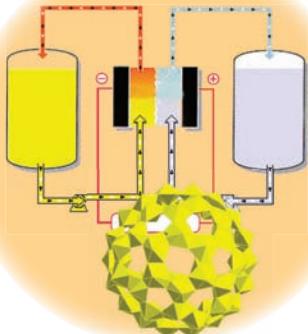
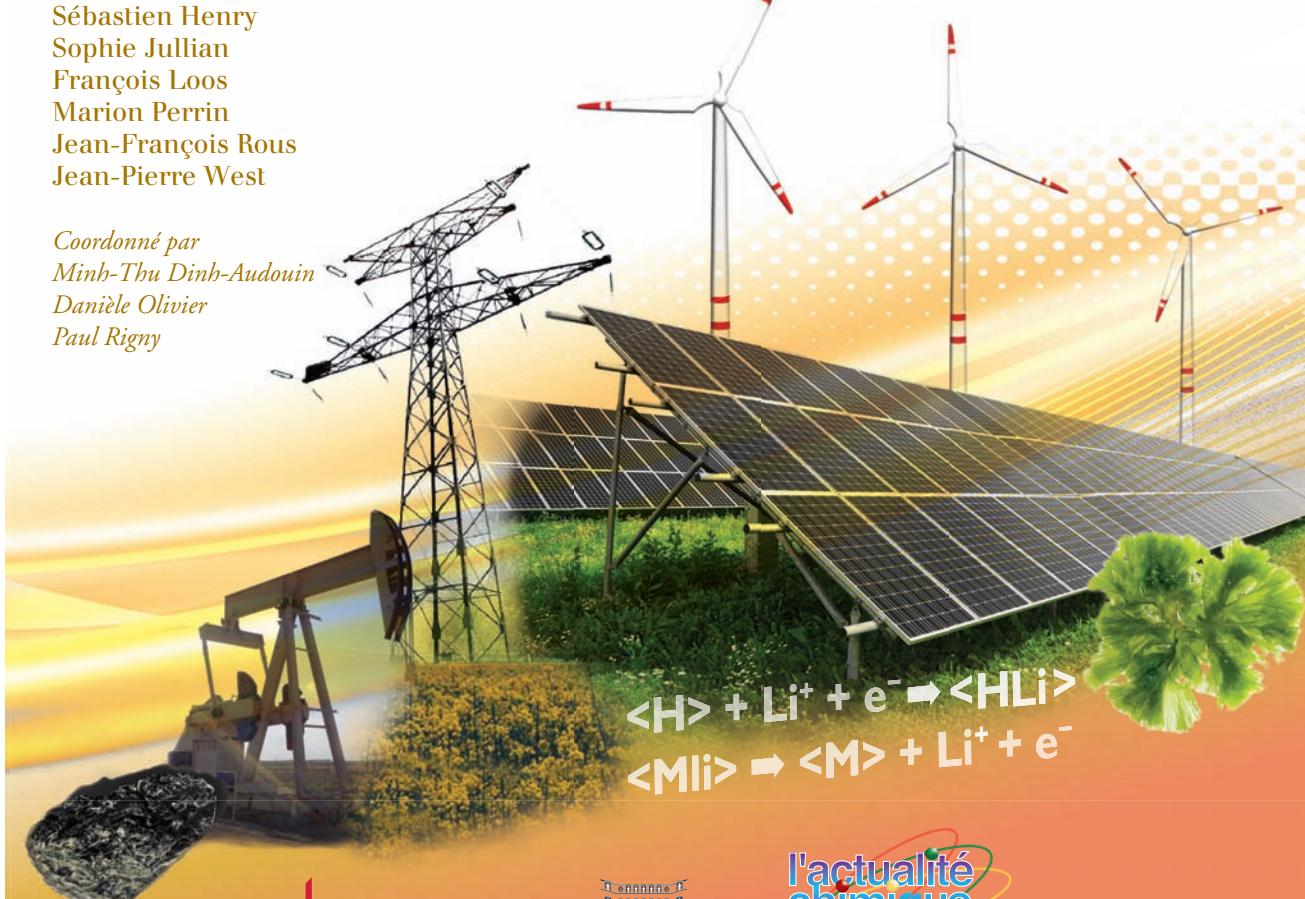


