



HAL
open science

Géologie et énergie

Jacques Varet

► **To cite this version:**

| Jacques Varet. Géologie et énergie. Géosciences, 2013, 16, pp.8-15. hal-01060500

HAL Id: hal-01060500

<https://brgm.hal.science/hal-01060500>

Submitted on 3 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Géologie et énergie

Bien que les avancées technologiques permettent d'exploiter des ressources en énergies fossiles toujours plus difficiles d'accès, celles-ci n'en demeurent pas moins épuisables : la société devra recourir à court terme aux énergies renouvelables et décarbonées. Les géosciences joueront un rôle majeur dans la « transition énergétique ». Elles seront à nouveau convoquées pour la recherche de nouveaux gisements, pour le développement des ressources géothermiques et pour mettre en œuvre des procédés innovants d'utilisation du sous-sol, comme les solutions de stockage.



Jacques Varet

BRGM
j.varet@brgm.fr

▲
Lagon Bleu, Islande. Ce site de balnéothérapie et récréatif a été développé à partir des eaux de rejet de la centrale géothermique thermoélectrique voisine.

Blue Lagoon, Iceland. This balneotherapy and recreational site was developed from waste waters from the nearby geothermal thermoelectric plant.

© J. Varet

En partant de la structure de la Terre, de ses enveloppes gazeuse, liquide et solide, puis de son évolution géologique (notamment géodynamique), nous resituerons les diverses catégories de ressources énergétiques dans leur cadre physique d'origine. Cela permettra de distinguer les sources « externes » (non géologiques), essentiellement le solaire, l'éolien et l'énergie des mers, des autres ressources géologiques. Dans l'intervalle, on évoquera l'hydraulique qui, bien que ressource externe, n'est pas sans rapport avec la géologie : perméabilité des terrains, construction de barrages, impact du changement climatique... Parmi les ressources énergétiques à proprement parler géologiques, nous distinguerons les catégories suivantes :

- les énergies fossiles diverses (exogènes) ;
- les substances minières endogènes (U, Th, H, C, méthane...) ;
- la géothermie ;
- l'espace souterrain pour l'énergie (stockages divers).

On les classera alors en terme de durabilité : celles qui disparaissent par combustion, qui polluent (air, déchets), et celles qui sont recyclables, voire renouvelables. On montrera que les fossiles ne sont en rien durables, que les substances minières endogènes le sont davantage (réutilisation possible, pas de limite en profondeur pour les gisements...), voire localement renouvelables (H, C, CH₄ volcaniques). Puis on reprendra les grands

types de géothermie, leur répartition spatiale, pour conclure sur leurs perspectives dans le bilan des renouvelables.

On tentera enfin de traiter de la contribution possible de la géologie pour le traitement des énergies non durables, ou potentiellement catastrophiques, comme les hydrates de méthane et leurs effets climatiques, et de la nécessité de les connaître, voire de les exploiter par mesure de prévention ou de précaution... On placera là les questions de stockage (énergie, CO2, déchets nucléaires...), questions clés pour le développement des renouvelables, souvent intermittentes.

Rappels sur la structure de la planète et les ressources énergétiques qui en découlent

La planète Terre présente la caractéristique – unique semble-t-il, au moins dans le système solaire – d’être constituée d’« enveloppes » concentriques solides, liquides et gazeuses, toutes mobiles et interagissant les unes avec les autres, que nous avons décrites en détail

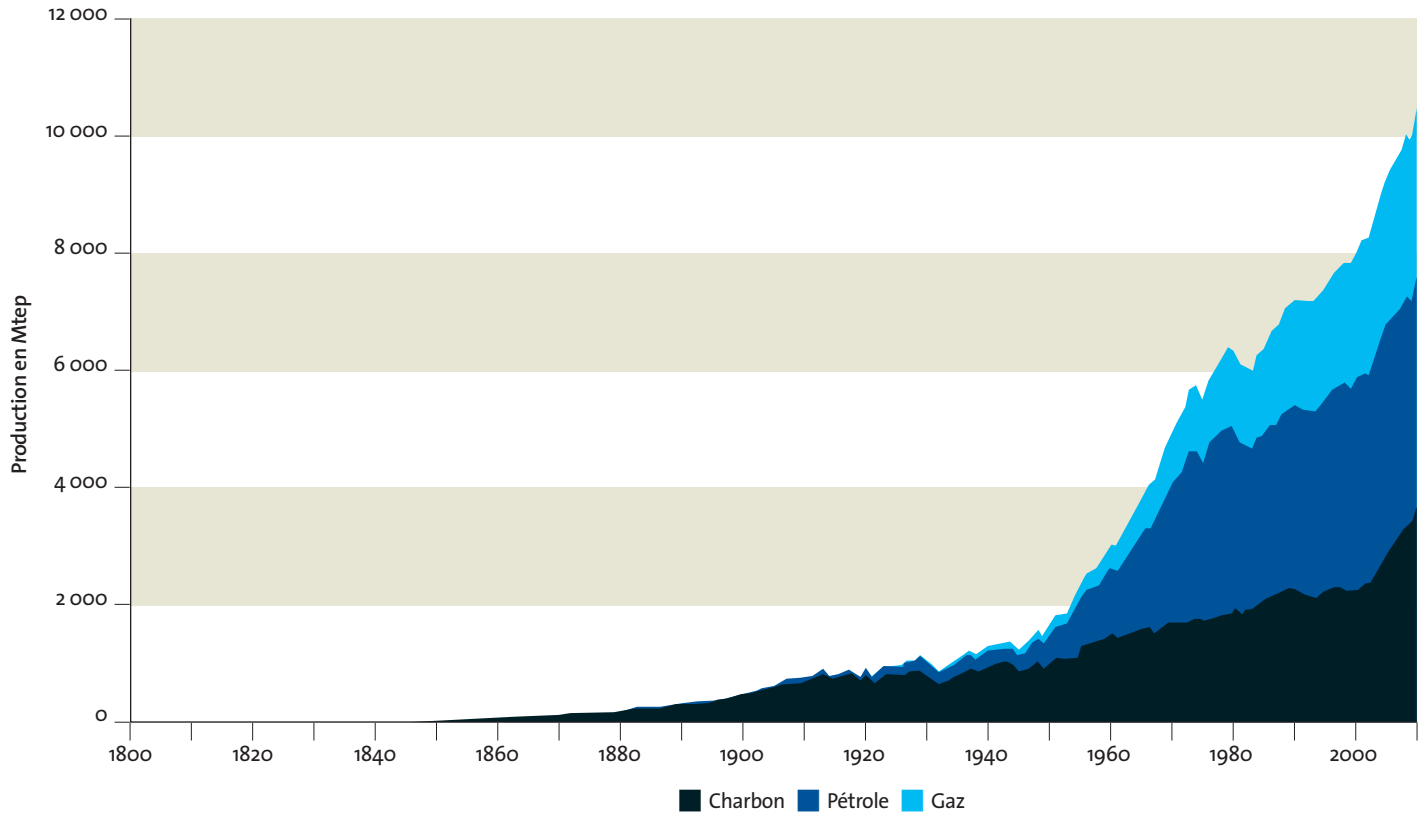
dans *Pour une Terre durable*, collection *Les Enjeux des Géosciences*, 2^e édition (BRGM, 2005).

