HAL open science

Géothermie : source d'indépendance énergétique et de développement durable

Erwan Bourdon, Dominique Tournaye

To cite this version:

Erwan Bourdon, Dominique Tournaye. Géothermie : source d'indépendance énergétique et de développement durable. Géosciences, 2013, 16, pp.16-25. hal-01060515

HAL Id: hal-01060515

https://brgm.hal.science/hal-01060515v1

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.

Déjà présente dans 78 pays, la production d'énergie géothermique (chaleur et électricité confondues) constitue une importante source de développement. Avec plus de 11 GW de capacité installée dans le monde (soit l'équivalent de douze réacteurs nucléaires), la production électrique d'origine géothermique assure déjà entre 10 et 30 % des besoins de six pays, dont les Philippines et le Costa Rica. Les autres applications de la géothermie, dans l'agriculture, l'industrie ou le chauffage urbain, se développent à cadence élevée partout dans le monde.

Géothermie : source d'indépendance énergétique et de développement durable

Erwan Bourdon
CFG Services
e.bourdon@cfg.brgm.fr

Dominique Tournaye
CFG Services
d.tournaye@cfg.brgm.fr

Tête de puits, centrale géothermique de Fang, Thaïlande.
Wellhead, Fang geothermal power plant, Thailand.
© P. Eurin.

Une énergie accessible à tous

Les ressources géothermiques sont virtuellement accessibles partout dans le monde, soit par l'utilisation directe ou indirecte de la chaleur des systèmes de moyenne à haute énergie (> 90 °C), soit par l'utilisation de pompes à chaleur pour les ressources de basse énergie.

Les ressources géothermiques les plus intéressantes, situées dans des réservoirs de moyenne à haute température (> 90 °C) à faible profondeur (< 2-3 km), sont constituées d'eau chaude et/ou de vapeur d'eau et sont présentes sur l'ensemble des continents *(figure 1)*. Elles sont donc une source d'énergie importante pour le développement, notamment dans les pays dépourvus de ressources en énergies fossiles ou dans les zones dépourvues d'infrastructures. Ces ressources de moyenne à haute énergie sont localisées essentiellement dans les zones présentant une activité volcanique et/ou tectonique récente ayant engendré une anomalie géothermique locale ou régionale *(figure 2)*. Tous les pays bordant l'océan Pacifique présentent un fort potentiel : du Chili, à

> *Tous les pays bordant l'océan Pacifique présentent un fort potentiel géothermal.*