Chimie et enjeux énergétiques



Jean-Claude Bernier
Bernard Bigot
Bernard Boullis
Patrick Criqui
François Drain
Léon Duvivier
Marc Florette
Bruno Goffé
Claude Gudin
Sébastien Henry
Sophie Jullian
François Loos
Marion Perrin
Jean-François Rous
Jean-Pierre West

Coordonné par
Minh-Thu Dinh-Audouin
Danièle Olivier
Paul Rigny



Chimie
et
enjeux énergétiques



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et enjeux énergétiques », qui s'est déroulé le 14 novembre 2012 à la Maison de la Chimie.

Chimie et enjeux énergétiques

Jean-Claude Bernier, Bernard Bigot, Bernard Boullis,
Patrick Criqui, François Drain, Léon Duvivier, Marc Florette,
Bruno Goffé, Claude Gudin, Sébastien Henry, Sophie Jullian,
François Loos, Marion Perrin, Jean-François Rous, Jean-Pierre West

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari et Minh-Thu Dinh-Audouin

Images de couverture :
Forage pétrolier (wikipédia-CC-BY-SA-3.0, Flcelloguy ;
Pilône : S. Henry (RTE)

Images de la 4^e de couverture : L. Duvivier et M. Florette

Iconographie : Minh-Thu Dinh-Audouin

Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-0973-8

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2013

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Jean-Claude Bernier
Professeur Émérite
des Universités
Université de Strasbourg

Bernard Bigot
Administrateur général du
Commissariat à l'Énergie
Atomique (CEA)
Président de la Fondation
internationale de la Maison de
la Chimie

Bernard Boullis
Institut National des Sciences
et Techniques Nucléaires
(INSTN)
Université de Montpellier
Directeur du programme
des technologies du cycle du
combustible et de gestion des
déchets au CEA

Patrick Criqui
Directeur de recherche CNRS
Laboratoire PACTE-EDDEN,
CNRS et Université de
Grenoble

François Drain
AREVA
Expertise & Innovation

Léon Duvivier
Directeur des Technologies
GDF SUEZ
Direction Recherche et
Innovation

Marc Florette
Membre du COMEX
Directeur Recherche et
Innovation
GDF SUEZ
Direction Recherche et
Innovation

Bruno Goffé
Directeur de recherche
CNRS au Centre Européen de
Recherche et d'Enseignement
en Géosciences de
l'Environnement (CEREGE),
Centre National de la
Recherche Scientifique (CNRS)
- Université Aix-Marseille

Claude Gudin
Ancien directeur
du programme microalgues
du CEA à Cadarache
Conseiller scientifique du
GPEA et de Fermentalg

Sébastien Henry
Réseau de Transport
d'Électricité (RTE)
Direction R&D et Innovation
(Département Expertise
Système)

Sophie Jullian
Directeur scientifique
Institut Français du Pétrole
Énergies Nouvelles (IFPEN)

Armand Lattes
Professeur Émérite
des Universités
Université Paul Sabatier
(Toulouse)

François Loos
Président de l'Agence de
l'Environnement et de la
Maîtrise de l'Énergie (ADEME)
Ancien ministre de l'Industrie

Marion Perrin
Chef de laboratoire stockage
de l'électricité (DRT/LITEN/
DTS/LSE) au CEA

Jean-François Rous
Sofiprotéol
Directeur Innovation

Jean-Pierre West
Directeur adjoint d'Électricité
De France (EDF)
Département R&D pour
la production d'électricité
d'origine nucléaire,
hydraulique et thermique

Équipe éditoriale :
Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier
et Paul Rigny

Vj ku'r ci g'kpvgpvkpcm{ 'ighv'ditpm

Sommaire

Avant-propos : par Danièle Olivier et Paul Rigny 9

Préface : par Bernard Bigot 11

Partie 1 Les leviers d'action pour notre futur énergétique

Chapitre 1 : La chimie pour réussir la transition énergétique
par Armand Lattes 15

