a acquis une importance stratégique dès le début du xx<sup>e</sup> siècle. L'inégale répartition des réserves mondiales avec un poids majeur du Moyen Orient a renforcé la dimension géopolitique du pétrole. Aujourd'hui les progrès technologiques permettent de mobiliser de nouvelles ressources et modifient, de ce fait, les relations stratégiques entre les pays.

Le secteur pétrolier est un domaine complexe. En dehors des aspects politiques, on peut citer, par exemple, l'interaction entre les prix et la technologie. Des prix élevés favorisent les progrès techniques qui à leur tour permettent des réductions de coût et donc une diminution des prix. En matière de prix, les experts se sont toujours trompés. Certains parlent même du caractère autodestructeur des prévisions !

Le secteur pétrolier soulève des passions voire des fantasmes. Trop souvent ceux qui ne le connaissent pas savent faire entendre leur voix, car comme le disait Turgot, « moins on sait, moins on doute ».

Les auteurs ne prétendent pas apporter « une » réponse aux questions posées dans le titre de cet ouvrage. Pour comprendre le présent et les facteurs des évolutions à venir,

il est nécessaire de déchiffrer le passé, de faire une analyse critique et dépassionnée des statistiques disponibles et des positions des différents spécialistes. C'est le but de cet ouvrage qui par l'étendue et la diversité des sources étudiées et son caractère objectif donne une grille de lecture des évolutions de la scène pétrolière.

Les auteurs ont intégré les bouleversements les plus récents ; c'est le cas des « révolutions arabes », mais aussi du développement des pétroles dits de « schistes ». Ces derniers ont redonné aux États-Unis un avantage compétitif en particulier dans le secteur de la pétrochimie. Malgré de nombreuses incertitudes, ces « *game changers* » créent un nouveau paradigme bien mis en évidence dans cet ouvrage qui marquera l'économie pétrolière dans les années à venir.

Olivier Appert

Ancien président d'IFP Énergies nouvelles  
Délégué général de l'Académie des technologies

# Table des matières

Prologue	IX
Préface	XI
Résumé	XIX
Introduction	1

## Partie 1

### L'offre

<b>1</b>	<b>La diversité des ressources pétrolières et de leurs substituts</b>	<b>5</b>
	<b>1. Hydrocarbures naturels</b>	<b>6</b>
	1.1 La distinction entre pétroles « conventionnels » et « non conventionnels »	6
	1.2 Les pétroles extra-lourds et les sables bitumineux	6
	1.3 Les hydrocarbures de roche mère ou de formations compactes	8
	1.4 Les schistes bitumineux ( <i>oil shale</i> ou <i>kerogen oil</i> )	13
	1.5 Les spécificités des pétroles « non conventionnels »	14
	1.6 Les pétroles résultant de l'utilisation des techniques de récupération assistée	15
	1.7 Les pétroles « frontières »	15
	1.8 Condensats et liquides de gaz naturel (LGN, en anglais NGL)	16
	<b>2. Hydrocarbures liquides de synthèse (XTL)</b>	<b>17</b>
	2.1 Les hydrocarbures liquides de synthèse obtenus à partir du charbon (CTL, <i>Coal to Liquids</i> )	17
	2.2 Les hydrocarbures liquides produits à partir de gaz naturel (GTL pour <i>Gas to Liquids</i> )	18
	<b>3. Les biocarburants</b>	<b>19</b>
	3.1 Les biocarburants de première génération	19
	3.2 Les biocarburants de deuxième génération	21
	3.3 Les biocarburants de troisième génération	23
	3.4 En conclusion	23

4.	<b>Des ressources aux réserves et aux productions</b>	23
4.1	Les taux de récupération	23
4.2	La récupération assistée	23
4.3	Des réserves aux productions	25
<b>2</b>	<b>Les réserves pétrolières</b>	27
1.	<b>Notions de ressources et de réserves pétrolières</b>	27
1.1	Ressources et réserves, la vision traditionnelle	27
1.2	Réserves et pétroles non conventionnels, la notion de réserves contingentes	35
1.3	Répartition géographique des réserves	36
1.4	Des visions alternatives, Rystad Energy, M. Blaizot	38
2.	<b>Réserves, le point de vue des optimistes</b>	40
3.	<b>Réserves, le point de vue dit des « pessimistes »</b>	42
3.1	Les ressources identifiées	42
3.2	Les réserves restant à découvrir	44
4.	<b>Optimistes et pessimistes, convergences et divergences</b>	47
5.	<b>Réserves, le point de vue des organismes officiels</b>	47
5.1	Les réserves de pétrole conventionnel	47
5.2	Les réserves de pétroles extra-lourds	48
5.3	Les réserves de pétroles de roche mère	48
5.4	Les schistes bitumineux	48
6.	<b>Quelques conclusions sur les réserves</b>	48
<b>3</b>	<b>Les productions</b>	50
1.	<b>L'évolution des productions passées</b>	50
1.1	La part du pétrole parmi les énergies fossiles	50
1.2	Précisions des statistiques	50
1.3	Le déclin des productions des gisements en exploitation	52
1.4	La répartition par régions	53
1.5	Les principaux producteurs	53
1.6	Les différentes composantes de la production de combustibles liquides	54
2.	<b>Productions futures. La courbe de Hubbert et le <i>peak oil</i></b>	57
3.	<b>Le rythme de développement</b>	61
3.1	Une question récurrente	61
3.2	L'ouverture du domaine minier	62
3.3	Des développements plus difficiles	63
3.4	L'augmentation des coûts	64