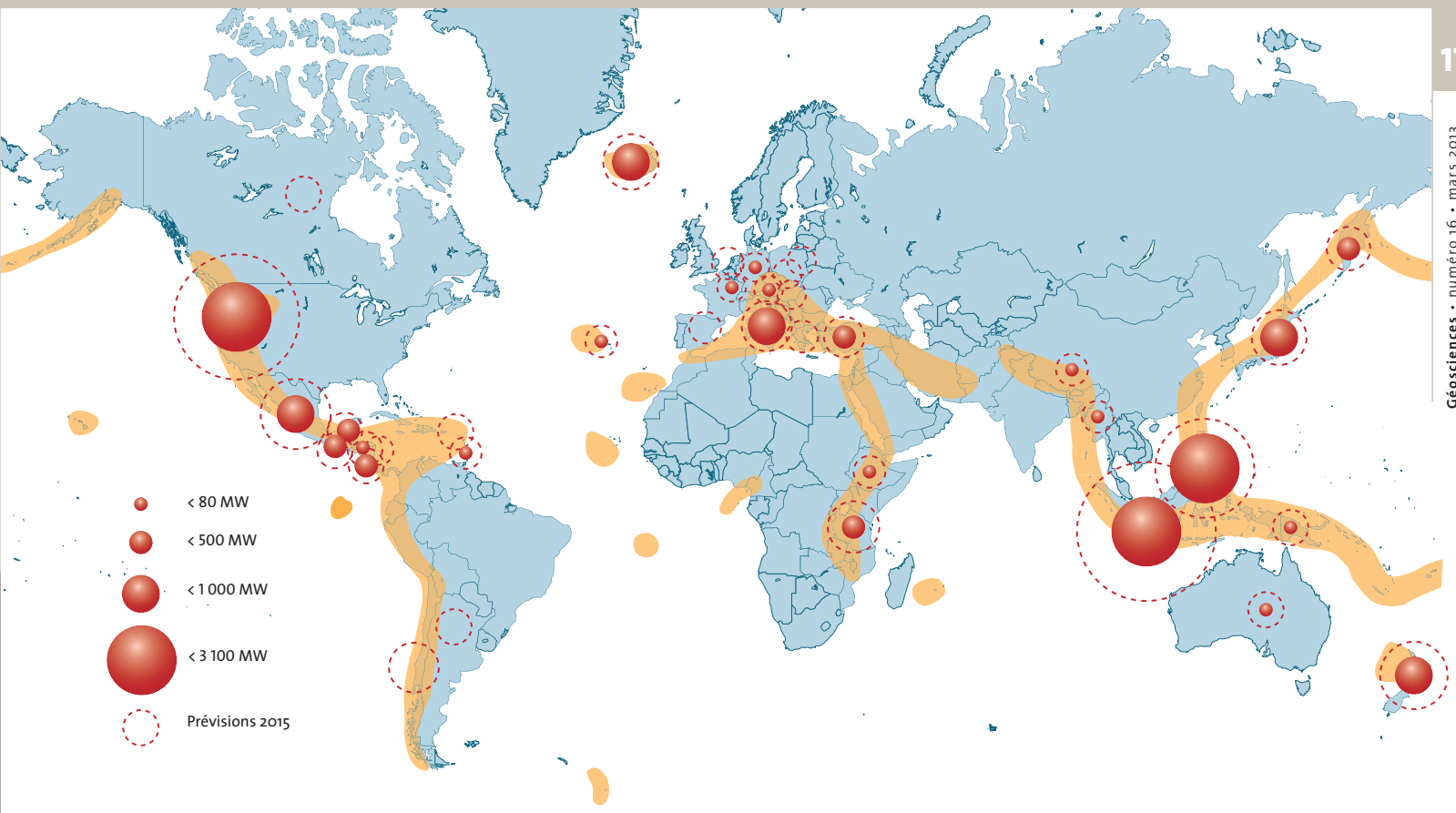


Fig. 1 : Carte mondiale des zones les plus favorables (couleur orange) pour la production d'énergie d'origine géothermique. État des capacités en production électrique d'origine géothermale installée en 2010 (ronds rouges) et prévues pour 2015 (cercles en pointillés rouges).

Fig. 1: World map of the most favorable zones (in orange) for geothermal energy production. Status of geothermal power generation installed capacities in 2010 and projected for 2015 (red dashed circles). © BRGM, CCGM

l'extrémité sud du continent sud-américain, à la Nouvelle-Zélande, en passant par l'Amérique centrale, les États-Unis, le Japon, les Philippines et la Micronésie. Dans l'océan Indien, l'Indonésie présente le plus fort potentiel géothermique en raison de sa forte activité volcanique plio-quaternaire. La plupart des îles volcaniques du globe possèdent, à des degrés divers, des ressources exploitables : il s'agit aussi bien des îles intraocéaniques comme Hawaii, l'Islande ou la Réunion, que des arcs insulaires (Petites Antilles, Sandwich, Vanuatu, etc.). Enfin, les grands domaines continentaux tectonisés aux frontières de plaques, liés ou non à du volcanisme récent, présentent aussi un grand intérêt ; de la chaîne alpine *stricto sensu* à l'Himalaya, en passant par la Turquie, ainsi que le rift est-africain *(voir encadré page 24)*.

Par ailleurs, bien que moins spectaculaires, les ressources de basse énergie existent dans un grand nombre de

Boiling Lake sur l'île de la Dominique (Arc des Antilles). Il est situé dans un ancien cratère d'explosion de la Vallée de la Désolation. Sa température varie entre 80 et 90 °C et son pH entre 4 et 6.

Boiling Lake on the Caribbean island of Dominica. It occupies an extinct explosive crater in the Desolation Valley. Water temperature ranges between 80 and 90 °C and its pH between 4 and 6.

© CFG Services – E. Bourdon

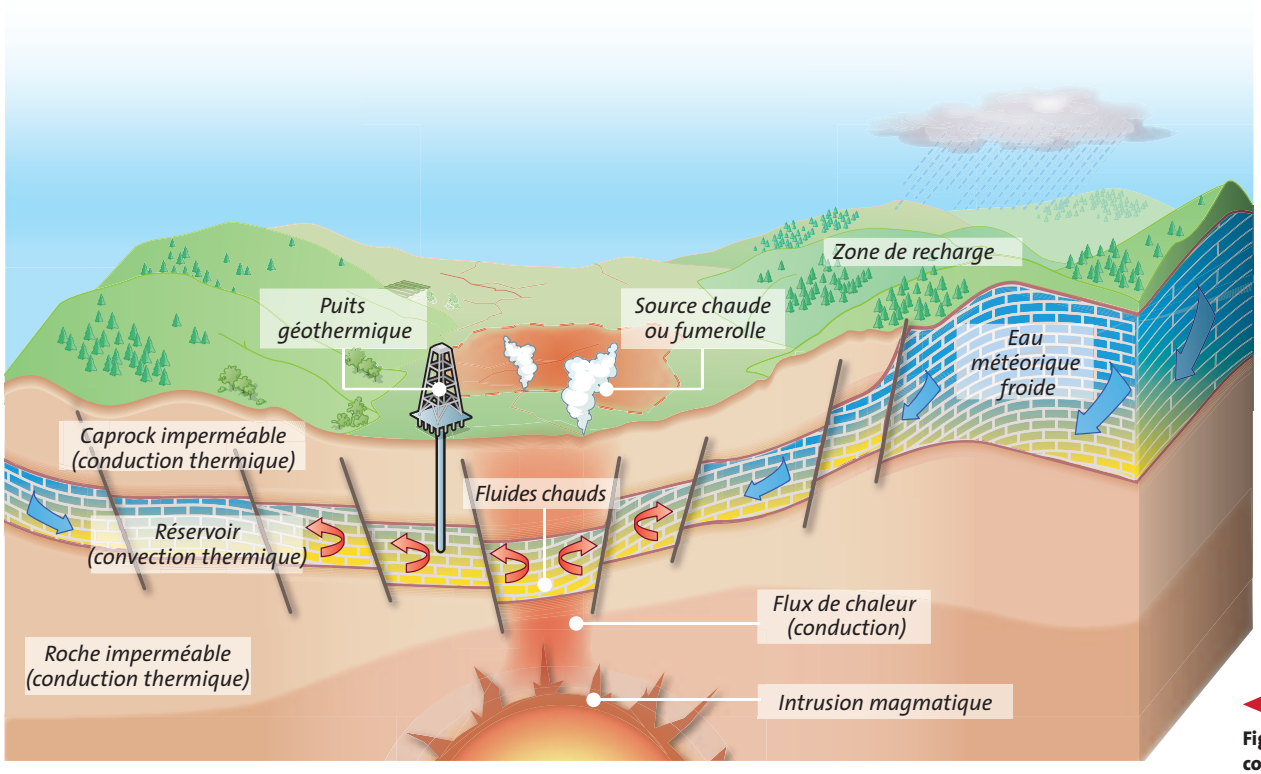


Fig. 2 : Modèle conceptuel d'un système géothermal.