Chapitre 2 : La chimie, une science au cœur des énergies d'avenir
par Bernard Bigot 27

Chapitre 3 : Notre futur énergétique se décide aujourd'hui
par Patrick Criqui 53

Partie 2 Optimiser nos pratiques actuelles en matière d'énergie

Chapitre 4 : Vivre en économisant cette « chère énergie »
par Jean-Claude Bernier 67

Chapitre 5 : Les enjeux de la chimie dans la production d'électricité
d'après la conférence de Jean-Pierre West ... 89

Chapitre 6 : Eau et énergie sont indissociables
par Marc Florette et Léon Duvivier 99

Chapitre 7 : Les enjeux de la R&D en chimie pour le domaine des carburants et des biocarburants
par Sophie Jullian 115

Chapitre 8 : La chimie et sa R&D dans l'industrie nucléaire par François Drain	127
Chapitre 9 : Réseaux de transport d'électricité et transition énergétique par Sébastien Henry	139
 Partie 3 Les techniques en émergence pour l'avenir	
Chapitre 10 : Les matériaux stratégiques pour l'énergie par Bruno Goffé	165
Chapitre 11 : La chimie pour la séparation et la gestion des déchets nucléaires par Bernard Boullis	191
Chapitre 12 : La biomasse, matière première renouvelable d'avenir d'après la conférence de Jean-François Rous	211
Chapitre 13 : Stockage de l'électricité : élément clé pour le déploiement des énergies renouvelables et du véhicule électrique par Marion Perrin	233
Chapitre 14 : CO₂ et microalgues, pour une chimie renouvelable par Claude Gudin	253
Chapitre 15 : 2050 : une chimie verte dans une France sans fossiles... ou presque par François Loos	265

Avant-propos

Pour mieux vivre – et même tout simplement pour vivre –, les hommes se sont entourés d'objets (des vêtements, des outils, des machines de toutes sortes, aujourd'hui d'outils de communication). Ces objets sont fabriqués à partir de matière brute (terre, bois, métaux) qu'il faut transformer au moyen de procédés qui utilisent d'autres objets... C'est une façon de dire que la chimie, qui est justement la science (et la technologie) de la transformation de la matière et de sa mise en œuvre, est omniprésente dans nos existences.

Malheureusement, cette simple vérité n'entraîne pas que la chimie soit directement perçue par les utilisateurs – tout heureux d'utiliser les objets sans se poser de questions sur leurs origines. La connaissance, ou même parfois la simple reconnaissance, de cette science se heurte à des difficultés tant chez les élèves que chez les citoyens. Car il faut travailler pour trouver la chimie derrière les objets et ne pas se contenter de la surface des choses. *C'est pourtant de nos*

progrès ou de nos retards en chimie que viendra le plus ou moins heureux développement de nos activités au cours des années ou des générations futures.

Pour réagir devant ces difficultés et ces impératifs, la Fondation de la Maison de la Chimie a déjà publié, depuis 2008, sept ouvrages sur des domaines importants pour nos sociétés. Ce sont : *La chimie et la mer*, *La chimie et la santé*, *La chimie et l'art*, *La chimie et l'alimentation*, *La chimie et le sport*, *La chimie et l'habitat*, *La chimie et la nature*. Issus de colloques organisés pour un large public, ils sont rédigés et proposés en librairie dans des conditions étudiées pour en favoriser la diffusion ; ils sont particulièrement conseillés aux élèves de lycées et aux étudiants des premiers cycles du supérieur auxquels ils apporteront l'accrochage entre les enseignements théoriques et les utilisations pratiques actuelles ou prospectives.

