



Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

# La géothermie

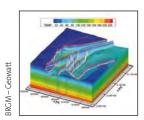
Quelles technologies pour quels usages?

2<sup>e</sup> édition

Collection "Les enjeux des Géosciences"

## Sommaire

Préface		4
PARTIE I	LA GÉOTHERMIE, UNE ÉNERGIE EXEMPLAIRE	5
ntroduction	Une énergie du développement durable	6
	Partout présente pour des usages variés	
	Propre et durable	
	Régulière et disponible 24 h sur 24	
	Économique et innovante	7
Chapitre I.1	La chaleur de la Terre	8
	Le gradient géothermal	
	L'origine de la chaleur	
	De la chaleur aux frontières  De la chaleur dans le proche sous-sol	
Chapitre I.2	·	
Liiapitre i.2	La géothermie pour les usages domestiques et tertiaires  Le boom des pompes à chaleur	
	Les capteurs horizontaux	
	Les sondes géothermiques verticales	12
	Les champs de sondes	
	Les fondations thermoactives Les puits canadiens ou provençaux	
	Les pompes à chaleur géothermiques sur aquifères	
	Le géocooling pour refroidir les bâtiments	15
Chapitre I.3	L'usage direct de la chaleur	16
	Capter le fluide géothermal par forage	
	Pomper l'eau	
	Récupérer la chaleur Réinjecter l'eau	
	Le concept de doublet géothermique	19
	Des traitements anti-corrosion	
	Bien gérer les réservoirs	
Chapitre I.4	Produire de l'électricité	
	Près de 10 000 MW dans le monde  De l'électricité en zone active	
	De l'électricité à partir des systèmes géothermiques stimulés (EGS)	
Chapitre I.5	Des applications très diverses	
chapitre 1.5	Du bain de boue à la turbine	
	Géothermie et agriculture	_
	Géothermie et pisciculture	26
	Géothermie et industrie Géothermie et loisirs	
	Géothermie et l'oisirs  Géothermie et "snow melting"	
	Géothermie et dessalement	28

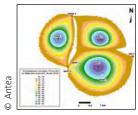


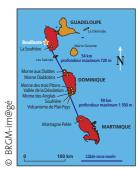


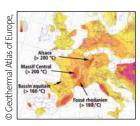


Chapitre I.6	L'avenir de la géothermie	29
	Un contexte politique international favorable	
	Croissance de la production de chaleur par géothermie	
	Une production d'électricité par géothermie en légère hausse	
	Les perspectives technologiques	3
PARTIE II	LA GÉOTHERMIE EN FRANCE	35
Chapitre II.1	Le contexte de la géothermie en France	36
	Répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement	36
	Les acteurs	
	Les aspects réglementaires	
	Les aides et les dispositifs financiers	-
Chapitre II.2	Les usages domestiques et tertiaires	43
	La croissance du marché des pompes à chaleur	
	QualiPAC, la référence qualité	
	La démarche QualiForage pour les sondes verticales  La plate-forme expérimentale pour les pompes à chaleur	
	Inventorier les aquifères superficiels	44
	Quelques exemples de réalisations	46
Chapitre II.3	Les réseaux de chaleur et autres usages directs	48
•	Des ressources importantes	
	Une filière qui repart	
	30 000 nouveaux logements chauffés par géothermie en 2013 en lle-de-France	
	Lo triplet de Suguen Prie	
	Le triplet de Sucy-en-Brie Le Bassin aquitain	_
	Les autres ressources : Alsace, Limagne, Bresse, Sud-Est, Hainaut	
	Un centre technique d'appui pour la géothermie	
Chapitre II.4	La production d'électricité	55
	La géothermie dans les départements d'outre-mer	55
	De l'électricité géothermique en Guadeloupe	
	Coopération régionale dans la Caraïbe à partir de la Dominique	
	Reconnaissance géothermique à La Réunion L'électricité du futur	57
	À Soultz-sous-Forêts, le plus grand projet EGS dans le monde	50
Duface Coll		
	de l'ADEME et du BRGM	
Glossaire		









### Partie I

# La géothermie, une énergie exemplaire



La géothermie, formidable réservoir de chaleur installé sous nos pieds, offre une énergie renouvelable pour le chauffage et le refroidissement des habitations, la climatisation des serres agricoles, les process industriels, l'alimentation des réseaux de chaleur, la production d'électricité...

La chaleur de la Terre

La géothermie pour les usages domestiques et le tertiaire

L'usage direct de la chaleur

Produire de l'électricité

Des applications très diverses

L'avenir de la géothermie

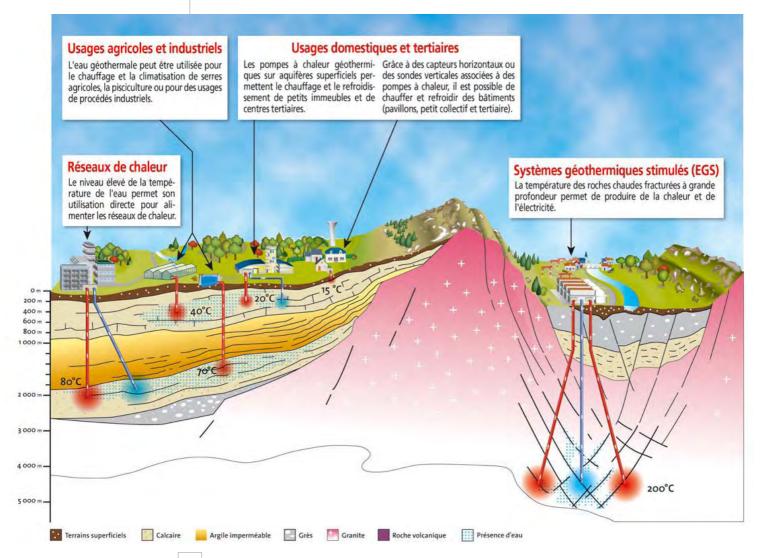
# Une énergie du développement durable

Introduction

La géothermie est porteuse d'un potentiel immense pour notre développement responsable et durable. Elle participe à notre indépendance énergétique pour les besoins de chauffage et de refroidissement du secteur domestique et tertiaire, l'alimentation des réseaux de chaleur et la production d'électricité.

# Partout présente pour des usages variés

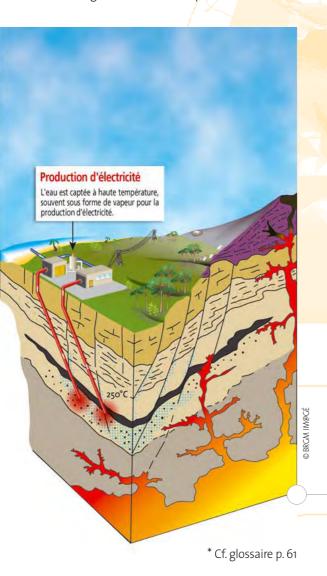
À la différence des énergies fossiles, concentrées en quelques sites particuliers de la croûte terrestre, la géothermie est présente dans tous les sous-sols et sous tous les climats. Ses usages sont variés, car elle présente une large gamme de températures et de profondeurs. À faible profondeur, en tout point du globe, associée à une pompe à chaleur, elle peut servir au chauffage et au refroidissement des habitations. Plus en



profondeur et selon la structure des formations géologiques ou la composition des roches, cette énergie sera plus ou moins facile à extraire avec des technologies maîtrisées, permettant d'autres usages comme la production d'électricité.

#### **Propre et durable**

La géothermie produit peu de rejets, c'est une énergie propre qui ne participe pas à la dégradation du climat et qui ne nécessite pas de transport ni de stockage de substances polluantes ou dangereuses. Elle est inépuisable à l'échelle humaine. En profondeur, la Terre dispose d'un stock global de chaleur énorme et à sa surface, le sol est réchauffé par le rayonnement solaire et la migration des eaux de pluie.



#### Locale et discrète

Par nature, la géothermie est une énergie locale, à valoriser sur place, sous forme de production d'électricité ou de chaleur. Les installations requises sont en général compactes avec très peu d'emprise au sol. Cette ressource peut être facilement adaptée aux besoins en énergie d'un particulier, d'une entreprise ou d'une collectivité.

### Régulière et disponible 24 h sur 24

La géothermie n'est pas tributaire des conditions climatiques, comme le sont l'énergie solaire ou l'énergie éolienne. Elle ne dépend que des caractéristiques intrinsèques du sous-sol (gradient géothermique, perméabilité\* des roches...), une constance qui assure une grande régularité dans sa mise en œuvre. Ainsi, le taux de disponibilité des centrales géothermiques électriques est de 90 % en moyenne et peut atteindre 100 % pour les réseaux de chaleur et les pompes à chaleur géothermiques.

### Économique et innovante

Avec un prix de revient réel compétitif et un coût d'exploitation faible, la géothermie est l'une des énergies renouvelables les plus rentables. Elle participe à l'indépendance énergétique pour la production d'électricité, le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, ou le refroidissement. Elle est également innovante. En effet, différentes technologies sont à l'étude, comme les systèmes géothermiques stimulés (EGS) qui consistent à stimuler artificiellement un gisement géothermique pour produire de la chaleur ou de l'électricité à l'échelle industrielle, ou encore les systèmes binaires qui permettent désormais la production d'électricité à partir de ressources à relativement basse température (aux alentours de 100 °C).

#### LA GÉOTHERMIE EST DIVERSIFIÉE :

les utilisations de la géothermie varient en fonction de la profondeur. Elles sont très nombreuses : chauffage urbain collectif par réseau de chaleur, chauffage de logements individuels, de piscines, de serres, usages industriels, chauffage par pompe à chaleur, production d'électricité...

## Géothermie, nom d'origine grecque:

"Gê" qui veut dire Terre et "Thermê" qui signifie chaleur.

La géothermie est l'énergie thermique contenue dans la Terre et, par extension, ce mot désigne aussi l'ensemble des procédés qui permettent l'extraction et la valorisation industrielle de cette chaleur interne.

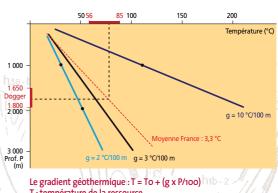
# La chaleur de la Terre

Chapitre I.1

Ce n'est pas sans raison que les anciens ont placé l'enfer et son feu purificateur au centre de notre planète. Sous nos pieds, la Terre est chaude, et même de plus en plus chaude à mesure que l'on s'enfonce dans ses entrailles.

### Le gradient géothermal

Expérimenté concrètement par des générations de mineurs de fond, la hausse de température liée à l'augmentation de la profondeur est appelée "gradient géothermal". Il augmente en moyenne de 3,3 °C par 100 mètres. Le flux d'énergie thermique à l'origine de ce gradient est de l'ordre de 60 milliwatt\* par m² (mW/m²). Mais ces valeurs peuvent être nettement supérieures dans certaines zones instables du globe, et même varier de façon importante dans les zones continentales sta-



T: température de la ressource

To: température annuelle moyenne locale (environ 12 °C) g: gradient géothermique

#### La structure interne du globe

On distingue trois enveloppes principales dans la structure du globe. Au centre, sur un rayon de 3 470 km, un alliage de fer et de nickel, solide au cœur et liquide autour, forme le "noyau", qui représente

seulement 16 % du volume total mais 67 % de la masse terrestre.

Il est entouré du "manteau" sur une épaisseur de 2 900 km. Riche en silicate de fer et magnésium, le manteau représente plus de 80 % du volume du globe. Enfin, vient l'écorce ou "croûte", enveloppe moins dense dont l'épaisseur varie grandement, puisqu'elle atteint entre 30 et 70 km dans les zones continentales pour seulement 20 km sous les océans, et seulement quelques

kilomètres au niveau des dorsales et

des rifts. L'écorce et la partie supérieure du manteau constituent la lithosphère. Cet ensemble rigide,

divisé en plusieurs plaques, flotte sur une couche inférieure du manteau : l'asthénosphère.

bles. Ainsi, le gradient géothermal est en moyenne de 3,3 °C en France, et varie de 10°C/100 m dans le nord de l'Alsace à seulement 2°C/100 m au pied des Pyrénées.

### L'origine de la chaleur

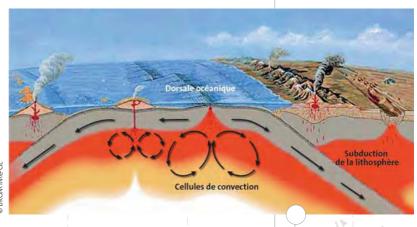
Contrairement à une idée largement répandue, l'essentiel de la chaleur dégagée par notre globe n'a pas pour principal responsable le refroidissement de son noyau, les roches intermédiaires étant de très mauvais conducteurs de chaleur.

On considère en fait, qu'il existe deux phénomènes principaux qui expliquent l'origine de la chaleur rencontrée dans la croûte terrestre : la désintégration des éléments radioactifs présents dans les roches et – dans une beaucoup plus faible mesure – le refroidissement correspondant à la dissipation de l'énergie dite primitive accumulée lors de la formation de la Terre.

On estime que la désintégration des éléments radioactifs présents dans la croûte terrestre – uranium, thorium, potassium, etc. – représente à elle seule plus de 90 % de l'énergie dissipée. La chaleur émise par la fission varie avec la composition chimique des roches : elle est environ trois fois plus élevée, par exemple, pour les granites que pour les basaltes. Elle varie aussi selon l'âge des roches, raison pour laquelle les gradients géothermiques sont plus élevés dans les plates-formes jeunes, comme en France et en Europe du Sud, que dans les socles anciens, comme en Scandinavie.

#### De la chaleur aux frontières

Dans certains lieux, le flux de chaleur est plus élevé qu'ailleurs. Ce phénomène s'explique : le magma est parvenu à remonter vers la surface, en réchauffant au passage les roches qui l'entourent. La lithosphère (l'écorce et la couche supérieure du manteau) est fragile (cassante) et est loin d'être une surface homogène. Elle est constituée de douze plaques principales (et plusieurs autres petites) qui flottent sur une couche plus fluide, l'asthénosphère, dotée de mou-

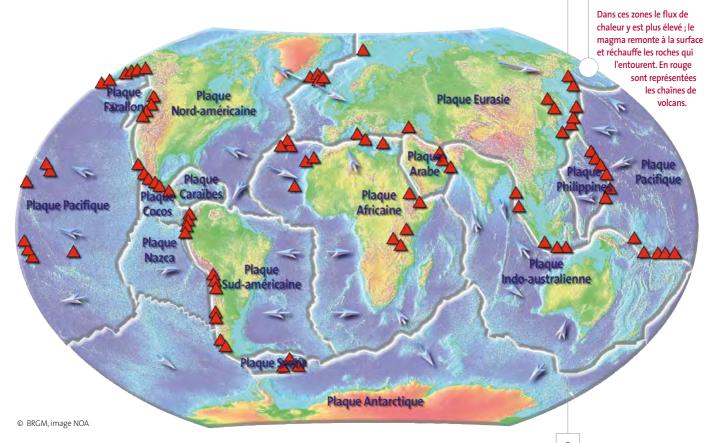


vements de convection lents et réguliers. C'est essentiellement à la frontière de ces plaques – et plus généralement dans les zones fragiles de l'écorce – que le magma peut se glisser et remonter, donnant naissance aux intrusions plutoniques et aux volcans. Dans ce cas précis, la chaleur se dissipe essentiellement par convection ; ce transfert d'énergie est beaucoup plus efficace. Les gradients peuvent atteindre 30 °C par 100 m.

LE MOUVEMENT DES PLAQUES LITHOSPHÉRIQUES :

zone d'expansion le long d'une dorsale océanique (au centre), zones de subduction avec création d'une cordillère (à droite) ou d'un arc insulaire (à gauche). Les zones de rift continental et de point chaud océanique sont également figurées.

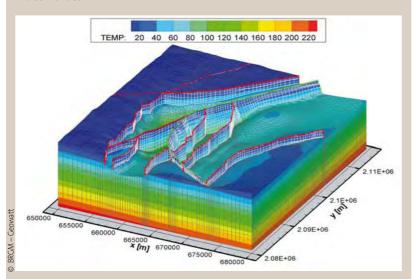
CARTE DES FRONTIÈRES ACTIVES DE PLAQUES LITHOSPHÉRIQUES.



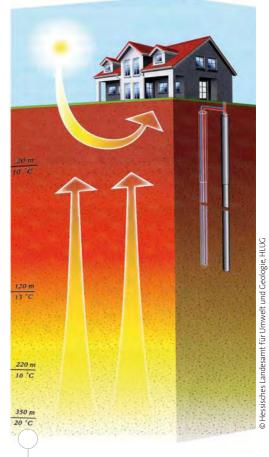
#### Géosciences et géothermie

La géothermie fait appel à de nombreux savoir-faire géoscientifques en matière de recherche et développement qui s'appuient sur des équipes pluridisciplinaires dont les principales compétences sont :

- la réalisation de synthèses pluridisciplinaires pour caractériser une ressource géothermale dans une région donnée ;
- le suivi géologique des cuttings, carottes, diagraphies de forages d'exploration ou de production géothermique ;
- le suivi géochimique des fluides (eau, gaz) sur forages et les analyses chimiques et isotopiques des eaux thermales et des gaz dans les sols ;
- la caractérisation, l'analyse, l'interprétation et la modélisation de la fracturation en domaine cristallin pour les systèmes géothermiques stimulés EGS;
- l'exploration géophysique des ressources haute-énergie par différentes méthodes géophysiques (magnétotellurie, gravimétrie, magnétisme sol et aéroporté, sismique côtière, sismique large bande) pour réaliser l'imagerie 3D de champs géothermiques;
- la surveillance des sites géothermiques par des méthodes géophysiques (données sismologiques, gravimétriques, géodésiques et électriques);
- le développement d'outils de calcul et de méthodologies pour la modélisation numérique des écoulements et des transferts souterrains ;
- la caractérisation du comportement et des impacts des systèmes exploitant les ressources des aquifères profonds ;
- les modélisations thermo-hydromécaniques de stimulations hydrauliques pour les systèmes EGS;
- l'étude géochimique des processus d'interaction eau-roche-gaz qui ont lieu dans les réservoirs géothermiques ;
- la réalisation de tests de traçage utilisant des traceurs chimiques pour évaluer l'état des connexions hydrauliques entre forages ainsi que pour estimer la capacité des réservoirs étudiés et les vitesses de circulation des fluides.



Calcul du potentiel géothermique de la Limagne (France) en simulant la température du sous-sol par la méthode des éléments finis.



#### LA CHALEUR DU PROCHE SOUS-SOL

Le rayonnement solaire et les conditions climatiques ont une influence sur la température terrestre des premiers mètres du sous-sol. Au-delà, l'énergie géothermale provient de la chaleur stockée depuis des millions d'années dans l'écorce terrestre. La quantité moyenne d'énergie des roches de la croûte terrestre par km³ représente environ 15 millions de tep.

# De la chaleur dans le proche sous-sol

À la très proche surface de la Terre, à quelques mètres de profondeur, l'énergie du sol provient pour l'essentiel du rayonnement solaire et de la migration des eaux de pluie dans le sol. C'est cette énergie inépuisable et permanente que récupèrent les pompes à chaleur géothermales sur capteurs horizontaux et verticaux (appelés aussi sondes verticales géothermiques) ou encore sur aquifères\* superficiels.

#### Chapitre I.2

# La géothermie pour les usages domestiques et tertiaires

Depuis quelques années on assiste à une très forte croissance de l'utilisation de la chaleur du sol pour les maisons individuelles, le petit collectif et le tertiaire, notamment par la mise en œuvre de pompes à chaleur géothermiques sur capteurs horizontaux, sur sondes verticales ou sur aquifères superficiels.

L'exploitation de gisements situés à faible profondeur peut se faire selon deux méthodes: soit par échange avec le sol ou le sous-sol (chaleur du sol), soit en utilisant des aquifères peu profonds (chaleur issue de l'eau souterraine).

Une fois cette chaleur prélevée, la pompe à chaleur géothermique transfère cette énergie via un fluide "caloporteur" au bâtiment à chauffer. Pour fonctionner, le compresseur de la pompe à chaleur géothermique doit être entraîné par un moteur électrique, mais pour 1 kilowattheure\* (kWh) d'énergie électrique consommée, la pompe à chaleur extrait 2 à 3 kWh du sous-sol et restitue donc 3 à 4 kWh de chaleur pour chauffer le bâtiment.

Il existe des pompes à chaleur réversibles qui peuvent fournir du froid en été, certaines peuvent même assurer une production simultanée de chaud et de froid. L'été, le système d'échange avec le sous-sol offre des possibilités de refroidissement quasigratuites (géocooling\*, cf. p. 15).

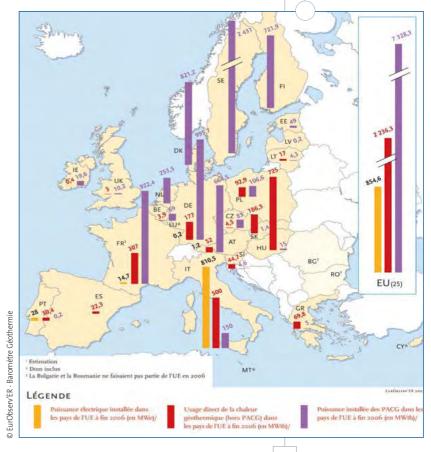
Les pompes à chaleur géothermiques se destinent au chauffage et au refroidissement de tous types de bâtiments du petit collectif au tertiaire: maisons individuelles, lotissements, centres commerciaux, hyper et supermarchés, cliniques et hôpitaux, écoles, immeubles de bureaux, hôtels, salles polyvalentes, musées, salles de concert, serres, etc.

### Le boom des pompes à chaleur

Depuis les années 90, on assiste en Europe et en Amérique du Nord, à un très fort développement des systèmes de chauffage associant la géothermie très basse température à des pompes à chaleur. Le parc d'installations a plus que doublé ces 5 dernières années. En 2007, on estimait le nombre d'unités installées en Europe à près de 600 000, représentant une puissance thermique installée de l'ordre de 7 300 MW\*, avec des ventes annuelles qui dépassent la barre des 100 000 unités. La Suède dispose du parc le plus important avec 270 000 unités (2 400 MW); elle est suivie par l'Allemagne: 90 000 unités (1 000 MW) et par la France: 84 000 unités. Viennent ensuite l'Autriche avec un parc de 40 200 unités et la Finlande, 34 000.

#### Puissances géothermiques installées des pays de l'Union Européenne :

Les pompes à chaleur géothermiques, en forte croissance, représentent une grande part de l'utilsation de la géothermie en Europe.



LES CAPTEURS HORIZONTAUX ET LES SONDES VERTICALES.

La longueur totale des tubes d'un capteur horizontal dépasse plusieurs centaines de mètres. Ils sont repliés en boucles distantes d'au moins 40 cm. On estime la surface de capteurs nécessaire de 1 à 2 fois la surface habitable à chauffer. À droite:

Deux sondes géothermiques verticales disposées chacune dans un forage d'environ 70 m de profondeur et distantes d'au moins 10 m, peuvent convenir pour chauffer une maison de 120 m² (en fonction de la zone climatique et de l'isolation de la maison).