Fig. 2: Diagram of a geothermal system.

© BRGM – Art Presse

pays et sont généralement liées à de grands bassins sédimentaires suffisamment profonds pour posséder des aquifères chauffés par un gradient géothermique « normal ». C'est le cas du Bassin parisien, en France, déjà exploité depuis plus de trente ans, et des grands aquifères continentaux du Maghreb, de Chine centrale ou d'Asie centrale (Kazakhstan, par exemple).

Des ressources variées pour des applications diversifiées

Souvent qualifiée d'« énergie nouvelle » en raison de son application récente dans la production d'électricité décarbonée, la géothermie est en réalité utilisée depuis l'Antiquité, de façon directe, notamment dans les bains thermaux dont de nombreux sites sont encore en activité de nos jours. En puissance thermique produite, le thermalisme constitue d'ailleurs toujours aujourd'hui la deuxième application de la géothermie dans le monde.

Le type d'application de la géothermie dépend essentiellement de la température de la ressource exploitée. Ainsi, on distingue les utilisations indirectes de la géothermie (principalement, la production d'électricité *via* le turbinage d'un fluide vaporisé) et les utilisations directes qui vont extraire du fluide géothermal les calories nécessaires (pour le chauffage ou un processus industriel, par exemple). En 2011, il existait une puissance électrique installée de 11 000 MWe *(figure 1)* dans le monde et une puissance thermique de 50 600 MWth. Cette dernière permet la production de près de 122 GWh d'énergie géothermique par an pour des applications très diversifiées.

La première d'entre elles est le chauffage par pompe à chaleur *(figure 3)*. Elle tire généralement parti des ressources de très basse énergie (< 30 °C) dont elle extrait les calories pour les transférer à un fluide secondaire. Les capacités installées ont été multipliées par sept depuis l'an 2000 et, parmi les 43 pays utilisant cette technologie, elle est devenue une source significative de chauffage pour les maisons individuelles en Suède, au Danemark et en Suisse.

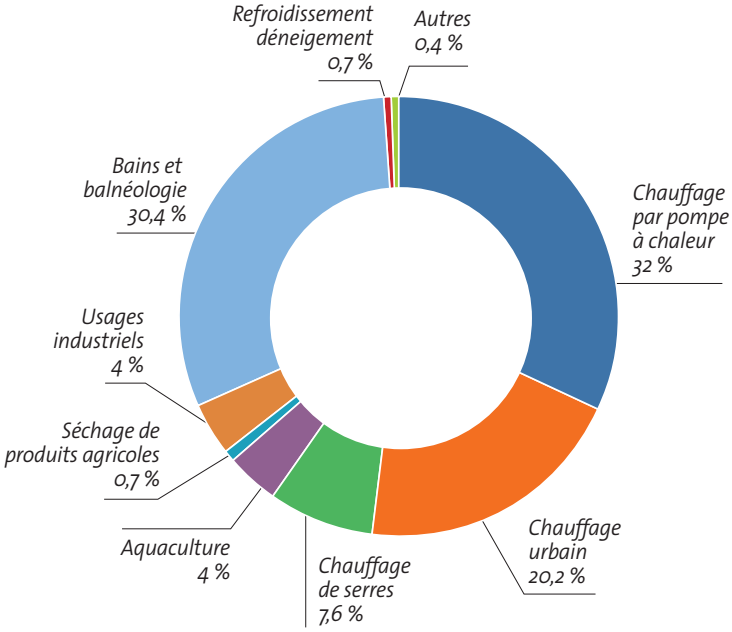
Avec des températures supérieures, la ressource géothermale peut être utilisée, toujours directement, pour le chauffage et la production d'eau chaude, notamment de quartiers urbains entiers *via* des

> *En puissance thermique produite, le thermalisme constitue aujourd'hui la deuxième application de la géothermie dans le monde.*

Fig. 3 : Proportion d'utilisation de la chaleur d'origine géothermique pour les principales applications.

Fig. 3: Proportion of geothermal heat use for the main applications.

Source : IGA (International Geothermal Association).



réseaux de chaleur. Les pays en pointe dans ce domaine sont la France (avec le Bassin parisien et le Bassin aquitain), l'Islande et la Chine. Également dans le domaine urbain, les ressources géothermales peuvent être utilisées en hiver pour le dégivrage de ponts, de trottoirs ou même de pistes d'aéroports. Par ailleurs, si la ressource est suffisamment chaude (généralement supérieure à 90 °C), elle peut aussi être utilisée pour produire du froid *via* une pompe à sorption.