Le présent ouvrage, le huitième donc, est titré *Chimie et enjeux énergétiques*. Il traite, on le voit, d'une question

critique dont chaque citoyen sent bien qu'elle le concerne : l'énergie nous est indispensable, mais les ressources que nous utilisons aujourd'hui vont se tarir... Après une présentation d'ensemble du problème dans une première partie, « Les leviers d'action pour notre futur énergétique », une deuxième partie « Optimiser nos pratiques actuelles en matière d'énergie » montre comment, à relativement court terme, la recherche conduite par les principaux acteurs de la politique énergétique française ou stimulée par eux peut permettre d'éviter des ruptures ou des révisions douloureuses des modes de vie. Il s'agit de mieux connaître et comprendre nos pratiques et nos comportements, de creuser les idées des laboratoires sur l'amélioration de nos techniques actuelles – pour la production et la distribution de l'électricité par exemple. Mais l'énergie est une préoccupation de long terme ; elle est partout présente sous différentes formes dans la nature... à nous de la trouver et de l'exploiter de façon durable ! Une troisième partie de l'ouvrage, « Les techniques en émergence pour l'avenir » donne des pistes déjà identifiées par les laboratoires universitaires et industriels : utiliser les ressources naturelles végétales (la biomasse terrestre, les algues) pour développer des procédés permettant de produire ce dont nous avons besoin à moindre coût énergétique ; savoir stocker l'électricité pour mieux

utiliser les ressources intermittentes que constituent le soleil et le vent ; et puis préserver l'environnement par une saine gestion des déchets nucléaires, qui est aujourd'hui à la portée de nos possibilités techniques, et des ressources dont nous n'avons pas encore conscience qu'elles n'ont qu'une disponibilité limitée sur la terre (comme certains métaux rares par exemple).

Le message de cet ouvrage est celui de foi en la recherche ; elle montre un considérable éventail de possibilités pour l'humanité de surmonter les difficultés apparues de façon si aigües dans le domaine de l'énergie ; elle saura transformer ces possibilités en réalités concrètes et montrer qu'il n'y a pas place pour le pessimisme ou le découragement. Les auteurs des chapitres du livre, qui ont présenté leurs réflexions au cours d'un colloque le 14 novembre 2012, sont tous des praticiens, scientifiques ou ingénieurs de l'industrie. Ceci garantit le côté concret et réaliste des contenus que tous les lecteurs apprécieront. En filigrane, ce message est aussi un appel à renforcer la culture scientifique et en l'occurrence la juste appréciation du rôle de la chimie qui est sollicitée par un bon nombre des projets ou des idées qui doivent permettre l'émergence d'un heureux futur et qui sont abordés dans cet ouvrage.

Danièle Olivier et Paul Rigny,
*Fondation internationale de la
Maison de la Chimie*

Préface

La « chimie et la transition énergétique » est un sujet de grande actualité, non seulement à l'échelle nationale, mais plus encore à l'échelle européenne et à l'échelle mondiale. Pour s'en convaincre, il suffit d'avoir en tête que nous, l'ensemble des 7 milliards d'habitants de la planète, nous consommons actuellement quelque 13 milliards de tonnes d'équivalent pétrole par an, c'est-à-dire, pour chacun d'entre nous en moyenne environ 1,9 tep/an, c'est-à-dire plus de 5 l d'équivalent pétrole par jour, avec des écarts considérables qui vont de plus de 22 l pour nos amis canadiens ou américains à moins de 0,2 l pour nos amis éthiopiens ou bengalis. Et qu'au milieu de ce siècle en 2050, nous serons 9 milliards et qu'avec une consommation pour tous au moins équivalente à 2,5 tonnes d'équivalent pétrole, c'est-à-dire environ la moitié de ce que nous consommons en France en moyenne actuellement, ce seront 23 milliards de tonnes d'équivalent pétrole qu'il nous faudra trouver, soit +75 % par rapport à maintenant, et cela au prix de gros efforts d'éco-

nomie d'énergie et d'efficacité énergétique accrue dans les pays développés. Et dans un contexte où ce qui assure aujourd'hui plus de 82 % de la consommation primaire d'énergie, à savoir les ressources fossiles, simple stockage temporaire de l'énergie solaire, via la photosynthèse végétale, ne peuvent que se raréfier et se renchérir, et alors qu'il nous faut de toute façon en réduire drastiquement la consommation massive pour éviter un inéluctable changement climatique, sans parler des impacts environnementaux et sanitaires tout aussi préoccupants. Comme vous le voyez, les défis sont considérables et il est important que chacun ait accès aux informations nécessaires à un débat éclairé et serein. En favorisant leur diffusion, la Fondation de la Maison de la Chimie est pleinement dans ses missions.