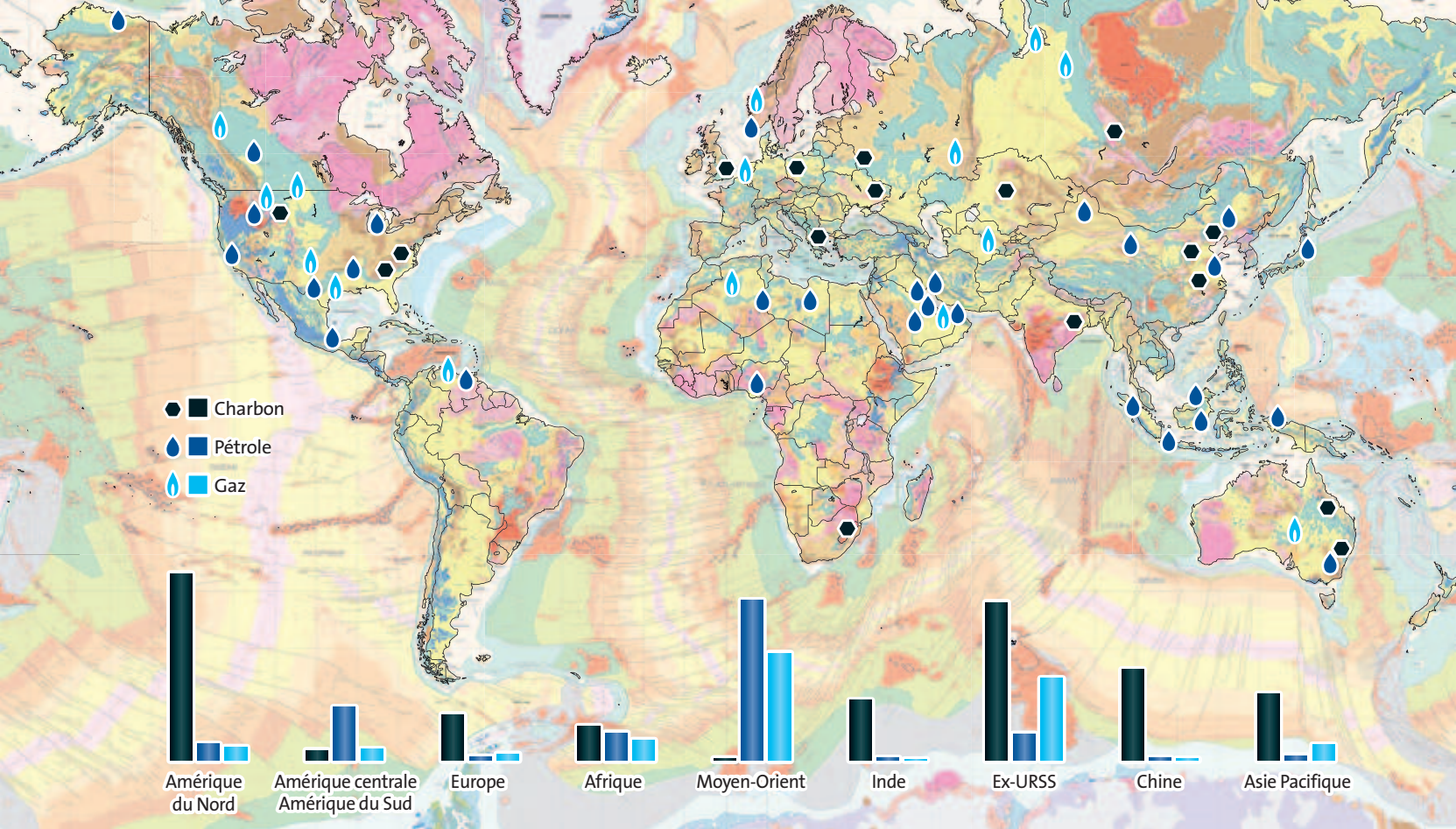
Pendant les premiers millions d’années de son existence, l’homme a essentiellement utilisé les énergies offertes par ces milieux : biomasse, traction animale... Les ressources du sous-sol (tourbe, lignite, charbon, puis pétrole et gaz naturel) ont ensuite apporté, notamment depuis les deux derniers siècles, les contributions déterminantes à un développement de tous les secteurs de l’économie et à une croissance démographique sans précédent (*figure 1*).