### Les capteurs horizontaux

Les capteurs sont constitués de tuyaux en polyéthylène enterrés horizontalement à faible profondeur (de 60 cm à 1,2 m) dans lesquels circule un fluide caloporteur. D'une longueur de plusieurs centaines de mètres, ils sont installés en boucles distantes de 40 cm sur le terrain jouxtant le bâtiment à chauffer, à plus de 2 m des arbres et à au moins 1,50 m des réseaux enterrés non hydrauliques. La surface des capteurs nécessaire est de 1 à 2 fois la surface habitable à chauffer, en fonction du degré d'isolation. Les capteurs horizontaux peuvent équiper trois types de pompe à chaleur : à détente directe, à fluides intermédiaires ou mixte (cf. encadré p. 14). La puissance thermique récupérable est de l'ordre de 15 à 20 W par mètre linéaire (m/l).

#### Un préalable : le diagnostic de performance énergétique

Avant de se lancer dans un projet de pompe à chaleur dans un bâtiment existant, il est conseillé de réaliser un Diagnostic de Performance Énergétique (DPE). Ce bilan permet d'estimer la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre d'un logement et de cibler les travaux les plus efficaces pour y économiser l'énergie. Il faut noter que ce DPE est obligatoire lors de toute mise en vente ou location d'un logement. Rappelons que le chauffage représente les deux tiers de la consommation d'énergie d'un logement, il faut – avant toute installation de pompe à chaleur – s'assurer de l'efficacité de l'isolation de sa maison, en particulier le toit, les fenêtres, les murs et le plancher. Il faut aussi vérifier l'adéquation des émetteurs de chaleur (radiateurs basse température, planchers chauffants, etc.



# Les sondes géothermiques verticales

Les capteurs verticaux sont constitués d'une ou de plusieurs sondes verticales qui vont puiser l'énergie contenue dans le sous-sol. Un capteur (tube en U, ou double U en polyéthylène) contenant un fluide caloporteur est descendu dans un forage à une profondeur pouvant aller jusqu'à 200 m. Seules les PAC à fluides intermédiaires (cf. encadré p. 14) peuvent être équipées de capteurs verticaux. La puissance prélevée est en moyenne de 50 W/ml (35 à 80 W/ml en fonction de la nature des terrains traversés).

L'installation des sondes géothermiques relève d'une entreprise de forage qualifiée (engagée dans une démarche qualité, comme QualiForage en France). Il convient également de respecter les procédures administratives concernant la protection du soussol et de la ressource en eau.

Le forage vertical demande peu d'espace et s'applique facilement en milieu urbain.

### Les champs de sondes

Pour les bâtiments de grande taille, plusieurs sondes géothermiques, espacées d'une petite dizaine de mètres pour une profondeur pouvant parfois atteindre plus de 200 m peuvent être réalisées sur un même site.

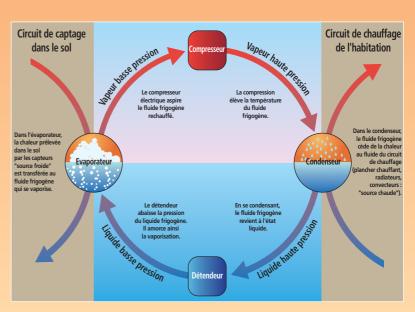
Dans ce volume parallélépipédique délimité et sans interférence avec le voisinage, l'exploi-

#### Qu'est-ce qu'une pompe à chaleur (PAC)?

Une PAC est une machine thermodynamique qui puise la chaleur d'un milieu naturel appelé "source froide" (eau, air, sol) dont la température est inférieure à celle du local à chauffer. Elle transfère ensuite cette énergie au fluide caloporteur afin d'assurer le chauffage et souvent aussi la production d'eau chaude sanitaire. Pour les applications géothermiques, on utilise généralement des PAC à compression qui comportent un compresseur électrique.

La chaleur prélevée au niveau de la source froide est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur en se condensant transmet sa chaleur au milieu à chauffer. La température de ce dernier s'abaisse fortement dans un détendeur le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer.

Aujourd'hui, il existe des pompes à chaleur dites réversibles qui permettent de produire du chaud et/ou du froid.



Le fonctionnement d'une PAC est comparable à celui d'un réfrigérateur ménager : il assure le chauffage à partir d'une source de chaleur externe (dont la température est inférieure à celle du local à chauffer).

Évaporateur : la chaleur est absorbée au milieu extérieur par vaporisation du fluide frigorigène\* à basse température.

Compresseur : entraîné par un moteur électrique, il aspire et comprime les vapeurs (en augmentant leur pression et leur température), puis les refoule vers le condenseur.

Condenseur : échangeur où les vapeurs passent à l'état liquide en cédant leur chaleur au milieu extérieur. Détendeur : il abaisse la pression du liquide venant du condenseur et règle son débit.

tant peut minimiser sa dépense énergétique annuelle en maintenant un équilibre entre les quantités d'énergie puisées pour le chauffage et celles réintroduites en période estivale, par exemple pour le rafraîchissement.

Les puissances exploitées peuvent être importantes : de quelques dizaines de kilowatts à plusieurs mégawatts.

#### Les fondations thermoactives

Dans le cas de construction de bâtiments nécessitant pour leur stabilité des pieux à grande profondeur, au-delà de 10 m par exemple, il est possible d'utiliser ces structures de béton pour capter et accumuler l'énergie thermique du sol (fondations thermoactives). Les capteurs sont alors installés au cœur des fondations. Ce type de technique est aussi envisageable dans le cas de blindages, de fouilles en parois moulées, de dalles, de semelles ou tout autre élément en béton en contact avec le sol. Le principe de ces pieux énergétiques consiste à

intégrer dans les éléments de fondations, lors **FONDATIONS THERMOACTIVES** de leur fabrication un système de captage de Le fluide caloporteur circule dans les tubes en l'énergie constitué d'un réseau de tubes en polyéthylène (1) polyéthylène et dans lequel circule en circuit noyés dans les fondations qui fermé un fluide caloporteur (de l'eau complétée sont connectés (2 et 3) à une conduite principale (4) de glycol, par exemple). Le système de captage reliée à la pompe à chaleur (5). de l'énergie est connecté à une pompe à chaleur qui assure le chauffage ou le refroidissement. L'installation des échangeurs thermiques ne peut se faire que dans le cadre de la construction de l'immeuble lui-même. l'équipement a posteriori de surfaces

#### Le coefficient de performance (COP)

La performance énergétique d'une pompe à chaleur se traduit par le rapport entre la quantité de chaleur produite par celle-ci et l'énergie électrique consommée par le compresseur. Ce rapport est le coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur. Plus la valeur du COP\* est élevée, meilleure est la machine. Les valeurs données par les constructeurs de PAC sont généralement comprises entre 4 et 5.

de béton existantes étant impossible. Mais ce dispositif permet de se dispenser des travaux de forage ou de pose nécessaires pour les collecteurs et les sondes géothermiques. On recense aujourd'hui en Europe, notamment en Autriche et en Suisse, plusieurs centaines de réalisations mettant en œuvre des fondations thermoactives. En France, plusieurs projets ont été récemment initiés, comme à la Cité du Design à Saint-Etienne dans la Loire (cf. p. 47).

# Les puits canadiens ou provençaux

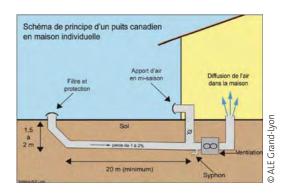
Les puits canadiens ou provençaux consistent à alimenter un bâtiment en air tempéré en le faisant circuler dans un conduit enterré qui selon les conditions climatiques le refroidit (puits provençal) ou le préchauffe (puits canadien) en utilisant l'inertie thermique du sol.

La terre offre une température pratiquement constante tout au long de l'année entre 2 et

#### Les types de pompe à chaleur géothermiques

- Dans les PAC à détente directe, il n'y a qu'un seul circuit : le fluide frigorigène circule en circuit fermé dans la pompe, les capteurs et les émetteurs de chaleur.
- Dans les PAC mixtes, il y a deux circuits : celui du fluide frigorigène des capteurs et de la pompe à chaleur et celui de l'eau chaude des émetteurs.
- Dans les PAC à fluides intermédiaires, il y a trois circuits: le circuit frigorifique\* de la pompe à chaleur, le circuit des capteurs où circule de l'eau additionnée d'antigel et le circuit qui alimente en eau chaude les émetteurs.

PAC géothermiques						
Dénomination	Capteurs enterrés	Capteurs enterrés	PAC sur eau			
commerciale	horizontaux	verticaux	de nappe			
Eau glycolée / eau	PAC à fluides i					
Eau / eau			PAC à fluides intermédiaires			
Sol / sol	PAC à détente directe					
Sol / eau	PAC mixte					



3 mètres de profondeur. Le puits canadien/provençal exploite cette température régulière : l'air venant de l'extérieur circule dans un collecteur enterré pour échanger des calories avec le sol. À la sortie du collecteur, la température de l'air est proche de celle du sol, donc plus chaud que l'atmosphère extérieure en hiver, et plus frais en été. L'air sert de fluide caloporteur tandis que le tube sert d'échangeur thermique tout en canalisant l'air jusqu'au bâtiment. Le puits canadien ne se substitue pas au système de chauffage de la maison.

# Les pompes à chaleur géothermiques sur aquifères

Jusqu'à 100 m de profondeur, les nappes d'eau souterraine présentent le plus souvent une température de 10 à 14 °C, quelle que soit la saison. Elles offrent une source d'énergie importante et stable qui peut parfaitement être utilisée pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Les pompes à chaleur sur aquifère (dites eau/eau) sont à fluides intermédiaires et comportent 3 circuits (cf. encadré ci-contre). À condition que le débit soit suffisant, elles sont particulièrement adaptées aux besoins de chauffage et de rafraichissement de lotissements, d'immeubles de bureaux, de centres commerciaux ou d'hôpitaux.

Les PAC sur aquifères nécessitent deux forages qui doivent être réalisés par une entreprise de forage qualifiée et déclarés à la DRIRE. Un premier forage permet de pomper l'eau, un second la réinjecte dans la nappe d'origine. Cette solution est préférable car elle évite le rejet en surface de l'eau prélevée dans la nappe. Le débit d'eau puisée dans la nappe doit être suffisant et stable dans le temps. Un débit d'un m³ fournit

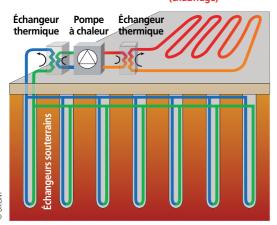
une puissance d'environ 10 kW correspondant au chauffage de 200 m² d'un bâtiment répondant à la nouvelle réglementation thermique RT 2005\*. Les aquifères les plus productifs dépassent 100 m³/h et peuvent alimenter des projets de plus d'un MW dans les conditions les plus favorables.

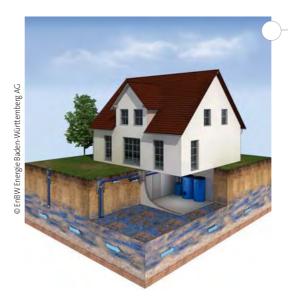
Ce type d'installation requiert une estimation précise des besoins thermiques en puissance et en consommation annuelle et une étude approfondie de la nappe précisant un certain nombre de paramètres (température, sens d'écoulement de la nappe, transmissivité\*, rabattement prévisionnel, coupe du forage, etc.), le nombre de forages de pompage et de réinjection pour le débit souhaité, sans oublier la réglementation applicable...

# Le géocooling pour refroidir les bâtiments

Le sous-sol dont la température à quelques mètres de profondeur est de 10 à 12 °C, peut aussi faire office de réservoir de froid pendant l'été et permettre le refroidissement des bâtiments. C'est le principe du géocooling qui consiste à utiliser cette fraîcheur du milieu naturel, principalement en période estivale, sans mise en service d'une pompe à chaleur, pour assurer le refroidissement direct des circuits de distribution d'eau des bâtiments. Cela permet donc d'obtenir un niveau de confort intérieur satisfaisant sans utiliser de systèmes de climatisation conventionnels, gourmands en énergie. Le refroidissement par géocooling peut se faire

Hiver

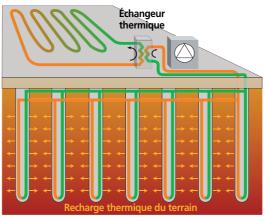




par l'intermédiaire de champs de sondes géothermiques, de fondations thermoactives (pieux énergétiques), de puits provençaux ou encore via le puits de production d'eau qui alimente des pompes à chaleur sur aquifère. Ainsi, les circuits de ces différents systèmes – sondes, pieux ou puits –, couplés au réseau de distribution de refroidissement par le biais d'un échangeur de chaleur, extraient les calories en excédent des bâtiments pour les conduire sous terre par échange thermique.

Le géocooling, dans la mesure où il peut, en combinaison avec la production d'énergie de chauffage, garantir une recharge thermique du terrain, est une solution intéressante qui permet d'offrir une prestation de froid sans un investissement supplémentaire significatif et avec un coût de fonctionnement très bas.

#### Été (refroidissement)



#### PAC SUR EAUX SOUTERRAINES

Pour qu'une pompe à chaleur géothermique sur eau souterraine donne toute satisfaction, il faut que le débit d'eau puisée dans la nappe soit suffisant et stable dans le temps. Pour une maison individuelle, il doit être compris entre 1 et 3 m³/h, selon le degré d'isolation de la construction.

#### LE PRINCIPE DU GÉOCOOLING.

- En hiver, les échangeurs souterrains (pieux,sondes...) sont couplés à une pompe à chaleur pour le chauffage du bâtiment via le plancher chauffant.
- En été,ils permettent de rafraîchir le batiment : les calories prises au bâtiment au niveau du plancher chauffant/rafraîchissant sont évacuées dans les terrains par une simple circulation des fluides dans la boucle sous-sol sans que la pompe à chaleur ne fonctionne. Ceci permet du même coup une recharge thermique des terrains, augmentant la performance de la pompe à chaleur pour l'hiver suivant.

NB. Les couleurs varient en fonction de la température : rouge pour le chaud, orange pour le tiède, vert pour le frais et bleu pour le froid.

# L'usage direct de la chaleur

Chapitre I.3

Des forages géothermiques à grande profondeur permettent de produire de l'eau chaude qui peut satisfaire de nombreuses utilisations : chauffage de bains, de serres agricoles, jusqu'à l'alimentation de réseaux de chaleur pour le chauffage urbain.

Alimentés principalement à partir d'un forage ou d'un doublet\* géothermique, les réseaux de chaleur géothermiques transportent de la chaleur sous forme d'eau chaude dans des canalisations enterrées pour le chauffage de logements, de bâtiments publics et industriels et la fourniture d'eau chaude sanitaire.

Dans le cas d'un réseau de chaleur, afin de rentabiliser le coût des forages et des investissements de surface, l'énergie produite doit permettre d'alimenter 3 à 4 000 équivalents logements, si possible regroupés dans un rayon de moins de 3 à 4 km, soit au moins 40 à 45 000 MWh/an.

La puissance géothermique installée au niveau mondial est estimée à 28 GW, pour une production de chaleur de l'ordre de 6 millions de tep\* par an. Sur les 70 pays équipés, quatre pays (États-Unis, Chine, Japon, Islande) se partagent près de 50 % de la capacité mondiale.

Seize pays de l'Union Européenne utilisent la géothermie. Les usages directs de la chaleur géothermique (si l'on excepte les pompes à chaleur) ont représenté une puissance installée de 2 250 MW en 2006, pour une énergie prélevée de près de 700 000 tep, en croissance de 5,2 % par rapport à 2005.

La Hongrie est le premier utilisateur de la géothermie en Europe avec une puissance installée de 725 MW en 2006. Les principaux usages de la géothermie dans ce pays sont le chauffage des bains, piscines et serres et les réseaux de chaleur.

L'Italie est à la deuxième place du classement avec une puissance thermique de l'ordre de 500 MW. Les usages principaux du pays sont également, par ordre d'importance, le chauffage des bains et piscines, celui des bâtiments avec des réseaux de chaleur, le chauffage des serres, l'élevage de poissons et les usages industriels.

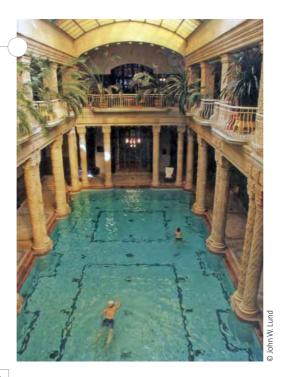
La France est le troisième utilisateur avec une puissance thermique installée de l'ordre de 300 MW en 2006. Elle a joué un rôle de pionnier avec la technique du doublet (double forage) en lle-de-France, qui présente la plus grande densité d'opérations de géothermie en fonctionnement au monde.

# Capter le fluide géothermal par forage

Une opération géothermique de production de chaleur nécessite la réalisation d'un forage permettant de remonter l'eau chaude à la surface. La technique de forage



Le chauffage des bains est l'application la plus répandue de l'usage direct de la chaleur géothermique.





est différente en fonction du type de terrain à traverser et de la profondeur recherchée. La technique la plus fréquente est dite "rotary", largement utilisée pour les forages pétroliers.

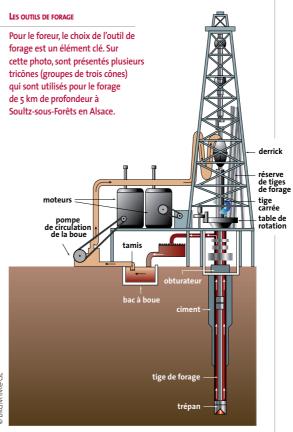
Pour les roches les plus dures, la méthode de forage la plus adaptée associe percussion et rotation avec un outil actionné par de l'air comprimé. Mais l'utilisation de molettes au carbure de tungstène, ou même au diamant, peut s'avérer nécessaire.

### Pomper l'eau

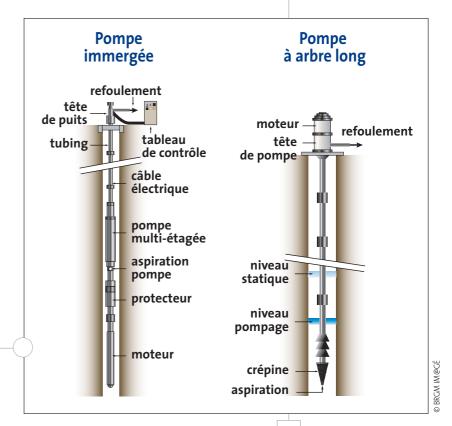
Une installation géothermique opérationnelle nécessite un débit d'eau aussi régulier que suffisant. Si la pression dans le réservoir souterrain est supérieure à la pression atmosphérique, l'eau peut jaillir naturellement à la tête du puits de forage qui se suffit alors à lui-même, prenant le nom de puits artésien. Mais si cette pression n'est pas assez importante ou si l'eau ne remonte pas du tout, il devient nécessaire d'avoir recours à un dispositif de pompage. Quel que soit leur type, toutes les pompes mises en œuvre comportent une partie hydraulique immergée qui est

#### POMPES DE PRODUCTION DU FLUIDE GÉOTHERMAL

Les pompes immergées sont largement utilisées dans le Bassin parisien pour pomper la nappe du Dogger\*. Elles permettent d'obtenir des débits importants supérieurs à 300 m³/h. Les pompes à arbre long (140 mètres maximum) sont surtout employées en Islande.



La technique du forage Rotary consiste à utiliser un outil (un tricône muni de molettes dentées) qui détruit la roche sous l'effet du poids et de la rotation. Le poids est assuré par un ensemble de tiges lourdes et creuses, assemblées en un train qui achemine sous pression un fluide appelé boue de forage. Ces houes refroidissent l'outil et assurent le déblaiement du trou. Autour des parois du forage, des tubes sont descendus et du ciment est injecté afin de garantir la tenue des parois du puits, ainsi qu'une protection contre la corrosion mais aussi la protection des nappes d'eau souterraines et leur isolation thermique.



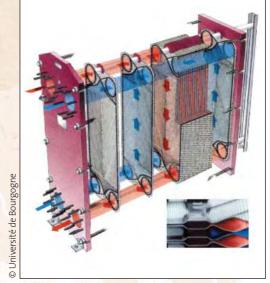
descendue de 100 à 400 mètres de profondeur, ainsi qu'un moteur. Ce dernier peut être immergé sous le dispositif hydraulique (pompes immergées) ou placé en surface (pompes à arbre long). Pour les sites où l'eau est renvoyée dans le réservoir (cf. la technique du doublet, p. 19), une pompe de réinjection installée en surface s'avère indispensable.

### Récupérer la chaleur

Pour des raisons économiques, l'énergie géothermique ne peut être transportée sur de longues distances. Son utilisation directe doit donc être réalisée à proximité du prélèvement. Pour ce faire, le fluide géothermal, extrait du sous-sol par forage et pompage, est acheminé dans un échangeur de chaleur où il cède son contenu énergétique à de l'eau qui assure la distribution de la chaleur aux utilisateurs par le biais d'un réseau de distribution.

Cette séparation des circuits (boucle géothermale\* d'un côté qui prélève la chaleur et circuit géothermique qui la distribue de l'autre) s'impose en général car le fluide géothermal est souvent corrosif.

En effet, quand l'eau chaude jaillit du soussol, elle est souvent trop corrosive pour être utilisée directement. On a donc recours à un échangeur (de type multitubulaire, spiralé ou à plaques) disposé entre le circuit géothermal et le circuit de distribution de chaleur. L'efficacité d'un échangeur se



ÉCHANGEUR À PLAQUES.
Ce matériel offre une surface d'échanges importante entre le circuit de l'eau géothermale (en rouge) et le circuit géothermique (en bleu).

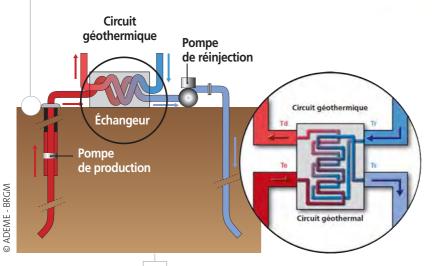
mesure à la différence de température entre l'entrée de la boucle géothermale et la sortie du circuit géothermique. Cette différence, baptisée "pincement", doit être aussi petite que possible (de l'ordre de 2 °C). Pour durer, un bon échangeur doit être fabriqué en matériaux résistants à la corrosion, comme l'acier inoxydable ou, encore mieux, le titane.