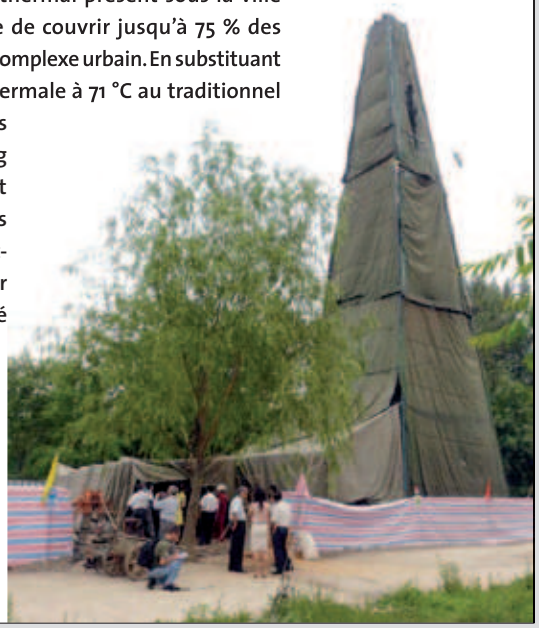
Dans le domaine industriel, la géothermie peut permettre la désalinisation de l'eau de mer, le séchage de produits, la pasteurisation, la production de ciment. La récupération de métaux dissous (lithium, par exemple) et de gaz à partir des eaux géothermales peut représenter une valorisation complémentaire. Les autres applications incluent des utilisations dans le domaine de l'agriculture : chauffage de serres et de bâtiments agricoles, aquaculture, séchage de produits agricoles. La Tunisie, par exemple, exploite depuis plusieurs années la géothermie dans le domaine agricole, notamment dans le sud du pays (zones de Kebili, Tozeur, Gabes et Gafsa). La ressource hydrothermale est puisée dans des grands aquifères continentaux d'âge mio-pliocène ou Crétacé inférieur. La température de la ressource peut monter jusqu'à 83 °C. Sa première utilisation est le chauffage et l'irrigation des serres de culture qui se développent à cadence élevée dans le sud du pays. De 111 ha en 2005, leur surface est passée à 194 hectares en 2010 avec un objectif affiché de 315 hectares en 2016. Le chauffage et l'irrigation permettent une croissance optimale des cultures maraîchères sous serres qui ne souffrent plus de la baisse sensible des températures pendant la nuit.

Une réponse à la crise énergétique mondiale et au changement climatique

Propre, renouvelable et la plupart du temps économique, la géothermie constitue, avec les autres énergies nouvelles, une solution de remplacement crédible face à l'épuisement des énergies fossiles et répond également aux enjeux de lutte contre le réchauffement climatique. En fonction du facteur de capacité considéré (qui est très élevé pour la géothermie, au contraire de l'éolien ou du solaire électrique qui ne peuvent pas être utilisés en moyens de production de base), le coût du kWh peut descendre jusqu'à 5 cts US$ pour les

Yanqing : du chauffage au charbon à la géothermie

Le district de Yanqing, à proximité de Pékin (Chine), mène une politique volontariste d'utilisation des énergies renouvelables dans le cadre de sa croissance urbaine. Menée en partenariat avec CFG Services et Dalkia, une étude de faisabilité a été finalisée en 2012 sur l'utilisation de la géothermie pour le chauffage urbain et la production d'eau chaude sanitaire pour près de 1 000 000 m² de surface de bâtiments à construire. Les résultats de l'étude montrent que quatre doublets géothermiques forés à moins de 2 000 mètres dans le réservoir géothermal présent sous la ville pourraient permettre de couvrir jusqu'à 75 % des besoins en énergie du complexe urbain. En substituant cette ressource géothermale à 71 °C au traditionnel chauffage par centrales à charbon, Yanqing pourrait éviter le rejet de 15 à 30 000 tonnes de CO_2 par an, promettant ainsi d'améliorer sensiblement la qualité de l'air de la ville.



Forage géothermique à Yanqing, Chine.

Geothermal drilling at Yanqing, China.

© CFG Services – D. Tournaye

plus grosses unités de production, soit un coût de production bien inférieur à celui d'une turbine à combustion ou d'une turbine vapeur alimentée au charbon de même puissance *(figure 4)*. Ces prix sont équivalents à ceux obtenus *via* les centrales hydrauliques, qui ont généralement un facteur de capacité plus faible (lié à la variation de disponibilité de l'eau au cours des saisons) et pour un impact environnemental sensiblement plus faible (la construction d'un barrage hydro-électrique nécessitant la neutralisation d'un espace foncier nettement plus important que pour une centrale géothermique).

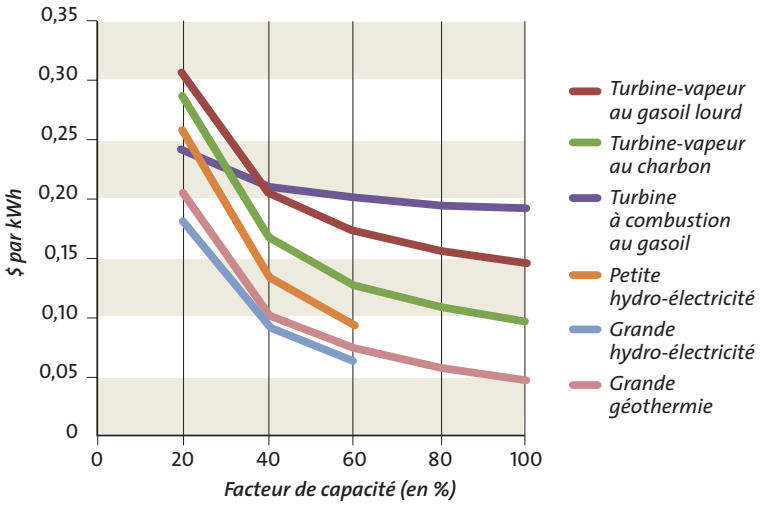


Fig. 4 : Comparaison des coûts de production du kWh pour différents modes de production en fonction du facteur de capacité.

Fig. 4: Comparison of production costs per kWh for different production means versus the capacity factor.

Source : Banque Mondiale.