Néanmoins, si l’on considère les diverses sources d’énergie naturelle actuellement disponibles et qu’on les compare aux besoins énergétiques de l’humanité, force est de constater que d’autres équilibres énergétiques sont possibles, par un recours accru aux énergies de flux de nature renouvelable et durable : solaire, éolien, hydraulique, énergie des mers et biomasse. Ce qui est heureux dans la mesure où, jusqu’ici, la croissance démographique est allée de pair avec celle de l’usage des énergies fossiles.

Fig.1 : Production globale d’énergie fossile depuis 1800 jusqu’en 2010.

D’après Höök et al., 2012.
Fig. 1: Global production of fossil energy from 1800 to 2010.
Adapted from Höök et al., 2012.





« Après avoir exploité les roches réservoirs des combustibles fossiles, les recherches s'orientent aujourd'hui vers les roches-mères. »

Les énergies fossiles, leurs succès actuels et leurs limites « des deux bouts »

Les énergies fossiles résultent de l'accumulation de la biomasse au sein de formations géologiques. Elles se trouvent donc essentiellement dans les bassins sédimentaires (figure 2) et peuvent se situer dans les dépôts eux-mêmes, directement fossilisés (c'est le cas du charbon ou des lignites), ou dans d'autres formations perméables sus-jacentes vers lesquelles les hydrocarbures fluides (liquides et/ou gazeux) ont pu migrer (figure 3). Après avoir exploité ces roches réservoirs par forages, les recherches s'orientent aujourd'hui vers les roches mères, avec les débats que l'on sait concernant les risques liés à ces exploitations qui nécessitent la fracturation de la roche peu perméable contenant les hydrocarbures. Les hydrates de méthane appartiennent aussi à la catégorie des ressources fossiles non exploitées actuellement, mais dont il convient de se soucier du fait du risque climatique qu'induirait leur libération en cas de dégel du permafrost [Bard (2006)].

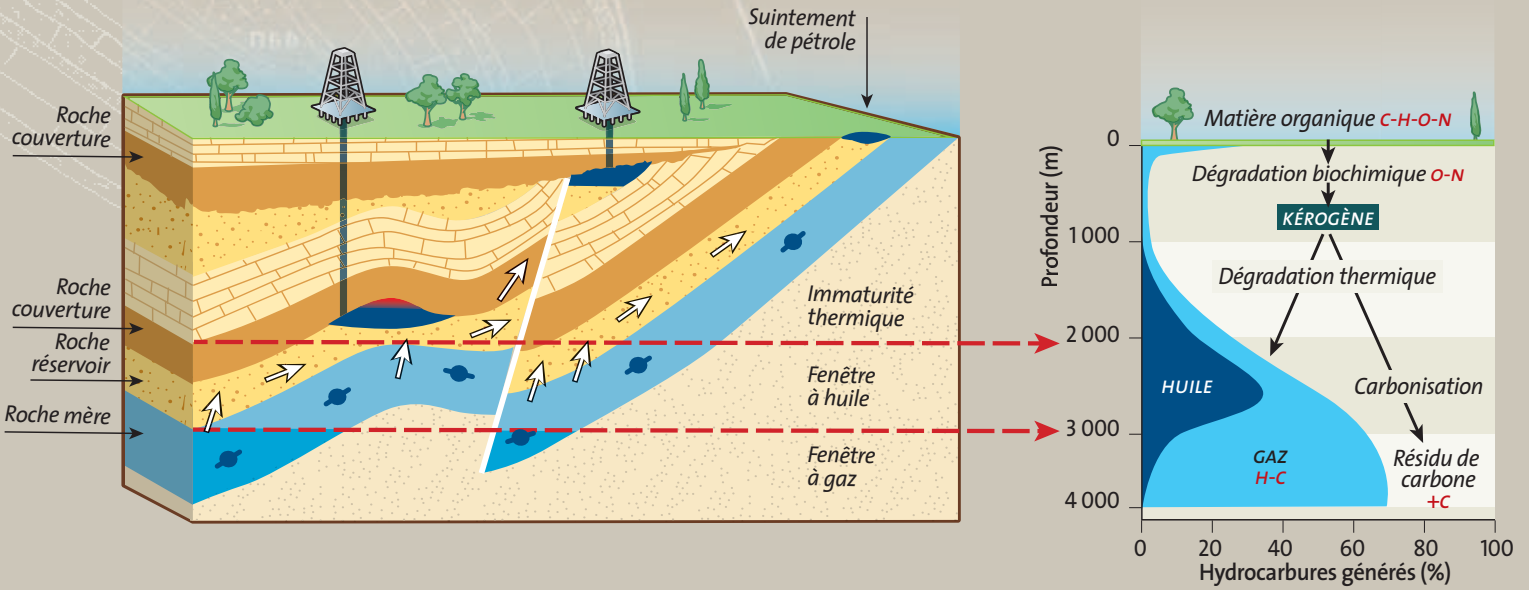
Les énergies fossiles occupent toujours – malgré les politiques de maîtrise de l'énergie, de développement des énergies renouvelables et l'effort considérable mis sur l'énergie nucléaire ces quarante dernières années – une place largement prédominante dans le bilan énergétique de la planète (figure 1). Globalement, même si leur proportion décroît, elles n'ont cessé de croître en quantité totale produite (figure 4). Il ne fait pas de doute que le développement des pays de l'OCDE depuis la seconde guerre mondiale, notamment pendant les « trente glorieuses », découle très directement de cette énergie devenue abondante et bon marché. Les avertissements visionnaires du « club de Rome » et les chocs pétroliers des années 1970 ont entraîné la mise en place de politiques publiques souvent volontaristes, mais celles-ci ont pour l'essentiel été abandonnées dès le premier « contre-choc » de 1986. Seuls quelques pays ont continué à investir dans d'autres domaines d'énergie au cours des vingt années suivantes : notamment les Scandinaves dans les énergies renouvelables et les Français dans l'énergie nucléaire.