<b>4. Perspectives de production : les pétroles conventionnels</b>	65
4.1 L'Arabie saoudite	66
4.2 L'Iran	68
4.3 L'Irak	69
4.4 La Russie	71
4.5 Autres pays	72
<b>5. Perspectives de production : les liquides de gaz naturel (LGN, en anglais NGL, <i>Natural Gas Liquids</i>)</b>	72
<b>6. Perspectives de production : les pétroles extra-lourds et les sables bitumineux</b>	73
6.1 Ultra-lourds, problèmes techniques et environnement	74
6.2 Ultra-lourds et politique	75
6.3 Ultra-lourds et économie	75
6.4 Des productions encore en augmentation	75
<b>7. Perspectives de production : les pétroles de roche mère et de gisements compacts (LTO, <i>Light Tight Oil</i>)</b>	77
7.1 Caractéristiques des pétroles de formations compactes	77
7.2 Les perspectives aux États-Unis	78
7.3 Les perspectives de production mondiale	80
7.4 Les évolutions à court terme	82
<b>8. Les perspectives de production mondiale à moyen et long terme</b>	83
8.1 La part du pétrole dans le bilan énergétique	83
8.2 La part de l'OPEP	83
8.3 La production mondiale, des visions contrastées	85

## Partie 2

### La demande

89

4

#### La demande

91

##### 1. La répartition des consommations

91

##### 2. Les déterminants de la demande

92

###### 2.1 L'équation de Kaya

92

###### 2.2 Demande et croissance économique

93

###### 2.3 Demande et prix

96

2.4 Évolutions techniques, comportementales et politiques de lutte contre le changement climatique	99
<b>3. Les évolutions possibles, quelques scénarios</b>	105
3.1 Les scénarios de l'AIE	105
3.2 Les scénarios de l'EIA	108
3.3 Les scénarios de BP	109
3.4 Les scénarios du Conseil mondial de l'énergie	110
3.5 Les scénarios de Shell	113

## Partie 3

### Les prix

117

#### **5 Prix et marchés des énergies fossiles** 119

##### **1. Les marchés du gaz naturel** 119

1.1 Des marchés régionaux 119

1.2 Le marché américain 121

1.3 L'approvisionnement des marchés européens et asiatiques 121

1.4 Le marché européen 122

1.5 Le marché Asie-Pacifique 123

1.6 Les écarts de prix 123

1.7 Les évolutions possibles 123

##### **2. Les marchés du charbon** 124

2.1 La demande 125

2.2 Les prix 126

#### **6 Formation des prix du pétrole. Les fondamentaux** 129

##### **1. Le pétrole ressource épuisable ?** 129

##### **2. Les coûts de production** 131

2.1 Les coûts techniques 131

2.2 Le coût des hydrocarbures de formations compactes 134

2.3 Le rôle du progrès technique et les évolutions possibles 138

2.4 Les coûts externes et les émissions de gaz à effet de serre 140

##### **3. Coûts marginaux, sensibilité de la production aux prix, le rôle des pétroles de gisements compacts** 142

3.1 Investissements et prix du brut 142

3.2 Sensibilité de la production à court terme 143

3.3	Les coûts marginaux de production des gisements compacts	145
3.4	La réactivité de l'activité de forage et de fracturation des gisements compacts	145
3.5	La réactivité de la production des gisements compacts	147
<b>4.</b>	<b>Les aspects géopolitiques et la formation des prix</b>	150
4.1	Le pétrole, un bien stratégique	150
4.2	Le cartel	153
<b>5.</b>	<b>Les forces de rappel du marché et les cycles pétroliers</b>	159
5.1	Le cycle des investissements	159
5.2	Les capacités de production	160
5.3	Les stocks	162
<b>6.</b>	<b>Prix du pétrole et cours du dollar</b>	164
<b>7.</b>	<b>Le rôle des anticipations</b>	166
7.1	Des prévisions souvent autodestructrices	166
7.2	La convergence des anticipations et le « point focal » des marchés	167
<b>7</b>	<b>Marchés financiers et marchés pétroliers</b>	169
<b>1.</b>	<b>Les marchés à terme et les marchés de produits dérivés</b>	169
1.1	Les principaux marchés	169
1.2	Les acteurs et leurs motivations	170
<b>2.</b>	<b>Le contexte de la montée des prix de 2004-2008</b>	173
<b>3.</b>	<b>Le comportement des investisseurs financiers</b>	175
3.1	Valeur du dollar et prix du pétrole	175
3.2	Prix du brut et inflation anticipée	176
3.3	Anticipation d'une raréfaction de l'offre pétrolière	176
<b>4.</b>	<b>Un scénario possible du rôle joué par les investisseurs financiers en 2008</b>	177
4.1	Les prises de position des acteurs	177
4.2	L'analyse des économistes : le stockage, nécessaire signature de la spéculation	179
4.3	Des points de vue inconciliables ?	180
4.4	Une approche par l'inertie de la demande	181
<b>5.</b>	<b>Les évolutions postérieures à 2008</b>	182
<b>8</b>	<b>Quelles évolutions des prix à venir ?</b>	185
<b>1.</b>	<b>Quelques éléments sur l'histoire des prix et de leurs prévisions</b>	185
1.1	Les évolutions des prix du pétrole, des causes multiples	185
1.2	La baisse des prix au second semestre 2014	186