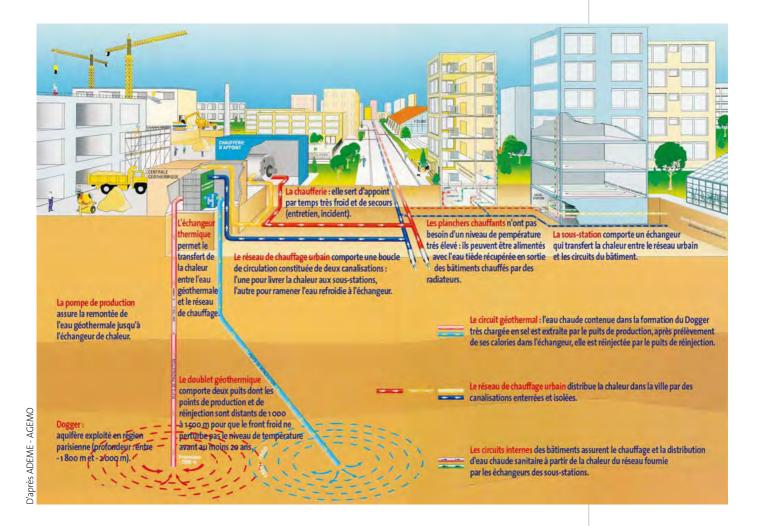
### Réinjecter l'eau

Une fois les calories du fluide géothermal récupérées, le fluide doit être réinjecté dans l'aquifère d'origine, sauf si d'autres usages sont prévus en aval (thermalisme, pisciculture, eaux brutes industrielles, etc.) : un forage supplémentaire est alors nécessaire. Si la réinjection de l'eau géothermale est indispensable pour protéger l'environnement, elle permet aussi de garantir la pérennité de la ressource, en évitant d'abaisser le niveau piézométrique\* de la nappe exploitée.

Afin de ne pas refroidir le réservoir, l'eau doit être réinjectée en un point relativement éloigné du point de puisage (le plus souvent d'environ un kilomètre, dans les formations sédimentaires).

La performance d'un échangeur placé dans une installation de géothermie est caractérisée par l'écart entre les températures à l'entrée de la boucle géothermale (To) et à la sortie du circuit géothermique (Td). Cet écart appelé "pincement", doit être aussi faible que possible (de l'ordre de 2 °C).





# Le concept de doublet géothermique

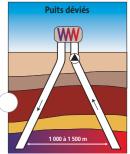
L'exploitation de la ressource géothermique par doublet nécessite deux forages : un forage de production et un forage de réinjection. Les impacts des forages au niveau du réservoir doivent être éloignés d'une certaine distance afin que l'eau réinjectée (plus froide) ne vienne pas perturber le niveau de température au puits de production. Pour les opérations au Dogger\* du Bassin parisien, cette distance est de l'ordre du kilomètre.

#### **Des traitements anti-corrosion**

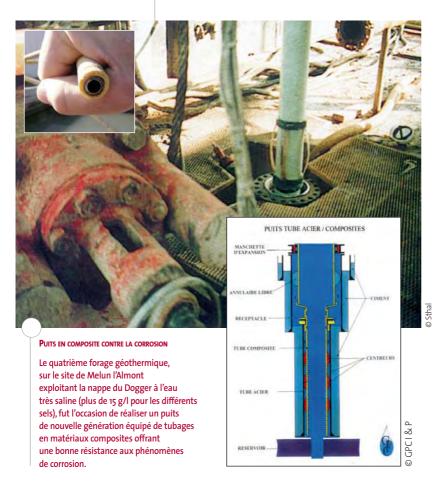
Tubes dans les forages, canalisations reliant les puits, échangeurs, joints... autant de matériaux soumis à rude épreuve dans une centrale géothermique\*. En contact avec l'eau du sous-sol, ils sont victimes de différents types de corrosion : une corrosion chimique (le fluide peut être chargé de sels minéraux très agressifs), une corrosion galvanique (provoquée par la présence de courants électriques parasites), et même une corrosion bactériologique (certaines souches bactériennes – éventuellement présentes dans le gisement et réactivées par l'abaissement de la température – produisent des sulfures, sous-produits de leur métabolisme, pouvant attaquer l'acier des tubages). Pour protéger l'installation, des traitements préventifs sont appliqués :

#### DOUBLET GÉOTHERMIQUE :

En milieu urbain, lorsque le terrain manque, on peut installer des puits dont la trajectoire dévie dans le sous-sol (puits déviés). Une seule plate-forme de forage suffit alors pour positionner les puits de production et d'injection.



BRGM-im@gé

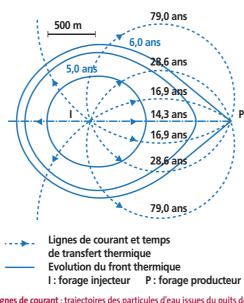


injections de produits inhibiteurs\* pour obtenir un film protecteur ou éviter la cristallisation et la formation de dépôts, des produits bactéricides pour se débarrasser des micro-organismes. C'est le cas dans les forages de production du Bassin parisien pour annihiler les problèmes de corrosion liés à l'exploitation de la nappe du Dogger. L'utilisation de tubages en matériaux composites peut limiter les effets néfastes de la corrosion.

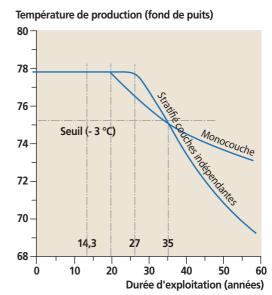
### Bien gérer les réservoirs

La géothermie est une énergie renouvelable, car l'eau extraite du sous-sol y retourne par réinjection. Mais cette eau qui retourne à la terre après usage est refroidie. Le travail de l'ingénieur consiste à calculer avec précision le délai qu'il lui faudra pour maintenir à niveau constant la production de calories compte tenu des caractéristiques du réservoir. Dans le cas d'un doublet, la distance entre puits au niveau du réservoir est calculée pour qu'aucune baisse de température n'apparaisse dans un délai équivalent à la durée de vie de l'installation (20 à 30 ans).

#### VISUALISATION DES LIGNES DE COURANT



#### RÉPONSE THERMIQUE DU RÉSERVOIR :



Lignes de courant : trajectoires des particules d'eau issues du puits de réinjection.

Temps de percée thermique (14,3 ans dans l'exemple): date d'arrivée au puits de production des premières particules d'eau froides, sans incidence perceptible sur la température du fluide exploité.

Durée de vie théorique (20 ou 27 ans dans l'exemple) : date où l'on note une chute perceptible de la température de production (0,2 à 0,5 °C). Durée de vie pratique (35 ans dans l'exemple): date mettant en cause l'intérêt de l'exploitation (3 à 5 °C par exemple).

# Produire de l'électricité

Chapitre I.4

La production d'électricité à partir de la géothermie connue depuis un siècle est devenue significative à partir des années 1970. Aujourd'hui, les technologies permettent la production électrique à partir de températures de plus en plus basses et les systèmes géothermiques stimulés dits EGS offrent des perspectives prometteuses.

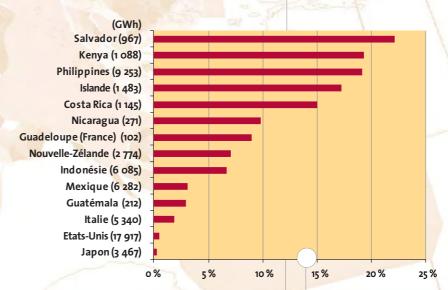
#### Près de 10 000 MW dans le monde

La puissance électrique installée d'origine géothermique dans le monde a atteint en 2007, 9 800 MW, soit 800 MW de plus qu'en 2005. Les États-Unis sont restés en 2007 le premier pays producteur avec 2 700 MW installés, suivis par les Philippines (2 000 MW). L'Indonésie (1 000 MW) qui a nettement augmenté sa capacité de production (+ 195 MW entre 2005 et 2007) ravit la troisième place au Mexique, dont la puissance géothermique est restée stable depuis 2005 (950 MW). Le pays le plus actif ces deux dernières années est l'Islande, qui a plus que doublé sa puissance installée pour atteindre 420 MW avec de nouvelles centrales situées à Nesjavellir, Hellisheidi et Reykjanes. Ce pays, qui produit la quasi-totalité de son électricité à partir des énergies renouvelables, développe des nouvelles capacités de production électrique afin d'étendre son activité de production d'aluminium.

Sept pays (États-Unis, Philippines, Mexique, Italie, Japon, Indonésie, Nouvelle-Zélande)



À Larderello en Italie, le gisement géothermal produit naturellement de la vapeur sèche, il faut alors réguler la pression en tête de puits pour optimiser les conditions d'exploitation.



regroupent aujourd'hui 90 % de la capacité installée pour la production électrique. Il existe plus de 350 installations géothermiques dans le monde qui produisent de l'électricité et on estime que plus de 60 millions de personnes sont alimentées avec cette électricité.

Les principaux pays producteurs se situent sur la ceinture de feu Pacifique : six dans les Amériques pour 3 390 MW, cinq en Asie pour 3 100 MW, deux en Océanie pour 437 MW.

L'Europe compte six pays producteurs, pour une puissance de l'ordre de 900 MW, et deux seulement en Afrique pour 54 MW. La géothermie couvre 0,4 % des besoins mondiaux en électricité. Toutefois, dans certains pays sa contribution aux besoins nationaux peut être bien plus élevée et atteindre plusieurs pour-cents.

La puissance électrique installée d'origine géothermique de l'ensemble des pays de l'Union européenne était de 860 MW en 2007. L'Italie est dotée des principaux gisements de PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ PAR GÉOTHERMIE. Part de la géothermie dans

Part de la géothermie dans la production électrique des premiers 14 pays (d'après Fridleifsson, 2007). Entre parenthèses sont indiqués les chiffres de production d'électricité géothermique en 2004, en GWh (d'après Bertani).



La centrale de production d'électricité de Bouillante en Guadeloupe (ici, le séparateur) fonctionne depuis plus de 20 ans. Elle produit 7% des besoins en électricité de l'île

CENTRALE GÉOTHERMIQUE EN CALIFORNIE.

Les États-Unis sont le premier pays producteur mondial d'électricité par géothermie. géothermie haute température de l'Europe à Larderello - Travale/Radiconli et à Monte Amiata pour une puissance totale de 810 MW. Au Portugal, l'exploitation des ressources géothermiques pour la production d'électricité a été développée dans l'archipel volcanique des Açores, sur l'île de San Miguel; la puissance géothermique atteint 28 MW.



En France, l'essentiel du gisement se situe dans les départements d'outre-mer. Aujourd'hui, deux unités fonctionnent à Bouillante en Guadeloupe. La puissance installée sur ce site est de 15 MW et pourrait être doublée grâce à des extensions autour du champ actuel.

En Martinique, deux zones potentiellement intéressantes ont été prospectées — l'une au nord de l'île, l'autre au Sud. Des forages d'exploration restent à réaliser pour confirmer l'existence possible de ressources géothermales exploitables dans ces deux zones. À la Réunion, la réalisation de trois forages d'exploration à 1 500 m de profondeur est prévue en 2009 sur le site de la plaine des Sables qui mène au volcan de la Fournaise.

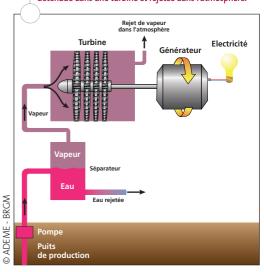
#### De l'électricité en zone active

Actuellement, on produit de l'électricité à partir de ressources géothermales en exploitant des réservoirs dont la température est comprise entre 110 et 350 °C et qui permettent des débits de production de fluides suffisants (quelques dizaines de kg/s) pour la production électrique. Ces conditions se rencontrent principalement dans les zones de volcanisme actif. Sur ces sites, la vapeur produite en tête du forage géothermique alimente une turbine et un alternateur qui produit de l'électricité. Le fluide condensé est ensuite réinjecté dans les gisements afin d'en optimiser la durée d'exploitation.

On peut également produire de l'électricité avec des ressources comprises entre 120 et 160 °C. Dans ce cas, le fluide géothermal transmet ses calories dans un échangeur à un liquide organique à bas point de vaporisation dont la vapeur actionne une turbine; le liquide organique évolue en circuit fermé entre l'échangeur géothermal et un condenseur. Cette technologie devrait permettre de produire de l'électricité à des coûts compétitifs dans des zones non raccordées à des réseaux électriques de forte puissance.

L'eau peut se trouver sous plusieurs formes à l'intérieur du réservoir géothermal : liquide, vapeur ou encore un mélange des deux. Le forage géothermique produit de la vapeur seule

SCHÉMA 1 - CENTRALE À ÉCHAPPEMENT LIBRE OU À CONTRE-PRESSION Après séparation de la phase liquide, la vapeur obtenue est détendue dans une turbine et rejetée dans l'atmosphère.



(dite vapeur sèche) ou un mélange des deux phases liquide et vapeur (on parle alors de vapeur humide). L'état du fluide dans le réservoir dépend de la pression et de la température qui déterminent également son potentiel énergétique (enthalpie). Selon la nature et les propriétés du fluide arrivant en surface, on utilise différents systèmes pour produire de l'électricité.

## Centrales à échappement libre ou à contre-pression (schéma 1)

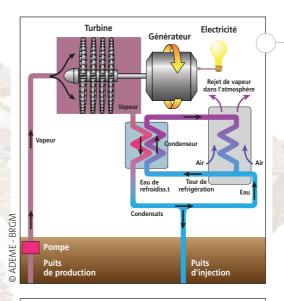
La vapeur, obtenue après séparation de la phase liquide, est directement détendue dans une turbine et rejetée à l'atmosphère à l'échappement de la turbine. Ce type de centrale est utilisé lorsque la vapeur géothermale contient une quantité élevée de gaz incondensables ou pour satisfaire des demandes électriques faibles ou lors de la phase initiale de grands projets de géothermie. Il s'agit d'unités modulaires et portables, installées le plus souvent en tête de puits et de puissance unitaire comprise entre 1 et 5 MW.

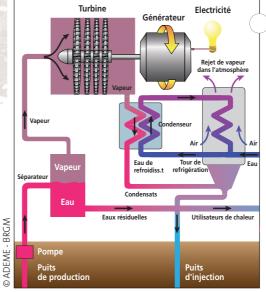
#### Centrales à condensation (schémas 2 et 3)

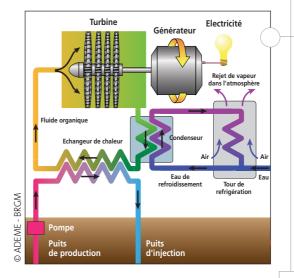
En sortie de turbine, la vapeur n'est plus rejetée à l'atmosphère mais condensée. L'intérêt est d'obtenir une pression à l'échappement de la turbine inférieure à la pression atmosphérique (échappement sous condition de vide) et d'augmenter ainsi le rendement de conversion thermoélectrique. En règle générale, les turbines utilisées sont à simple flux de vapeur. Cependant, il est possible aussi de recourir à des turbines à double flux (cf schéma 3) La gamme de puissance des turbines à condensation va de 10 à 55 MW, avec plus fréquemment des tailles unitaires de 20, 35 ou 55 MW.

#### Centrale à fluide binaire (schéma 4)

Pour valoriser des ressources de moindre température (température de réservoir à moins de 120 °C), on a recours à une autre technologie : celle utilisant le principe du cycle de Rankine à fluide organique (ORC\*, pour *Organic Rankine Cycle*) ou technologie à fluide binaire. Son principe est le suivant : le fluide géothermal extrait est amené dans un échangeur de chaleur où il cède une partie de son énergie à un fluide organique (alcane, fluorocarbone, ammoniac, etc.),







### SCHÉMA 2 - CENTRALE À CONDENSATION.

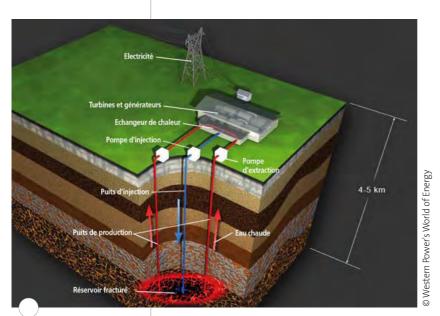
La vapeur obtenue en tête du puits de production alimente la turbine. En sortie de turbine, elle est ensuite condensée.

### SCHÉMA 3 - CENTRALE GÉOTHERMIQUE À CONDENSATION ET DOUBLE FLUX.

Le fluide extrait, constitué de vapeur et d'eau, passe par un séparateur de phase, la vapeur alimente la turbine.

SCHÉMA 4 - CENTRALE GÉOTHERMIQUE À FLUIDE BINAIRE.

Le fluide géothermal cède sa chaleur dans un échangeur à un fluide organique qui se vaporise à basse température et se détend dans la turbine.



LE PRINCIPE DES SYSTÈMES GÉOTHERMIOUES STIMULÉS (EGS).

La stimulation d'un horizon géologique fracturé permet la circulation de l'eau en profondeur au sein de ce réservoir. Cette eau peut être extraite par les puits de production jusqu'à l'échangeur de chaleur. grâce à une pompe d'extraction, avant d'être réinjectée dans un puits d'injection pour rejoindre le réservoir. Les calories récupérées servent ensuite à la production d'électricité au moven de turbines et générateurs.

appelé fluide de travail, qui se vaporise (pour une pression identique, ce type de fluide présente la particularité de se vaporiser à des températures plus basses que celle de l'eau par exemple). Les vapeurs produites sont ensuite détendues dans une turbine puis condensées au contact du circuit d'eau de refroidissement d'un condenseur. Le liquide obtenu est alors renvoyé à l'échangeur, par l'intermédiaire d'une pompe pour effectuer un nouveau cycle (vaporisation, détente, condensation, pressurisation). Le fluide de travail évolue donc en circuit fermé. Les centrales de ce type sont de taille unitaire plus modeste (quelques centaines de kW à quelques MW), sachant que l'on peut toujours, sur un même site, mettre en parallèle plusieurs unités, afin d'atteindre une capacité de production électrique importante, si la ressource géothermale disponible le permet.

# De l'électricité à partir des systèmes géothermiques stimulés (EGS)

En géothermie classique, les productions se construisent sur des réservoirs de forte perméabilité capables de fournir des débits de production élevés. Les technologies de systèmes géothermiques améliorés ou réservoirs artificiellement stimulés dites EGS (Enhanced Geothermal System), s'attachent à améliorer les performances hydrauliques d'un milieu plus ou moins fracturé (roches de socle ou roches sédimentaires de bassins compacts) possédant des caractéristiques de porosité et de perméabilité trop faibles pour être exploitables avec des méthodes traditionnelles. L'extraction de chaleur dans ces formations devient donc possible à condition de stimuler (hydrauliquement ou chimiquement) ces milieux pour favoriser la circulation du fluide et les échanges thermiques. Ces technologies permettent une exploitation plus complète des champs hydrothermaux classiques et la réalisation de productions géothermales en dehors de tout contexte volcanique. Les cibles potentielles constituées de granites profonds sous une épaisse couverture sédimentaire sont particulièrement nombreuses sur les continents. Le projet Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) ou les divers projets australiens illustrent parfaitement ce concept. Celui-ci consiste à forer un dispositif comportant un ou plusieurs puits de production et d'injection et à augmenter la perméabilité par fracturation hydraulique ou chimique. Selon le niveau de température en tête de puits de production, les applications viseront à la production d'électricité ou de chaleur.

À l'heure actuelle, le projet européen de Soultz-sous-Forêts, qui a permis de franchir de nombreux obstacles, dispose d'un triplet de puits à 5 000 m (1 injecteur et 2 producteurs) et constitue le projet de recherche le plus abouti au plan mondial. Pour arriver à un déploiement large de cette technologie, il faudrait localiser avec certitude les zones potentiellement favorables (température élevée en profondeur, qualité de la fracturation existante, etc.), abaisser fortement le coût des forages, et maîtriser totalement les technologies de création de l'échangeur et de gestion de la ressource géothermale.

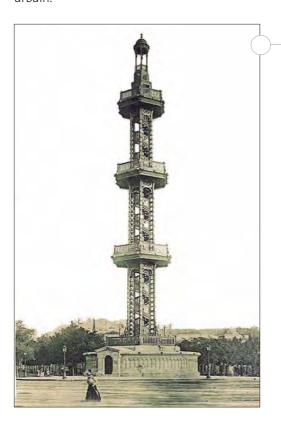
# Des applications très diverses

Chapitre I.5

La production d'électricité, le thermalisme et le chauffage urbain restent les applications les plus connues et les plus répandues de la géothermie. Mais les applications de la géothermie sont bien plus ouvertes. Toute une gamme d'usages sont possibles, qui ne dépendent que de l'imagination des hommes et des caractéristiques des fluides présents sous leurs pieds.

#### Du bain de boue à la turbine

Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'homme remontent à près de 20 000 ans. Les régions volcaniques ont constitué, très tôt, des pôles d'attraction, du fait de l'existence de fumerolles et de sources chaudes que l'on pouvait utiliser pour se chauffer, cuire des aliments ou tout simplement se baigner. Tout au long de l'histoire des civilisations, la pratique des bains thermaux s'est multipliée et depuis un siècle, les exploitations industrielles se sont développées pour la production d'électricité et le chauffage urbain.

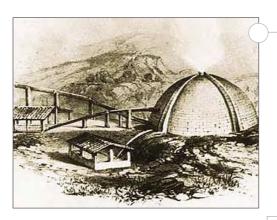




#### LE PUITS DE GRENELLE

En France, on réalise entre 1833 et 1841, dans le quartier de Grenelle à Paris, le premier forage pour capter, à 548 m, l'eau douce à 30 °C des sables albiens

C'est en 1904 à Larderello en Italie, que l'on produit de l'électricité par géothermie pour la première fois. Le premier réseau moderne de chauffage urbain alimenté grâce à la géothermie est installé, quant à lui, en 1930 à Reykjavik (Islande). Dès lors, des réseaux de



#### allume symboliquement cinq ampoules, annonçant pour l'année suivante la construction de la première centrale expérimentale de 20 kW.

#### LA TECHNIQUE DU "LAGONI COUVERT"

Le Français François Larderel entreprend en 1818 dans la région de Volterra la première véritable exploitation industrielle – donnant naissance au village de Lardarello qui portera son nom. Il invente la technique du "lagoni couvert", permettant de capter la vapeur à une température suffisante pour alimenter des machines destinées à pomper les eaux boriques.





La centrale de Svatsengi produit en cogénération 75 MW d'électricité et 150 MW pour le chauffage. Les effluents sont utilisés pour la balnéothérapie dans le "Blue Lagoon". chaleur utilisant la géothermie vont voir le jour en France, Italie, Hongrie, Roumanie, Russie, Turquie, Géorgie, Chine, États-Unis. La production mondiale d'électricité géothermique, quant à elle, ne deviendra significative qu'à partir des années 1970. Ce développement doit beaucoup aux crises pétrolières et au souci des pays en voie de développement d'utiliser une ressource nationale pour produire leur électricité. La puissance électrique installée dans le monde est passée de 400 MW en 1960 à 9 800 MW en 2007.

#### **Stockage intersaisonnier pour les serres**

Depuis 25 ans, la géothermie est utilisée dans plusieurs pays européens pour le chauffage et le refroidissement des serres. Cette énergie est souvent disponible dans le sous-sol où se situent les serres et elle est facilement captée dans des installations simples de fonctionnement qui permettent la production à contre-saison de fruits, légumes et fleurs.