Dès 1992 pourtant, le sommet de la Terre à Rio de Janeiro a été l'occasion, en reprenant les conclusions du premier rapport du GIEC, d'une prise de conscience des chefs d'États et des organisations internationales concernant les limites à imposer aux émissions de gaz à effet de serre (GES) issus pour l'essentiel de la combustion des énergies fossiles (tableau 1). La convention Climat, puis le protocole de Kyoto, offrirent l'occasion de mettre

▲ Fig. 2 : Carte des principales ressources en énergies fossiles de la planète.

Fig. 2: Map of the planet's main fossil energy resources.

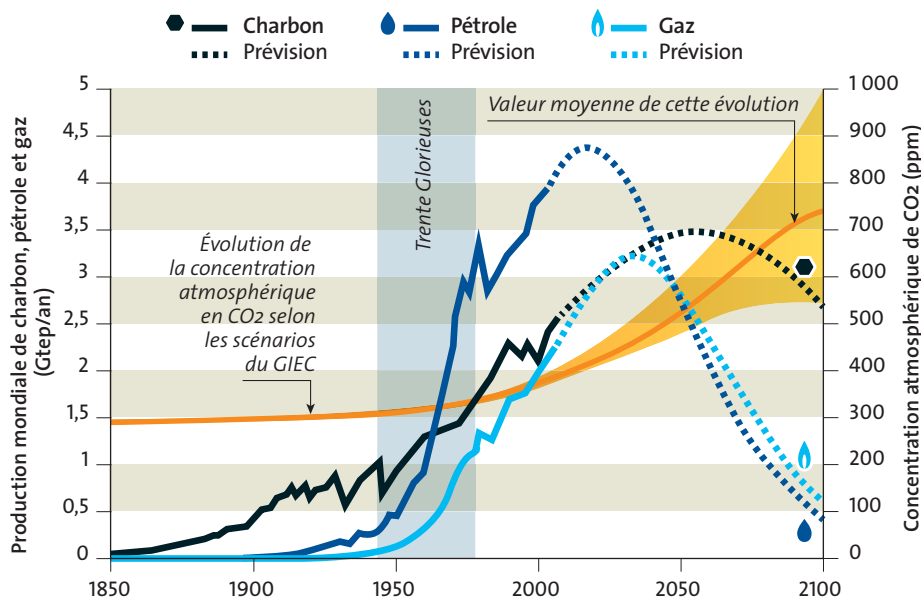
© BRGM



▲ Fig. 3 : Coupe géologique schématique présentant les réservoirs conventionnels de pétrole et de gaz issus des roches mères sous-jacentes aujourd'hui visées également pour la production d'énergie fossile. Selon la température atteinte par la couche de roche-mère (qui dépend essentiellement de la profondeur de l'enfouissement), les hydrocarbures produits pourront être essentiellement liquides (pétrole) ou gazeux.

Fig. 3: Schematic geological section depicting the conventional reservoirs of oil and gas from the underlying bedrock which today are targeted for fossil energy production. Depending on the temperature prevailing in the bedrock layer (determined essentially by the depth at which it is buried), the hydrocarbons produced could be essentially liquid (oil) or gaseous.

© D'après IFP Energies Nouvelles, France – Université de Laval, Canada.



▲ Fig. 4 : Schéma illustrant le bilan du carbone fossile dans la période 1850-2100. On observe les pics successifs de production des énergies fossiles : pétrole (bleu foncé), gaz naturel (bleu clair) puis charbon (noir), et la croissance des émissions de CO₂ résultant de leur combustion dans l'enveloppe (en jaune) des divers scénarios du GIEC.

Fig. 4: Graph illustrating the total amount of fossil carbon over the period 1850-2100. We note the successive production peaks for fossil fuel productions: oil (dark blue), natural gas (light blue), and coal (black), then, in the yellow envelope, the increase in CO₂ emissions from their combustion following various IPCC scenarios.

Source : J. Varet/Futuribles, 2005.

▲ Tableau.1 : Les réserves en énergie fossiles de la planète, leur contenu énergétique et les émissions de GES résultant de leurs combustions respectives.

Table 1: The planet's fossil energy reserves, their energy content and the GHG resulting from their respective combustion.

Source: BP Statistical Review of World Energy, 2010.

	Mt	Tcf	Gbep	Facteur de conversion	CO ₂ (Mt C)	CO ₂ (Mt)	CO ₂ (Mt/Gbep)
Charbon	860 938		3 300	0,7326	630 700	2 315 000	700
Gaz		6 609	1 172	14,56	96 200	353 200	300
Pétrole			1 383	106,1	146 700	538 500	390

Dès 1992, le sommet de la Terre à Rio de Janeiro a été l'occasion d'une prise de conscience des chefs d'États et des organisations internationales.

