

La géothermie dans la transition énergétique, approche transdisciplinaire du développement durable

Jacques VARET

Géo2D, Président du COPEC (Région Centre),

Résumé

Après avoir analysé les raisons qui nous forcent à nous engager dans la voie d'une transition énergétique, nous portons notre regard sur la géothermie. L'analyse des phénomènes en cause nous oblige en effet à porter notre regard vers la terre et notre relation à ses enveloppes superficielles solides, liquides et gazeuses (lithosphère, hydrosphère et atmosphère). Le facteur déclenchant est en effet un usage immodéré des ressources fossiles (pétrole, gaz et charbon), qui par déstockage massif du carbone contenu dans la lithosphère, entraîne une concentration effective de gaz à effet de serre atmosphérique avec les conséquences climatiques que l'on sait. Or si la terre solide contient en effet – en quantité finie – ces réserves énergétiques qui ont permis l'éclosion de la société dite moderne, elle développe également une énergie considérable dont l'exploitation a été jusqu'ici relativement ignorée : la géothermie.

Mots-clés

Transition énergétique, géothermie, transdisciplinarité, chauffage, France, électricité, Afrique de l'Est, énergie renouvelable, développement durable.

A l'attention des chercheurs, des enseignants et des communicants en matière de développement durable, nous proposons d'analyser ici les caractéristiques de la géothermie, une des options possibles pour la transition énergétique. Après avoir montré la place que pourrait prendre cette énergie renouvelable dans le bilan énergétique dans deux pays pris en exemple : la France hexagonale et le Kenya (rift est africain), les questions restant à résoudre pour assurer ce développement seront posées, dans le but d'ouvrir des voies de recherche et d'innovation et en fin de compte de réalisation effective répondant aux enjeux.

Pourquoi la transition énergétique s'impose à nous

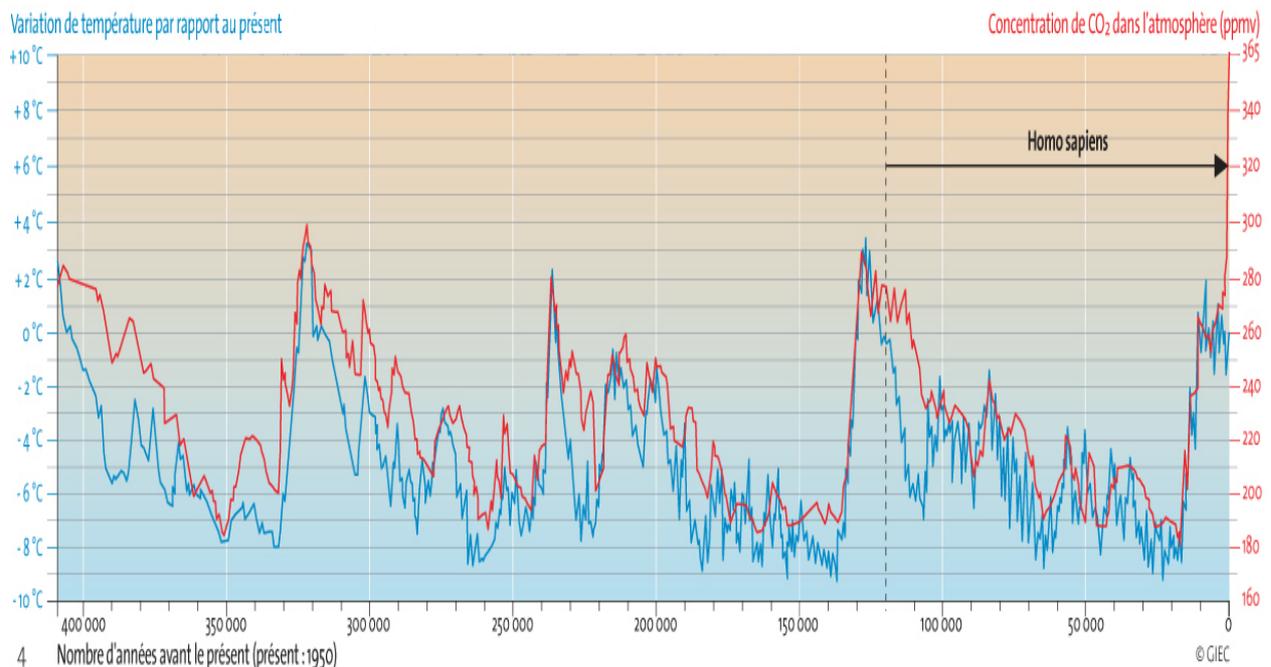
Développement durable, politiques climatiques, transition écologique, ces différentes expressions retenues par les politiques publiques sont étroitement liées et s'imposent également à nous. On pourrait y ajouter bien d'autres questions d'actualité, comme le dérèglement économique, le chômage ou même les guerres du Sahel et les afflux de réfugiés. Toutes se relient directement ou indirectement à la même source, qui peut se résumer à une addiction excessive de nos sociétés, au cours de ces deux derniers siècles aux énergies fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel. Il

en résulte une double contrainte, qui frappe les générations suivantes et qu'il est de notre responsabilité de résoudre aujourd'hui :

- D'une part le dérèglement climatique découlant de l'augmentation de la teneur en gaz à effets de serre de l'atmosphère terrestre, qui résulte directement du déstockage du carbone stocké dans la lithosphère et de son émission dans l'atmosphère par combustion des énergies fossiles
- D'autre part l'épuisement progressif des ressources en énergie fossile accessibles à bon marché, c'est à dire les gisements de pétrole, de gaz et de charbon conventionnels, au point d'avoir passé le pic pour le pétrole et de l'atteindre bientôt pour le gaz, étant entendu que pour le charbon nous disposons de quelques dizaines d'années supplémentaires tout au plus.

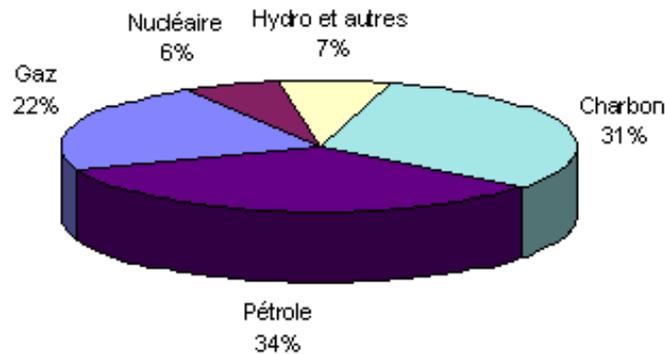
Les travaux du GIEC ont clairement démontré la corrélation existant au cours des derniers millénaires entre teneur en CO₂ et la température de l'atmosphère. Ils ont également montré que, depuis les années 1900, on assiste à une augmentation importante de la teneur en CO₂ de l'atmosphère (figure 1), et l'origine de cette croissance est bien identifiée comme résultant directement, pour l'essentiel, de la combustion des énergies fossiles. Cette augmentation n'a rien d'étonnant lorsque l'on sait que 87% de l'énergie consommée dans le monde repose sur la combustion d'énergies fossiles (figure 2).

Figure 1 : Corrélation entre teneur en CO₂ et température de l'atmosphère au cours des dernier 400.000 ans révélée par l'étude des inclusions fluides dans les glaces polaires



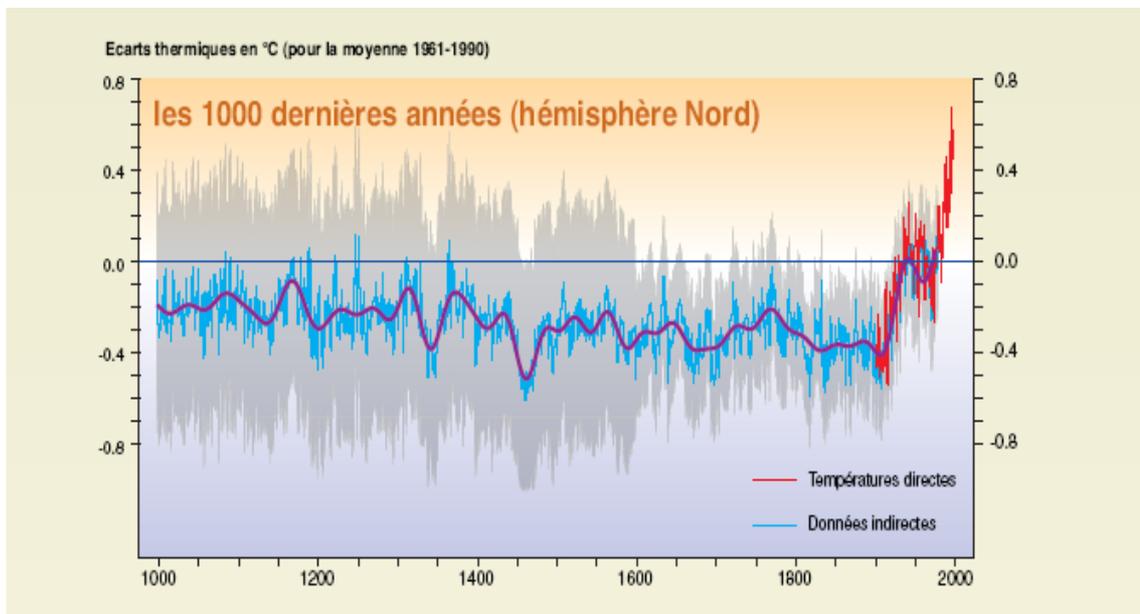
Source : GIEC

Figure 2 : Production mondiale d'énergie par source ; les fossiles représentent 87% du total



Cette augmentation des teneurs en gaz à effet de serre ne se traduit pas instantanément par une augmentation des températures moyennes, mais on observe néanmoins indiscutablement une augmentation qui dépasse celle découlant des variations solaires naturelles (figure 3). Les scientifiques du GIEC ont pu établir à partir des calculs réalisés à l'aide de divers modèles que les quantités de gaz à effet de serre déjà émises entraîneraient une augmentation de température de l'ordre de 2°C à l'horizon 2100, et que cette augmentation pourrait dépasser 5°C si aucune mesure n'est prise pour réduire ces émissions.