Des systèmes de stockage intersaisonnier peuvent être réalisés à partir de deux forages : le premier fait office de puits froid et le second de puits chaud. En été, l'eau captée dans le puits froid circule dans des tubes sous la serre et en capte la chaleur, avant d'être stockée dans le puits chaud. En hiver, l'eau suit le trajet inverse et réchauffe la serre.



Les serres constituent des zones de transferts thermiques importants où l'eau qui y circule peut capter ou restituer les calories.

### **Géothermie et agriculture**

Le chauffage des serres est un domaine d'application intéressant pour la géothermie. En effet, pour cette activité, les dépenses énergétiques peuvent être très élevées: par exemple, 200 tonnes de fioul par an sont nécessaires pour chauffer un hectare de serres de cultures maraîchères et 400 tonnes de fioul par an pour des cultures florales. Changer d'énergie pour utiliser la chaleur du sous-sol représente donc le meilleur moyen de faire des économies, tout en protégeant l'environnement. Dans le réseau de chaleur d'une serre, la fourniture en température est calculée aussi bien en fonction de l'ensoleillement dans la journée que de la chaleur induite par effet de serre.

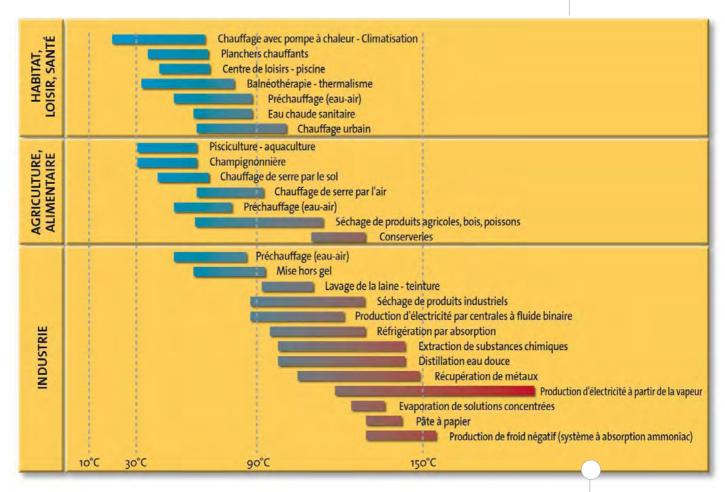
### Géothermie et pisciculture



PISCICULTURE.

Une augmentation de la température de quelques degrés et son maintien à un niveau constant produit un accroissement du métabolisme chez les poissons et les crustacés.

Pisciculture et géothermie vont bien ensemble. Une augmentation de la température de quelques degrés, et surtout le maintien d'une température constante (une des grandes qualités de l'eau géothermale), suffisent à augmenter le métabolisme des poissons et crustacés. Leur maintien dans une eau chaude toute l'année prolonge encore leur possibilité de croissance. Une installation de pisciculture comporte un puits unique ou un doublet. L'eau chaude est utilisée directement, ou au travers d'un échangeur quand sa nature n'est pas compatible avec l'élevage.



#### Géothermie et industrie

La majorité des usages industriels directs nécessitent des températures comprises entre 100 et 200 °C. Dans cette gamme de température, le fluide géothermal se présente sous forme d'eau et de vapeur d'eau et sa chaleur peut être utilisée pour le lavage de la laine, le séchage de produits industriels, l'extraction de substances chimiques (récupération de tannins), la fabrication de pâte à papier ou l'évaporation de solutions concentrées (production d'eau douce par dessalement d'eau de mer).

Dans certains cas, lorsque le fluide est très chaud et chargé en sels, il est intéressant de récupérer, outre sa chaleur, certains sous-produits qu'il contient naturellement : iode, brome, acide borique, lithium. On extrait aussi des gaz dissous, comme le méthane ou le gaz carbonique. La Turquie produit ainsi 40 000 t/an de CO<sub>2</sub> liquide ou de neige carbonique à partir de ses installations géothermiques.

Les usages industriels de la géothermie transportée sous forme de vapeur et d'eau par canalisations sont nombreux et variés. PRINCIPALES UTILISATIONS
DE LA GÉOTHERMIE EN FONCTION
DES TEMPÉRATURES.



#### Géothermie et loisirs

La géothermie se prête bien aux activités de loisir. Des thermes classiques aux piscines olympiques, en passant par des centres de vacances sous bulle avec animaux exotiques, plantes tropicales et toboggans d'eau chaude, les applications de loisirs de la géothermie ont un bel avenir. Parmi les installations les plus originales : les immenses serres des jardins tropicaux d'Atagawa, au Japon, avec leur élevage de crocodiles, d'oiseaux exotiques et de tortues géantes, construites sur des thermes qui datent du XV<sup>e</sup> siècle.

## Géothermie et "snow melting"

Depuis une dizaine d'années, dans les pays où l'enneigement est fréquent, la géothermie est utilisée pour empêcher l'accumulation de neige et de verglas. Ces systèmes utilisent des conduites de vapeur et d'eau chaude géothermale disposées aux entrées des bâtiments, dans les trottoirs, les aires de stationnement, les rampes de garage, ou encore les pistes d'aéroports ou les aiguillages de voies ferroviaires.





LES JARDINS TROPICAUX D'ATAGAWA

Depuis des temps immémoriaux, les sources thermales sont utilisées par les hommes pour les bains et les loisirs.

#### Géothermie et dessalement

Durant les années 90, une installation-pilote de dessalement dans l'île de Kimolos (Grèce) a démontré la faisabilité technique de l'utilisation de la géothermie basse-enthalpie (61 °C) pour le dessalement d'eau de mer, à partir d'un forage profond de 188 m. Grâce à son débit régulier et stable, 24 heures sur 24, cette énergie s'est montrée particulièrement adaptée à la production de 80 m<sup>3</sup> d'eau potable par jour. Cette solution est intéressante pour les zones côtières et les îles où existent des ressources géothermiques.



L'EGEC (European Geothermal Energy Council) publie des brochures sur les applications de la géothermie (www.egec.org).

#### Sous les trottoirs de Riejkavic.

Le réseau de tuyaux disposés lors de la réalisation des trottoirs permet la circulation de l'eau chaude qui assure le déneigement des trottoirs.

# L'avenir de la géothermie

Le contexte politique international ne peut que favoriser le développement de la géothermie dans le monde tout comme les innovations technologiques qu'il s'agisse des systèmes hybrides, des pompes à chaleur à absorption ou des systèmes géothermiques stimulés (EGS).

# Un contexte politique international favorable

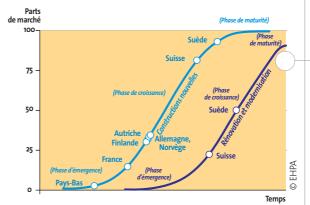
En février 2007, le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) concluait que l'essentiel de l'accroissement constaté de la température moyenne de la planète depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle était "très vraisemblablement" dû à l'augmentation observée des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines.

Face à ce constat, et compte tenu d'un renchérissement plus que probable à terme du coût des énergies fossiles, il est désormais admis, qu'un recours plus important aux énergies renouvelables est désormais nécessaire. Cet objectif particpe du concept de développement durable adopté à la Conférence de Rio en 1992.

La conférence mondiale sur les énergies renouvelables à Bonn en juin 2004 a confirmé cette tendance avec la signature d'une déclaration politique réaffirmant l'engagement des États membres à augmenter substantiellement et de manière urgente la part globale des énergies renouvelables dans la production énergétique.

L'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto en 2005, aboutissement d'un long processus de négociations internationales sur les conditions de lutte contre le changement climatique, impacte directement sur les politiques énergétiques des États signataires et participe à l'essor des énergies renouvelables en général et à celui de la géothermie en particulier.

Ainsi, l'Union européenne s'est-elle engagée



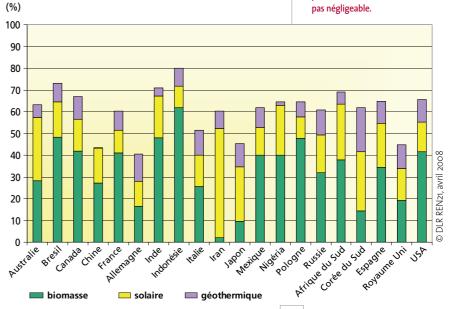
en janvier 2008 (avec le paquet Énergie-Climat) à porter la part des énergies renouvelables à 20 % de sa consommation totale d'énergie à l'horizon 2020.

La conférence d'Accra sur le climat, en août 2008, témoigne de la continuité de la mobilisation de certains États dans leur lutte contre le changement climatique. La proLE MARCHÉ DES POMPES À CHALEUR DANS QUELQUES PAYS EUROPÉENS.

Le degré de maturité du marché des PAC dans le secteur de la construction neuve est variable d'un pays à l'autre. Tandis que le marché atteint un palier en Suède, il est en pleine croissance en France.

PART DES ÉNERGIE RENOUVELABLES DANS LA PRODUCTION DE CHALEUR À L'HORIZON 2050

Le rapport de REN 21 (Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century) indique pour une vingtaine de pays, qu'à l'horizon 2050, la part de la géothermie pour la production de chaleur ne sera pas négligeable.



RÉPARTITION MONDIALE DES UTILISATIONS

DE LA CHALEUR PRODUITE PAR

Le chauffage des locaux

représente plus de la moitié (52 %) de l'utilisation, dont une

part importante pour les pompes à chaleur géothermiques (32 %);

les bains et piscines représentent 30 %, le chauffage des serres

(8 %), les usages industriels (4 %).

chaine conférence de Poznan en 2009 devrait permettre de donner une suite au Protocole de Kyoto et réaffirmer le rôle des énergies renouvelables dans la lutte contre le changement climatique.

# Croissance de la production de chaleur par géothermie

La production annuelle mondiale de chaleur par géothermie est estimée à plus de 6 millions de tonnes d'équivalent pétrole. Répartie dans 70 pays, cette activité a connu ces dernières années un taux de progression d'environ 5 % par an. Ce taux devrait s'accroître dans les années à venir avec l'intérêt grandissant qui est observé pour les techniques géothermiques avec pompes à chaleur.

En Europe, l'accroissement des capacités installées ces dernières années (hors pompes à

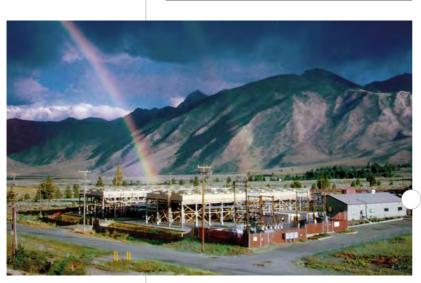
Piscines et bains 30,4 %

Piscines et bains 30,4 %

Séchage agricole 0,7 %

Chauffage de bassins d'aquaculture 4 %

Chauffage de serres 7,6 %



**BOUILLANTE (GUADELOUPE)**Vue aérienne de la centrale géothermique de production d'électricité qui produit 7 % des besoins de l'île.

chaleur géothermiques), est de l'ordre d'une centaine de MW par an, ce qui devait porter rapidement la capacité totale installée en Europe à 3 000 MW.

Si l'on intègre les pompes à chaleur géothermiques et si le rythme de progression du marché de ces produits reste élevé (plus de 20 % par an), la puissance thermique installée pour l'ensemble des applications thermiques de la géothermie pourrait vite atteindre les 18 000 MW.

# Une production d'électricité par géothermie en légère hausse

En 2005, la production mondiale d'électricité par géothermie s'élevait à 57 TWh\* et la puissance installée à environ 8 900 MW. Avec un total de 133 TWh produits annuellement, la géothermie se plaçait au troisième rang des sources d'énergie renouvelables pour la production d'électricité après l'hydraulique (2 940 TWh/an) et la biomasse (183 TWh/an) et devant l'éolien (99 TWh/an). Cette activité était présente dans 24 pays – dont 10 pays en développement – et pour 5 d'entre eux, la géothermie participait à la production nationale d'électricité pour 15 à 22 %. On estime qu'il serait possible de porter la puis-

#### NEVADA, "L'ARABIE SAOUDITE DE LA GÉOTHERMIE".

Depuis 15 ans, 240 MW d'électricité géothermique sont disponibles sur les réseaux du Nevada et le grand plan énergétique G3 prévoit de livrer 1 GW supplémentaire à destination des villes de Los Angeles et Las Vegas. Le potentiel géothermique est estimé correspondre aux besoins d'énergie de 2,5 millions d'habitants. Ici la centrale de Hot Creek dans la "Long Valley Caldera".

Geothermal Education Office - D. Benoit

sance mondiale installée de 10 à 70 GW avec les technologies conventionnelles. Elle pourrait être doublée (140 GW) avec la technologie encore expérimentale des systèmes géothermiques stimulés.

La géothermie qui satisfait aujourd'hui moins de 0,5 % des besoins mondiaux en énergie électrique pourrait ainsi accroître sa contribution de facon significative.

Certains pays, dotés de ressources de qualité, ont su déjà mettre en valeur ce potentiel. Ainsi les Philippines produisent le cinquième de l'électricité nationale par géothermie (deuxième producteur mondial) et envisagent d'atteindre une capacité de 9 500 MW en 2025. Plusieurs pays en développement, notamment en Amérique Centrale et en Afrique Orientale, pourraient satisfaire par géothermie, à moyen terme, une part importante de leurs besoins en électricité. Ainsi le Kenya prévoit en 2017 une contribution de 25 % de la géothermie dans son bilan énergétique. Les scénarios de développement indiquent une croissance modérée des exploitations traditionnelles. En Europe, les principaux pays concernés ambitionnent d'augmenter leur capacité. Ainsi, l'Italie prévoit-elle l'installation d'une centaine de MW supplémentaires dans les années qui viennent ce qui porterait la puissance installée à près de 1 000 MW. En 2020, le Portugal devrait afficher une puissance de l'ordre de 35 MW et l'Allemagne environ 10 MW. En France, avec les DOM insulaires (Guadeloupe, Martinique, Réunion) la géothermie pourrait connaître une poussée de croissance intéressante dans les 15 prochaines années, sachant que des objectifs ambitieux pour la production d'électricité par énergie renouvelable ont été fixés lors des travaux du Grenelle de

### Les perspectives technologiques

l'environnement (atteindre avec les énergies

renouvelables 50 % de la production d'électri-

Géothermie et production combinée d'électricité et de chaleur

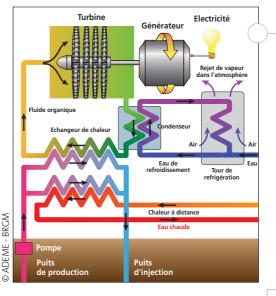
cité à l'horizon de 2020).

Le marché total de la géothermie (chaleur et électricité) était estimé à environ 2 milliards d'euros en 2005, soit 7 % du marché total des énergies renouvelables, pour un taux de crois-

Réserves mondiales d'énergie					
Vent, soleil	∞				
Force hydraulique :					
exploitable économiquement	0,7 TW				
utilisée aujourd'hui	0,3 TW				
Uranium					
avec surgénérateurs	200 ans				
sans surgénérateurs	100 ans				
Pétrole (selon consommation actuelle)	40 ans				
Gaz naturel (selon consommation actuelle)	110 ans				
Charbon (selon consommation actuelle)	> 200 ans				
Géothermie	∞				

sance annuel moyen observé depuis les années 80 d'environ 5 %.

Un moyen d'accroître les parts de marché de la géothermie est d'encourager la réalisation d'opérations assurant une production combinée d'électricité et de chaleur. Aujourd'hui, il est possible techniquement de produire de l'électricité avec des ressources géothermales dont la température est de l'ordre de 100 °C en mettant en œuvre des unités à cycles binaires (avec cycle de Rankine ou cycle de Kalina). Ces ressources sont mieux réparties que des ressources à plus haute température, mais les rendements de conversion thermo-électrique théoriquement atteignables restent limités à quelques pourcents. Une façon d'améliorer la performance de ces unités est donc de valoriser la chaleur résiduelle qu'elles produisent en



#### PRINCIPE D'UNE CENTRALE À FLUIDE BINAIRE AVEC COGÉNÉRATION.

Le fluide géothermal à travers deux échangeurs permet d'une part, la production d'électricité et d'autre part, l'alimentation en chaleur, par exemple d'un réseau de chaleur urbain. La performance de l'installation est ainisi valorisée.



LE CHAMP GÉOTHERMAL BACON-MANITO ET LE VOLCAN MAYON.

Les Philippines, deuxième puissance "géothermique" après les États-Unis pourraient porter d'ici à 2013 leur capacité installée de 1 931 MW à 3 131 MW, avec l'objectif d'atteindre 9 500 MW en 2025.

#### DE HAUT EN BAS, LES CENTRALES OLKARIA I, II ET III

A 120 km au nord-ouest de Nairobi, sur le site de la principale unité de production d'électricité géothermique du pays, Olkaria, dans ces collines situées au coeur d'un parc naturel où cohabitent girafes, zèbres, tuyaux et stations de pompage, on extrait de "l'or blanc", un mélange d'eau et de vapeur sous pression à 300 °C qui remonte des entrailles de la terre, à plus de deux kilomètres de profondeur.

alimentant par exemple un réseau de chaleur. Ce type d'opérations commence à se diffuser en Europe.

Ainsi, l'Autriche a installé sur des aquifères karstiques à 2 500 mètres de profondeur et à respectivement 106 °C et 110 °C, des unités de 1 MW à Altheim et 180 kW à Blumau.

L'Allemagne dispose également depuis 2003, sur le site de Neustadt-Glewe, d'une centrale à cycle binaire d'une puissance électrique de 230 kW qui utilise un fluide géothermal de 98 °C. Depuis, trois autres centrales à cycle binaire ont







été installées à Landau/Pfalz (3,8 MW), Bruchsal (1 MW), Unterhaching (3,2 MW).

#### Les systèmes hybrides

La dynamique actuelle des énergies renouvelables et l'attrait pour les dispositifs de production décentralisés d'électricité sont des éléments favorables à un renouveau de la géothermie. Or l'une des particularités de la géothermie est qu'elle peut aussi être associée sur une même installation à d'autres sources d'énergie (biomasse, biogaz, solaire, etc.): on parle alors d'installations hybrides. Ces installations sont amenées à se développer à deux échelles:

- -soit à l'échelle des réseaux de chaleur alimentés par la chaleur d'aquifères profonds;
- -soit à l'échelle du bâtiment où des sondes géothermiques peuvent être associées à d'autres équipements fonctionnant avec d'autres sources d'énergie renouvelable (par exemple, des panneaux solaires ou une pile à combustible, etc.).

#### LA CENTRALE ORC D'ALTHEIM (AUTRICHE).

La centrale autrichienne à cycle binaire dispose d'une puissance installée d'1 MW à partir d'une ressource géothermale de 106 °C.

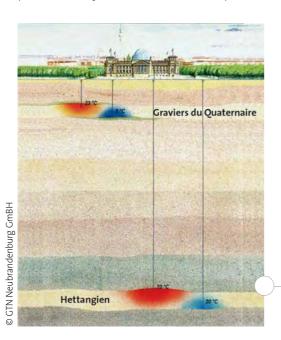


À Honey Lake en Californie, de l'eau géothermale à 118 °C puisée à 1 900 m de profondeur est utilisée en préchauffage d'une centrale de production d'électricité à partir de la combustion de déchets de bois. La centrale a une capacité de 35,5 MW, la contribution énergétique de la géothermie à ce système hybride étant de l'ordre de 20 %.

Autre cas de figure : à Kuwerau en Nouvelle-Zélande, la géothermie est associée à d'autres énergies renouvelables pour assurer la couverture énergétique d'une usine de pâte à papier. À de la vapeur extraite du champ géothermal de Kuwerau (75 kg/s de vapeur à 7 bars), vient s'ajouter celle produite par quatre chaudières qui brûlent les déchets de bois et les déchets chimiques résultant de la fabrication de la pâte à papier. L'association de ces sources énergétiques en co-génération satisfait 75 % des besoins en chaleur et 20 % des besoins en électricité de l'entreprise, la géothermie contribuant pour 25 % à la production de chaleur et pour 5,5 % à celle d'électricité.

## Les pompes à chaleur à absorption/adsorption

Encore confidentiels, les cycles thermodynamiques sans compression (adsorption et absorption en cycle fermé, dessiccation/évaporation en cycle ouvert) utilisent l'aptitude





de certains fluides ou solides à capter et relâcher l'énergie d'un gaz (le fluide frigorigène) en fonction des conditions de température ou pression. Tout comme une machine thermodynamique à compression, ces pompes à chaleur peuvent être utilisées en chauffage et/ou en rafraîchissement. Leur relative complexité et leur encombrement supérieur sont compensés par des consommations énergétiques jusqu'à 20 fois moindres. De nombreuses sources de chaleur peuvent être utilisées : géothermie, solaire, etc.

# Les technologies de systèmes géothermiques stimulés (EGS)

Jusqu'à ce jour, la géothermie n'a été développée économiquement que dans des zones géologiques à forte perméabilité naturelle, qu'il s'agisse de systèmes volcaniques fracturés ou d'horizons favorables de certains bassins sédimentaires. Il reste à tester l'immense potentiel des zones profondes des plates-formes continentales stables.

À ce titre, démontrer la faisabilité technique et économique des technologies EGS comme à Soultz-sous-Forêts en Alsace, grâce aux travaux de recherche entrepris, est un enjeu important et qui suscite un intérêt croissant dans le monde.

#### LE REICHSTAG À BERLIN

Exemple de système hybride de trigénération (cogénération, pompes à chaleur à absorption et stockage inter-saisonnier de chaleur et de froid) impliquant la géothermie.

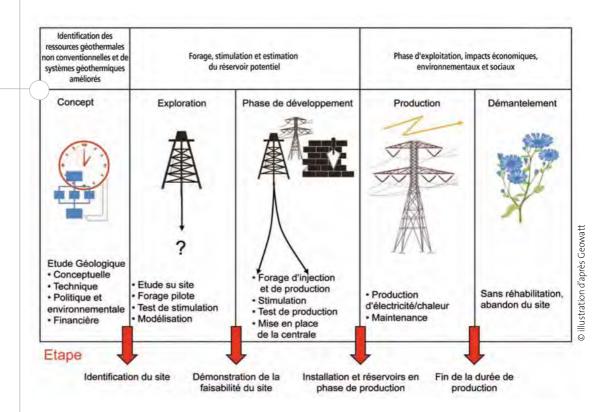
L'ÉCHANGEUR DE CHALEUR DE LA CENTRALE DE NEUSTADT-GLEWE.

L'installation est constituée d'un doublet de forages et puise à plus de 2 200 m de profondeur, un fluide à 98 °C contenu dans la formation des grès de Concorta. Pour garantir la pérennité du système, une chaudière d'appoint à gaz de 4,8 MW et deux chaudières de secours, à fioul, de 5.6 MW. complètent l'installation. Depuis 2003, la centrale produit également de l'électricité par géothermie grâce à un petit générateur électrique à fluide binaire d'une capacité de 200 kW. La géothermie couvre 95 % des besoins de chaleur de 1300 logements, de 20 locaux commerciaux et d'une entreprise industrielle.