En effet, depuis sa création en 1934, il y a donc 78 ans, l'une des missions principales de la Fondation est de « travailler à l'expansion et au développement de la Science Chimique » et à « sa promo-

tion ainsi que celle de toutes ses applications » en facilitant les rencontres entre les savants, les ingénieurs, les entrepreneurs et l'ensemble de nos concitoyens pour permettre une meilleure compréhension mutuelle des enjeux dont chacun est porteur. Dans ce cadre, nous avons particulièrement intensifié nos efforts pour :

- faire prendre conscience à un large public non spécialiste de l'apport de la chimie dans sa vie quotidienne ;
- préparer l'avenir en encourageant les jeunes à s'orienter vers l'industrie et la recherche, et contribuer ainsi au développement d'une industrie chimique innovante et compétitive.

La série des colloques « Chimie et... » et des ouvrages qui en sont issus (dont celui-ci est le huitième) répond à ces objectifs.

Les thèmes transdisciplinaires choisis ont toujours une grande importance sociale, économique ou culturelle, et correspondent à la volonté de mettre la science au service des hommes et de l'amélioration de leur qualité de vie.

Ils réunissent des conférenciers choisis parmi les meilleurs spécialistes des organismes de recherche publique et de l'industrie dans les domaines concernés, non seulement pour faire le point sur les apports présents ou prévisibles de la chimie sur les plans scientifique et sociétal, mais aussi pour répondre,

en toute transparence et franchise, et avec toute la rigueur nécessaire, aux interrogations et parfois aux inquiétudes que suscitent les sciences de la chimie.

Tous ces experts acceptent de se plier au difficile exercice de rendre leur intervention accessible à tous les publics et je les en remercie chaleureusement.

Dans le contexte actuel, les enjeux énergétiques sont au cœur de défis économiques, sociaux et scientifiques, et vous verrez dans cet ouvrage que les chimistes y apportent leur concours à tous les niveaux et devront sans doute le faire plus encore dans un proche avenir.

Je me réjouis que tous, notamment les plus jeunes, qui vont devoir façonner un avenir énergétique nouveau demain, puissent, à travers cet ouvrage, connaître l'opinion des principaux acteurs de la politique énergétique française sur les leviers d'action pour notre futur énergétique, qu'ils soient scientifiques, politiques, économiques ou sociétaux.

Je vous en souhaite la meilleure lecture.

Bernard Bigot

**Président de la Fondation internationale de La Maison de la Chimie
Administrateur Général du CEA**

Partie 1

Les leviers d'action pour notre futur énergétique

Vj ku'r ci g'kpvgpvkpcm{ 'ighv'ditpm

La chimie pour réussir la transition énergétique

Un journal présentait cette semaine la prévision d'économistes selon lesquels, en 2030, l'Europe payera son énergie 50 % plus cher que les États-Unis. Ceci est annonciateur de changements considérables pour tous les Européens, en particulier pour ceux que l'industrie chimique intéresse, puisque celle-ci se trouvera en situation pour le moins délicate. Cette actualité est simplement l'illustration de ce que nous savons tous : le problème de l'énergie est l'un des plus importants auxquels nous sommes confrontés. Il est important de faire connaître les solutions que la chimie peut proposer, et même de faire comprendre que la chimie est incontournable, quelles que soient les solutions à l'approvisionnement en énergie qui soient mises en avant par nos sociétés. Cet ouvrage explicite cette réalité en développant plusieurs aspects des évolu-

tions à prévoir et le rôle de la chimie sur la mise en œuvre des politiques énergétiques.

On pourrait faire remonter la maîtrise de la première source d'énergie par l'homme aux temps immémoriaux de la maîtrise du feu, il y a environ 400 000 ans (dans une grotte de Chine, dit-on). Mais des sources non polluantes étaient bien sûr largement utilisées : l'énergie hydraulique avec les norias qui petit à petit se sont imposés, les moulins à vent et, peut-être avant tout, la force des animaux et celle des hommes (*Figure 1*). Mais le monde tournait, il n'y avait que peu de dépenses énergétiques, peu de pollution et on ne souffrait pas des changements climatiques, sans doute dus aux activités humaines, qui peuvent nous affliger aujourd'hui.