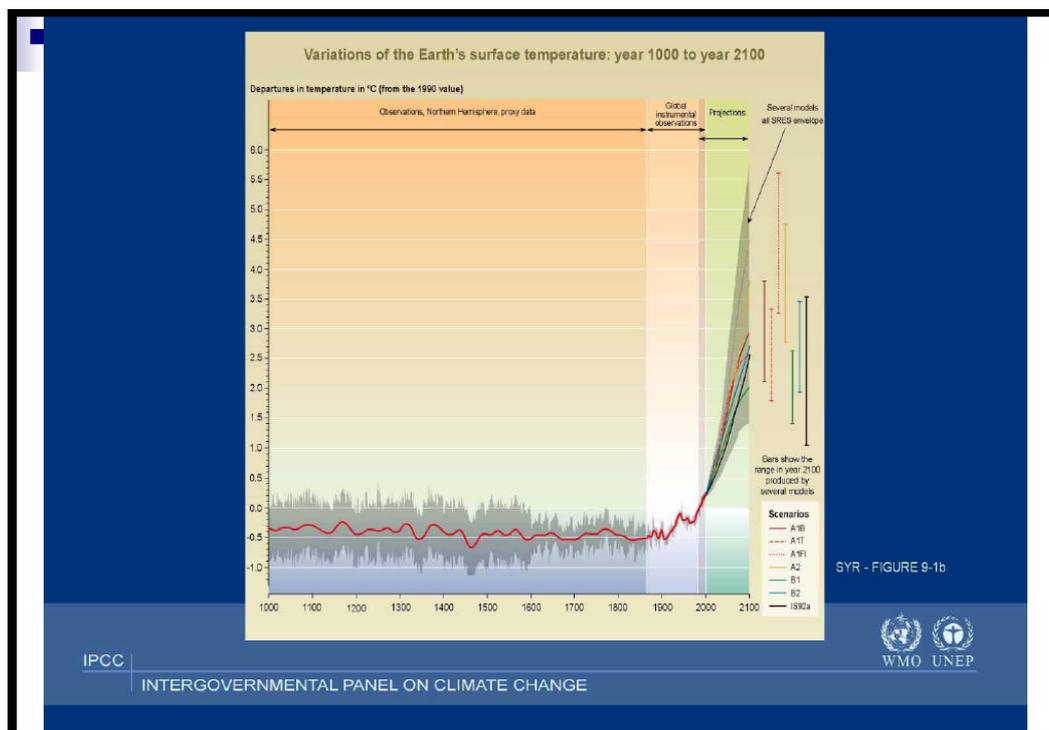
Figure 3 : Variations des températures et des écarts thermiques dans l'hémisphère nord au cours des 1000 dernières années (source GIEC).



Ainsi différents scénarios ont été proposés et un accord international a permis de fixer les limites à ne pas dépasser avant que le coût des effets du changement climatique ne devienne insupportable pour nos sociétés (Fig.4). La convention

internationale pour le climat et les réunions périodiques des parties prenantes (Etats et Organisations Internationales) ont permis d'aboutir à la signature du protocole de Kyoto assurant une maîtrise des émissions globales et une répartition des efforts entre pays. La 21eme conférence des parties (COP21 à Paris) est destinée à fixer de nouveaux engagements pour les décennies à venir, notamment pour tenir compte des changements intervenus ces dernières années (ainsi la Chine est devenue le principal émetteur devant les Etat Unis).

Figure 4 : Variations observées, mesurées et calculées des températures terrestres entre les ans 1000 et 2100, avec indication des valeurs résultant pour 2100 de 7 scénarios du GIEC.



La seconde raison qui nous contraint à changer nos habitudes et à nous engager dans la transition énergétique, c'est l'épuisement des ressources fossiles. Un géologue américain, Marion King Hubbert a présenté dès 1956 à l'American Petroleum Institute que la courbe de production d'une matière première minérale issue d'un gisement fini, comme c'est le cas d'un réservoir pétrolier, suivait une courbe en cloche. Il a établi que la production de pétrole américaine (48 États) passerait par un maximum en 1970. Sa présentation, oubliée jusqu'en 1971, l'a rendu célèbre lorsque la production américaine a effectivement atteint son maximum pour ensuite décliner conformément à ses prédictions. Depuis, l'ASPO (Association for Study of Peak Oil) a développé cette approche au niveau mondial, permettant de comparer les volumes de découvertes annuelles avec les productions, et de déterminer les pics pour le pétrole (figure 5), le gaz et le charbon (figure 6).

Figure 5 : Comparaison des découvertes mondiale annuelle de pétrole et des productions, et modèle de déclin jusqu'en 2040 (source ASPO)

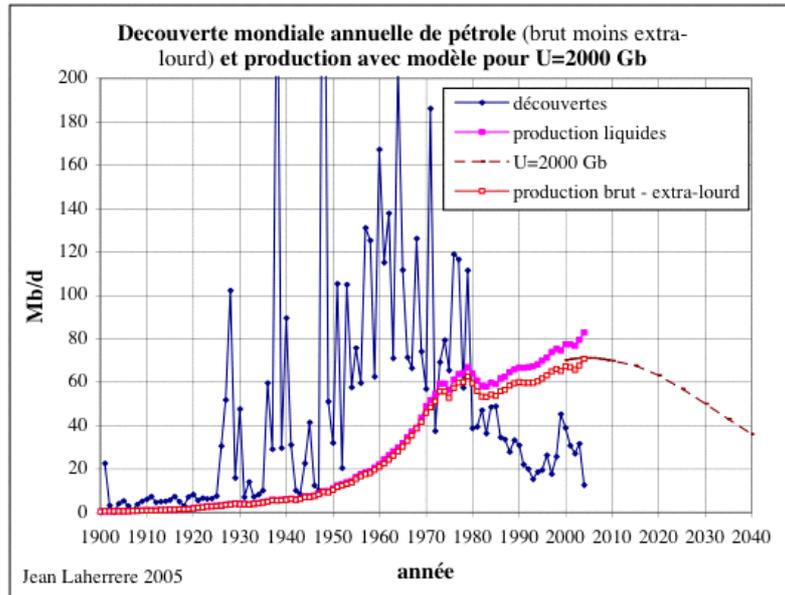
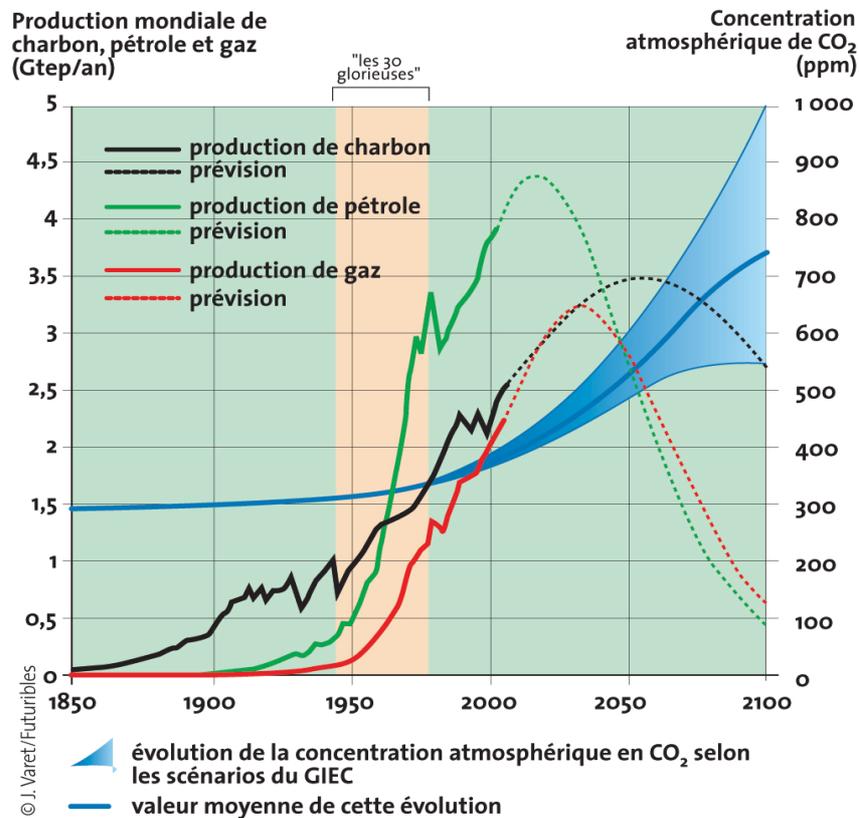


Figure 6 : Relations entre enveloppes terrestres : productions de pétrole, de gaz et de charbon et émissions de gaz à effet de serre (différents scénarios du GIEC inclus dans l'enveloppe bleue).



La question est de savoir quel sera le facteur déterminant, des politiques climatiques ou de la limitation des ressources, dans la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre. Ces deux contraintes jouent en tout état de cause dans le même sens pour nous contraindre à la transition énergétique (Varet, 2005).

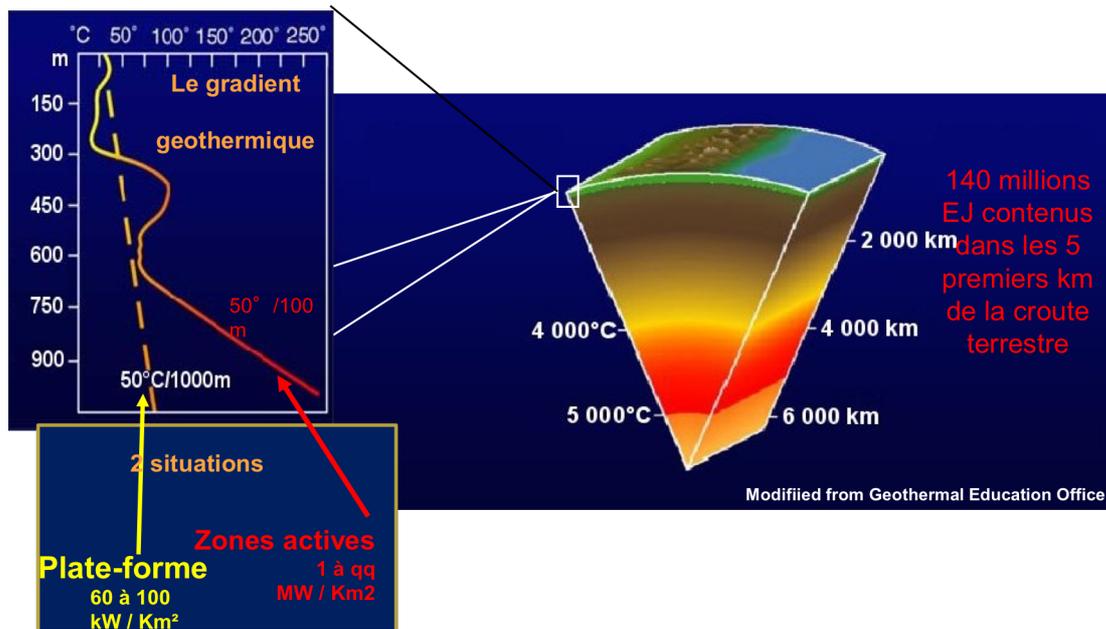
Ainsi, à la différence des publications de l'AIE, basées sur les déclarations des Etats et de Majors, qui préconisaient une croissance exponentielle des consommations et de productions d'énergies fossiles au cours des prochaines décennies (données sur lesquelles se sont basés les travaux du GIEC), ces données nous montrent que la contrainte n'est pas seulement liée à la nécessaire prévention des dérèglements climatiques liée aux émissions de gaz à effet de serre, mais existe aussi au niveau de la ressource elles-mêmes, dont la disponibilité – et le coût d'accès – pourrait devenir le facteur limitant. En reportant sur le même diagramme les courbes d'épuisement des énergies fossiles de l'ASPO et celles des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre du GIEC (figure 6), on visualise les relations entre enveloppes terrestres : effet de serre atmosphérique et déstockage du carbone fossile lithosphérique. En même temps, nous réalisons que nous sommes « coincés des deux bouts » : sommes-nous limités d'abord par la ressource ou par notre volonté de maîtriser les émissions ? Et si on avait passé le pic ? Dans tous les cas se pose une question éthique, d'équité intergénérationnelle autant qu'intragénérationnelle. Au cours de l'histoire et encore aujourd'hui, la consommation en énergie – notamment fossile – a été très déséquilibrée entre les différents pays de la planète. Par contre les effets du changement climatique frappent les pays de manière tout aussi inéquitable. Et dans la futur, on sait que certaines régions du monde seront pratiquement condamnées (îles coralliennes, zones de deltas, sahel), tandis que d'autres ne seront pas nécessairement perdantes (nord Canadien et Eurasie du nord). On mesure ici les incidences de ces questions sur les problématiques aussi diverses que les guerres et les migrations, et la nécessité impérieuse de « changer de modèle » et d'assurer une transition écologique efficace et équitable.