1.3 Les prix du pétrole, la myopie des prévisions	187
<b>2. Les facteurs d'évolution des prix</b>	188
2.1 L'offre	188
2.2 La demande	189
2.3 La régulation par l'OPEP	189
2.4 La régulation par les capacités de production	189
2.5 Un nouveau régulateur, les pétroles de gisements compacts	190
<b>3. Quels scénarios de prix pour les années à venir ?</b>	190
3.1 Les évolutions à court terme	190
3.2 Des prix durablement bas sont-ils possibles ?	192
3.3 Le risque d'insuffisance des investissements	193
3.4 Un scénario de prix modérés	194
3.5 Un scénario de prix croissants	195
3.6 Un nouveau choc pétrolier ?	196
<b>Conclusion</b>	197
<b>Bibliographie</b>	199
<b>Glossaire</b>	205
<b>Unités de mesure utilisées dans l'industrie des hydrocarbures</b>	213
<b>Index</b>	215

# Résumé

Ce livre a pour objet de présenter une synthèse des analyses proposées sur les trois sujets qui sont au cœur de l'économie pétrolière : les réserves, les productions et les prix. Sur chacun de ces trois sujets existe une très abondante littérature, mais peu ou pas d'ouvrages de synthèse. Cet ouvrage comprend trois parties correspondant respectivement à l'offre (trois chapitres), à la demande (un chapitre) et à la formation des prix (quatre chapitres).

L'objet principal concerne le pétrole proprement dit, c'est-à-dire les hydrocarbures liquides, mais quelques considérations concernant le gaz naturel et même le charbon ont été incorporées là où elles paraissent utiles.

Le premier chapitre rappelle tout d'abord ce que sont les ressources naturelles à partir desquelles on peut produire des pétroles, en mettant l'accent sur les « nouveaux pétroles », parmi lesquels les pétroles dits « de schistes » (*shale oil*), ou « de gisements compacts » (LTO pour *Light Tight Oil*), qui sont à l'origine d'un changement majeur de l'économie pétrolière. Sont également abordées dans ce chapitre les techniques permettant d'étendre le domaine des ressources naturelles en recourant à des produits de synthèse ou de substitution. Ceux-ci sont communément appelés XTL, abréviation de « *X to liquids* », X pouvant être du gaz naturel (GTL), du charbon (CTL), de la biomasse (BTL) ou même de l'hydrogène (HTL).

Le second chapitre est consacré aux réserves. Il présente les différents points de vue en présence, souvent très éloignés les uns des autres, en particulier entre les « optimistes » et les « pessimistes », dans une tentative d'explicitation des hypothèses sous-jacentes et d'analyse des incertitudes concernant les ressources récupérables dans le futur. Ces incertitudes sont dues tout d'abord à l'extrême variété des situations géologiques, des qualités des réservoirs et de celles des hydrocarbures qu'ils peuvent contenir. Une seconde source d'incertitudes est liée au couple « économie et technologies », le montant des réserves mondiales ou locales étant fonction des variations des prix des bruts et de l'évolution des technologies permettant de modifier les conditions d'accès aux ressources et en particulier les coûts de production. Ce sont les progrès techniques et l'apprentissage qui sont à l'origine de la « révolution des gaz et pétroles de schistes », les ressources et plus encore les réserves relatives à ces « nouveaux » pétroles sont celles sur lesquelles les différentes appréciations sont le plus contrastées et c'est sur leur potentiel que les incertitudes sont les plus élevées. Quant aux pétroles « conventionnels », on observe une sensible diminution des nouvelles découvertes, qui peut être une source d'inquiétude sur le renouvellement des réserves. Aux sources d'incertitudes précédemment citées s'ajoutent des facteurs politiques qui peuvent conduire à des annonces de réserves parfois sujettes à caution. Parmi les facteurs politiques figurent également les conditions d'ouverture du domaine minier aux sociétés internationales et les conditions de sécurité nécessaires à la conduite des opérations.