> *La géothermie émet en moyenne 3 à 8 fois moins de CO2 que le charbon, le pétrole ou le gaz.*

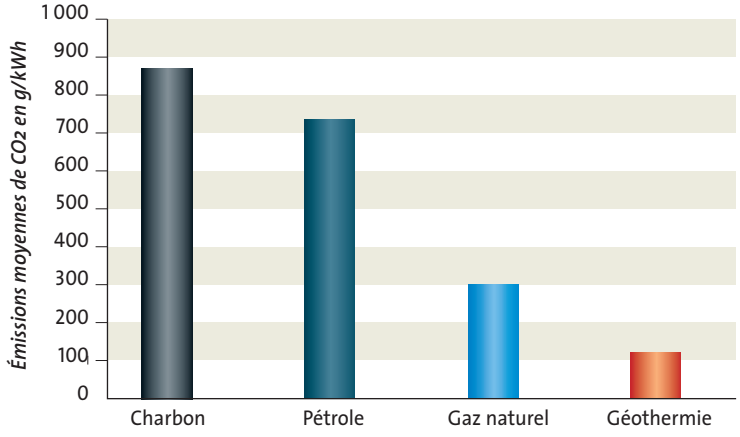


Fig. 5 : Moyenne des émissions de CO2 (g/kWh) pour différentes sources d'énergie.

Fig. 5: Average CO2 emissions (g/kWh) produced by different energy sources.

Source : IGA (International Geothermal Association).

Dans le contexte de lutte contre le réchauffement climatique mondial et de maîtrise des rejets en CO2 qui lui est associé, la géothermie présente un avantage indéniable sur la combustion des énergies fossiles *(encadré Yanqing)*. Ce mode de production d'électricité n'est pas exempt de rejets de CO2 puisque, lors de l'extraction de la vapeur d'eau nécessaire au fonctionnement de la turbine, un certain nombre de gaz incondensables (dont le CO2) initialement dissous dans le fluide géothermal (quelques pour cent), sont extraits du sous-sol. Ces gaz peuvent éventuellement être captés en sortie de turbine et être valorisés pour l'industrie. En règle générale, ils sont cependant rejetés directement dans l'atmosphère. Néanmoins, en termes de grammes de CO2 par kWh produit, la géothermie émet en moyenne 3 à 8 fois moins de CO2 que le charbon, le pétrole ou le gaz *(figure 5)*. Les cycles binaires qui n'utilisent pas la vapeur d'eau pour le turbinage, mais extraient les calories du fluide géothermal total avant de le réinjecter dans le réservoir ont une émission de CO2 virtuellement nulle.

La géothermie et le développement rural

Si pour des raisons d'économie d'échelle, les grandes centrales géothermiques de production électrique ont été favorisées dès les premiers pas de la géothermie, le développement de la petite géothermie (puissance inférieure à 5 MWe) pour l'électrification rurale connaît un essor certain. Elle tire généralement avantage de réservoirs géothermaux de dimensions restreintes et de faibles températures (100 à 170 °C) à travers l'utilisation de cyles binaires. Les plus petites de ces centrales géothermiques (100 à 300 kWe) peuvent être construites et contenues dans un simpe container standard et donc être facilement transportables partout dans le monde. Leur conception leur permet de supporter des variations de charge instantanée (jusqu'à 25 % de la puissance installée) assez fréquentes dans

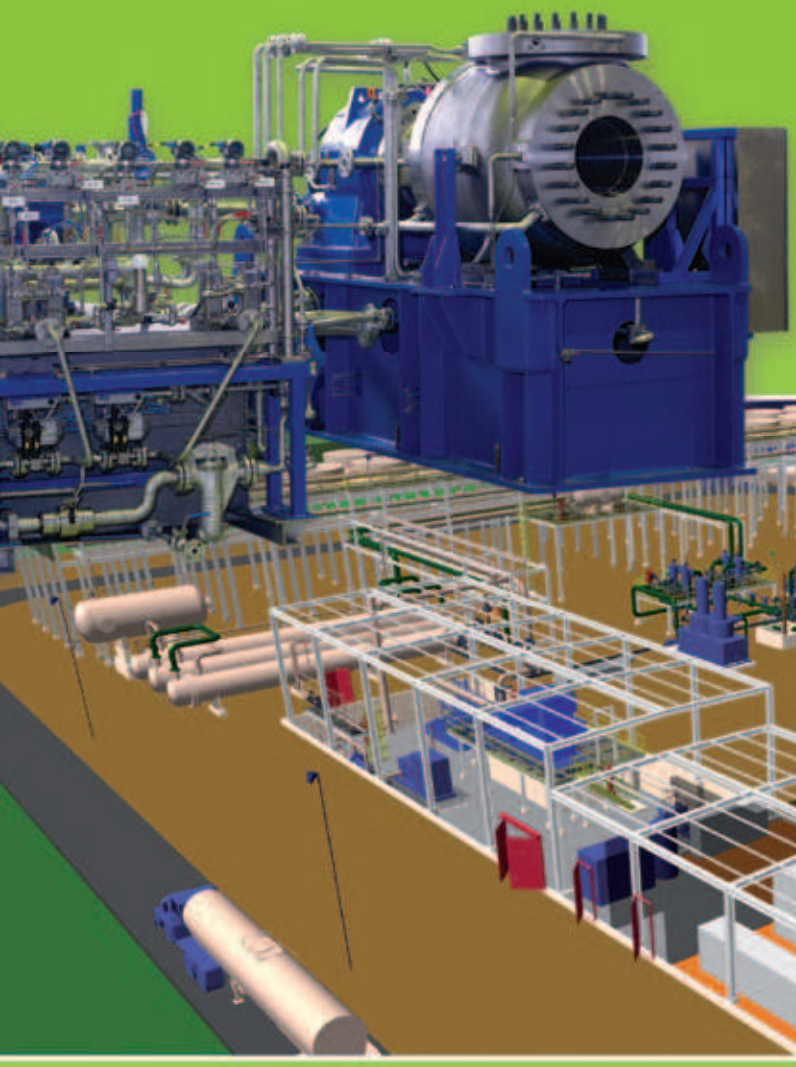
Publicité

LES CENTRALES GEOTHERMIQUES CRYOSTAR
LA PERFORMANCE "MADE IN FRANCE"