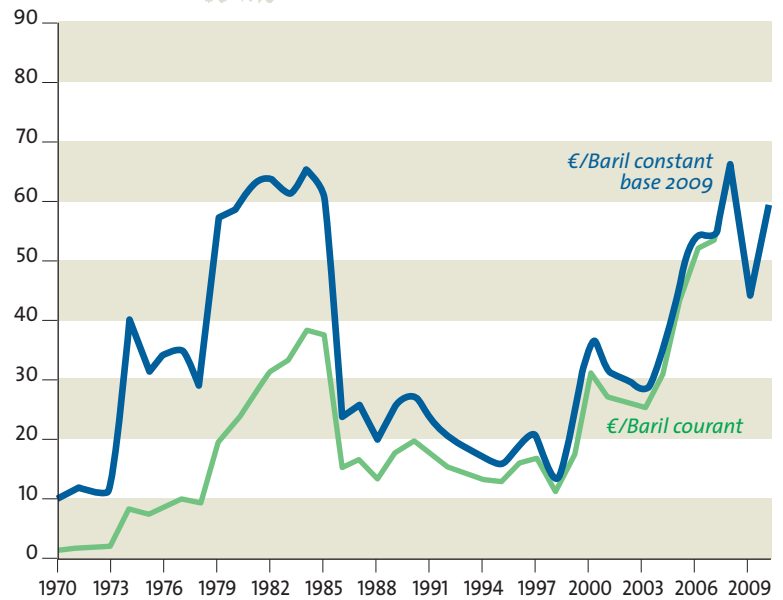
en place une nouvelle forme de solidarité planétaire, selon laquelle les pays les plus émetteurs s'engageaient dans une politique de réduction permettant aux pays émergents et en développement de bénéficier d'une croissance tout en plafonnant les émissions globales (voir aussi article de D. Houssin en introduction scientifique, ce numéro). Mais la mise en œuvre concrète de ces mesures a été battue en brèche par les intérêts nationaux de quelques pays clés, notamment les États-Unis, les états du Golfe et la Russie.

Dans le même temps, les géologues de l'ASPO⁽¹⁾ rappelaient qu'en tout état de cause les ressources fossiles étaient limitées et que les « pics » de production de pétrole, puis de gaz, puis de charbon seraient successivement atteints dans la même période (2020-2050 ; figure 4). Et, de fait, la production mondiale ne répondant plus à la demande croissante des pays émergents (la Chine notamment), le constat de la rareté a été progressivement reconnu par les producteurs eux-mêmes. La croissance des prix des énergies fossiles qui en résulte est venue jouer le rôle régulateur que les politiques publiques climatiques ne parvenaient pas à mettre en œuvre (figure 5).

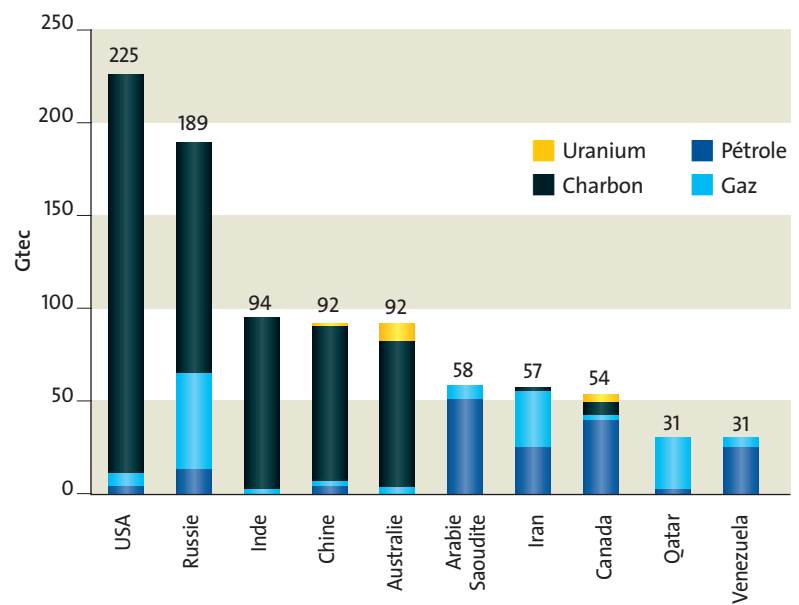
Ainsi, les énergies fossiles sont « coincées aux deux bouts ». Qu'il s'agisse de la production initiale ou des émissions finales, elles devront inéluctablement faire place aux énergies renouvelables. La géologie présentant des disparités considérables, l'Europe, du fait de la faiblesse de ses propres ressources fossiles, se retrouve à viser une position de leader dans cette recherche d'énergies alternatives. (figure 6).

(1) Association for the study of Peak Oil&Gas. <http://aspofrance.org/>

La croissance des prix des énergies fossiles est venue jouer le rôle régulateur que les politiques publiques climatiques ne parvenaient pas à mettre en œuvre.



▲ Fig. 5 : Évolution des cours du pétrole en euros par baril, prix constants et courants base 2009.
 Fig. 5: Evolution of oil prices in euros per barrel, constant prices and current, base 2009.
 Source : UFIP, 2012.



▲ Fig. 6 : La grande dépendance énergétique de l'Europe s'observe sur ce diagramme figurant, par importance décroissante, les réserves en pétrole, en gaz naturel, en charbon et en uranium des dix premiers pays producteurs de la planète. Toutes énergies ramenées en équivalent gigatonne de charbon.
 Fig. 6: Europe's massive energy dependence is seen on this diagram, depicted, by decreasing order of importance, oil, natural gas, coal and uranium reserves for the planet's ten largest producers. All the energies are expressed in equivalent gigatonne of coal.
 Source : BGR, Allemagne.

Près de 500 géologues en formation

L'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais a pour objectif de former des ingénieurs et des techniciens reconnus et appréciés par les professionnels dans les domaines des Sciences de la Terre et de l'Environnement. Chaque année, LaSalle Beauvais délivre 25 à 30 Techniciens Supérieurs (Bac+3) et 80 Ingénieurs (Bac+5), soit près de 500 jeunes en formation. Ces diplômés présentent des débouchés dans des domaines variés : ressources énergétiques, ressources minérales, eau, environnement, géotechnique et enseignement-recherche.