La géothermie, diversité de ses caractéristiques géologiques et de ses modes d'exploitation

La terre reçoit et produit une énorme quantité d'énergie. Elle reçoit en permanence $1,74 \cdot 10^{17}$ W du Soleil, ce qui correspond à une énergie de $5,5 \cdot 10^{24}$ J par an. En zone désertique en plein soleil on obtient 1 MW/m^2 . Elle produit, depuis l'intérieur vers la surface, 50 TW, dont 10% de manière spectaculaire (séismes et éruptions volcaniques) et 90% de manière très discrète (le flux géothermique). On peut comparer ces 50 TW dégagés par la Terre aux 15 TW produits et consommés par l'humanité : la Terre dégage 3 fois plus d'énergie que ce que produit/consomme l'humanité. Avec les 174 000 TW reçus du Soleil, l'humanité tien à sa disposition une quantité considérable d'énergie renouvelable. Néanmoins, à la différence des

énergies solaires et éolienne, l'énergie géothermique présente l'intérêt d'offrir un flux continu et régulier. En outre, si l'énergie solaire est stockée dans la biomasse terrestre, et pour le passé dans les gisements d'énergie fossile, l'énergie géothermique présente l'avantage, en comparaison avec les autres énergies renouvelables, de receler un stock considérable : 140 millions d'EJ sont contenus dans les 5 premiers km de la croûte terrestre.

Figure 7 : La terre dissipe et contient une énorme quantité d'énergie



On peut distinguer pour schématiser deux types d'environnements géologiques : les plateformes stables, comme c'est le cas des grands bassins sédimentaires français, et les zones géologiques actives, notamment à la frontière des plaques, qu'elles soient en expansion ou en subduction (figure 8). Dans les premières, le gradient géothermique est de l'ordre de 30°C par kilomètre alors qu'il peut atteindre des valeurs 10 fois plus fortes dans les zones volcaniques. Si l'on se souvient de l'équation de propagation de la chaleur : $J = -k \cdot dT/dh$, le flux de chaleur « J » s'exprime en W par m², la conductivité thermique "k" en W par mètre et par degré, et le gradient géothermique "dT/dh", variation de température (dT) avec la profondeur (dh), en K/m (degré par mètre). On pourra trouver dans des terrains favorables des gradients atteignant 300°C par Km, correspond à des flux de l'ordre du MW/Km² (figure 9).

Figure 8 : Mouvements respectifs des plaques lithosphériques et variations géologiques qui en résultent : volcanisme et anomalies thermiques développées dans les zones géologiques actives, tant en expansion qu'en subduction.

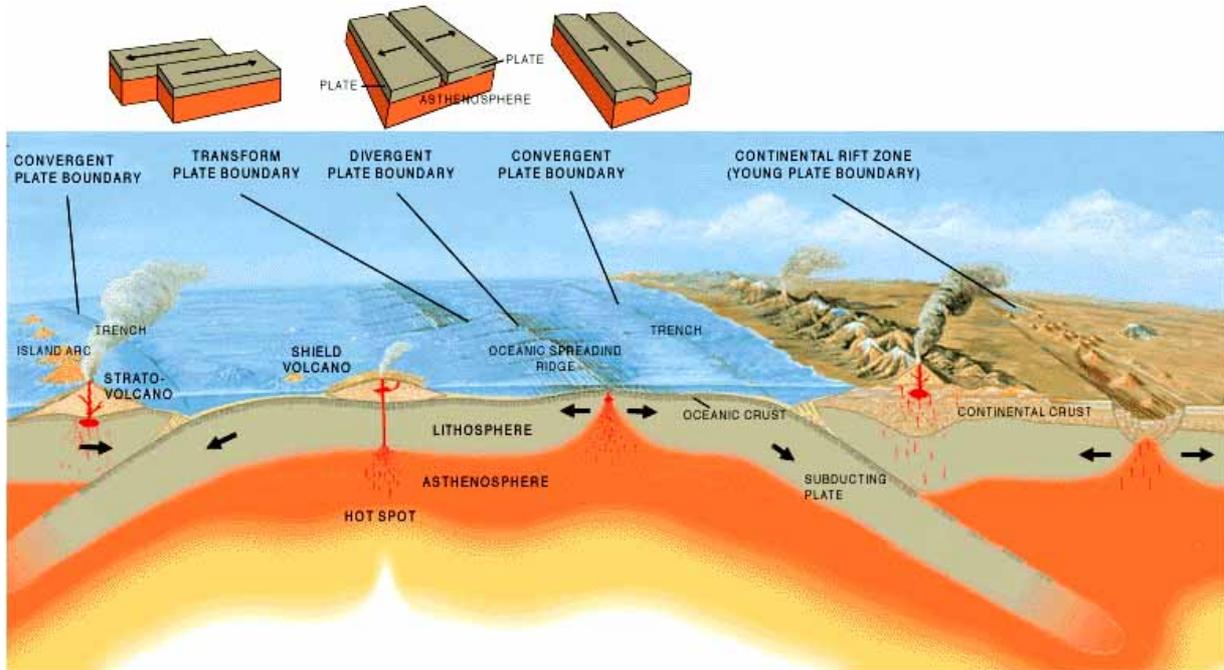
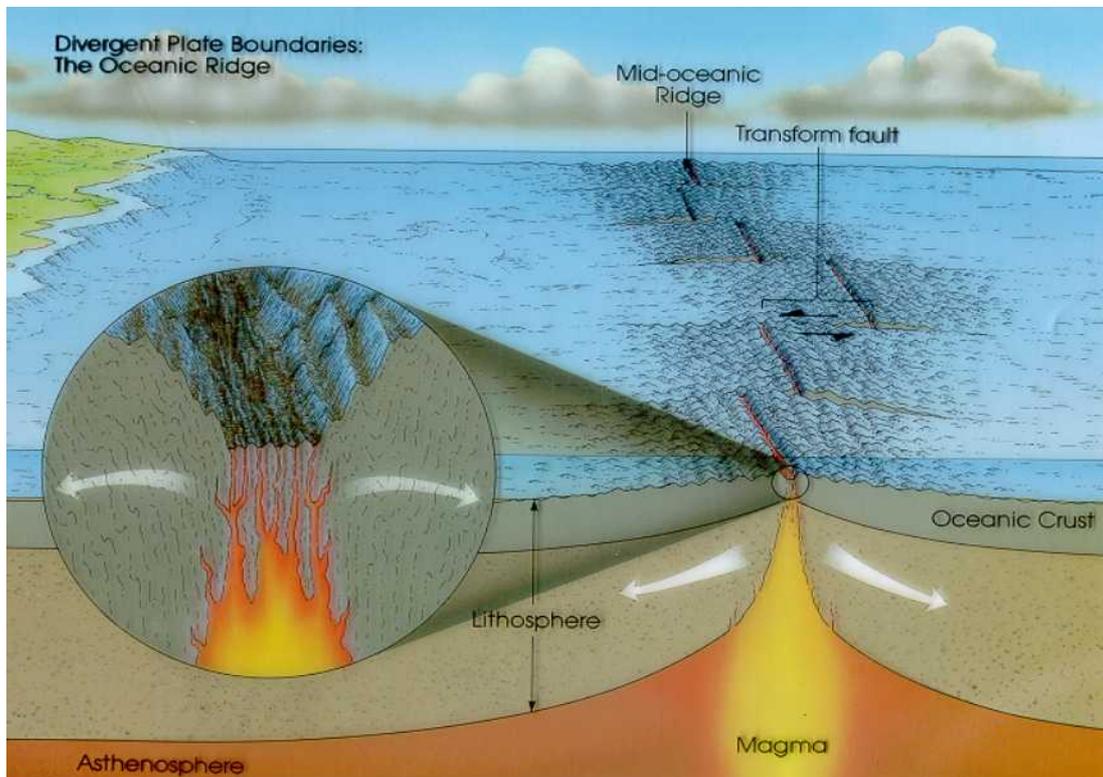
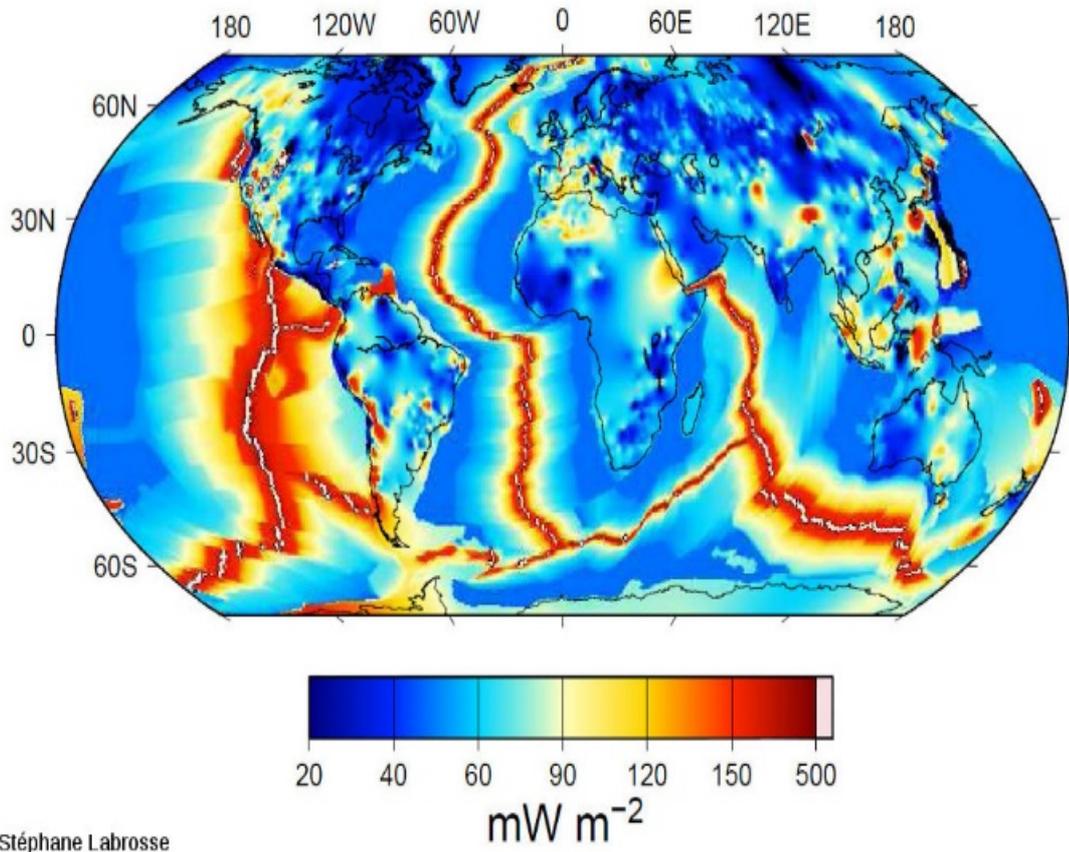