La presque totalité de l'énergie disponible sur Terre provient du soleil (*Figure 2A*). Le charbon, le pétrole, le gaz naturel... tout cela vient du soleil puisque



Figure 1

L'énergie à travers les âges.

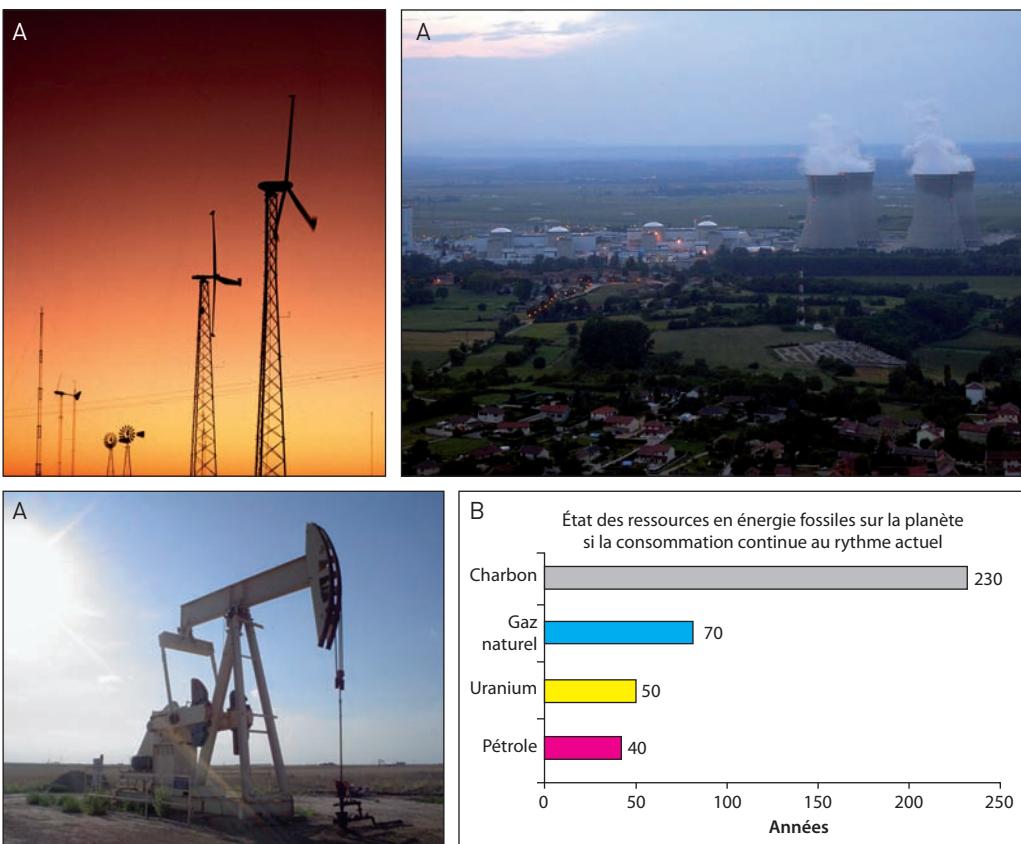


Figure 2

- A.** Presque toutes les sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil.
- B.** Disponibilité des ressources en énergie si la consommation continue au rythme actuel.

produit de l'évolution de végétaux des ères anciennes... Le vent lui-même, phénomène météorologique, vient aussi indirectement du soleil ainsi que les rivières qui fournissent l'énergie hydraulique. La géologie, d'un autre côté, issue des bouleversements cosmologiques primordiaux, est à l'origine de l'énergie nucléaire puisqu'elle fournit l'uranium et bien sûr la géothermie. Un détail aujourd'hui, mais puisque les marées apportent également une certaine énergie exploitable, il faut reconnaître un certain rôle à la lune.