33

#### LES PRINCIPALES ÉTAPES D'UN PROJET **EGS.**

Depuis l'identification du site jusqu'à la production d'électricité, le cycle d'un projet EGS s'étale plusieurs années.



#### **Exploiter les fluides supercritiques**

Pour l'instant, seuls des systèmes jusqu'à 350 °C, sont exploités à grande échelle dans le domaine de la géothermie. Les progrès technologiques montrent qu'il est maintenant envisageable d'exploiter d'exploiter des systèmes de très haute enthalpie (400 °C). À ces températures, l'eau est dans un état dit "supercritique", permettant de produire une quantité d'énergie au moins dix fois supérieure à celle extraite des systèmes actuels.

C'est l'objectif du projet islandais IDDP (Iceland Deep Drilling Project) démarré en 2004. Un puits pilote sur le flanc du volcan Krafla devrait atteindre une profondeur de

3 000 m, puis être approfondi par carottage pour atteindre 4 000 m et environ 400 °C en 2009, puis 5000 m et environ 500 °C en 2010.

## Le projet Engine (Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe)

Avec 31 partenaires, 16 pays d'Europe et 3 représentants de pays tiers (Mexique, El Savador, Philippines), le projet Engine a pour objectif de permettre le développement à grande échelle des systèmes géothermiques stimulés (EGS), a mis en évidence plusieurs secteurs prioritaires de recherche :

- identifier les réservoirs potentiels en profondeur en Europe, comme le MIT a pu le réaliser aux États-Unis (rapport The Future of Geothermal Energy, 2006);
- améliorer les techniques de forages en réduisant les coûts;
- caractériser et stimuler les réservoirs en modélisant finement le réservoir, son comportement en réponse à la stimulation;
- améliorer les cycles de conversion de la chaleur en énergie électrique ou en production de chaleur.

#### LE PROJET ISLANDAIS IDDP

Le forage à grande profondeur réalisé en Islande sur le flanc du volcan Krafla s'effectue souvent dans des conditions climatiques difficiles.



### Partie II

# La géothermie en France



À l'horizon 2020, la géothermie devrait contribuer dans le bouquet énergétique de la France à hauteur de plus de 1,3 million de tonnes d'équivalent pétrole.

Le contexte de la géothermie en France

Les usages domestiques et tertiaires

Les réseaux de chaleur et autres usages directs

La production d'électricité

# Le contexte de la géothermie en France

Chapitre II.1

Trois principales filières sont concernées par la géothermie en France : celle des pompes à chaleur géothermiques pour les usages domestiques et le tertiaire, celle des réseaux de chaleur destinés au chauffage collectif et celle de la production électrique, principalement dans les DOM. Il est prévu que la géothermie contribue en 2020 au mix énergétique français à hauteur de plus de 1,3 million de tonnes d'équivalent pétrole.

# Répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement

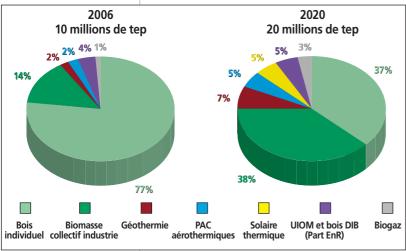
Passer de 9 % à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020 et viser, si possible, 25 %, telles sont les orientations retenues à l'issue des tables rondes du Grenelle de l'environnement qui ont réuni de juillet à septembre

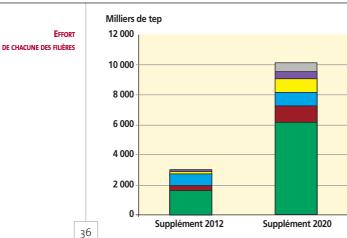
le Grenelle Environnement

2007 – événement sans précédent – les représentants de cinq groupes d'acteurs (associations, syndicats, entreprises, élus, représentants de l'État).

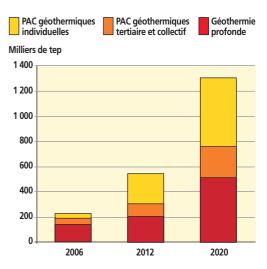
Le groupe de travail Climat-Énergie a établi un scénario de division par 4 des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici à 2050 ("facteur 4") avec une première étape en 2020 correspondant aux objectifs européens des 3 fois 20 % arrêtés en mars 2007 (-20 % de consommation finale en 2020, -20 % de CO<sub>2</sub>, minimum 20 % d'énergies renouvelables en énergie primaire). Le Grenelle de l'environnement a proposé d'augmenter de 20 millions de tep la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique à l'horizon 2020. En 2008, les comités opérationnels (Comop)

RÉPARTITION
DES SOURCES DE CHALEUR RENOUVELABLE





#### ZOOM SUR LA GÉOTHERMIE



ont été chargés de traduire ces objectifs en mesures concrètes. Ainsi le comité opérationnel du plan de développement des énergies renouvelables (Comop n° 10) estime que la géothermie doit constituer un des piliers du développement des énergies renouvelables. Dans son rapport, il indique que la géothermie est particulièrement pertinente pour la fourniture de chaud et de froid dans le bâtiment, gros secteur consommateur d'énergie. La géothermie pourrait chauffer 4 % du parc immobilier à l'échéance 2020.

L'élaboration de **Plans Climat-Énergie Territoriaux** (PCET) est proposée pour chaque échelle de grands territoires (intercommunalité, département, région). Ces plans auraient un caractère réglementaire et s'imposeraient aux documents d'urbanisme (SCOT, PLU, lotissements, ZAC). Ainsi, la priorité donnée aux réseaux de chaleur inscrite dans un PCET serait traduite dans le PLU en termes d'obligation de raccordement aux réseaux existants ou à créer, dans les zones de développement prioritaire; la procédure de classement serait ainsi remplacée par l'élaboration du PCET.

Ces propositions mettent clairement en évidence l'intérêt des réseaux de chaleur pour généraliser l'usage des énergies renouvelables et en particulier de la géothermie.

Ces possibilités offertes par les PCET devraient s'appuyer sur des moyens financiers donnés aux collectivités responsables grâce à la création d'un fonds chaleur renouvelable alimenté par une taxe sur les énergies fossiles. Le fonds chaleur permettrait d'aider au financement d'équipements de production de chaleur renouvelable par une aide à l'investissement ou par une aide au MWh produit. Ce fonds, qui ne concerne pas les installations chez les particuliers, s'adresserait aux équipements collectifs. Ces diverses dispositions doivent faire l'objet de textes législatifs ou réglementaires en 2008 et 2009. La création de ce fonds doit permettre d'assurer une rentabilité normale aux projets de valorisation thermique d'énergies renouvelables, en particulier la géothermie valorisée directement ou par l'intermédiaire de pom-

pes à chaleur.

## Le Grenelle de l'environnement : priorité à la recherche

Le développement de la géothermie à l'échelle des objectifs nationaux comprend un important effort de recherche, développement et démonstration technologique dont les axes sont les suivants.

# • Pompes à chaleur géothermiques

Amélioration de la connaissance des formations superficielles, notamment dans les zones urbaines et périurbaines. Développement de la connaissance des performances et de l'impact sur les milieux des différents types d'échangeurs souterrains. Recherche appliquée sur l'optimisation des techniques de forage et la réduction de leur coût et de leur impact.

# • Réseaux de chaleur géothermiques

Recherche et démonstration sur le thème du stockage d'énergie intersaisonnier en aquifère profond. Création d'un "Centre technique" ayant la mission de coordonner la valorisation des données d'exploitation acquises dans le Dogger.

### • Production d'électricité dans les DOM

Amélioration de la connaissance de la ressource, de sa modélisation et des méthodes d'exploitation.

#### Production de froid et climatisation dans les DOM

Dans les DOM, les besoins de froid et de climatisation sont particulièrement importants. La technologie des pompes à chaleur permet d'y répondre, sous réserve que l'on développe des produits adaptés au contexte spécifique tropical. De plus, la présence de ressource géothermale de moyenne température permet d'envisager l'utilisation de pompes à chaleur à absorption ou adsorption, sans recours à une source externe d'électricité.

# Nouvelles technologies d'exploitation de la géothermie profonde pour la chaleur et l'électricité en métropole

Avec le progrès des technologies (stimulation, cycles binaires...), la notion de ressource géothermale s'étend, en permettant d'utiliser de nouveaux réservoirs, ou d'envisager la production d'électricité à partir de ressources à relativement basse température (120 °C). Pourraient être concernées l'Alsace, l'extension des zones d'exploitation des champs hydrothermaux dans les DOM insulaires et, plus largement en métropole, les roches sédimentaires profondes (Trias) voire les roches de socles fracturées sous couverture sédimentaire.

Concernant spécifiquement la technologie EGS (Enhanced Geothermal System), il s'agit d'exploiter au mieux les acquis scientifiques du pilote réalisé à Soultz-sous-Forêts, pour maîtriser la stimulation des réservoirs et développer de nouveaux concepts d'extraction de l'énergie thermique. La plate-forme de Soultz devrait être dédiée à cet objectif.

Ce fonds pourrait également venir abonder le fonds de garantie géothermie (cf. p. 42), pour en augmenter les capacités et permette ainsi de prendre en charge un portefeuille plus important de projets.

Dans les collectivités d'outre-mer, l'objectif stratégique est de progresser vers l'autonomie énergétique par le biais de la maîtrise des consommations et le recours aux énergies renouvelables à hauteur de 50 % de la consommation d'énergie (30 % à Mayotte). La géothermie peut y contribuer fortement comme c'est le cas en Guadeloupe où elle est devrait assurer à terme 25 % de la production d'électricité.

### Les acteurs

Les acteurs de la géothermie sont différents d'une filière à l'autre; outre l'ADEME et le BRGM, il peut s'agir d'industriels fabricants de matériels, de distributeurs de matériel, de bureaux d'études, d'installateurs, d'énergéticiens, d'organismes professionnels, des pouvoirs publics, etc. Le détail et les principales adresses sont indiquées sur le site: www.qeothermie-perspectives.fr



ESAPCE INSTITUTIONNEL SUR LA GÉOTHERMIE SUR INTERNET.

Le site www.geothermieperspectives.fr a été créé par l'ADEME et le BRGM, pour "tout savoir sur la géothermie".

#### **Pour les particuliers**

L'ADEME a développé depuis 2001 le réseau "Info Energie", en partenariat avec les collectivités locales. Ce réseau d'information et de conseil de proximité sur l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables est constitué de 155 espaces et compte 300 conseillers au service du public.

Le choix d'un installateur de pompe à chaleur peut se faire en consultant l'Association française pour les pompes à chaleur (AFPAC) qui a pour mission de promouvoir le développement des pompes à chaleur en France. L'AFPAC a mis en place en 2007 une démarche qualité comportant deux volets : un marquage certifié NF PAC pour le matériel, et une

labellisation QualiPAC pour les installateurs. La liste de ces installeurs est accessible sur le site : <u>www.afpac.org</u>

Parallèlement, une commission géothermieforage a été créée au sein de l'Afpac avec l'appui technique du BRGM pour mieux prendre en compte les spécificités propres aux systèmes des PAC géothermiques et en particulier la mise en oeuvre des capteurs géothermiques verticaux.

Pour le choix d'une entreprise de forage pour la mise en place d'une sonde verticale, la liste des entreprises engagées dans une démarche d'engagement qualité (**QualiForage**) mise en place par l'ADEME, le BRGM et EDF se trouve sur le site : <a href="https://www.geothermie-perspectives.fr">www.geothermie-perspectives.fr</a>

#### Pour le tertiaire et le résidentiel collectif

Les acteurs dans cette filière sont les constructeurs et les installateurs de pompes à chaleur géothermiques, les entreprises de forage, les bureaux d'études sous-sol et les administrations. Pour la réalisation de forages, il faut faire appel à une entreprise qui respecte les procédures et les conditions énoncées dans la norme AFNOR NF X 10-999 du 20 avril 2007. Le syndicat national des entrepreneurs de puits et forages d'eau (SFE) regroupe un certain nombre d'entreprises de forage. www.sfe-foragedeau.com

Pour l'étude d'un système de chauffage et de refroidissement, l'association des ingénieurs en climatique, ventilation et froid (AICVF) regroupe des maîtres d'œuvre, fournisseurs, installateurs, scientifiques, etc. (aicvf.org). De même, l'union climatique de France (UCF) regroupe des professionnels en climatisation, ventilation et chauffage (www.ucf.fr).

L'AFPAC peut aussi être consultée pour tout conseil sur les pompes à chaleur de forte puissance (www.afpac.org).

Les bureaux d'études sous-sol sont également des acteurs essentiels. Certains sont membres du syndicat des énergies renouvelables (SER). Ce syndicat dispose depuis 2007, d'une commission géothermie regroupant les professionnels de la géothermie pour le tertiaire et le résidentiel collectif (www.enr.fr).

Enfin, les administrations régionales doivent être contactées pour toutes les formalités administratives et les déclarations obligatoires.

Au titre des acteurs, citons également la SAF Environnement qui assure la gestion de la garantie Aquapac (cf. p. 41) pour couvrir les risques des PAC sur aquifères.

#### Pour les réseaux de chaleur

La réalisation d'un réseau de chaleur nécessite l'intervention de nombreux partenaires : les Pouvoirs Publics soucieux de réduire notre dépendance énergétique, les gestionnaires d'immeubles et d'équipements (Offices et SA HLM) qui ont pour objectif de réduire les charges de chauffage des abonnés, les usagers et les habitants du quartier qui souhaitent payer le moins de charges et les professionnels, constitués de sociétés d'exploitation et des sociétés de service (sous-sol et surface), qui ont pour objectifs de développer et de diversifier leur activité.

L'association des maîtres d'ouvrage publics en géothermie (AGéMO) a été créée en 1986. Elle regroupe la plupart des maîtres d'ouvrage de la région parisienne. Elle a pour objectif d'étudier les problèmes communs aux maîtres d'ouvrage publics en géothermie et de développer les actions susceptibles de résoudre ces problèmes. Elle est aussi un lieu d'échanges et d'information pour analy-





CHANTIER DU DOUBLET D'ORLY.

Mobilisant plusieurs partenaires, le doublet géothermique d'Orly-Choisy a été réalisé au second semestre 2007, en plein centre ville à 1 700 m de profondeur, dans le Dogger ; il produit plus de 300 m<sup>3</sup>/h d'eau à 76 °C.

ser les problèmes techniques, réglementaires, financiers, organiser des actions communes pour la promotion de la géothermie.

La Fédération française des entreprises gestionnaires de services aux équipements, à l'énergie et à l'environnement (FG3E) regroupe 6 syndicats dont les adhérents s'intéressent notamment au développement des réseaux de chaleur et de froid, à la cogénération chaleur/électricité ou encore au développement des énergies renouvelables comme la géothermie. <a href="https://www.fg3e.fr">www.fg3e.fr</a>

Il est aussi indispensable de faire appel à desbureaux d'études pour l'assistance à maîtrise d'ouvrage, pour les études thermiques et les études sous-sol.

Les organismes régionaux figurent aussi parmi les acteurs de la géothermie : en premier lieu les directions régionales du MEEDDAT et les Régions qui disposent, pour beaucoup, de structures spécialisées :

 Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies d'Ile-de-France (ARENE IDF), à Paris.

POMPE À CHALEUR GÉOTHERMIQUE.

Il est conseillé de faire appel à un installateur spécialiste des pompes à chaleur et de choisir des matériels certifés NF PAC.



TRAVAUX DE RACCORDEMENT SUR UN RÉSEAU DE CHALEUR.

La longueur des réseaux de chaleur est importante comme celui de Chevilly-Larue - l'Haÿ-les-Roses -Villejuif qui comporte 72 km de canalisations.

- Agence de Développement Économique de la Corse (ADEC), à Ajaccio.
- Agence Pour l'Environnement et le Développement Soutenable en Bourgogne (ALTERRE), à Dijon.
- Agence de l'Énergie et de l'Environnement en Poitou-Charentes (APCEDE), à Poitiers.
- Agence Régionale de l'Environnement de Haute-Normandie (AREHN), à Rouen.
- Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine (AREL), à Metz.
- Agence Régionale pour l'Environnement Midi-Pyrénées (ARPE MP), à Toulouse.
- Agence Régionale de l'Énergie Réunion (ARER), à Saint-Pierre.
- Agence Régionale Pour l'Environnement PACA (ARPE PACA), à Aix-en-Provence.
- Centre Ressource du Développement Durable (CERDD), à Loos-en-Gohelle.
- Rhônalpénergie-Environnement (RAEE), à Lyon.

Le Réseau des Agences Régionales de l'Énergie et de l'Environnement (RARE) est basé à Toulouse (www.rare.asso.fr).

# Les aspects réglementaires

Une opération de géothermie peut être définie comme une opération d'exploitation de l'énergie thermique du sous-sol, qui s'effectue avec ou sans prélèvement d'eau. L'exploitation d'énergie sous forme thermique ren-

voie donc au corpus réglementaire qui découle du code minier, alors que le prélèvement d'eau renvoie a celui qui découle du code de l'environnement (loi sur l'eau, avant sa codification).

La réalisation d'une opération de géothermie peut donc être conditionnée à l'obtention d'autorisations au titre de la législation minière et d'autorisations au titre de la législation environnementale, voire du code de la santé publique.

Pour mieux s'adapter aux évolutions techniques des opérations de géothermie en nappe peu profonde, il est envisagé de moderniser les textes d'application du code minier pour notamment mieux préciser la notion de gîte géothermique afin de lever toute ambiguite entre les opérations relevant du code minier et celles relevant du code de l'environnement.

# Les aides et les dispositifs financiers

Il existe des mécanismes financiers nationaux et des aides régionales. Le champ des dispositifs fiscaux est assez large ; il concerne les particuliers (crédit d'impôt), les entreprises (amortissement accéléré) et les collectivités. L'ADEME et les collectivités territoriales (région, département, agglomérations, etc.) sont susceptibles d'aider les études de faisabilité, et dans certaines conditions l'investissement.

#### Les aides de l'ADEME

L'ADEME a notamment mis en place un dispositif incitatif d'aides financières spécifique à la géothermie permettant de financer des études de faisabilité et des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage, ainsi que des investissements tant pour la réhabilitation d'opérations existantes que pour la réalisation de nouvelles opérations. Ce dispositif peut être complété par des aides régionales (voire européennes, fonds FEDER).

L'ADEME propose aussi des outils méthodologiques et des aides financières, sous forme de subventions, aux organismes qui font appel à un prestataire pour réaliser plusieurs types d'interventions : pré diagnostic, diagnostic ou étude de faisabilité.

Dans le cadre de la mise en place du fonds Chaleur prévu par le Grenelle de l'environnement, les mécanismes devraient évoluer.

# Pour les particuliers : crédit d'impôt, aide de l'ANAH et prêt à taux zéro

Pour les particuliers, le crédit d'impôt porte sur les coûts des seuls équipements dont la finalité essentielle est la production de chaleur, quelle que soit la date d'achèvement de l'immeuble (pompes à chaleur, échangeurs, pompes de circulation...).

Le taux du crédit d'impôt pour les pompes à chaleur est fixé chaque année par la loi de finances. Pour être éligible, le coefficient de performance (COP) de la PAC est pris en compte. Cette procédure ne concerne que les particuliers.

L'Agence Nationale d'Amélioration de l'Habitat (ANAH) peut accorder prime et subvention pour l'installation d'une pompe à chaleur dans la résidence principale d'un particulier, construite il y a plus de quinze ans (www.anah.fr).

Enfin, la création d'un prêt à taux zéro écologique pour favoriser la réalisation de travaux améliorant les performances énergétiques des logements est également envisagée à partir de 2009.

# Pour les entreprises : amortissement fiscal accéléré

Les entreprises ont droit à l'amortissement fiscal accéléré. Ce dispositif offre aux entreprises la possibilité de pratiquer un amortissement immédiat, sur douze mois à compter de leur mise en service, des matériels destinés à produire de l'énergie renouvelable (PAC, matériels divers, matériels de télégestion...).

# Pour le résidentiel collectif et le tertiaire : procédure Aquapac et certificats d'économies d'énergie

La procédure Aquapac a été mise en œuvre en partenariat entre l'ADEME, le BRGM et EDF. Il s'agit d'une assurance qui couvre les risques géologiques liés à la possibilité d'exploitation énergétique d'une ressource aquifère située en général



à moins de 100 m de profondeur, puis au maintien de ses capacités dans le temps. Elle s'applique aux installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance thermique supérieure à 30 KW. C'est donc une double garantie, dont les deux aspects sont indissociables :

- la garantie de recherche couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour le fonctionnement des installations tel qu'il avait été prévu;
- la garantie de pérennité couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource, en cours d'exploitation.

RÉALISATION D'UN FORAGE POUR
L'INSTALLATION D'UNE SONDE VERTICALE.

Les forages doivent être effectués par une entreprise qualifiée (engagement Qualiforage). Il faut aussi respeter les procédures administratives concernant la protection du sous-sol et de la ressource en eau.



POMPE DE CIRCULATION D'UNE CENTRALE GÉOTHERMIQUE.

Le contrôle de la pompe de circulation permet d'assurer le bon fonctionnement de l'installation (ici celle de Chevilly-Larue - L'Haÿ-les-Roses).



Aquapac assure pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage et le transfert de la ressource jusqu'à l'échangeur eaueau et sa réinjection. La garantie ne concerne pas les éventuels incidents de chantier, ni les conséquences des défauts de conception, de réalisation ou de maintenance. Le maître d'ouvrage conserve l'entière responsabilité du respect de la réglementation, du choix des bureaux d'études ou entreprises, et de la réalisation de l'opération.

La gestion administrative et financière de la garantie Aquapac est assurée par la SAF Environnement.

Pour le résidentiel collectif et le tertiaire, les certificats d'économies d'énergie concernent les pompes à chaleur de type eau/eau (cf p. 14) à destination du bâtiment tertiaire d'une surface inférieure à 5 000 m² (fiche d'opération n° BAT-TH-13) et à destination des bâtiments de grande taille à usage professionnel d'une surface comprise entre 5 000 et 10 000 m² (fiche d'opération n° BAT-TH-13-GT).

# Pour les réseaux de chaleur : TVA au taux réduit et certificats d'économies d'énergie

www.industrie.gouv.fr/energie/certificats.htm

Pour favoriser le développement de la géothermie, les pouvoirs publics ont mis en place plusieurs mesures et instruments de soutien.

Le fonds de garantie Géothermie permet une couverture des risques géologiques à court et long terme.

FORAGE GÉOTHERMIQUE D'ORIV.



Cela concerne l'application du taux de TVA réduit aux réseaux de chaleur renouvelable, l'éligibilité de la géothermie aux certificats d'économie d'énergie et aux quotas CO<sub>2</sub>, ainsi que le système de couverture des risques géologiques et miniers.