LES TURBOGENERATEURS CRYOSTAR
★ Turbines radiales (technologie éprouvée)
★ Rendements élevés y compris en 'off design'
★ Puissance pouvant aller jusqu'à 15-20 MW par unité
★ Machines adaptées aux ORC et cycles Kalina

LES ORC CRYOSTAR
★ Design sur mesure, optimisation au cas par cas
★ Cycles subcritiques ou supercritiques
★ Boucles simple ou double pression
★ Choix du fluide de travail (Hydrocarbures ou Réfrigérants)

CENTRALES CLÉ EN MAIN
★ Flexibilité de l'étendue de fourniture
★ Depuis la sortie du puits jusqu'à la connexion réseau



CRYO STAR

★ CLEAN ENERGY
CRYOSTAR

Expert en technologies de pointe pour applications en Gaz Industriel, Énergie Propre, GNL et Hydrocarbures

★ BRÉSIL ★ CHINE ★ ÉTATS-UNIS ★ FRANCE ★ INDE ★ SINGAPOUR ★ ROYAUME-UNI ★

www.cryostar.com

Sources d'eau chaude du Parc national Mae Fang, Thaïlande.

Hot springs in Mae Fang National Park, Thailand.

© 123RF.

les systèmes électriques isolés. Ces centrales demandent peu d'entretien, peu de maintenance, présentent un facteur de disponibilité de près de 98 % et ne nécessitent pas d'importants systèmes de production électriques de back-up en cas d'avarie. Dans de nombreuses zones isolées et non reliées aux infrastructures de distribution d'électricité nationales (territoires insulaires, par exemple), la petite géothermie peut apporter une réponse compétitive, et adaptée, à l'absence d'électrification ou aux coûts sans cesse croissants des générateurs fonctionnant au diesel *(encadré ci-contre)*. Ainsi, sur l'île de Flores, en Indonésie, la construction de deux unités de 2,5 MW en 2011 a permis de remplacer l'équivalent de 2 MWe de production *via* des générateurs diesel tout en assurant l'augmentation de la demande future estimée à 2,5 MWe. La production d'origine géothermique permet ainsi d'économiser près de 3 millions de dollars par an.

Outre que cette énergie de substitution permet des économies susbstantielles, elle améliore la qualité de l'environnement en évitant la production de plusieurs milliers de tonnes de CO_2. Par ailleurs, elle encourage la consommation d'électricité, qui serait restée dans le cas contraire trop chère, pour le bénéfice de la population locale : nouveaux usages, nouvelles industries, alimentation des hopitaux, etc. Au même titre que les autres énergies renouvelables, ces centres de productions décentralisés en électricité d'origine géothermique doivent faire l'objet d'une étude socio-économique relativement fine de la zone d'implantation pour s'assurer de leur compétitivité vis-à-vis des énergies fossiles. La puissance (de quelques kWe à plusieurs centaines de MWe), la technologie (vapeur sèche ou cycle binaire) d'une centrale géothermique et son environnement (contexte urbanisé, isolement, contraintes règlementaires, etc.) peuvent effectivement faire varier le coût du kWh de 1 à 4. Cependant, entre les coûts toujours croissants des carburants d'origine fossile et les coûts en baisse régulière des installations géothermiques depuis plusieurs années, l'avantage compétitif en faveur de la géothermie ne peut que s'accroître dans le futur .

À Fang, en Thaïlande, la mise en place d'une unité de 300 kWe en 1989 (et toujours en activité) a permis de diviser le coût de l'électricité par trois en remplaçant les générateurs diesel utilisés jusqu'alors. Mais le projet initial prévoyait également l'utilisation en cascade du fluide géothermal (à 116 °C) en sortie de turbine. Ce fluide est donc utilisé pour la production de froid pour du stockage, pour le séchage de produits maraîchers et pour le fonctionnement d'un spa *(figure 6)*. En fin de chaîne, l'eau est refroidie dans un étang à l'air libre avant d'être utilisée pour l'irrigation ou être rejetée dans le milieu naturel. Ainsi la géothermie irrigue-t-elle l'ensemble du tissu économique local.

À l'heure actuelle, seule une petite fraction du potentiel géothermique de la Terre est exploitée. On s'attend à ce que, à elle seule, la capacité des centrales électriques géothermiques passe de 11 GW aujourd'hui à 160 GW en 2050 (source AIE).

La Dominique : vers une électricité 100 % verte grâce à la géothermie

Située au cœur de l'arc des Petites Antilles, la Dominique est une île-nation de 70 000 habitants. Ses besoins en électricité sont relativement modestes et couverts à l'heure actuelle à 25 % par l'hydroélectricité et à 75 % par des générateurs diesel. La Dominique possède également le potentiel géothermique le plus important des Petites Antilles. Le prospect de Wotten Waven, situé dans la vallée de Roseau, pourrait à lui seul permettre de fournir 120 MWe, soit une puissance six fois supérieure aux besoins de l'île. Les premiers forages exploratoires, terminés début 2012, ont confirmé la présence d'une ressource géothermale abondante exploitable à Wotten Waven. Deux unités de production de 2 x 5 MWe devraient bientôt voir le jour et permettre à l'île de se passer de ses générateurs diesel, devenant ainsi la première nation caribéenne dont l'électricité serait à 100 % d'origine renouvelable. Elle devrait même devenir, d'ici quelques années, exportatrice nette d'énergie en lançant la construction d'unités de plus grandes puissances, ce qui permettrait, *via* des câbles sous-marins, d'alimenter la Guadeloupe au nord et la Martinique au sud (soit 50 MWe pour chacune des deux îles françaises).

La vallée de la Désolation en Dominique.
Desolation Valley on Dominica Island. © BRGM.