La **Figure 2B**, qui illustre la disponibilité des sources primaires d'énergie que nous utilisons, attire de façon criante l'attention sur le cas particulier du charbon : avant la fin du siècle, il resterait la seule ressource disponible, les autres ressources fossiles ou le nucléaire s'étant taris. L'industrie chimique pourra peut-être s'en accommoder – après tout, la synthèse organique a commencé avec le charbon comme matière première – mais un pays comme la France sans source d'énergie nationale devra vivre tout autrement.

Deux remarques pour tenter d'atténuer le pessimisme sur le nucléaire et la disponibilité des ressources en uranium. Rappelons d'abord, pour titiller aimablement certains écologistes, que, l'énergie nucléaire est un phénomène naturel ! En effet, il y a environ deux milliards d'années, une centrale nucléaire naturelle s'est mise en fonctionnement. À l'époque, la concentration de l'uranium naturel en isotope 235 était analogue à celle que nous réalisons aujourd'hui par l'enri-

chissement de l'uranium pour exploiter la fission nucléaire. De plus, les conditions hydrologiques idéales pour réaliser le ralentissement des neutrons, indispensable à l'établissement des réactions en chaîne, prévalaient autour des sites géologiques uranifères du Gabon : pendant un million d'années une « centrale nucléaire naturelle » a ainsi fonctionné, d'une puissance de quelques dizaines de kW.

Par ailleurs, on peut verser au dossier de la disponibilité de l'uranium les études sur la présence de cet élément dans l'eau de mer (**Figure 3**). Il n'y est qu'en concentration très faible (3,3 µg/L), et l'extraire semble un défi très difficile à relever. Des techniques utilisant des polymères fibreux ont permis d'extraire environ 3,5 g d'uranium par kilo de polymères, mais les coûts à grande échelle seraient prohibitifs. Dommage car il s'agit de plusieurs milliards de tonnes au total... une ressource qui durerait très très très longtemps !

Dans cette introduction, on ne peut pas éviter la question du pétrole. Certes, déjà en 1974 au moment du « choc pétrolier », on nous disait que la réserve mondiale était de 40 ans, et 40 ans après on nous dit toujours la même chose. Mais cela ne veut pas dire que les choses ne changent pas : aujourd'hui, il faut exploiter un pétrole off-shore et très profond ou des bruts lourds extrêmement visqueux (**Figure 4**). La chimie hérite d'une responsabilité majeure pour traiter ces différents bruts et en permettre l'exploitation.

La situation s'apprécie à l'aide du concept de *peak oil*. La **Figure 5** montre que

Figure 3

- A.** Mine d'uranium.
- B.** L'eau de mer en un clin d'œil.

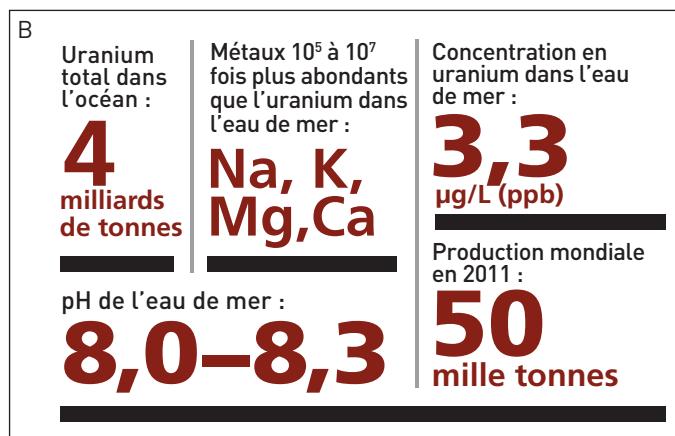
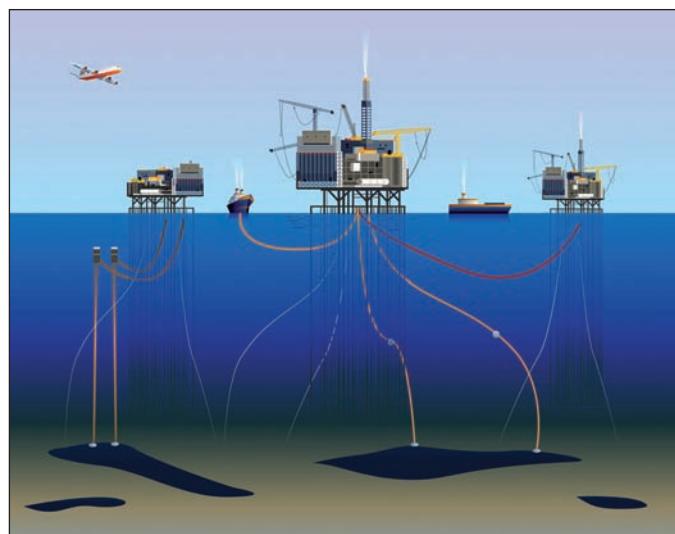