L'article 76 de la loi n° 2006-872 du 13 juillet 2006 portant engagement national pour le logement étend le bénéfice du taux réduit aux abonnements relatifs aux livraisons d'énergie calorifique distribuée par réseaux ainsi qu'à la fourniture de chaleur distribuée par ces réseaux lorsqu'elle est produite au moins à 60 % à partir de sources d'énergie renouvelable ou de récupération. Le taux réduit applicable est de 5,5 %.

Les certificats d'économies d'énergie concernent les réseaux de chaleur alimentés par la géothermie dans le cas de production de chaleur renouvelable (géothermie) sur un réseau de chaleur (Fiche Opération n° RES-CH-01) et dans le cas d'un raccordement à un réseau de chaleur alimenté par des énergies renouvelables

www.industrie.gouv.fr/energie/certificats.htm

# Pour les aquifères profonds : fonds de garantie Géothermie

Compte tenu du poids financier important d'une opération de géothermie et de la durée élevée d'amortissement des installations, les pouvoirs publics ont mis en place une procédure de couverture des risques géologiques à court terme – c'est-à-dire lors de la réalisation des forages (débit et température insuffisantes) – et à long terme – c'est-à-dire pendant l'exploitation de l'installation (diminution du débit de fluide géothermal, sinistres liés au fluide géothermal affectant les matériels et les équipements de la boucle géothermale).

La durée de la garantie a été fixée à 20 ans. Les décisions d'agrément d'opérations nouvelles ou de versement d'indemnisations des sinistres relèvent exclusivement du Comité Technique, organe indépendant institué par les statuts du Fonds de Garantie Géothermie.

Antes

# Les usages domestiques et tertiaires

Chapitre II.2

La géothermie avec usage de pompes à chaleur sur aquifères superficiels, sur capteurs horizontaux ou sur sondes verticales suscite un intérêt croissant depuis quelques années pour le chauffage et le refroidissement. La France connaît un développement rapide et sans précédent de ce marché qui devient un des plus importants d'Europe.

Installateur spécialiste

pompes à chaleur

# La croissance du marché des pompes à chaleur

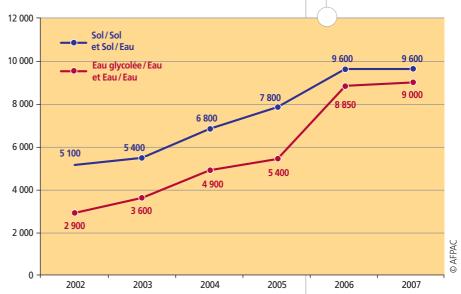
En France, en 2007, 19 000 pompes à chaleur géothermiques (PACG) ont été installées chez les particuliers. Sur ce nombre, 15 000 étaient des installations avec capteurs horizontaux (essentiellement dans l'habitat neuf), 2 000 des 10 000 installations sur aquifères superficiels (dont 15 % dans l'habitat existant) et 2 000, des installations sur capteurs verticaux (là également principalement dans l'habitat neuf).

Dans le domaine du tertiaire et du résidentiel collectif, le marché des opérations sur aquifères superficiels est en augmentation constante depuis quelques années ; celui des opérations sur champs de sondes est en émergence avec plusieurs dizaines d'opérations par an, enfin des projets sur pieux géothermiques commencent à voir le jour.

installateurs au travers d'un cursus de formation comportant trois modules, dispensés par six centres de formation ayant contractualisé avec l'AFPAC, le respect par l'installateur d'une

MARCHÉ DES PAC GÉOTHERMIQUES DE 2002 À 2007, EN FRANCE.

En 5 ans, le marché a plus que doublé.



# **OualiPAC, la référence qualité**

COR Qualipro Afin de pérenniser le développement des pompes à chaleur, l'Afpac a lancé la démarche qualité PAC. Elle est composée de deux volets : le marquage "NF PAC" pour le matériel et composée de deux volets : le marl'obtention du certificat d'installateur QualiPAC, spécialiste de la pompe à chaleur.

MATÉRIEL NE PAC La marque NF PAC garantit un niveau de qualité et de performance pour les pompes à chaleur et notamment un seuil minimal de COP au moins de 3,3 (soit 3,3 kWh restitués en chaleur pour 1 kWh électrique consommé). QualiPAC, le second volet de la démarche, repose sur trois supports : la formation des

charte de qualité comportant 10 engagements et le contrôle aléatoire des instal-

> lations réalisées par un organisme indépendant, comme l'APAVE.

# La démarche **OualiForage pour les** sondes verticales

Concernant plus spécifiquement, les PAC avec capteurs verticaux peu profonds, l'ADEME, le BRGM et EDF ont mis en place une démarche d'engagement qualité pour les entreprises de forage de sondes géothermiques, afin de fournir un standard de qualité et d'améliorer la performance des

#### PIEDS DE SONDE.

Au fond des forages, se trouvent les pieds des sondes verticales. Ils sont électrosoudables aux tubes en polyéthylène.



installations. La démarche vise à encadrer le marché des pompes à chaleur sur sondes géothermiques verticales grâce à :

brgm

QualiForage

- la mise en place d'un "standard de qualité" avec un cahier des charges de référence pour la réalisation de sondes selon les règles de l'art;
- la promotion d'une image de marque optimale de la sonde géothermique verticale.
   La gestion de la démarche engagement qualité ainsi que la sélection des entreprises sont pilotées par le BRGM.

Une norme AFNOR spécifique aux forages de sondes géothermiques est en cours de mise

au point. Elle constituera un complément à la norme NF X 10-999 d'avril 2007 sur les forages d'eau et de géothermie.

# La plate-forme expérimentale pour les pompes à chaleur

Comment augmenter les performances des capteurs (échangeurs souterrains), comment en réduire le coût, y compris pour leur installation dans le sol ? Telles sont quelques-unes des questions qui vont être étudiées sur la plate-forme expérimentale d'Orléans installée sur le site du BRGM, financée dans le cadre du contrat de projets État-Région Centre.

La plate-forme d'essais va permettre d'expérimenter, dans des conditions réalistes, tous types d'échangeurs souterrains : ceux déjà présents sur le marché, mais aussi des échangeurs innovants (au regard de leur géométrie en particulier). Les dispositifs seront testés sur des périodes de plusieurs mois (incluant périodes estivales et hivernales) et connectés sur des boucles simulant l'appel énergétique d'un bâtiment. Les données recueillies par les partenaires sur un réseau de sites instrumentés seront parallèlement centralisées et intégrées, puis exploitées dans des modèles numériques.

Plusieurs questions décisives seront étudiées: impacts à court et long terme des capteurs sur le sous-sol, relation entre dimensionnement et impacts sur la température du sol afin d'optimiser les coûts, perturbation éventuelle des équilibres géochimiques, hydrogéologiques, biologiques...

# Inventorier les aquifères superficiels

Si les capteurs fermés horizontaux et verticaux peuvent être installés partout, une opération sur aquifère requiert une ressource sur le lieu de réalisation.

Un aquifère peut être défini comme une couche géologique constituée de roches perméables dont les caractéristiques physiques permettent le prélèvement de l'eau en quantité suffisante par captage. Le potentiel

#### PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE POUR LES POMPES À CHALEUR.

Cette vue éclatée montre quelques-uns des ouvrages expérimentaux qui seront installés sur la plate-forme réalisée sur le site du BRGM, à Orléans, dans le cadre du contrat de projets État-Région Centre.



© BRGM IM@GÉ

des aquifères superficiels connaît de fortes disparités selon les régions, certaines en sont bien pourvues (Ile-de-France, Centre, Aquitaine, Alsace, etc.).

La synthèse des connaissances hydrogéologiques des aquifères superficiels de plusieurs régions est consultable sur l'espace régional du site <u>www.geothermie-perspectives.fr</u>

À ce jour, des informations spécifiques pour plusieurs régions, comme l'Ile-de-France, le Centre ou la Lorraine sont disponibles. Les résultats sont présentés sous forme d'un système d'informations géographiques (SIG) destiné à fournir, pour un point donné du territoire régional (commune par exemple), les caractéristiques des principaux aquifères.

Cet outil d'aide à la décision, fondé sur l'inventaire du potentiel des nappes superficielles, permet d'évaluer les ressources géothermales disponibles dans la tranche de terrains situés entre o et environ 100 mètres de profondeur.

Les inventaires des ressources géothermales ont été établis à partir des données disponibles au BRGM dans la banque des données du sous-sol (BSS), dans la base d'accès aux données des eaux souterraines (ADES) ainsi qu'à partir du référentiel des systèmes aqui-

fères superficiels. Outre la dimension géologique le système propose une évaluation de l'exploitabilité des aquifères à partir d'une analyse multicritère des données disponibles.

La température de ces aquifères peu profonds est de l'ordre de 12 à 16 °C et les débits peuvent dans certaines configurations dépasser 100 m³/h. Les pompes à chaleur associées à cette ressource ont un coefficient de performance stable qui peut dépasser 4.

Dans ces conditions, en considérant un prélèvement de 7 °C sur l'eau puisée, la puissance disponible est de l'ordre de 10 kW/m<sup>3</sup>/h. Avec un débit de 100 m<sup>3</sup>/h, il est possible d'assu-

#### PRINCIPALES "MASSES D'EAU SOUTERRAINE" POUR LE TERRITOIRE MÉTROPOLITAIN.

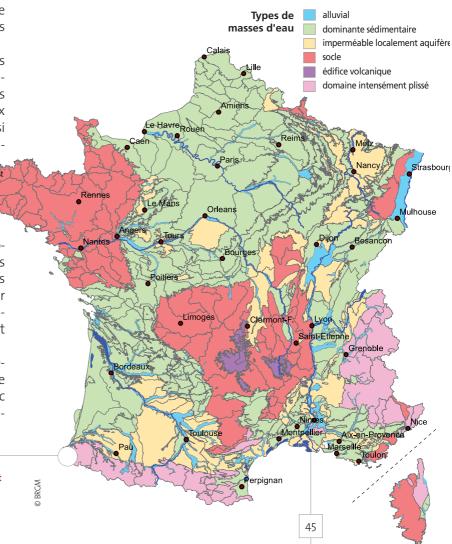
Le référentiel cartographique national pour la France métropolitaine est composé de 533 masses d'eau souterraine dont 498 à l'affleurement. Six principaux types de masses d'eau souterraines ont été identifiés.

# Qualiforage : un standard de qualité

Les entreprises adhérant à Qualiforage garantissent le respect des règles de l'art pour :

- le dimensionnement des sondes, en fonction notamment de la nature des terrains et de la présence ou non d'eau souterraine pour répondre correctement aux besoins de chauffage;
- le respect de l'espacement minimal de 10 mètres entre deux sondes pour éviter le gel du sous-sol;
- les conditions techniques de réalisation avec la mise en œuvre d'une technique de forage adaptée, la mise en place des tubes à l'aide d'un touret pour ne pas endommager la sonde, la cimentation\* sous pression depuis la base de la sonde;
- les tests in-situ de l'étanchéité des sondes ;
- le respect de la réglementation et la clarification des responsabilités entre le foreur, le chauffagiste et le client.

La liste et la carte des foreurs adhérant à Qualiforage sont disponibles sur le site : <a href="https://www.geothermie-perspectives.fr">www.geothermie-perspectives.fr</a>



rer le chauffage pour un ensemble tertiaire de 15 000 m² (et éventuellement le refroidissement).

Avant de passer à la réalisation, il est indispensable de faire une étude hydrogéologique, dans le cadre d'une étude de faisabilité.



#### LA POMPE À CHALEUR DES **M**URFAUX.

En hiver, la PAC d'une puissance de 300 kW, alimente les planchers chauffants. En été, la nappe située à 30 m de profondeur, à une température de 15 °C) est utilisée, via un échangeur, en géocooling pour rafraîchir le bâtiment. Une programmation du chauffage est réalisée sur sept zones selon leur exposition et les horaires de présence.

# Quelques exemples de réalisations

### Le pôle administratif des Mureaux (Yvelines)

Mis en service en 2005, le pôle administratif des Mureaux est un bâtiment exemplaire de 4 500 m² construit en appliquant la démarche HQE. Une pompe à chaleur d'une puissance de 300 kW assure le chauffage et le rafraîchissement. La source d'énergie est la nappe de la craie du Sénonien ; la profondeur des deux puits (pompage et réinjection) est de 30 mètres et le débit d'exploitation de l'ouvrage atteint 32 m³/h.

Le suivi des performances effectué par EDF durant 3 ans, montre une consommation annuelle d'environ 100 kWh par m² et par an, tous usages confondus ; le coefficient de performance (COP) de l'installation a été de 4,3 en hiver et de 13,7 en été.

En hiver, la PAC alimente les planchers chauffants, tandis qu'en été, la nappe à 15 °C est utilisée, via un échangeur, en géocooling\* (sans la pompe à chaleur) pour rafraîchir le bâtiment.

## Le collège des Bernardins (Paris)

Construit aux XIII° et XIV° siècles, le collège des Bernardins a été classé monument historique. Il a fait l'objet d'un programme de rénovation et d'extension pour notamment dégager l'ensemble des volumes des rez-dechaussée et du sous-sol de l'ancien réfectoire, à substituer une charpente neuve selon le profil d'origine à celle actuellement existante, datant du XIV° siècle.

D'importants travaux de renforts ont été réalisés, tant en fondations qu'en superstructures, pour permettre la réutilisation des locaux en surfaces de bureaux et de salles de cours. Le chauffage et le refroidissement sont assurés par une pompe à chaleur géothermique sur aquifère superficiel. Un doublet de forages a été réalisé à 28 m de profondeur dans les calcaires et marnes du Lutécien de l'Éocène inférieur et moyen, avec un débit d'exploitation de 60 m³/h. Grâce à ce système, les émissions de CO<sub>2</sub> évitées représentent 63 tonnes par an.



# La CAF de Lyon (69)

Depuis une dizaine d'années, le bâtiment de la Caisse d'Allocations Familiales de Lyon est équipé d'une installation qui comporte deux pompes à chaleur sur aquifère d'une puissance de 600 kW chacune. La chaleur produite est distribuée dans ce bâtiment d'une surface de près de 17 000 m², via un réseau de ventilo-convecteurs à 4 tubes. Les pompes à chaleur sont réversibles. Elles fonctionnent en mode thermofrigopompe, c'est-à-dire qu'elles peuvent produire simultanément du chaud et de froid. Ainisi, le régime de fonctionnement en eau glacée est de 7 à 12 °C l'été et de 10 à 12 °C l'hiver. En eau chaude, il est de



LES BUREAUX DE LA CAF DE LYON.

Deux pompes à chaleur géothermiques sur aquifère assurent le chauffage et le refroidissement des locaux de la CAF de Lyon.

35 °C pour + 20 °C à l'extérieur et de 45 °C pour o °C à l'extérieur. Par rapport à une solution traditionnelle (chaufferie gaz et groupe froid), la solution PAC sur aquifère superficiel permet une diminution du coût énergétique de la production de chaud et froid de 37 %. Elle permet aussi chaque année de réduire les rejets de CO2 d'environ 250 tonnes, soit une économie de 70 % par rapport à une solution plus classique avec combustible fossile. Le coefficient de performance (COP) de l'installation mesuré depuis l'origine est en moyenne de 3,8, c'est-à-dire que pour 1 kWh électrique consommé, l'installation en a fourni 3,8 sous forme de chaud ou froid.

# La Cité du Design à Saint-Étienne (Loire)

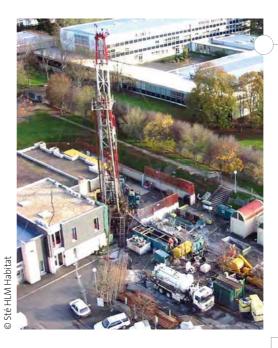
La Cité du Design qui ouvre ses portes fin 2009 sur le site de l'ancienne Manufacture d'Armes, constitue une plate-forme de création, de recherche, d'enseignement et de formation par et sur le design. Outre la réhabilitation des trois bâtiments inscrits au titre des Monuments Historiques, deux nouveaux bâtiments ont été créés: la Tour Observatoire et la Platine, un bâtiment contemporain de 7000 m².

La Platine est un bâtiment de Haute Qualité Environnementale (HQE), novateur par son approche énergétique et climatique. Ainsi, les systèmes de chauffage et de refroidissement par rayonnement (circulation d'eau dans les planchers en béton) sont alimentés par 120 pieux géothermiques d'une profondeur de 10 à 30 mètres, 10 sondes géothermiques d'une profondeur de 150 mètres, et un puits canadien qui a été réalisé en fermant le vide sanitaire sous le bâtiment pour le rafraîchissement de l'auditorium. La Platine est le premier bâtiment en France à utiliser cette technique des pieux géothermiques. Le suivi de la performance énergétique de ce système et du concept énergétique dans son ensemble fait l'objet d'une attention particulière, dans le cadre d'un partenariat entre Saint-Étienne Métropole, la Cité du Design, l'ADEME, EDF et le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).



GRANDE PREMIÈRE À LA CITÉ DU DESIGN DE SAINT-ÉTIENNE.

120 pieux géothermiques, 10 sondes verticales et un puits canadien sont mis en œuvre pour le chauffage et le refroidissement du bâtiment HQE.





LYON CONFLUENCE (RHÔNE).

Le nouveau quartier Lyon Confluence, qui prolongera le centre ville jusqu'à la pointe de la Presqu'île, recourt à des pieux énergétiques et à un système de pompes à chaleur sur aquifère.

# Châteauroux (Indre), pionnier de la géothermie en région Centre.

L'ensemble collectif d'environ 1300 logements est alimenté par une centrale géothermique composée d'un forage captant les formations sableuses du Trias entre 482 et 670 m associé à 4 pompes à chaleur à moteur à gaz d'une puissance unitaire de 350 kW. Le forage qui avait été réalisé en 1983 a été réhabilité en 2002. L'eau puisée à 34 °C est pompée à un débit de 100 m<sup>3</sup>/h dans le puits principal au Trias. Elle est mélangée à celle d'un puits secondaire exploitant l'aquifère du Dogger, capable de concourir jusqu'à 120 m<sup>3</sup>/h d'eau à 16 °C.

# Les réseaux de chaleur et autres usages directs

Chapitre II.3

La France a joué un rôle de pionnier dans le développement de la géothermie dans le Bassin parisien avec l'aquifère du Dogger, qui présente la plus grande densité au monde d'opérations de géothermie en fonctionnement.

Sur l'ensemble de son sous-sol, la France recèle un véritable trésor géothermique dont une infime partie est aujourd'hui exploitée. On dénombre un total de 65 installations dédiées au chauffage urbain réalisées pour l'essentiel dans les années 1980. Elles assurent la couverture des besoins de près de 200 000 équivalent-logements, dont 150 000 en région parisienne. Après une quinzaine d'années de pause, liée aux cours relativement bas de l'énergie fossile, la géothermie connaît un regain de nouvelles opérations, notamment en lle-de-France.

Des ressources importantes

Sous les effets des chocs pétroliers et de la mise en place de politiques incitatives, près d'une centaine d'opérations en majorité dans le Bassin parisien ont alors été réalisées en quelques années, jusqu'en 1985 où des problèmes économiques (cours du pétrole), techniques (corrosion et dépôts dans les tubages)

et financiers (prêts contractés avec des taux élevés en période d'inflation vite révolue) stopperont net le développement de la filière. En 1989, les pouvoirs publics vont s'engager dans une négociation avec les maîtres d'ouvrage du Bassin parisien. Le rééchelonnement des prêts permettra le maintien en fonctionnement d'une trentaine d'exploitations.

Au plan technique, les problèmes de corrosion liés au fluide géothermal exploité ont été depuis complètement résolus. Les exploitations fonctionnent aujourd'hui encore, avec un taux de disponibilité moyen proche de 95 % et sans qu'ait été constatée de baisse de température de la ressource géothermale.

# Une filière qui repart

Depuis 1961, date du premier forage à 600 m de profondeur à la Maison de la radio (Paris), 117 forages profonds, qu'il s'agisse de puits forés ou de forages existants réhabilités, ont été réalisés en France métropolitaine, principalement dans le Bassin parisien et le Bassin aquitain.

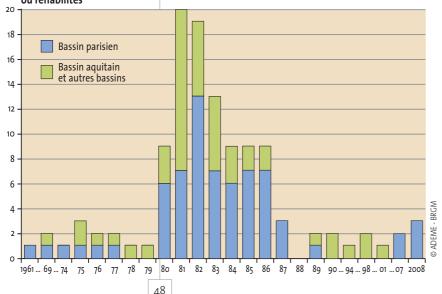
Le graphique ci-contre de l'évolution annuelle des puits forés ou réhabilités montre l'impact des périodes de "chocs pétroliers" notamment en 1979 et le désengagement constaté à partir de 1987. 97 de ces forages ont été mis en exploitation et actuellement 65 installations géothermales sont exploitées en puits uniques, doublets ou triplets. Un tiers des installations environ a été arrêté en raison de difficultés d'ordre technique ou économique ou pour cause de concurrence énergétique.

Les apports thermiques de la géothermie basse température permettent de substituer annuellement 1 265 GWh, ce qui représente environ 130 000 tep économisées.

FORAGE ET RÉHABILITATION DES DE PUITS GÉOTHERMIQUES DEPUIS 1961.

117 forages profonds ont été l réalisés en France de 1961 à 2008, principalement dans les Bassins parisien et aquitain.

Nombre de puits forés ou réhabilités



Les émissions polluantes évitées sont estimées à plus de 400 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an. En Ile-de-France, la géothermie peut être considérée comme la première énergie renouvelable. En effet la région compte à ce jour, 34 centrales géothermiques en fonctionnement, dont 16 dans le département du Val-de-Marne qui, à lui seul, concentre 40 % de la production des réseaux de chaleur géothermique français.

# 30 000 nouveaux logements chauffés par géothermie en 2013 en lle-de-France

Dans cinq ans, de nouvelles familles franciliennes pourront se chauffer par géothermie. En effet, soucieuse de réduire la consommation d'énergies fossiles et les émissions de gaz à effet de serre sur son territoire, la Région francilienne relance la géothermie en investissant, avec l'ADEME, sur la période 2008-2013, 22 millions d'euros dans six opérations : la création de six nouvelles opérations (doublets) et la réhabilitation de six opérations. Des installations qui devraient profiter en tout à l'équivalent de 30 000 logements.

Les nouveaux puits serviront au chauffage de logements et bâtiments publics dans plusieurs communes d'Ile-de-France. Quant aux réhabilitations, elles concerneront les puits arrivés en fin d'exploitation comme à Sucyen-Brie (94) et à La Courneuve Sud (93).

Toutes ces opérations s'ajoutent au plan énergie 2006-2011 de la Région, qui vise lui aussi au développement de la géothermie. L'un de ses objectifs est en effet de soutenir les collectivités qui, pour produire de la chaleur, font ce choix écologique et économique.

# L'opération d'Orly-Choisy

À Orly et Choisy (Val-de-Marne), 8 000 logements sont chauffés par de l'eau à 76 °C prélevée à 1 700 mètres de profondeur : la construction d'un doublet de forage a été lancée, en juillet 2007, par l'Office public d'aménagement et de construction (Opac) du Val-de-Marne. C'est le premier dans la région depuis 1996.