Figure 9 : Convection et fusion partielle de l'asthénosphère dans les zones de dorsales océaniques, et variations correspondantes du flux de chaleur terrestre.

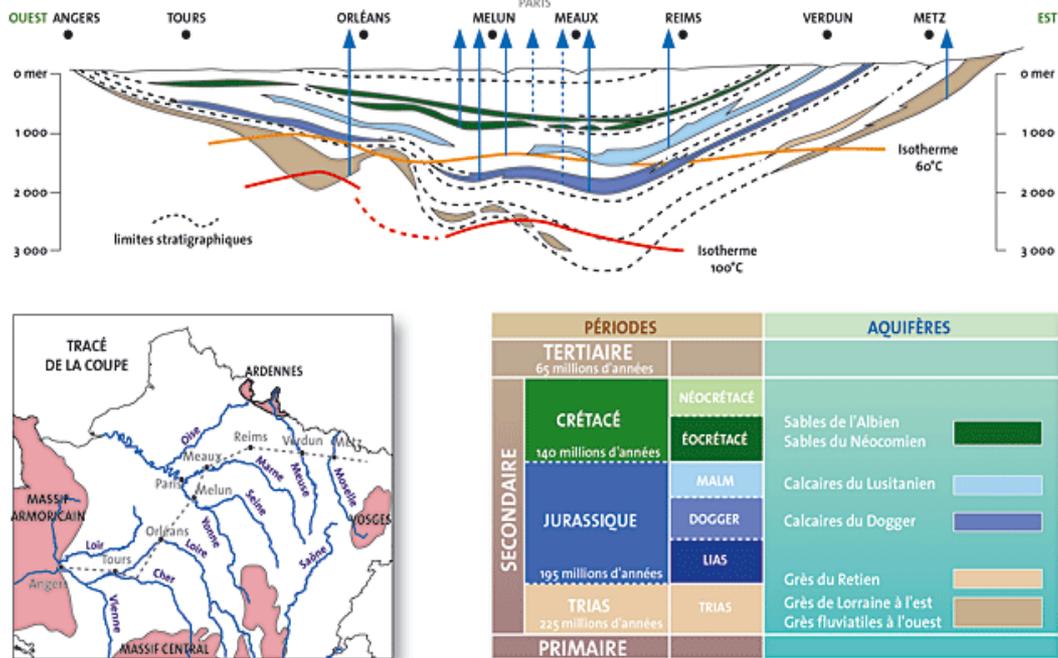




Mais l'exploitation de la géothermie ne dépend pas que du gradient permettant d'atteindre des températures intéressantes à une profondeur accessible économiquement par forage. Il faut en outre disposer d'un fluide susceptible d'échanger la chaleur avec la roche chaude. Ainsi, le travail du géologue consistera à rechercher des terrains perméables, permettant de forts débits de fluides en contact avec d'importants volumes rocheux. Ces conditions seront rencontrées dans deux types de contextes :

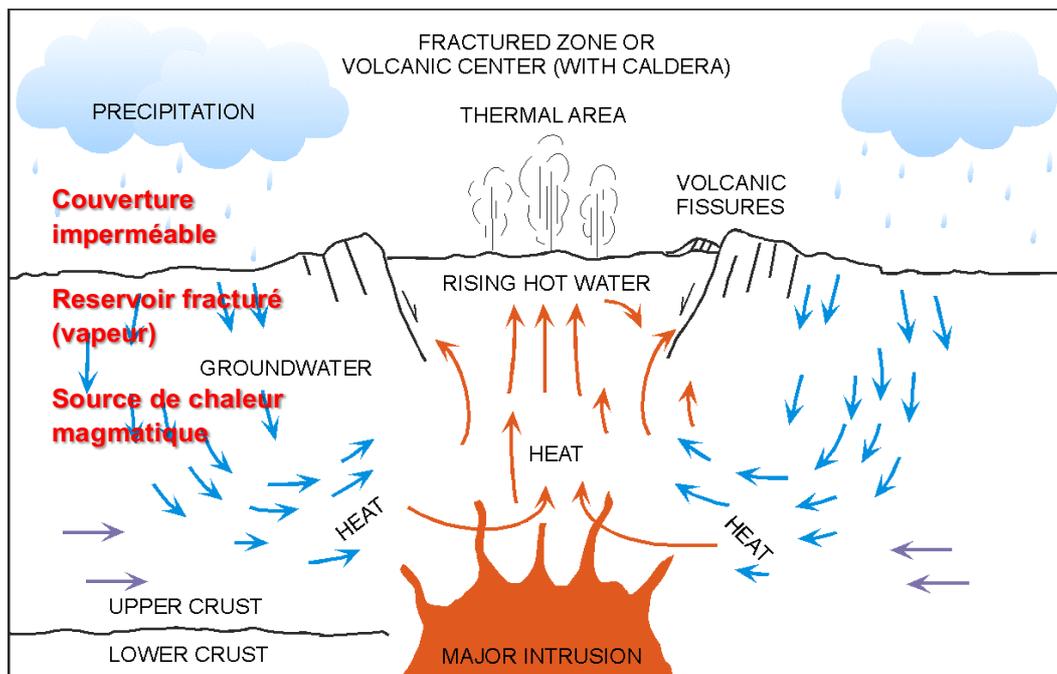
- les réservoirs sédimentaires qui présentent une porosité et une « perméabilité de formation », comme les sables, les grès, les conglomérats ou les calcaires karstiques, comme on en trouve à plusieurs niveaux dans le bassin parisien (figure 10) ;
- les zones fracturées de socles ou de terrains volcaniques dans lesquels des roches fragiles soumises à de fortes tensions permettront de développer une « perméabilité de fracture » permettant la circulation des fluides géothermaux (figure 11).

Figure 10 : Coupe géologique SW-NE à travers le bassin de Paris montrant les aquifères (réservoirs géothermiques) disponibles à diverses profondeurs et courbes isothermes établies à partir des données de forages disponibles



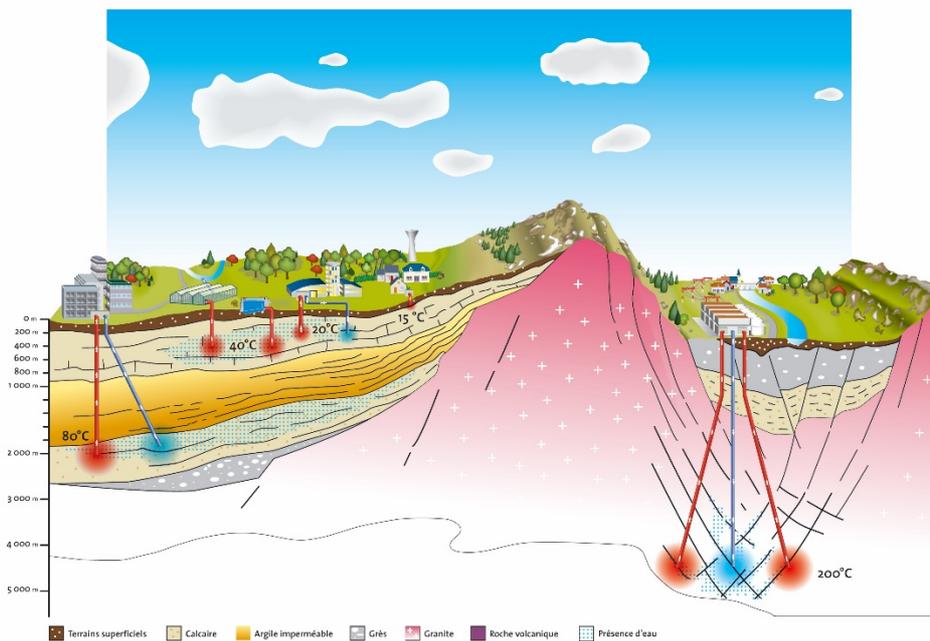
Source : BRGM

Figure 11 : Schéma géologique conceptuel d'un système géothermique de haute température



Ces dernières années se sont développés des concepts basés sur le développement de l'ingénierie géologique, avec la création d'échangeurs « man made », appelée « EGS » (pour « enhanced geothermal systems ») concernant les systèmes profonds à finalité de production électrique ou de très nombreuses solutions de subsurface (figure 12) pour les systèmes superficiels avec pompes à chaleur pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire ou la climatisation (ou rafraîchissement).