Figure 4

- Exploitation off-shore et pétrole visqueux.*



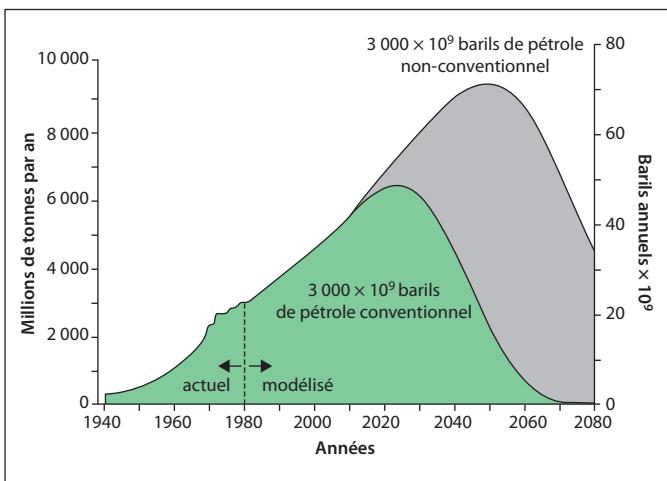


Figure 5

Production de pétrole de 1940 à 2080 (prévisions). L'exploitation de sources non conventionnelles permet de déplacer le peak oil d'une vingtaine d'années.

Source : Odell, 1998

ce point critique serait déjà atteint sans les ressources non conventionnelles qui fournissent du pétrole lourd. Ceci se fait au prix de tours de force industriels, comme illustré par une exploitation pétrolière extraordinaire située au large de l'Angola. Le pétrole s'y trouve à 1 000 mètres en dessous de la mer puis 1 200 mètres dans la terre ; c'est à 2 200 mètres qu'il faut descendre ! Cette exploitation comporte l'inroyable longueur de tuyaux de 57 km. Pourquoi ? Et bien parce que toute les techniques de la récupération assistée y sont mises en œuvre. C'est évidemment un exploit chimique que d'avoir pu concevoir et réaliser des tuyaux (matériaux) capables de résister à de telles conditions de fonctionnement : contraintes mécaniques, corrosion par le pétrole, températures élevées. Mais la chimie d'aujourd'hui sait relever de tels défis.

Il y a évidemment lieu, compte tenu du débat en cours actuel-

lement, de mentionner les gaz de schistes ou plus particulièrement les huiles (ou pétrole) de schiste. La Figure 6A montre le principe d'une installation de récupération de ce pétrole de schiste. On fait un « forage horizontal », technique remarquable qui a commencé à être mise au point en 1774. Il est nécessaire de pénétrer profondément dans les sous-sols, et pour cela de se livrer à de la fracturation c'est-à-dire d'injecter des produits chimiques et de provoquer des micro-ruptures pour que le gaz et le liquide puissent être récupérés. Les problèmes associés à cette technique sont nombreux : utilisation d'eau, parce qu'il en faut des quantités considérables, pollution de l'eau par les produits utilisés, pollution de cette eau par le gaz susceptible de monter à travers les fissures et d'envahir la nappe phréatique : on prétend que lorsque vous ouvrez votre robinet et allumez une allumette, l'eau peut s'enflammer (Figure 6B).

Vj ku'r ci g'kpvgpvkpcm{ 'ighv'ditpm