Le terrain, une marque de fabrique !

L'enseignement repose sur une pédagogie originale avec une grande variété de mises en situation concrètes et d'expérimentations par le groupe avec des stages de terrain, des projets de recherche, des projets d'innovation et d'entrepreneuriat, des projets d'application industrielle, des stages en entreprise. Les apprentissages sur le terrain dépassent 20 semaines d'enseignement dont 14 de cartographie géologique dans des contextes géologiques variés.



Une ouverture aux enjeux industriels

Au-delà des bases scientifiques et techniques, l'enseignement des 3 premières années intègre des disciplines utiles à la résolution des problématiques industrielles comme l'économie, la gestion financière, le droit, la communication mais aussi l'apprentissage de plusieurs langues étrangères. Lors des 2 dernières années, la gestion de projet prend alors en compte les dimensions économiques, environnementales et sociétales, en plus de la faisabilité technique et du suivi managérial.

4 prix à des concours internationaux

Fait remarquable, nos élèves ont participé à 4 concours internationaux réunissant les principaux masters des universités d'Europe, voire du monde. Ils ont été systématiquement primés dans des domaines aussi variés que les nouvelles énergies (3^{ème} à l'Energia Challenge en 2012), la géologie pétrolière (3^{ème} à l'Imperial Borell Award en 2012), la géophysique marine (2^{ème} au SEG Challenge Bowl en 2011) et la géologie minière (1^{er} au travail en équipe au

concours du jeune chercheur à St Pétersbourg en 2010).

Des nouveautés ?

Dernière nouveauté : le dispositif de l'alternance pour la formation des Techniciens supérieurs est opérationnel depuis 2012.

D'autre part, pour être diplômé à partir de 2015, les Ingénieurs devront avoir validé une période de 14 semaines à l'étranger.

Hervé Leyrit Directeur de la Spécialité Géologie



Élèves-ingénieurs LaSalle Beauvais, stage d'acquisition, traitement et interprétation sismique, Villefranche sur Mer

Déposer une offre de stage : stage@lasalle-beauvais.fr

Recruter un collaborateur : emploi@lasalle-beauvais.fr

www.lasalle-beauvais.fr

Les ressources énergétiques minières endogènes

La nature même de l'enveloppe solide de la planète, essentiellement silicatée, recèle elle aussi des ressources énergétiques intéressantes. Il s'agit d'une part des substances radioactives, comme l'uranium, dont les filières de production ont été développées ces dernières années, ou le thorium, plus abondant encore, mais non encore exploité industriellement.

Présent en traces dans la lithosphère continentale, avec une concentration moyenne de 1,7 ppm (et 0,003 mg/l dans l'eau de mer), les teneurs en uranium nécessaires à une bonne rentabilité minière dépassent généralement le gramme par tonne, mais des teneurs aussi basses que 150 à 250 ppm sont néanmoins exploitées. Les besoins dans les années 2020 sont évalués à 80 000 tonnes d'uranium par an, ce qui nécessite la découverte et la mise en exploitation de nouvelles mines, la production actuelle étant de 65 000 tonnes. Au plan géologique, si l'origine de l'uranium est endogène (magmatique et hydrothermale), les meilleurs gisements se trouvent dans les formations sédimentaires détritiques (grès et conglomérats) ou résultent d'altérations supergènes.

Le cycle de la production d'énergie nucléaire se caractérise aussi par la génération de déchets radioactifs à vie longue, pour lesquels à ce jour seule la solution du stockage géologique s'avère possible. Les géosciences sont, ici aussi, convoquées pour une approche impliquant la recherche de sites à très faible perméabilité et le déploiement de technologies adaptées (barrières minérales, réseaux de surveillance...) présentant des garanties de stabilité à très long terme (de l'ordre du million d'années, que seul le géologue peut appréhender, bien entendu avec l'aide des sciences humaines et sociales).

L'activité magmatique et hydrothermale peut aussi faire remonter vers la surface des éléments d'intérêt énergétique, comme le carbone, l'hydrogène ou le méthane. Certains gisements de méthane, notamment sibériens, sont ainsi d'origine endogène ; les zones volcaniques en extension (dorsales océaniques et rifts) peuvent renfermer des sources d'hydrogène, non exploitables à l'heure actuelle, mais vraisemblablement accessibles un jour. Des recherches engagées dans le cadre du programme international de forages profonds continentaux (DSDP) permettent d'ores et déjà d'atteindre les systèmes supercritiques permettant un accès à la production d'hydrogène⁽²⁾.

(2) http://www.icdp-online.org/front_content.php?idcat=709

La géothermie

Le flux géothermique terrestre serait, à lui seul, suffisant – si l'on disposait des moyens pour le capter efficacement – pour répondre aux besoins énergétiques de l'humanité. La géothermie a donc sa place parmi les énergies renouvelables auxquelles on doit faire appel pour remplacer les énergies fossiles émettrices de GES. En comparaison avec les autres énergies de flux provenant des enveloppes plus externes de la planète, elle présente l'avantage d'offrir des capacités naturelles de stockage, du fait des caractéristiques de conductivité thermique et des masses disponibles en sous-sol. Le stock énergétique disponible est immense et dépasse largement les besoins cumulés des générations futures (figure 7).