Figure 12 : Diverses options possibles de production géothermiques dans des zones à gradient normal (ici coupe schématique est-ouest à travers le bassin de Paris, les Vosges et le fossé rhénan).



Source : BRGM

Dans tous les cas, la démarche de projet en géothermie est nécessairement transdisciplinaire. Elle implique en effet l'intervention de très nombreuses disciplines et spécialités des sciences de la terre, des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines et sociales. C'est sans doute ce qui fait à la fois la difficulté que rencontre son développement, et l'intérêt qu'elle représente pour la recherche et l'ingénierie.

Pour les géosciences, on devra mobiliser les ressources suivantes :

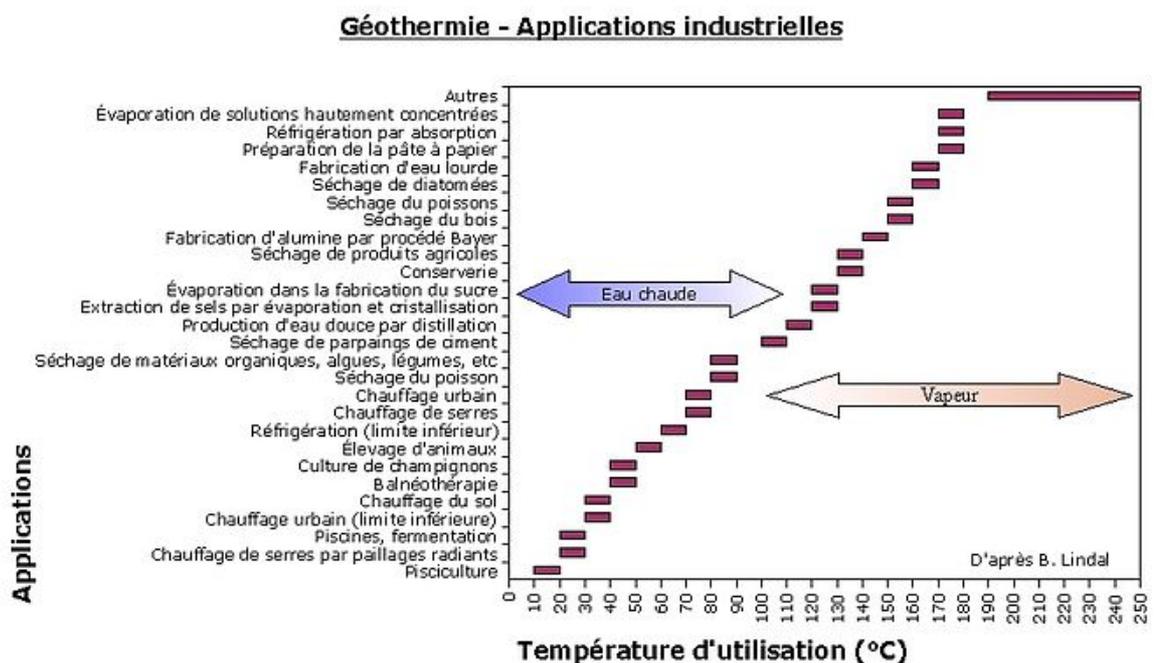
- Géologie des bassins sédimentaires d'une part ou des zones volcaniques et tectoniques d'autre part ;
- Hydrogéologie des réservoirs de bassins et des zones fracturées ;
- Géochimie des eaux, des gaz et des sols, incluant les applications des géothermomètres et des analyses isotopiques ;

- Pétrologie et minéralogie des roches magmatiques et des systèmes géothermaux, incluant géothermomètres et géobaromètres ;
- Géophysique : méthodes électriques, électromagnétiques, magnétotelluriques, gravimétriques, micro-sismiques ;
- Ingénierie de forages de gradients et de production ;
- Ingénierie d'essais de production et de réservoirs, notamment pour l'optimisation des systèmes de réinjection ;

Parmi les sciences de l'ingénieur, outre leur contribution déjà citée, les projets géothermiques feront en outre intervenir :

- La thermique, notamment pour l'optimisation de l'usage des fluides en surface, notamment à travers les systèmes d'applications « en cascade » ;

Figure 13 : Diagramme indiquant la diversité des applications industrielles possibles de la géothermie selon les niveaux de température du fluide disponible (d'après B. Lindal). Ces applications peuvent être utilisées en cascade.



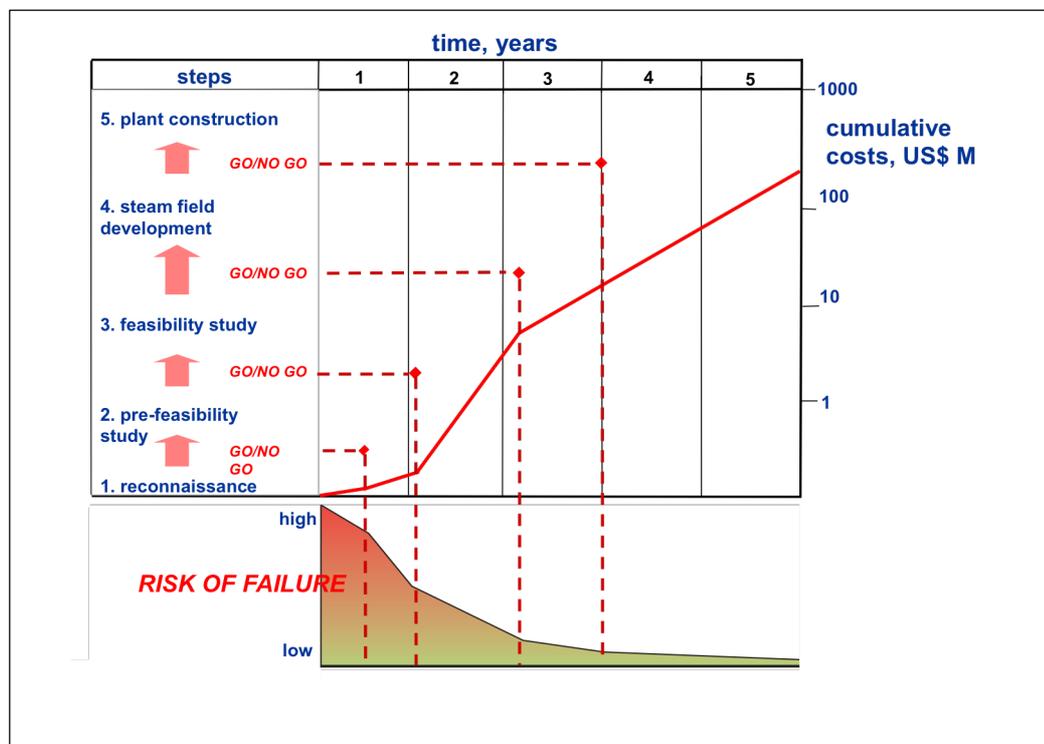
- La thermodynamique, notamment pour l'optimisation des équipements de production électrique, mais aussi dans la gestion des réservoirs ;
- De très nombreuses applications de l'électricité, qu'il s'agisse de la produire, de réguler sa production ou de son usage dans les divers systèmes y compris de basse température (pompes à chaleur notamment) ;
- Ainsi, pour les installations de géothermie dans l'habitat individuel avec pompes à chaleur, la capacité de mobilisation à un coût abordable d'ingénieurs de techniciens compétents et polyvalents (plombiers-chauffagistes-électriciens-foreurs) constitue

une des clés du développement de cette filière, qui passe par un important travail de formation.

Mais le succès des projets de géothermie, qu'ils soient de basse ou de haute température, et plus encore lorsqu'ils sont polyvalents (couplage de production électrique et de chaleur, voire d'autres usages des fluides géothermaux, balnéothérapie ou tourisme par exemple), nécessite également de fortes implications des sciences sociales :

- La sociologie sera mobilisée pour concevoir et accompagner le changement qui sera induit dans la société par la modification radicale des concepts et des habitudes des populations concernées ;
- Dans les pays du tiers monde où des ressources abondantes coïncident avec des communautés agraires ou pastorales, l'ethnologie devra être sollicitée pour comprendre les relations des populations à leur sous-sol et ses manifestations volcaniques ou hydrothermales. Le cas des Maori est exemplaire de ce point de vue ;

Figure 14 : Schéma de développement d'un projet de géothermie haute température indiquant les étapes à franchir, les risques et les coûts correspondants. L'étape critique est celle de la faisabilité qui implique des forages coûteux et à risque que les étapes antérieures visent à réduire au minimum.



- L'économie interviendra dans tous les cas de manière déterminante dans le système de décision concernant l'existence même des projets, la gestion de leur approche depuis la recherche et les études de faisabilité jusqu'au développement de la

production (fig. 14). Et dans la plupart des cas, une approche tenant compte des externalités, s'inscrivant dans une démarche de développement durable, et prenant en compte les intérêts de toutes les parties prenantes est de nature à permettre l'optimisation du projet.

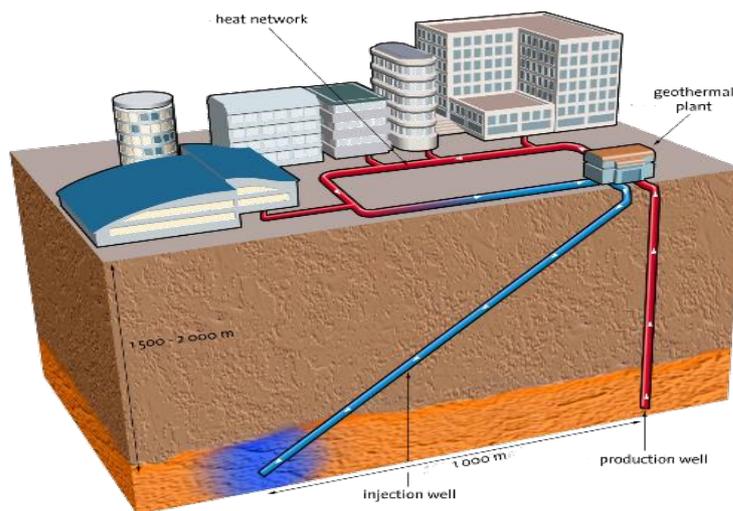
La géothermie permettrait à elle seule d'assurer le facteur 4 pour le chauffage et la production d'ECS en France

Lorsque l'on parle des énergies renouvelables, de la consommation d'énergie, de la transition énergétique, on pense le plus souvent à l'électricité d'une part, et aux carburants pour les transports d'autre part. Ainsi, les politiques énergétiques européennes ont-elles encouragé le développement des énergies renouvelables par des tarifs de rachats de l'énergie électrique à des tarifs avantageux. Par contre, un pan important des consommations d'énergie en France concerne les usages à basse température : chauffage des logements et des locaux, et production d'eau chaude sanitaire principalement. En Région Centre par exemple, la consommation du secteur résidentiel et tertiaire représente la moitié de la consommation totale, et les usages à basse température plus du tiers.