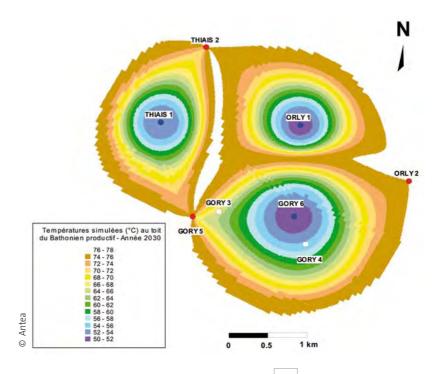
#### FRESNES (VAL-DE-MARNE):

Mis en service en 1986, le doublet de forages au Dogger offre une température en tête de puits de 73 °C, qui alimente un réseau de chaleur qui alimente aujourd'hui 5 350 équivalent-logements.

#### OPÉRATION D'ORLY-CHOISY.

Les tiges de forage sont assemblées les unes aux autres au fur et à mesure de l'avancement du forage

Ci-dessous : la modélisation de l'impact thermique indique la position des "bulles thermiques" à l'horizon 2030.



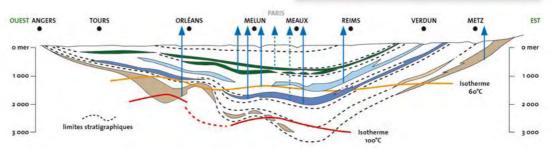
#### LES RESSOURCES GÉOTHERMALES DU BASSIN PARISIEN.

Formé par un empilement de couches sédimentaires qui se sont déposées au cours des trois dernières ères géologiques sur un socle cristallin ou granitique plus ancien, le Bassin parisien possède la particularité d'être très stable. Cinq grands réservoirs aquifères géothermaux y ont été recensés, dans différentes couches de sédiments. La plus connue et la plus exploitée est celle du Dogger (un étage du Jurassique) dans la région lle de France. Ce réservoir, calcaire, qui s'étend sur 15 000 km², offre des températures variant entre 56 °C et 85 °C et assure le fonctionnement de 34 installations géothermales. Mais dans la région Centre, ce sont les sédiments gréseux du Trias qui permettent à Châteauroux de chauffer 1 310 logements HLM.

Et à Paris, c'est le réservoir situé dans les sédiments de l'Albien (les "sables verts") qui assure le chauffage et le refroidissement de la Maison de Radio France. Les sédiments du Lusitanien et du Néocomien sont, quant à eux, peu exploités, bien que leurs ressources ne soient pas négligeables.

PÉRIODES			AQUIFÈRES			
	TERTIAIRE 65 millions d'années					
SECONDAIRE	CRÉTACÉ 140 millions d'années	NÉOCRÉTACE				
		ÉOCRÉTACE	Sables de l'Albien Sables du Néocomien			
	JURASSIQUE	MALM				
		DOGGER	Calcuires du Dogger			
		LIAS	Grès du Retien			
	TRIAS		Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest			
	PRIMAIRE					





L'étude du projet a commencé en 2006 dans le cadre du plan de relance de la géothermie profonde en Ile-de-France initié en 2004 par l'ADEME, l'ARENE Ile-de-France et le BRGM. Après les forages réalisés entre juillet et décembre 2007, la mise en service du doublet est intervenue à la fin février 2008. L'opération permet d'éviter le rejet annuel de 10 000 tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et de s'affranchir de la fluc-

tuation du cours du gaz. Elle s'avère, en coût global sur l'ensemble de la durée de vie du projet, la solution la moins onéreuse.

# Le triplet de Sucy-en-Brie

La ville de Sucy-en-Brie (Val-de-Marne) a décidé de pérenniser l'exploitation qu'elle fait de la géothermie depuis plus de 20 ans et



FORAGE D'ORLY (94).

Le forage d'Orly réalisé en 2007, marque le renouveau de la géothermie en Ile-de-France.



© Ville de Sucy-en-Brie

d'étendre maintenant son réseau de chaleur géothermique qui fournira aux 2 900 équivalents logements, 34 760 MW d'énergie géothermique chaque année, assurant près de 90 % de leurs besoins.

Ainsi, un nouveau forage destiné à la production vient d'être réalisé à environ 2 000 mètres de profondeur, tandis que les deux anciens puits ont été réhabilités pour la réinjection du fluide géothermal. Ce "triplet" offre une température d'exploitation de l'ordre de 77 °C avec une débit potentiel de 300 m³/h.

Plusieurs bâtiments publics et à usage d'habitation ont été raccordés au réseau de chaleur existant et une extension vers d'autres quartiers de la Ville est envisagée.



RÉSEAU DE CHEVILLY-LARUE, L'HAŸ-LES-ROSES - VILLEJUIF

Avec ses 72 km de canalisations, c'est le plus grand réseau géothermique d'Europe qui dessert 19 200 équivalents logements.

Principales opérations en Ile-de-France en service en 2008									
Opérations	Dépar- tement	Date de mise en service	Température tête de puits en °C	Débit en m³/h	Équivalent- logements	MWh géother- mique	Taux de couverture géoth. %		
Alfortville	94	1986	73	275	4 415	43 155	78		
Blanc-Mesnil Nord	93	1983	66	175	2 754	25 471	74		
Bonneuil-sur-Marne	94	1986	79,3	280	3 078	25 519	66		
Cachan	94	1984	70	360	4 605	49 028	85		
Champigny	94	1985	78	280	6 644	58 552	71		
Chelles	77	1987	69	280	3 601	16 917	38		
Chevilly-Larue - L'Haÿ-les-Roses	94	1985	72,6	560	9 793	72 580	58		
Clichy-sous-Bois	93	1982	71	180	3 794	15 572	33		
Coulommiers	77	1981	85	230	2 106	24 752	94		
Créteil	94	1985	78,9	300	12 303	56 466	37		
Epinay s/Sénart	91	1984	72	250	5 105	49 874	78		
Fresnes	94	1986	73	250	5 351	32 335	48		
La Courneuve Nord	93	1983	58	200	2 393	21 666	73		
La Courneuve Sud	93	1982	56	180	2 822	12 472	35		
Le Mée s/Seine	77	1978	72	134	4 856	21 155	35		
Maisons Alfort 1	94	1985	73	300	4 505	36 673	65		
Maisons Alfort 2	94	1986	74	260	4 329	20 755	39		
Meaux Beauval et Collinet	77	1983	75	400	13 529	58 384	35		
Meaux Hôpital	77	1983	76	130	3 761	20 674	44		
Melun l'Almont	77	1971	72	260	5 238	44 593	68		
Montgeron	91	1982	72,5	220	1 749	16 881	77		
Orly - Choisy	94	2007	76	350	8 000	68 000	80		
Ris-Orangis	91	1983	72	190	225	16 239	58		
Sucy-en-Brie	94	2008	77	300	2 900	34 760	90		
Thiais	94	1986	76	250	4 352	43 539	87		
Tremblay-en-France	93	1984	73	275	4 212	45 562	87		
Vigneux	91	1985	73,2	240	3 430	33 579	66		
Villeneuve-Saint-Georges	94	1987	76	350	4 303	34 411	65		
Villiers-le-Bel	95	1985	67	230	2 959	21 699	60		

# Le Bassin aquitain

Le Bassin aquitain possède une structure géologique un peu plus complexe. Les formations aquifères sont nombreuses mais moins étendues, les plus profondes se trouvant au pied des Pyrénées, enfouies jusqu'à 10 km dans le sous-sol.

Deux zones particulièrement favorables ont été découvertes dans la région : l'une forme un croissant au nord et au nord-est de Bordeaux, et l'autre descend d'Arcachon à Bayonne avant de s'élargir vers l'est au pied des Pyrénées. Les principales exploitations géothermiques se trouvent dans la région de Bordeaux, de Mont-de-Marsan et de Dax.

# Les autres ressources : Alsace, Limagne, Bresse, Sud-Est, Hainaut

En Alsace, la plaine du Rhin se situe dans un fossé d'effondrement, le fossé rhénan, qui s'est rempli de dépôts tertiaires et quaternaires pouvant atteindre par endroits, plusieurs kilomètres d'épaisseur, avec le gradient le plus élevé de France : de 4 à 5 °C/100 m en

#### PRINCIPAUX RÉSERVOIRS GÉOTHERMAUX EN AQUITAINE À PLUS DE 60 °C :

ils sont formés de terrains sédimentaires (Crétacé, Jurassique supérieur, Lias et Trias) qui reposent sur le socle ancien.
Les formations sont de type poreux (grès, sables, calcaires oolithiques, dolomies...) ou de type fissuré ou karstique (calcaires poreux ou non).

# Des tomates géothermiques

Bientôt, 8 500 tonnes de tomates pourront être produites chaque année grâce à l'eau chaude et au gaz issus des forages pétroliers de Parentisen-Born, dans les Landes.

Ce projet, réalisable d'ici à la fin 2008 devrait permettre de créer 120 emplois. Il est porté par la commune de Parentis, le groupe Rougeline, qui rassemble 150 producteurs du sud de la France, et le groupe canadien Vermilion qui exploite le champ pétrolier de Parentis.

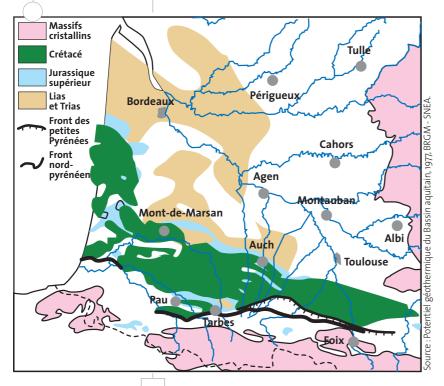
L'idée est de récupérer l'eau chaude et les gaz soufrés issus des forages voisins, qui étaient jusqu'à présent inexploités, afin de chauffer 17 hectares de serres. Cette énergie pourrait également produire suffisamment d'électricité pour alimenter 1 500 foyers. Ce projet va permettre de concilier production agricole, respect de l'environnement, valorisation énergétique et lutte contre la pollution.

moyenne et localement 10 °C/100 m dans la région d'Haguenau. La tectonique y est plus complexe que dans le Bassin parisien. Aucune exploitation ne fonctionne à ce jour, mais c'est dans cette région que se trouve le grand programme de recherche de Soultzsous-Forêts. Plusieurs projets sont à l'étude pour l'utilisation directe de la chaleur.

La Limagne, bassin d'effondrement, dans la région de Riom, recèle un aquifère profond dans l'Oligocène qui atteint des profondeurs de 2 000 m avec un gradient élevé de l'ordre de 6 à 9 °C/100 m. Deux forages réalisés à des fins géothermiques au début des années 80 n'ont pas donné les résultats escomptés.

La Bresse, fossé d'effondrement, renferme quelques réservoirs dont la température pourrait dépasser 70 °C. Un forage géothermique a été réalisé au début des années 80 à Bourg-en-Bresse, mais il a été considéré comme un échec.

**Sud-Est**: dans la zone qui couvre les bassins du Couloir rhodanien, les fossés de la bordure cévenole, la Haute-Provence, La Camargue et le Languedoc-Roussillon, il existe de nombreux réservoirs calcaires, dolomitiques ou gréseux, mais leur extension est souvent limitée par le compartimentage tectonique.



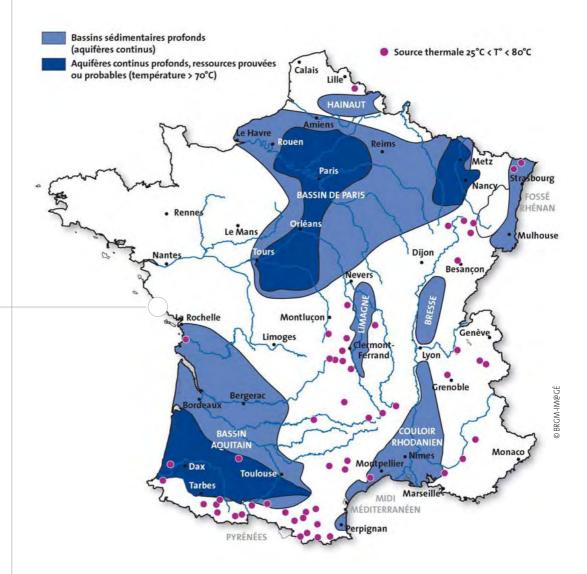
Aujourd'hui, un projet est à l'étude dans l'agglomération d'Aix-en-Provence.

Enfin, dans le Hainaut, des forages ont été réalisés dans le calcaire carbonifère du bassin charbonnier franco-belge, sans donner de résultats suffisants. Des initiatives pour valoriser le potentiel du Carbonifère, à l'image de ce qui a pu être fait du côté belge, pourraient voir le jour prochainement.

# Un centre technique d'appui pour la géothermie

Pour répondre aux problématiques techniques collectives qui se posent aux maîtres d'ouvrage et aux exploitants des réseaux de chaleur géothermiques, l'ADEME et le BRGM ont créé un centre technique d'appui au sein du département Géothermie du BRGM.

Principales opérations en Bassin aquitain, Limagne, Languedoc, Lorraine, Bresse en service en 2008									
				Apports	Hydrocarbures	Pollution			
Région	Opération	Utilisation	Température tête	géothermiques	substitués	évitée			
			de puits (°C)	(MWh utiles)	(tep)	(t de CO <sub>2</sub> )			
	Argelouse / Sore	pisciculture	48	16 492	1 773	5 566			
	Bordeaux Benauge	piscine	42	391	40	92			
	Bordeaux Mériadeck	chauffage	52	3 312	339	847			
	Bordeaux Stadium	piscine	34	1 082	110	255			
	Gujan Mestra	centre nautique	25	2 004	203	472			
	Hagetmau	piscine / ECS	32	2 793	283	657			
	Merignac - BA 106	chauffage	52	16 218	1 641	3 816			
	Mios-le-Teich	pisciculture	73	21 440	2 169	5 045			
Bassin	Mont-de-Marsan 1	chauffage	60	13 169	1 348	3 368			
aquitain	Mont-de-Marsan 2	chauffage	56	2 480	251	583			
	Pessac - Salge Formanoir	chauffage	48	16 157	1 635	3 802			
	Saint-Paul-les-Dax 1	chauffage/thermes	47	13 775	1 394	3 241			
	Saint-Paul-les-Dax 2	piscines/serres	60	4 299	435	1 012			
	Blagnac 1	piscine	55	3 202	324	753			
	Blagnac 2	chauffage	60	6 302	602	1 483			
	Nogaro 2	pisciculture	51	18 494	1 988	6 242			
	Jonzac 1	chauffage/thermes	60	5 487	555	1 291			
	Jonzac 2	centre nautique	58	12 031	1 232	4 010			
Limagne	Aigueperse	serres	43	11 512	1 238	3 885			
Bassin parisien	Châteauroux	chauffage	34	14 860	1 503	3 496			
	Montagnac	pisciculture	30	7 850	844	2 649			
Languedoc	Lodève 1	serres	30	8 770	887	2 064			
Languedoc	Lodève 2	serres	52	6 280	635	1 478			
	Pézenas	piscine/pisciculture	38	11 576	1 171	2 724			
	Dieuze	pisciculture	31	5 233	529	1 231			
	Lunéville	piscine-pisciculture	25	827	84	195			
Lorraine	Nancy 1 - Thermes	chauffage/thermes	45	3 134	317	737			
	Nancy 2 - Caserne Kellermann	chauffage	30	6 280	635	1 478			
Bresse	Montevel-en-Bresse	centre nautique	32	1 924	195	453			



LES RESSOURCES GÉOTHERMALES PROFONDES EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Les ressources géothermales profondes sont assez largement réparties dans notre sous-sol : Bassin parisien, Bassin aquitain, Hainaut, fossé rhénan, Limagne, Bresse, Sud-Est (couloir rhodanien)...

Destiné, dans un premier temps, à accompagner la relance de la géothermie des réseaux de chaleur en lle-de-France, ce centre de ressources doit être à même de pouvoir répondre à toutes sortes de questions : gestion durable de la ressource, optimisation des performances, gestion des fluides (corrosion, dépôts, etc.), problèmes technico-économiques et juridiques.

C'est le cas, par exemple, avec le projet intitulé "Gestion du Dogger", piloté par le BRGM en partenariat avec l'ADEME et la région lle-de-France. Ce projet a pour but de fournir aux instances qui sont associées à l'exploitation géothermique du Dogger (comme l'administration par exemple), des éléments et des méthodes

pour une meilleure appréciation des conséquences à long terme de l'exploitation de ce réservoir.

L'incidence de la réinjection dans le Dogger de l'eau géothermale refroidie après le prélèvement de ses calories en surface est une des questions importantes qui se pose, par exemple ; de même, comment prendre en compte de nouvelles opérations qui viendraient s'ajouter à l'exploitation existante du réservoir ?

À terme, le centre technique sur la géothermie doit étendre son domaine d'intervention à tous les types de géothermie et à l'ensemble du territoire.

\ \hib-2 d7-h1a

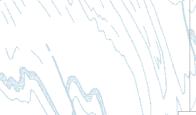
54

htb-2

haa //

h<sub>3</sub>

h3á de-



# La production d'électricité

Chapitre II.4

En France, la production d'électricité à partir de la géothermie s'effectue depuis plus de 20 ans à partir de la centrale de Bouillante en Guadeloupe et c'est d'ailleurs dans les départements d'outre-mer que les perspectives sont les plus prometteuses. En métropole, une petite production d'électricité a commencé sur le site du grand projet EGS de Soultz-sous-Forêts.

# La géothermie dans les départements d'outre-mer

Le contexte insulaire volcanique rend très prometteuse la contribution de l'électricité géothermique dans les départements d'outre-mer insulaires. Ces îles sont largement dépendantes de l'électricité d'origine fossile, dont les coûts s'envolent, et la géothermie est la seule énergie renouvelable susceptible de contribuer en base, à un prix compétitif, à la production d'électricité. La centrale de Bouillante en Guadeloupe, exploitée par une filiale du BRGM produit déjà 15 MW. Des travaux d'exploration sont en cours en Guadeloupe, à la Réunion, à la Dominique (qui pourrait alimenter la Martinique et la Guadeloupe) et ouvrent la perspective d'atteindre les 200 MW à l'horizon 2020, ce qui représenterait une part importante des besoins d'électricité de ces départements. Afin de réduire l'aléa géologique et de minimiser ainsi les coûts des phases d'exploration par forage – qui constituent le plus gros handicap pour les initiatives industrielles le BRGM a également lancé un projet de recherche qui vise à améliorer les méthodologies d'exploration de surface et à les adapter au contexte particulier des DOM.

# De l'électricité géothermique en Guadeloupe

Non loin du volcan guadeloupéen de la Soufrière, la centrale de Bouillante a déjà une longue histoire qui a débuté dans les années 1960 par des sondages et des fora-



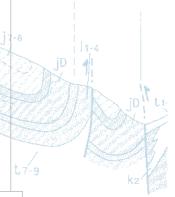
#### LA GÉOTHERMIE EN GUADELOUPE.

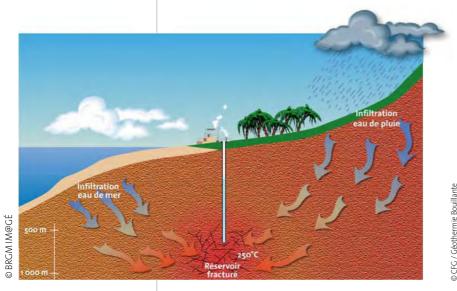
Non loin du volcan de la Soufrière (ci-contre), les installations de la centrale géothermique de Bouillante (ci-dessous) d'une puissance de 15 MW, permettent de satisfaire, plus de 7 % des besoins en électricité de l'île.



ges d'exploration sous l'égide du BRGM. Quatre forages profonds ont suivi dans les années 70, réalisés par une entreprise privée innovante, la société Eurafrep. Un seul d'entre eux d'une profondeur de 300 m a été déclaré positif sur la base duquel l'installation d'une centrale de 4,2 MW a été décidée en 1984.

À partir de 2000, un projet d'extension des activités géothermiques a été mis à l'étude pour multiplier par trois les capacités intallées. Très proches de ce site, trois nouveaux





MODÈLE SIMPLIFIÉ DU CHAME GÉOTHERMIQUE DE BOUILLANTE.

Les fluides exploités par la centrale sont constitués par un mélange en proportion égale d'eau de mer et d'eau de pluie qui s'infiltrent en profondeur à la faveur des fractures, se mélangent et se réchauffent au contact des roches chaudes à une température de l'ordre de 250-260 °C.

puits de production plus profonds (1 km en moyenne) ont été mis en service en 2001 et une centrale, construite en 2003 (Bouillante 2). La mise en production de l'unité Bouillante 2 installée en 2005 et couplée avec l'unité Bouillante 1 permet de produire aujourd'hui Guadeloupe.

40 ans après les premiers travaux d'exploration, l'exploitation du réservoir géothermique de Bouillante a acquis une taille signifi-



environ 7 % de l'électricité consommée en

Faille de Montserrat-Marie Galant Volcans actifs Volcans sous-marins Ocean Atlantique

> FAILLE RÉGIONALE MONTSERRAT - MARIE GALANTE ET LES VOLCANS AÉRIENS ET SOUS-MARINS DE L'ARCHIPEL GUADELOUPÉEN.

La Chaîne de Bouillante est constituée de nombreux petits appareils volcaniques distribués le long de la côte ouest de Basse-Terre, et en particulier au niveau de Bouillante. Ce volcanisme est âgé de moins de 1 million d'années. Il est probablement à l'origine de l'anomalie géothermique de Bouillante.

cative et le développement de Bouillante peut se poursuivre. Le réservoir géothermique s'étend largement autour de la Baie de Bouillante. L'exploitation d'une portion de ce réservoir, située au nord de la Baie, est envisagée dans le cadre d'un nouveau projet appelé "Bouillante 3".

La capacité de production attendue est de plusieurs dizaines de MW (de 20 à 30 MW espérés). Une prochaine phase de forages d'exploration devrait confirmer ce potentiel puis, en cas de succès, initier la phase de développement comprenant le forage des puits producteurs, la mise en place de conduites de transport des fluides et la construction d'une nouvelle unité de production électrique.

# Coopération régionale dans la Caraïbe à partir de la Dominique

En outre, cette expérience guadeloupéenne incite les autres îles de la Caraïbe à mettre en valeur leur potentiel géothermique. C'est notamment le cas de l'île voisine de la Dominique, dotée d'un potentiel élevé, évalué à quelque centaines de MW, qui pourrait envisager de produire de l'électricité pour couvrir

#### CENTRALE DE BOUILLANTE 2 (LE MÉLANGEUR).

Les installations de l'unité Bouillante 2 de la centrale géothermique couplées à l'unité Bouillante 1, assurent 7 % des besoins en électricité de la Guadeloupe.

la totalité de ses besoins et exporter le surplus vers les îles voisines de Guadeloupe et de Martinique, via des câbles sous-marins. C'est d'ailleurs l'ambition du projet de coopération régionale associant la Dominique, les Régions Guadeloupe et Martinique, l'ADEME et le BRGM, qui vient de démarrer.