Mais ici plus qu'ailleurs, la science géologique doit être mise en œuvre avec acuité car, au-delà des valeurs moyennes, les exploitations géothermiques doivent prendre en compte plusieurs éléments permettant d'identifier les gisements économiquement exploitables selon la disponibilité et la maturité des technologies :

- le gradient géothermique, lui-même déterminé par le flux et la conductivité des terrains, qui peut varier de 3 °C par 100 mètres dans les zones stables à des valeurs dix fois supérieures dans les zones géologiques actives ;
- la perméabilité des formations géologiques, dites réservoirs lorsqu'elles permettent une production suffisante du fluide contenu, une fois atteintes par forage. Cette perméabilité peut être soit « de formation » lorsqu'elle découle des propriétés propres de la couche géologique, soit « de fracture » lorsqu'elle résulte d'un contexte tectonique favorable ;

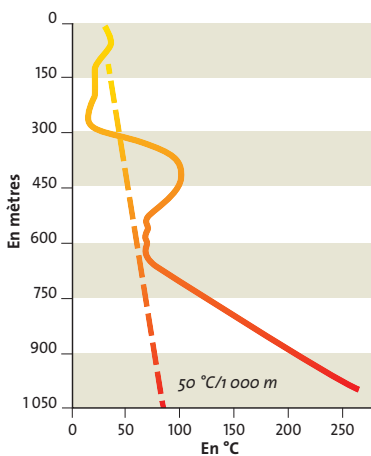
– la qualité même du fluide géothermique, toujours chargé en éléments chimiques divers du fait de l'augmentation de la solubilité des minéraux avec la température, et éventuellement enrichi en gaz hérités des formations traversées ou des apports magmatiques.

Ainsi peut-on distinguer deux grands types de géothermie dont on présente plusieurs exemples détaillés dans ce volume :

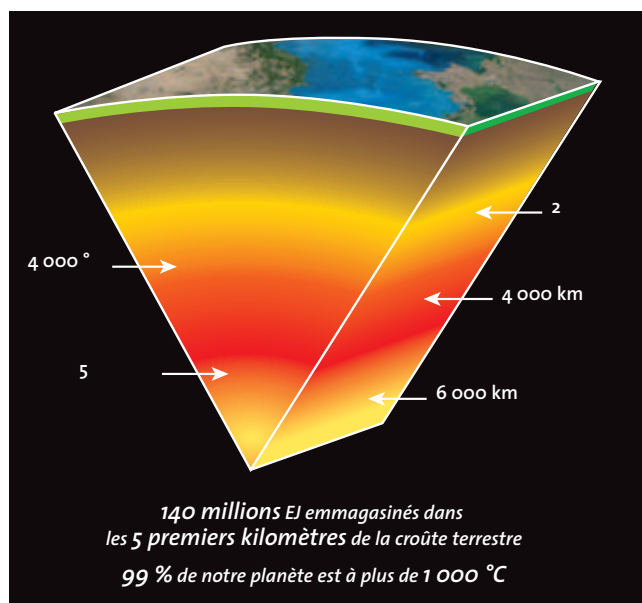
- celle des bassins sédimentaires dans lesquels des aquifères peuvent être identifiés et exploités pour le chauffage, avec ou sans pompes à chaleur, avec une relative certitude du fait de la continuité des formations géologiques ;
- celle des zones tectoniques ou volcaniques actives dans lesquelles une source de chaleur superficielle permet de disposer d'un fluide géothermal à une température suffisante pour produire de l'électricité (figure 8).

Mais il s'agit ici d'une subdivision très schématique, dans la mesure où, d'une part la géologie offre nombre de situations intermédiaires ou différentes permettant la mise en œuvre de systèmes spécifiques (systèmes stimulés par exemple) et, d'autre part, les technologies offrent un panel élargi de solutions (échangeurs directs en sous-sol, utilisation de fluides binaires, utilisation en cascade de l'énergie, par exemple). En tout état de cause, la diversité et la créativité sont des règles en la matière, qu'il s'agisse du versant géoscientifique ou du versant technologique de la discipline.

“
Le flux géothermique terrestre serait, à lui seul, suffisant pour répondre aux besoins énergétiques de l'humanité.”



60 à 100 MW/m² dans les zones stables (soit 60 à 100 kW par km²)
Jusqu'à 10 fois plus dans les zones actives (soit 1 MW ou plus par km²)