Il s'agit là d'enjeux nationaux, et on peut regretter que les politiques européennes les négligent à ce point, mais il s'agit aussi d'enjeux régionaux car les solutions et les incitations gagneraient à bénéficier de réelles politiques de transition énergétique portées par tous les niveaux de l'action publique, y compris au niveau des collectivités locales pour atteindre et diffuser jusque dans les choix individuels.

La géothermie offre ici, partout en France et en Europe, une grande diversité de solutions, depuis les opérations de chauffage urbain avec réseau de chaleur en cas d'agglomérations urbaines de bonne densité, jusqu'à des solutions individuelles. Les aquifères profonds, comme celui du Dogger (un étage du Jurassique) dans la région parisienne ou du Trias dans l'Est et le Sud du bassin, permettent par doublet d'assurer le chauffage en base de plusieurs milliers, voire dizaines de milliers d'équivalent-logements (figure 16). Un puits produit de l'ordre de 300m³/h à une température d'environ 70°C, ce qui permet, avec un retour par un puits de réinjection à 20°C d'assurer une puissance thermique de 15 MW. Certes une telle puissance dépasse celle restituée par le flux géothermal, entraînant un refroidissement progressif de la nappe. Mais celui-ci est limité et très ponctuel et les puits sont implantés de telle manière qu'aucune baisse de température ne se produise avant 30 ans (figure 15).

Figure 15 : Vue et coupe schématique d'une installation de géothermie en région parisienne (ici Meaux) avec doublet de forages et réseau de distribution de la chaleur vers diverses catégories d'usagers



On dispose souvent d'une grande variété de solutions par nappes, à divers niveaux dans les bassins, depuis le niveau municipal jusqu'au petit collectif, en ajustant la profondeur du réservoir à la dimension des installations de surface (voir figure 12). Et pour ce qui concerne l'habitat individuel, les pompes à chaleur (PAC) géothermiques permettent de mobiliser une grande variété de solutions, d'autant plus faciles et économiques à mettre en œuvre qu'elles seront conçues comme partie intégrante de la construction (figure 16). Il faut souligner à nouveau ici l'intérêt que représente la géothermie en matière de stock. Un réservoir géothermal peut produire, mais aussi stocker de la chaleur, par exemple de manière inter-saisonnière. On peut ainsi combiner avantageusement grâce à une PAC réversible chauffage l'hiver et rafraîchissement l'été. On peut également stocker les excédents thermiques d'une centrale d'incinération (figure 17) ou de capteurs solaires thermiques.

Figure 16 : Divers types de solutions disponibles pour les installations de géothermie destinées au chauffage des locaux et à la production d'eau chaude sanitaire

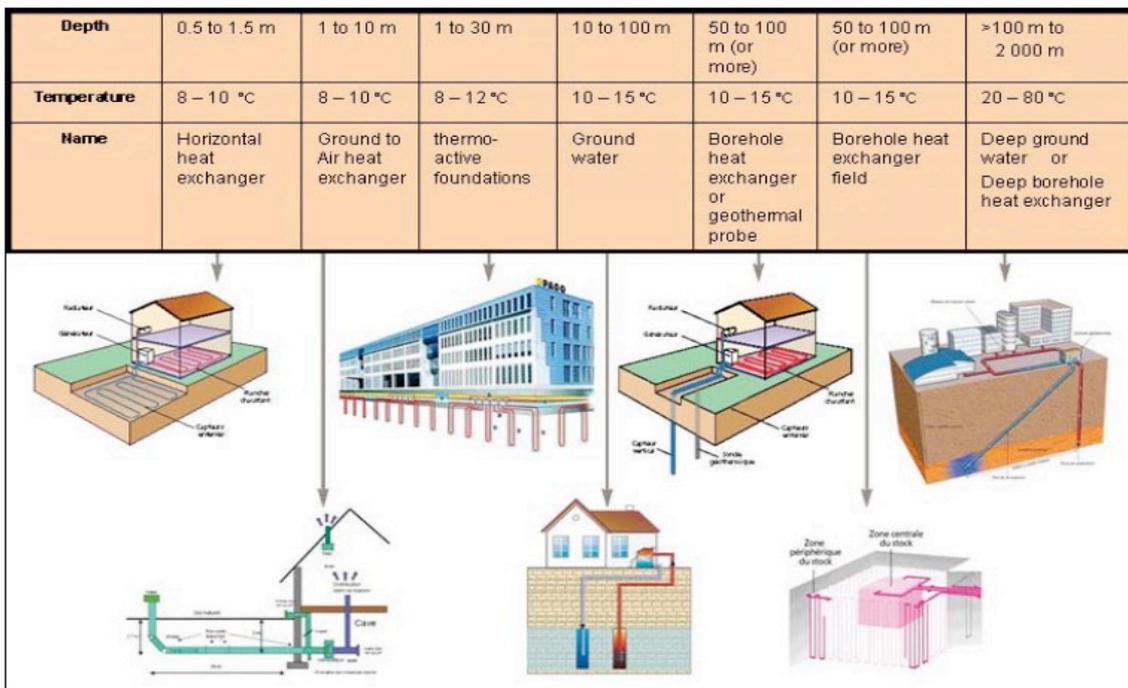
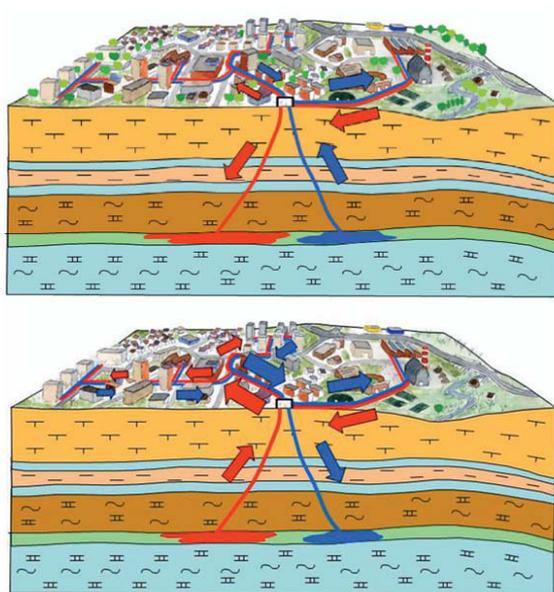


Figure 1: Main ground heat extraction systems developed in France

Figure 17 : Schéma de principe de fonctionnement d'un système géothermique de stockage inter-saisonnier (projet GEOSTOCAL, Ivry sur Seine)



Principe de fonctionnement du stockage inter-saisonnier du projet GEOSTOCAL

Architecture du réseau d'Ivry-sur-Seine de distribution de chaleur au niveau de l'opération envisagée :
 Disponibilité de l'énergie fatale au niveau du stockage géothermique envisagé.
 Cette énergie stockée en été est ensuite déstockée en hiver vers le réseau basse température (BT) qui desservira les secteurs réaménagés d'Ivry-sur-Seine.
 Si nécessaire, un appoint vapeur est apporté.
 L'énergie estivale fatale provient des usines d'incinération raccordées au réseau de chaleur de la CPCU (Compagnie Parisienne de Chauffage Urbain)

Source : BRGM

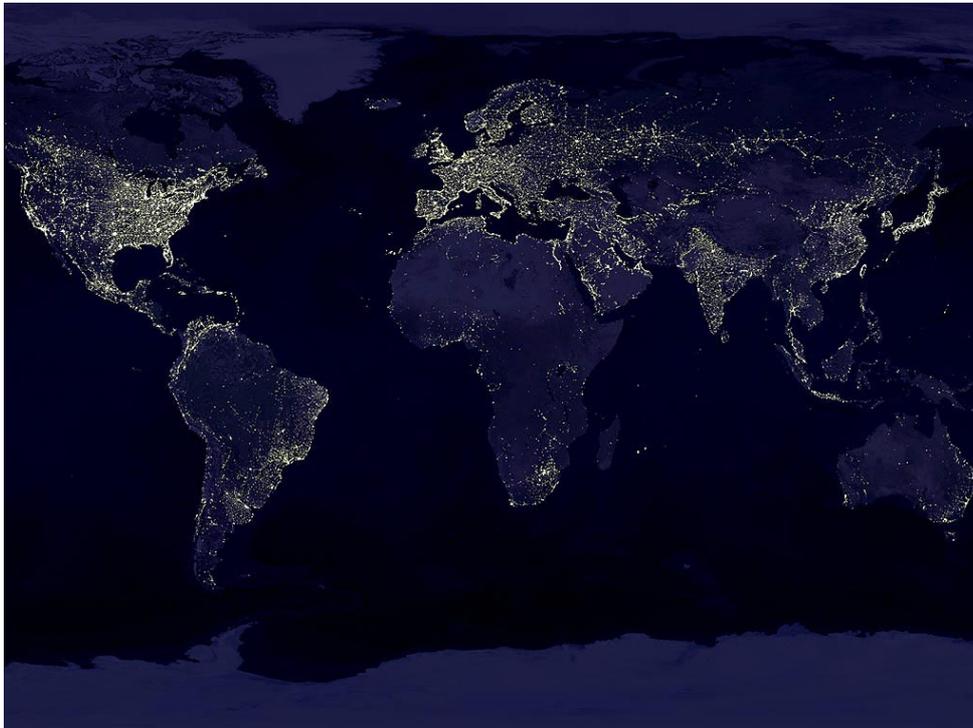
Au total, compte tenu de l'excellent rendement des PAC géothermales, la géothermie permettrait à elle seule, si elle était diffusée en France comme elle l'est en Suède ou en Suisse, d'assurer à elle seule le facteur 4 dans l'habitat et le tertiaire.

Le développement de telles solutions peut avantageusement reposer sur des études à caractère régional combinant les options géothermiques disponibles en sous-sol avec les données de consommation de surface. Ces solutions devraient être des priorités pour la transition énergétique ; cela passe par une meilleure information des populations et des maitres d'ouvrages, par des actions de formation des architectes, ingénieurs et techniciens et par des incitations appropriées. Mais surtout, dans ce domaine resté en France aux mains des ingénieurs des corps d'état et pas vraiment pris en charge par les politiques, il serait nécessaire de développer une approche par les sciences sociales pour mieux identifier les mobiles pour agir de la part des acteurs concernés et former des formateurs en conséquence.