Overview of geothermal resource exploration and development in the East African rift system

Meseret Teklemariam Zemedkun – United Nations Environment Programme – Regional Office for Africa, Nairobi, Kenya – Meseret.zemedkun@unep.org

The East African Rift System (EARS) is one of the Earth's major tectonic structures where the geothermal energy escapes to the surface. This energy flow is expressed through volcanic eruptions, earthquakes and the upward transport of heat via hot springs and natural vapor emissions. The EARS extends over about 6500 km, from the Middle East (Dead Sea-Jordan Valley) in the North to Mozambique in the South, passing through Eritrea, Djibouti, Ethiopia, Kenya, Tanzania, Uganda, Rwanda, the Democratic Republic of Congo (DRC), Zambia, Malawi, Mozambique and Madagascar *(figure)*. The estimated geothermal energy resource potential in the EARS exceeds 20,000 MWe.

Despite the high geothermal potential of the EARS, only Kenya and Ethiopia are actually exploiting it, with an installed capacity of about 217 MWe. Countries such as Djibouti, Eritrea, Tanzania, Uganda, Rwanda and Comoros are at various exploration stages. So far, the other countries have not progressed beyond preparing inventories of the resource potential.

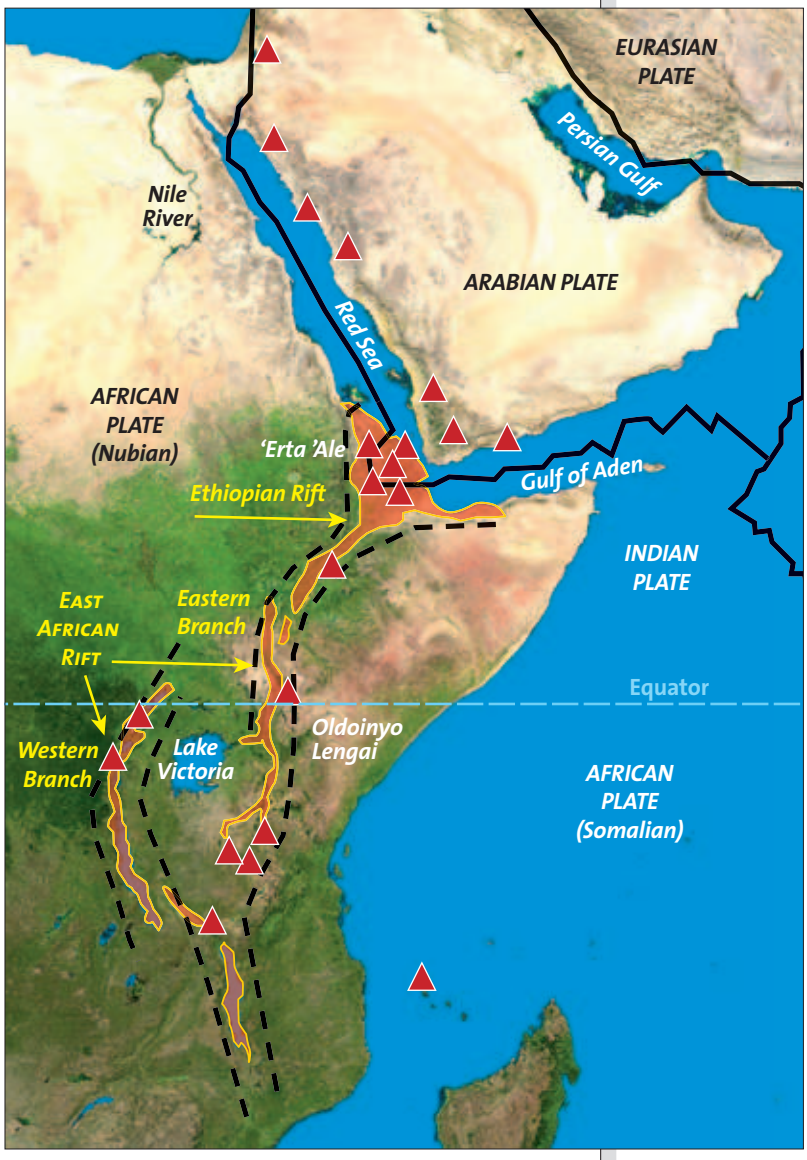
Geothermal development in the East African region has been hindered by risk factors: those implied in resource exploration and development, and financial risks incurred when implementing the projects. Insufficient investment and inadequate institutional structures in many countries have also contributed to the slow pace of development. To overcome these obstacles and allow geothermal development to be accelerated in EARS countries, a regional geothermal resource development approach needs to be adopted. One of the main programmes representative of this approach is the African Rift Geothermal Development Facility Project (ARGeo[1]).

The ARGeo Project is a GEF[2] funded project implemented by UNEP[3]. The project's objective is to promote geothermal resource utilization by reducing the risks associated with resource's exploration and development. ARGeo aims to stimulate geothermal energy investments from both the public and private sectors. It will notably promote the utilization of the resource in agriculture and industry.

The Great East African Rift System.

Le système du grand rift est-africain.