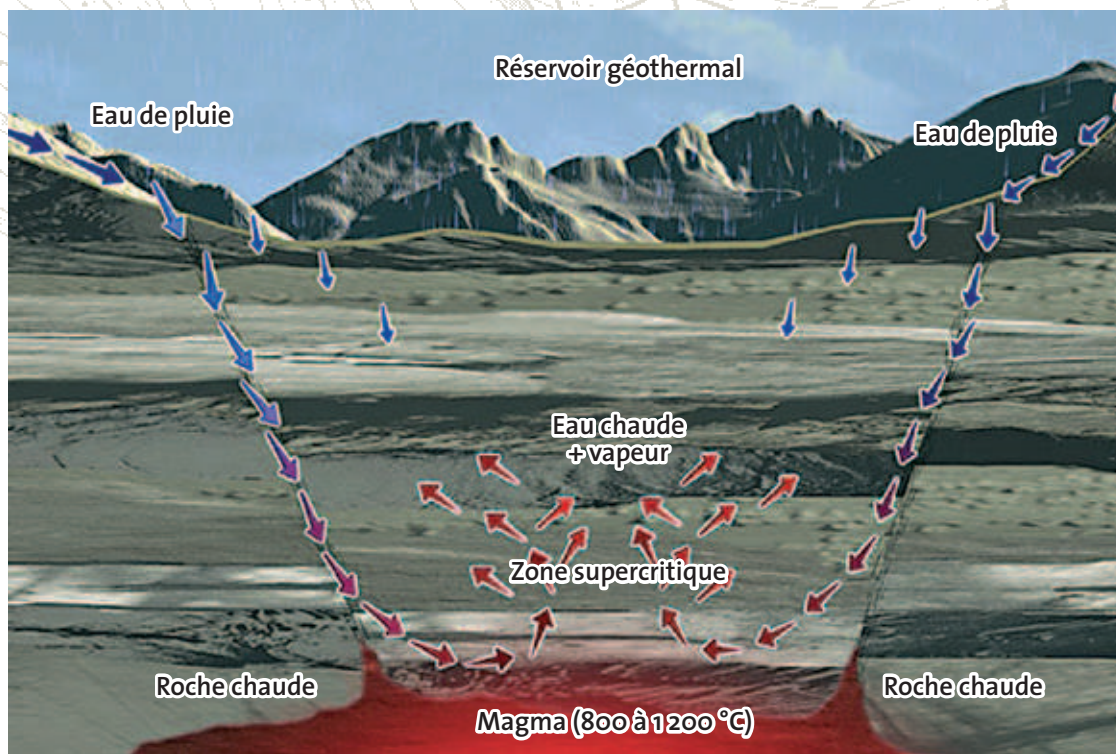


140 millions EJ emmagasinés dans les 5 premiers kilomètres de la croûte terrestre
99 % de notre planète est à plus de 1 000 °C

Fig. 7 : Flux et gradients géothermiques dans les zones stables et les zones géodynamiquement actives de la planète, et énergie emmagasinée dans les cinq premiers kilomètres (accessibles par forage) de la lithosphère.

Fig. 7: Geothermal flow and gradients within the planet's stable zones and its geodynamically active ones and the energy stored within the top 5 kilometers of the lithosphere (accessible via borehole).

© BRGM



▲ Fig. 8 : Coupe schématique d'un gisement géothermique de haute température classique, avec source de chaleur magmatique (800 à 1200 °C à une profondeur de 5 à 10 km), zone supercritique dominée par des fluides salins et chargés en métaux dissous, réservoir géothermique exploitable (température de 150 à 300 °C) et couverture imperméable, avec réalimentation naturelle du gisement par des eaux météoriques et/ou marines.

Fig. 8: Schematic section of a classic high-temperature geothermal deposit, having a magmatic heat source (800 to 1200 °C at a depth of 5 to 10 km), a supercritical zone dominated by saline fluids charged in dissolved metals, an exploitable geothermal reservoir (temperature between 150 and 300 °C) and impermeable cover, with a natural recharge of the deposit by meteoric waters or seawater.

Source : La géothermie, collection Les enjeux des Géosciences, BRGM/Ademe

Le stockage géologique et ses perspectives

Le développement des activités humaines à la surface de la planète aboutit à un certain encombrement de l'espace, notamment dans les mégapoles [Varet J. (2009)] ou les zones industrielles. Mêmes les zones agricoles et les espaces naturels méritent d'être préservés pour leurs fonctions spécifiques. De ce fait, le sous-sol offre des solutions attractives, compte tenu de l'espace disponible à la verticale du lieu concerné et de la diversité de ses caractéristiques géologiques selon la profondeur. Dans le domaine de l'énergie, on est encore loin d'avoir optimisé la gestion de l'espace en 3D. Or, non seulement cet espace peut être dédié à des fonctions spécifiques de stockage d'énergie, de CO₂ [Varet J. (2006)] ou de déchets (nucléaires, par exemple), mais encore il est possible de développer des utilisations combinées (extraction de matière première minérale et stockage, par exemple).

Les choix et formes possibles de stockage d'énergie sont très nombreuses, qu'il s'agisse de gaz (méthane, pratiqué de longue date, air comprimé, hydrogène), de liquide (hydrocarbure, eau chaude ou autre fluide

caloporteur) ou de formes d'énergie cinétique ou thermique. Quelques exemples sont détaillés dans les articles qui suivent, au sein de ce volume.

Ce tour d'horizon permet de dresser un tableau montrant la part essentielle des disciplines géologiques – qu'elles soient fondamentales ou liées à l'ingénierie et aux technologies innovantes – dans la résolution des problèmes posés par la « transition énergétique », pour passer en quelques décennies du « tout fossile » au « tout renouvelable ». Même si les ressources à mobiliser proviendront plus largement des flux issus des « enveloppes externes » de la planète, les sciences de la terre continueront à apporter une contribution déterminante, qu'il s'agisse de la production ou du stockage. En définitive, les métiers des géosciences devront s'engager simultanément sur deux fronts : celui de la découverte de ressources toujours plus profondes et difficiles d'accès, nécessitant des technologies toujours plus sophistiquées, et celui des procédés d'utilisation du sous-sol pour un meilleur usage de l'énergie et au service des énergies renouvelables et décarbonées. Voilà des perspectives mobilisatrices pour la jeunesse, la formation et les entreprises innovantes. ■



Geology and Energy

Ease of access to low-cost energy over recent decades in our self-styled “developed” countries has caused a majority of people to lose sight of the very origin of these resources that have procured such abundance and well-being. Humanity, today, relies essentially on fossil fuels discovered in the sub-surface of planet Earth, mainly in the pre-1980 years, notably thanks to conceptual leaps made possible by newly achieved discoveries of global tectonics, space imagery and applied geophysics. While continual technical advances enable ever-deeper resources to be tapped, climate constraints force us to reconsider the very bases of these delicate balances. They will necessarily need to be revised via improved adaptation of supply to demand, mastering consumption and recourse to sustainable, carbon-free energy sources. Now, while these mobilize resources in the planet's outermost envelopes (solar and wind power, ocean energy, biomass...), the geosciences are once again called into play to devise the very infrastructures for these energy-producing systems, thereby enabling geothermal resources and underground storage solutions to be developed. And this, whether we are ensuring “clean” use of fossil fuels (and notably the most abundant of these, coal) or making available the storage solutions that are an absolute necessity for these renewable energies, essentially intermittent by nature.