La géothermie pourrait assurer une production énergétique renouvelable en Afrique de l'Est

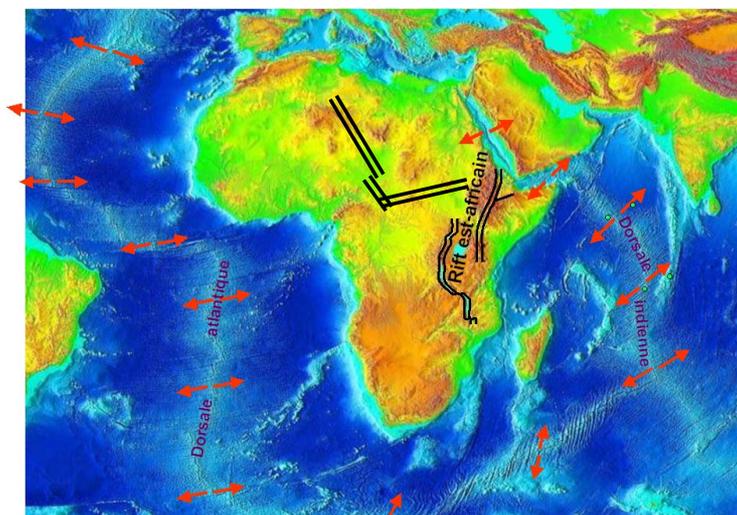
La transition énergétique n'est pas une question purement française, ni même européenne. Elle représente un enjeu global dans la mesure où l'inégalité des consommations au niveau planétaire (figure 18) s'accompagne d'une injustice des effets des perturbations climatiques.

Figure 18 : Illustration des déséquilibres entre pays du nord et du sud en matière de consommation d'énergie



Or il se fait que les ressources renouvelables sont très inégalement réparties, et que, à cet égard, les pays du sud sont éventuellement gagnants. Ce n'est peut-être pas un hasard si les technologies et les opérateurs industriels n'ont pas fait plus tôt plus d'efforts en la matière, car à la différence du pétrole, du gaz ou du charbon, les énergies renouvelables doivent être consommées à proximité de leurs sites de production, ou du moins nécessitent des réseaux électriques qui font aujourd'hui défaut. D'énormes quantités d'énergie sont dissipées aux frontières des plaques lithosphériques, qu'il s'agisse des arcs insulaires, des cordillères, bien représentées dans les pays du sud (Amérique latine, Asie du sud-est) ou des dorsales et rifts. Si les meilleures sources terrestres de production d'énergie renouvelable que constituent les rides océaniques sont encore hors de portée au plan technique et économique, le rift africain représente un cas unique de frontière de plaque émergée en expansion (figure 19). On y rencontre en effet une succession de fissures ouvertes facilitant la remontée périodique de magmas basaltiques issus d'un manteau situé à faible profondeur, de centres volcaniques souvent complexes, dans lesquels les magmas se sont différenciés offrant une variété de produits dont les calderas qui constituent des objectifs géothermiques intéressants (figures 20 et 21). En outre, la structure même du rift, et celle de ces unités volcaniques, facilite le développement d'excellentes perméabilités de fractures régulièrement réactivées par la micro-sismicité caractérisant ces zones actives. Les failles bordières des hauts plateaux bien arrosés garantissent une circulation des fluides de recharge des réservoirs géothermaux par ailleurs scellés grâce aux dépôts et altérations hydrothermales elles même (phénomène de « self sealing ». Néanmoins, des fuites de ces fluides sous forme de fumeroles, de jets de vapeur ou de sources chaudes, permettent souvent d'identifier la présence des gisements profonds et peuvent faciliter des exploitations superficielles, qu'elles soient traditionnelles ou modernes (figures 22 et 23).

Figure 19 : Carte topographique indiquant la position du rift est-africain relativement aux dorsales océaniques avoisinantes.



Figures 20 et 21 : Failles normales et fissures actives dans l'axe du rift au Kenya. La caldera de Silali, avec zones fumeroliennes le long des parois et volcanisme récent (cônes de scories) post-caldera



Source : Photo Jacques Varet (2014)

Figures 22 et 23 : Fissure ouverte émissive de vapeur à Garrabbayis (Rep. De Djibouti), captée pour produire de l'eau par condensation ; collecte par de fillettes de l'eau condensée le long des parois de la caldera de Alutu, Ethiopie.



Dans ce cas, des travaux d'exploration – géologiques, hydrogéologiques, géochimiques, et géophysiques doivent être menés pour identifier les composants du système géothermal (voir figure 11) :

- La source de chaleur magmatique, dont on précisera la température, l'extension et la profondeur ;
- Le réservoir et sa recharge qui pourront être tracés à l'aide des données tectoniques et structurales, et le fluide qu'il contient dont la géochimie permettra de préciser la température et la composition ;

- La couverture assurant l'étanchéité du gisement (situé à une profondeur de 1.000 à 3.000 mètres), et les fuites latérales permettant des exploitations superficielles.

Ces travaux seront menés par étapes successivement plus coûteuses et permettant de quantifier la ressource exploitable (avec des unités qui peuvent varier de quelques centaines de kWe à quelques milliers de MWe), et de proportionner les dépenses aux objectifs du développement, qui dans tous les cas sera progressif. C'est en effet un des avantages de la géothermie dans ces contextes que de permettre un développement modulaire des exploitations. Au stade du développement, des tranches successives peuvent être ajoutées par forage de nouveaux puits, répondant ainsi au développement progressif des besoins locaux. L'objectif du processus est principalement de minimiser les risques de forages, la phase la plus coûteuse et la plus aléatoire, sur laquelle bute souvent le développement des projets géothermiques.

Seuls deux pays développés ont réellement misé sur la géothermie : l'Islande et la Nouvelle-Zélande :

- > La totalité de la consommation électrique et thermique y est assurée par les énergies renouvelables (géothermie et hydro), et le développement de la production est seulement limité par le caractère insulaire de ces pays ;
- > On y compte de nombreuses unités de production électrique et souvent de chaleur combinée (chauffage, chaleur industrielle), y compris à usage export (aluminium en Islande, pâte à papier et lait en poudre en Nouvelle-Zélande)
- > L'implication des communautés locales dans le développement est remarquable en Nouvelle-Zélande, où les trusts Maori possèdent 4 centrales géothermiques.
- > On trouve également de nombreux exemples d'initiatives locales en Islande : serriculture, séchage du poisson, tourisme et productions cosmétiques dérivées du célèbre « Blue Lagoon », comme aussi en France (pépinières et plantes ornementales, production d'alevins et de caviar ; J.Varet, 2014), et en Italie (production fromagère en Toscane p.ex.).

En Afrique de l'Est, l'ensemble de la vallée du rift recèle un potentiel géothermique remarquable et encore peu utilisé. Au nord, la dépression de l'Afar, qui s'étend sur 3 pays (Érythrée, Éthiopie et Djibouti) se caractérise par une géologie de type « dorsale océanique », exceptionnellement émergée comme en Islande. En effet, la vallée du rift Éthiopien vient y buter contre les rifts de la mer Rouge et du golfe d'Aden qui s'y prolongent à l'intérieur du continent africain. L'Afar est sans doute la région la plus propice au développement de la géothermie, malgré son climat très aride. La vallée du rift Éthiopien recèle aussi de nombreux sites favorables, notamment à l'endroit de vastes calderas, mais le développement de la géothermie en Éthiopie est concurrencé par celui de l'hydraulique (équipement du

Nil Bleu) auquel le gouvernement de l'Etat Fédéral a donné la priorité ces dernières années. La vallée du rift se divise en deux branches au sud de l'Ethiopie, avec la branche Est où domine l'activité volcanique (Kenya, Tanzanie) et la branche Ouest à dominante tectonique (Ouganda, RDC, Rwanda, Burundi...). Le tableau 1 récapitule le potentiel géothermique de la région.

Tableau 1 : Potentiel géothermique des principaux pays du rift Est-Africain

Pays	Potentiel (MWe)	Existant (MWe)	Prévu 2050 (MWe)	Prévu 2100 (MWe)
Kenya	15.000	450	5.000	10.000
Ethiopie	20.000	10	1.000	10.000
Djibouti	2.000		50	200
Erythrée	2.000		20	
Tanzanie	5.000		100	
Rwanda	700		300	
Uganda	450			

C'est aujourd'hui au Kenya que s'observe le développement le plus remarquable. Outre le site d'Olkaria (figure 24) qui atteint actuellement 600MWe et où de nouvelles tranches sont ajoutées chaque année, plus de 14 sites favorables au développement de centrales géothermiques de puissance ont été identifiés dans la Rift Valley Kenyane (figure 25 et tableau 2), totalisant une puissance potentielle de 15.000MW.

Figure 24 : Vue aérienne de l'une des unités (2x70MWe) de KenGen (Kenya) à Olkaria: chaque centrale connecte un réseau de vapeur à partir de puits forés à 2500-3000 mètres de profondeur



L'objectif affiché du gouvernement est d'atteindre 5.000MWe en 2050 et 10.000MWe en 2100. Ce challenge repose notamment sur l'existence de deux entreprises publiques : Kengen et GDC qui emploient chacune 700 personnes en géothermie. Cela nécessite un gros effort de formation et de recherche, et la construction d'un centre d'excellence projetée pour soutenir le développement régional à partir du Kenya.

Figure 25 : Carte schématique des principaux sites géothermiques identifiés dans la vallée du rift kenyan.