© Nasa, BRGM



East African Rift Zone
Plate Boundaries
Active Volcanoes

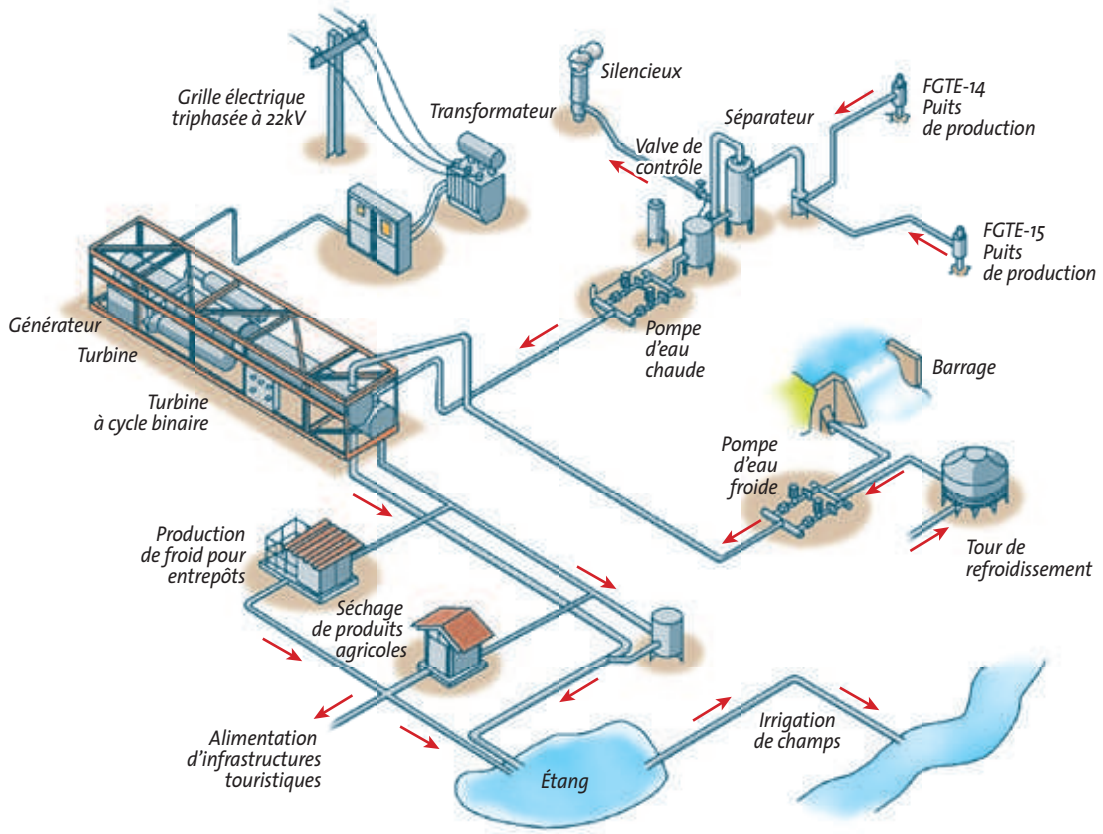
(1) http://www.worldbank.org/projects
(2) GEF (Global Environment Facility) is the largest public funder of projects to improve the global environment. http://www.thegef.org/gef/home
(3) UNEP (United Nations Environment Programme). http://www.unep.org

La moitié de cette puissance installée proviendra des systèmes EGS (ou systèmes géothermaux activés ; *voir article de S. Gentier, ce numéro*) quand cette technologie arrivera à maturité. En attendant, le développement de la géothermie « classique » ces prochaines années aura lieu principalement dans les pays en voie de développement qui possèdent la majorité du potentiel existant. Cette dernière fait face à de nombreux défis dont le principal reste le financement de ces projets qui nécessitent une dépense en capitaux importante avant même que la ressource géothermale n'ait été prouvée (c'est le « risque géologique »). La France a été pionnière dans la couverture du risque des projets géothermiques dès les années 1980, notamment dans le Bassin parisien, qui garantit un remboursement partiel des frais engagés si la ressource géothermale n'est pas présente en quantité et qualité à l'issue des forages ou durant l'exploitation. De tels fonds de couverture du risque sont à l'étude aussi bien pour la région Caraïbe que dans la zone des Grands Lacs en Afrique de l'Est. Leur mise en place devrait permettre de « libérer » les importants capitaux privés ou publics qui seront nécessaires pour le développement de la géothermie dans ces régions.

Fig. 6 : Exemple d'utilisation en cascade de la ressource géothermale en domaine rural à Fang (Thaïlande).

Fig. 6: Example of a cascading scheme for the geothermal resource in a rural context at Fang (Thaïland).

© BRGM (modifié d'après EGAT).



Geothermal energy: a source of energy independence and sustainable development

With over 11 GWe installed capacity worldwide, geothermal energy has already proved to be an economically and environmentally sound response to mounting oil and gas prices and global climate change. It already covers between 10 and 30% of electricity consumption in six countries including the Philippines and Costa Rica. Geothermal resources are found on all continents, either along tectonic plate margins (in high-enthalpy reservoirs often associated with volcanic contexts) or in large sedimentary basins (in low-enthalpy aquifer reservoirs). Geothermal heat still serves largely to heat homes via heat pumps. However, depending on the resource temperature, its applications may vary widely: urban district heating, melting snow, industrial (paper and concrete manufacture) and agricultural uses (drying crops, heating greenhouses), ice production, air conditioning... In isolated areas (islands or continental regions unconnected to the national power grid), where power is mainly or entirely generated by diesel turbines, small geothermal power plants can be cost-effective enough to significantly lower the price of electricity, while creating new agricultural, industrial or recreational activities through the utilization of waters separated from the geothermal fluid. Furthermore, by cutting CO_2 emissions by a factor of 3 to 9 (as well as other pollutants) compared to fossil energy sources, geothermal power generation can substantially improve local air quality, thus helping combat global warming. By 2050, EGS (Enhanced Geothermal Systems) is expected to be a major contributor to worldwide growth in the sector. Meanwhile, unleashing the conventional geothermal potential in developing countries will necessitate a massive public and private financial effort, its related risk being minimized through Geothermal Risk Coverage Funds such as the one already existing in France's Paris Basin since the 1980's.