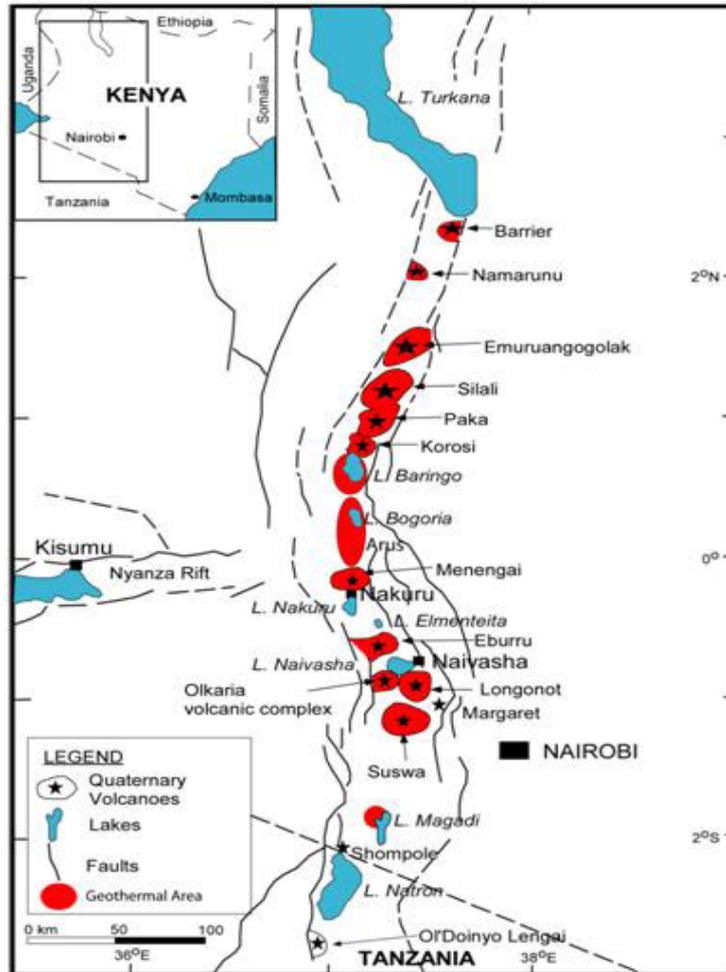
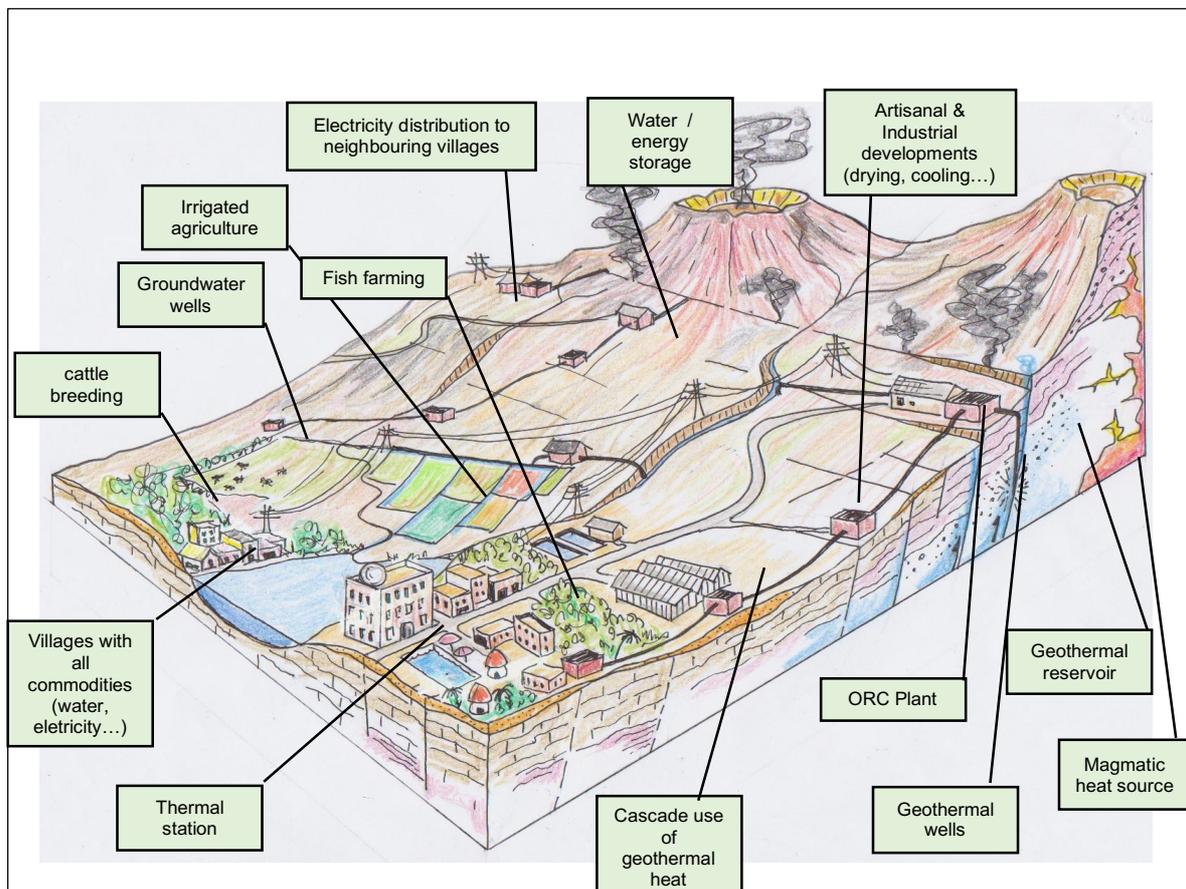


Tableau 2 : Les sites géothermiques identifiés au Kenya

North Rift	<u>Nyanza rift</u>	Central Rift	South Rift
<u>Lake Baringo</u>	<u>Oma hills</u>	<u>Menengai</u>	<u>Olkaria</u>
<u>Korosi</u>		<u>Eburru-Badlands</u>	<u>Longonot</u>
<u>Paka</u>		<u>Arus-Bogoria</u>	<u>Suswa</u>
<u>Silali</u>			<u>Lake Magadi</u>
<u>Emuruangogolak</u>			
<u>Namarunu</u>			
<u>Barrier</u>			

A côté des enjeux techniques, environnementaux et financiers, il faut souligner que la géothermie représente aussi un champ de recherche pour les sciences humaines et sociales. L'approche actuelle – soutenue par les banques de développement comme la Banque Mondiale repose sur la démarche classique découlant des études d'impact environnemental et social, qui entraîne la mise en place de mécanismes de compensation pour faciliter l'acceptation par les populations locales. Comme le montre Susan Onyango, il s'agit là d'une approche insuffisante au regard du développement durable. L'idée défendue par notre entreprise est de mettre en place une forme de développement qui mobilise d'abord les communautés locales. En effet celles-ci sont généralement concernées par les émergences thermales, qui sont utilisées ou même considérées pour leurs vertus médicinales, voire l'objet de croyances religieuses. Une nouvelle approche consiste à promouvoir un concept : répondant d'abord aux besoins sociaux par un usage en cascade de l'énergie et de l'eau à la faveur de petites opérations sur sites. Le concept de « Geothermal Village » (Fig. 26) découle de cette démarche qui peut s'inscrire dans une perspective de développement de plus grande ampleur duquel les communautés locales n'auront pas été éliminées d'office.

Figure 26 : « Geothermal Village » concept : répondre d'abord aux besoins sociaux par un usage en cascade de l'énergie et de l'eau. Conçu par Géo2G déployé avec GDC Kenya et Eleterre de France



Conclusion

L'exemple de la géothermie, sous ses divers aspects traités ici à travers deux exemples, tant français pour répondre aux besoins thermiques de l'habitat, que kenyan pour répondre aux besoins énergétiques d'un pays en développement, montre que des efforts restent à faire pour que cette énergie trouve la place qui devrait être la sienne dans la transition énergétique. Si des avancées restent à faire au niveau des approches géologiques et technologiques, c'est certainement à travers des approches en sciences humaines et sociales que les difficultés rencontrées, voire les situations de blocages possibles à l'avenir, doivent être résolues par la recherche, d'une part, et la formation, notamment la formation des formateurs, d'autre part.

Malgré les différences apparentes aux plans géologiques et technologiques entre les réalisations de chauffage collectif en région parisienne et les installations de production électriques kenyanes, il apparaît qu'une meilleure convergence des approches économiques et sociales pourrait se révéler productive. Une démarche précoce basée sur la connaissance des besoins des communautés concernées, notamment révélée par les genres (les femmes sont généralement en charge des tâches d'approvisionnement en eau et en énergie, voir S. Onyango, ce volume), permettrait de concevoir les projets en sorte qu'ils répondent aux besoins locaux avant même de servir ceux du réseau servant les populations urbaines éloignées.

Références bibliographiques

- BRGM-ADEME (2004), *La géothermie*. Brochure, 48p.
- BRGM-ADEME (2011), *La géothermie et les réseaux de chaleur - Guide du maître d'ouvrage*, 68p.
- CHADASAYGAS (2014, 2015), *Rapports d'activité*, Riom.
- ENTHINGH D.J, EASWARAN E., McLARTY L. (1994), "Geothermal Electric Systems for remote Power", *Geothermal Resources Council Bull.* 23, n°10.
- GALANIS N., CAYER E., ROY P., DENIS E.S, DESILETS M. (2009), "Electricity generation from low temperature sources", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2(2), 55-67, 1735-3645.
- GOGUEL J., VARET J. (2010) "Geothermie" *Encyclopedia Universalis*.
- LUND J.W, BOYD T. (1999), "Small geothermal power project examples Geo-Heat Center.", *Geo-Heat Center Oregon. Bull.*, 26 p.
- MARIITA N.O (2002), "The Socio-economic and Environmental Impact of Geothermal Energy on the Rural Poor in Kenya", *Report AFREPREN/FWD*, 47p.
- MARIITA N.O (2010), "An Update on Applications to Direct-uses of Geothermal Energy Development in Kenya", *Proc. World Geothermal Congress*, 5 p.

OMENDA P., (1989, 1991), *Geothermal Exploration in Kenya*, *UNU Reports*, Reykjavick.

ONYANGO S., VARET J. (2014), "For a new social gender-based approach to geothermal development", *Proceedings 5th African Rift Geothermal Conference, Arusha, Tanzania, 29-31 October*.

RAFFERTY K. (2000), "Geothermal power generation; a prime on low-temperature, small-scale applications", *Geo-Heat Center, Oregon, 12p*.

VARET J. (1982), *Géothermie basse énergie: usage direct de la chaleur*. Coll. Les Objectifs scientifiques de demain. Ed. Masson Paris. 1 vol, 201 p.

VARET J. (1984), "Feasibility study and the implementation of the Fang ORC Plant (Thailand) for EGAT, the electric authority of Thailand", *BRM/CFG Report*.

VARET J. (2012), "Risorse geotermiche e loro sviluppo in aree di bassa e media temperatura: esempi della Francia", *Atti del convegno il Calore della Terra, Piancastagnano, (Siena, Italy), 6p*.

VARET J. (2013), « La géothermie en milieu rural », *Revue POUR*, Paris, 11p.

VARET J. (2014), *La géothermie en Afrique de l'Est*. *Encyclopédie du Développement Durable*, <http://encyclopedie-dd.org/varet-jacques.html>

VARET J., OMENDA P., ACHIENG J., ONYANGO S. (2014), "The Geothermal Village Concept: A new approach to geothermal development in rural Africa", *Proceedings 5th African Rift geothermal Conference, Arusha, Tanzania, 29-31 October*.