Ce projet pourrait permettre d'éviter le rejet à l'échelle régionale de 250 000 t de CO<sub>2</sub>. En outre, le caractère transnational du projet, à savoir l'exportation des excédents vers la Martinique et la Guadeloupe, favorise la coopération et engendre une dynamique de partenariat économique et humain de co-développement assez novateur dans la région.

# Reconnaissance géothermique à La Réunion

Lancée par la Région de la Réunion en 2001, l'exploration du potentiel géothermique de l'île est maintenant achevée et a abouti au choix de la plaine des Sables, sur le massif de la Fournaise, comme la zone présentant le plus de probabilité d'existence d'un réservoir

**GUADELOUPE Bouillante** La Soufrière maximum 720 n Morne aux Diables Morne Diablotins -DOMINIQUE Morne des trois Pitons Vallée de la Désolation Morne des Anglais 59 km profondeur maximum 1 500 m Volcanisme de Plat-Pays Montagne Pelée **MARTINIOUE** © ADEME - BRGM 100 km Câble sous-marin

géothermal. Une zone d'environ 20 km² a été définie, elle présente une probabilité d'être un réservoir géothermique conséquent. Il s'agit maintenant de procéder à la reconnaissance de la ressource par un forage de reconnaissance et d'évaluer le

# LA GÉOTHERMIE, MOTEUR DE LA COOPÉRATION DANS LA CARAÏBE.

La Dominique est considérée comme l'île de la Caraïbe ayant le potentiel géothermique le plus élevé, évalué à quelque centaines de MW. L'électricité qu'elle pourrait produire serait transportée par des câbles sousmarins en Guadeloupe et en Martinique.

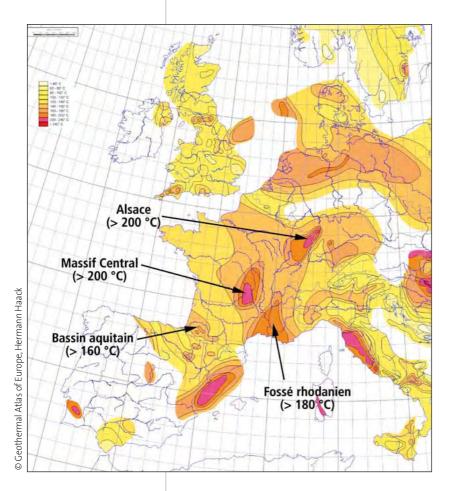


### La RÉUNION

L'exploration géothermique rentre dans le cadre de la politique régionale de développement des énergies renouvelables à la Réunion : tendre vers l'autonomie énergétique de l'île en faisant appel à des sources d'énergies locales et non polluantes.







POTENTIALITÉ DES ROCHES PROFONDES (TEMPÉRATURES À 5 KM DE PROFONDEUR).

En France, 4 régions, l'Alsace, le Massif Central, le bassin aquitain et le Fossé rhodanien offrent à cette profondeur des températures de 160 à plus de 200 °C. potentiel offert. Les résultats des sondages permettront de mesurer les paramètres du réservoir géothermal supposé afin de juger de la faisabilité d'une exploitation de la ressource.

### L'électricité du futur

Plusieurs expériences ont été tentées et sont développées dans le monde (États-Unis, Japon, Royaume-Uni, Allemagne, Australie, Suisse...) pour mettre au point la technique baptisée aujourd'hui systèmes géothermiques stimulés (EGS). Afin de donner un ordre de grandeur du potentiel de ces systèmes, le prestigieux MIT (Massachussets Institute of Technology) estime dans un rapport de 2006 que 2 % de la chaleur contenue dans le sous-sol des États-Unis entre 3 et 10 km de profondeur (profondeur accessible avec les technologies actuelles) est susceptible de répondre à 2 500 fois les besoins annuels

en énergie des États-Unis.

Le projet le plus avancé a démarré en 1987, en France, dans le cadre d'une collaboration franco-anglo-allemande avec le support de l'Union européenne, de l'ADEME et des ministères allemands concernés.

# À Soultz-sous-Forêts, le plus grand projet EGS dans le monde

Le site de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin) se situe sur le flanc ouest du fossé rhénan, à une cinquantaine de kilomètres de Strasbourg. Il a été choisi car le granite de la région est naturellement fracturé et possède un gradient géothermal élevé, bien connu par d'anciens travaux d'exploration et d'exploitation pétrolières. Il est également représentatif des conditions qui règnent dans de nombreuses régions du monde et les données acquises peuvent servir de référence.

Deux puits profonds, distants de 450 mètres, ont été creusés (l'un à 3 600 m, l'autre à 3 800 m) ainsi que cinq puits d'observation géophysique (1 400 à 2 200 m). Après dix ans de tests et sondages, en 1997 et pendant quatre mois, une circulation d'eau a été réalisée entre les deux forages profonds, avec un débit de 25 kg/s et une température supérieure à 140 °C, sans perte d'eau ni effet de corrosion, et avec une puissance de pompage modeste.

Cette première mondiale a donné le feu vert à la poursuite du programme : la construction d'un pilote scientifique avec



LA TURBINE ET LE GÉNÉRATEUR DU PILOTE DE SOULTZ-SOUS-FORÊTS.

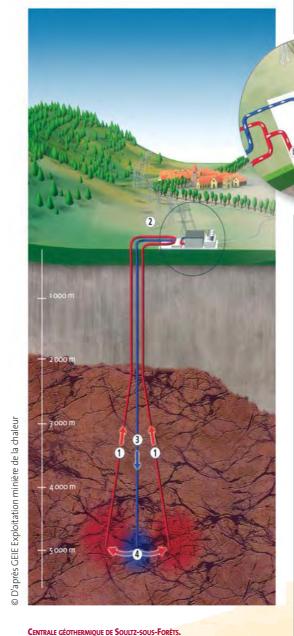
Le générateur (en vert) et la turbine (en bleu) fonctionnent selon le cycle binaire ORC (cf. p. 23).

la réalisation de trois forages profonds de 5 000 m et la mise en service en 2008 d'une centrale de production d'électricité à fluide binaire d'une puissance de 1,5 MW. Le groupement européen d'intérêt économique "Exploitation Minière de la Chaleur" et rassemblant les principaux électriciens européens en assure la maîtrise d'œuvre. De nombreuses équipes de scientifiques français (BRGM, CNRS, Universités), allemands mais aussi suisses, anglais, japonais et américains, regroupées au sein de l'association EHDRA (European Hot Dry Rock Association) créée par le BRGM, participent à ces travaux.

En juin 2008, la première centrale de production électrique à partir de la géothermie profonde a donc été inaugurée à Soultz-sous-Forêts. Elle dispose d'une puissance de 1,5 MW injectée sur le réseau d'Electricité de Strasbourg.

La chaleur géothermale est tirée de l'eau, pompée à 5 000 mètres de profondeur à une température de 200 °C et exploitée en surface pour produire de l'électricité. L'eau refroidie est ensuite réinjectée dans le sous-sol.

Le déploiement de cette technologie est conditionné par le niveau de coût de production de l'électricité qui reste largement au-dessus des références économiques actuelles, car elle nécessite des forages à grande profondeur dans un milieu encore mal connu. Mais si l'on parvient à baisser les coûts, cette énergie propre et locale pourrait alors donner son plein potentiel.



Le projet pilote est entré dans sa phase d'expérimentation avec la pose, durant l'été 2008, d'un groupe turbo-alternateur d'une puissance de 1,5 MW. L'eau géothermale qui arrive en surface atteint une température de 175 °C pour un débit de 35 l/s. Pendant les trois prochaines années, le pilote va faire l'objet d'un programme d'expérimentations (mise en œuvre d'essais de circulation de longue durée) visant à évaluer les performances du système et à en maîtriser son fonctionnement. En cas de succès, cette étape sera suivie par la conception et la réalisation d'un prototype industriel d'une puissance électrique d'une dizaine de MW.

- 1 Extraction de l'eau présente dans le réseau de fractures par deux puits de production
- 2 En surface, transformation par l'intermédiaire d'un échangeur thermique (a) de l'eau chaude du circuit primaire (b) en vapeur dans le circuit secondaire (c) pour entraîner une turbine (d) qui produit de l'électricité (e)
- 3 Réinjection de l'eau froide à 5 000 m de profondeur par le puits central
- 4 Circulation d'eau dans les fractures et réchauffement au contact de la roche chaude (200°c)



# Présentation des organismes

L'ADEME et le BRGM ont signé le 13 juin 2008 un accord pour le développement de toutes les formes de géothermie. L'enjeu est de développer en quelques années une filière professionnelle qualifiée et compétente, qui représentera plusieurs milliers d'emplois. Pour accompagner ce développement, les besoins sont forts tant en recherche et innovation, qu'en matière de sensibilisation et d'information du public, ou de structuration des filières professionnelles par la formation et les démarches qualité. L'ADEME et le BRGM s'engagent à mobiliser leurs compétences et leurs moyens financiers sur l'ensemble de ces champs d'action.

# **ADEME**

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public à caractère industriel et commercial, sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. L'Agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collec-

tivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines : énergie, air et bruit, déchets et sol, management environnemental (sites et produits). Dans le domaine de la géothermie, l'objectif de l'ADEME est d'assurer une meilleure connaissance des ressources géothermales, de faciliter l'aide à la décision, de soutenir des opérations exemplaires, de relancer le marché et d'encourager le renforcement des réseaux professionnels et des filières par l'information technique et la formation.

# **BRGM**

Le BRGM est l'établissement public de référence dans le domaine des applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol. Ses missions sont la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques, la coopération internationale, la prévention et la sécurité minière. Ses objectifs sont de :



- comprendre les phénomènes géologiques, développer des méthodologies et techniques nouvelles, produire et diffuser des données de qualité;
- mettre à disposition les outils nécessaires à la gestion du sol, du sous-sol et des ressources, à la prévention des risques naturels et des pollutions, aux politiques de réponse au changement climatique.

Le BRGM est impliqué dans le domaine de la géothermie depuis plus de 30 ans. Aujourd'hui, il entend amplifier sa contribution à l'essor de la géothermie, en participant activement à la promotion des différentes filières de cette source d'énergie renouvelable : les pompes à chaleur géothermiques, l'alimentation des réseaux de chaleur, la production d'électricité (notamment en outre-mer) et la recherche sur les systèmes géothermiques stimulés (EGS).





En présence de François Fillon. Premier Ministre, de Jean-Louis Borloo, Ministre d'État, Ministre de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire et de la Secrétaire d'État chargée de l'Écologie, Nathalie Kosciusko-Morizet, l'accord entre l'ADEME et le BRGM a été signé par Chantal Jouanno, présidente de l'ADEME et Philippe Veysseron, Président du BRGM, le 13 juin 2008, à l'occasion de l'inauguration du pilote scientifique de production d'électricité géothermique de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin).

# **Glossaire**

Aquifère: formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable, constituée de roches perméables et capables de la restituer naturellement et/ou par exploitation. On distingue les aquifères à nappe libre (l'aquifère repose sur une couche très peu perméable surmontée d'une zone non saturée en eau) et les aquifères captifs (l'eau souterraine est confinée entre deux formations très peu perméables). Lorsqu'un forage atteint une nappe captive, l'eau remonte dans le forage.

**Boucle géothermale** : circuit de l'eau souterraine (eau géothermale) puisée dans l'aquifère et qui y retourne. Elle cède dans la centrale ses calories à la boucle géothermique.

Centrale géothermique : ensemble des équipements de surface permettant la récupération de la chaleur (énergie) contenue dans le fluide géothermal et le départ vers le circuit de distribution de l'énergie (chaleur ou électricité). La centrale comprend également tous les équipements nécessaires à ce transfert (systèmes de régulation, échangeurs, pompes...). Tous ces équipements peuvent être regroupés dans un même bâtiment.

Circuit frigorifique : circuit fermé contenant un fluide frigorigène. Les 4 constituants principaux du circuit frigorifique sont le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur.

Cimentation: la cimentation d'un tubage dans un forage consiste à cimenter l'espace annulaire entre le tubage et la paroi naturelle du forage. Cette cimentation a pour but de sceller le tubage aux terrains traversés, ce qui permet de protéger la qualité des eaux souterraines (afin éviter le mélange d'eaux de différents niveaux et l'infiltration d'eau de surface). À ne pas confondre avec la cimentation d'une sonde géothermique; dans ce cas la cimentation consiste à sceller les capteurs dans le forage par remplissage par un ciment spécialement préparé à cet effet.

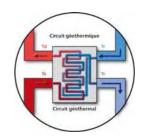
Cogénération: elle consiste à produire en même temps et dans la même installation de l'énergie thermique (chaleur) et de l'énergie mécanique (force) pour la production d'électricité. On parle de centrale de cogénération ou de centrale de chaleur-force. L'énergie utilisée pour faire fonctionner des installations de cogénération peut être le gaz naturel, le fioul, la biomasse ou la géothermie...

Conductivité thermique : capacité d'un matériau à conduire (transporter) de l'énergie thermique (chaleur).

COP: le coefficient de performance traduit la performance énergétique d'une pompe à chaleur. Il s'exprime par le rapport entre la quantité d'énergie calorifique produite par celle-ci et l'énergie électrique consommée pour effectuer le transfert d'énergie. Le COP est généralement compris entre 3 et 4 en géothermie.

Dogger: c'est le principal aquifère géothermique exploité en région parisienne par "doublet" de forages. Il se situe entre 1 500 et 2 000 mètres de profondeur et contient une eau d'une température variant en fonction de la profondeur de 65 °C à 85 °C. Il correspond à des dépôts anciens (-175 à -154 millions d'années) à dominante calcaire du Jurassique moyen. L'eau contenue dans cet aquifère est largement minéralisée (6,5 à 35 g/l).

Doublet : c'est un ensemble de deux forages associés, l'un étant dédié à la production du fluide géothermal, l'autre à la réinjection du fluide dans l'aquifère d'origine. Cette configuration présente plusieurs avantages : absence de rejets dans l'envi-





© BRGM





ronnement (circuit en boucle fermée), pérennité du débit hydraulique et stabilité des pressions d'exploitation.

Fluide frigorigène : le fluide confiné dans la PAC assure lors de ses changements de phase, (gaz, liquide) les transferts de chaleur. Le fonctionnement des machines thermodynamiques (réfrigérateur, pompe à chaleur) est fondé sur la capacité des fluides frigorigènes à se vaporiser et se condenser à température ambiante.

**Géocooling**: rafraîchissement gratuit (*free cooling*), dans le cas d'utilisation d'aquifères; il s'agit d'utiliser la capacité de refroidissement du fluide frigogène sans utiliser la PAC.

Inhibiteur de corrosion : en traitement des eaux, désigne des produits chimiques ajoutés à l'eau qui empêchent son action corrosive sur des métaux par formation d'une pellicule protectrice sur le métal.

ORC: les machines ORC (Organic Rankine Cycle) constituées d'un circuit secondaire fermé avec fluide caloporteur à faible point d'ébullition, sont utilisées pour la production d'électricité par turbinage.

**Perméabilité** : c'est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide.

Plancher chauffant : émetteur de chaleur constitué de tubes dans lesquels circule un liquide restituant la chaleur aux pièces à chauffer, le plancher chauffant est Intégré à une chape de béton et dimensionné pour que sa température de surface reste modérée (environ 23 °C). Un plancher chauffant peut assurer aussi le rafraîchissement d'une habitation, on parle alors de plancher chauffant-rafraîchissant.

Pompage (essais et tests): après la réalisation d'un forage, les pompages d'essais consistent en une série de tests et mesures pour vérifier la capacité de production du forage (débit) et évaluer l'influence du futur prélèvement sur les ouvrages voisins (rayon d'influence).

RT 2005: la réglementation thermique 2005 s'adresse aux constructions neuves (ou extensions de constructions) des bâtiments résidentiels et non résidentiels (tertiaires, bâtiments industriels ...). Elle fixe une limite de consommation énergétique de référence (appelé Cepréf) à ne pas dépasser.

**Tep**: la tonne d'équivalent pétrole (tep) est une unité de mesure de l'énergie couramment utilisée par les économistes de l'énergie pour comparer les énergies entre elles. C'est l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole moyen, ce qui représente environ 11 600 kWh.

**Transmissivité**: paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de l'aquifère, sous l'effet du gradient hydraulique, incluant l'épaisseur de l'aquifère. La transmissivité permet d'évaluer le débit que peut capter un forage.

Watt (W) : unité légale de puissance, le watt correspond à la quantité d'énergie consommée ou produite par unité de temps, soit un joule par seconde.

Multiples: 1 milliwatt = 0,001 W; 1 kilowatt (kW) = 1000 W; 1 mégawatt (MW) = 1000 kW; 1 gigawatt (GW) = 1000 MW; 1 térawatt (TW) = 1000 GW.

Le wattheure (Wh) correspond au travail accompli par une puissance de 1 Watt pendant 1 heure. Multiples :

1 kilowattheure (kWh) = 1 000 Wh; 1 mégawattheure (MWh) = 1 000 kWh; 1 gigawattheure (GWh) = 1 000 MWh; 1 térawattheure (TWh) = 1 000 GWh.

La puissance thermique d'une centrale est typiquement trois fois sa puissance électrique, en raison des pertes (rendement de l'ordre de 30 à 40 %).

Zone non saturée et saturée : la zone non saturée correspond à la partie du sous-sol comprise entre la surface du sol et la surface d'une nappe libre. La zone est dite saturée quand l'eau occupe complètement les interstices des roches, formant, dans un aquifère, une nappe d'eau souterraine.

# Pour en savoir plus

#### **Sites internet:**

Espace institutionnel sur la géothermie réalisé par l'ADEME et le BRGM : www.geothermie-perpectives.fr

Agence de l'Environnement et de la Maîtrie de l'Energie : www.ademe.fr

Bureau de Recherches Géologiques et Minières : www.brgm.fr

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire :

http://www.developpement-durable.gouv.fr

Certificats d'économies d'énergie : <a href="https://www.industrie.gouv.fr/energie/certificats.htm">www.industrie.gouv.fr/energie/certificats.htm</a>

Agence Nationale d'Amélioration de l'Habitat: www.anah.fr

CLER: Comité de Liaison des Énergies Renouvelables: http://www.cler.org

Association Française pour les Pompes à Chaleur : www.afpac.org

Syndicat national des entrepreneurs de puits et forages d'eau : www.sfe-foragedeau.com

Syndicat des Énergies Renouvelables : http://www.enr.fr

Soultz-sous-Forêts: http://www.soultz.net

IEA Heat pump Center: <a href="http://www.heatpumpcentre.org">http://www.heatpumpcentre.org</a>
European Heat Pump Association: <a href="http://geothermal.marin.org">http://geothermal.marin.org</a>
International Geothermal Association: <a href="http://iga.igg.cnr.it">http://iga.igg.cnr.it</a>
European Geothermal Energy Council: <a href="http://www.egec.net">http://www.egec.net</a>
Geothermal Ressources Council: <a href="http://www.geothermal.org">http://www.geothermal.org</a>

Suisse Géothermie: http://www.geothermie.ch et http://www.crege.ch

# **Ouvrages:**

- Guide technique Pompe à chaleur géothermique sur aquifère Conception et mise en œuvre, Collectif ADEME-ARENE-BRGM, Angers, Paris, Orléans : Editions BRGM, ADEME Editions, 2008, 72 p. ill., 21 cm ; ISBN : 2-7159-2440-6
- La géothermie, Collectif BRGM-ADEME, Orléans, Angers : Editions BRGM, ADEME Editions, 2004 ; Coll. "Les Enjeux des Géosciences"; 44 p. ill.; 21 cm ISBN : 2-7159-0952-7
- Énergie Géothermique, Philippe Laplaige, Jean Lemale, Paris : Technique de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 8 590 Volume BE, 2001 ; 28 p. : ill. ; 30cm ; ISSN : 0399-4139.
- La chaleur de la terre : De l'origine de la chaleur à l'exploitation des gisements géothermiques, Raymond Ferrandes, Paris : ADEME Editions 1998 ; 399 p. : ill. ; 22 cm, Contient des références bibliographiques et un index ; ISBN 2-86817-301-2.
- La géothermie : une énergie d'avenir "réalité en Ile-de-France", Jean Lemale, Florence Jaudin, (avec la collaboration de Y. Benderitter, P. Laplaige, R. Ferrandes ; Coordination Francine Brenière), Paris : ARENE, 1998 ; 117 p. : ill. ; 30 cm. "Couve.: ARENE, Ademe, BRGM" Bibliogr : p. 112 ; ISBN 2-911533-11-9.
- Fraîcheur sans clim': le guide des alternatives écologiques, Thierry Salomon et Claude Aubert; préface de Yves Cochet, Paris: Ed. Terre vivante Description, 2004: 160 p.: ill., couv. ill. en coul.; 21 cm; ISBN: 2-914717-09-1 (br.).
- La pompe à chaleur : déterminer, installer, entretenir, Jacques Bernier, Paris : Ed. Pyc livres, 2004 : 256 p. : ill., couv. ill. en coul. ; 21 cm ; ISBN : 2-86243-071-4 (br.).

# BRGM Éditions Collection *Les enjeux des Géosciences*

### Directeur de collection

Jacques Varet

### Comité de rédaction

ademe

Norbert Bommensatt, Françoise Coroller, Philippe Laplaige

Fabrice Boissier, Gregory Delobelle

#### Rédaction

Michel Bouchi-Lamontagne

### Conception et réalisation

**BL** Communication

# Impression

Imprimerie Mame, Tours

### Collection Les enjeux des Géosciences

Direction de la Communication et des Éditions du BRGM ISSN: 1775-7533 - Dépôt légal, novembre 2008. Coédition ADEME BRGM Tous droits réservés. Reproduction partielle sur autorisation expresse.

### Déjà parus

- Pour une Terre durable, juin 2003 et novembre 2005 (versions française et anglaise)
- La géothermie (novembre 2004)
- La capture et le stockage géologique du CO<sub>2</sub>, septembre 2005 (versions française et anglaise)
- L'après-mine en France, décembre 2006
- Capter et stocker le CO<sub>2</sub> dans le sous-sol, octobre 2007 (versions française et anglaise)
- Le risque sismique en France, mars 2008



Imprimé avec des encres végétales sur du papier provenant d'une forêt durablement gérée par un imprimeur labellisé Imprim'Vert qui n'utilise pas de produits toxiques, sécurise le stockage des produits et déchets dangereux et organise leur collecte.

# La géothermie

# Quelles technologies pour quels usages?

Ce livre, abondamment illustré et riche d'exemples concrets, fait le point sur les différentes technologies mises en œuvre aujourd'hui pour utiliser la chaleur de la Terre : les pompes à chaleur géothermiques pour les usages domestiques et tertiaires et le résidentiel collectif, les réseaux de chaleur géothermiques destinés au chauffage urbain et les centrales géothermiques pour la production d'électricité.

Ce panorama est complété par les perspectives d'avenir qu'offre cette énergie renouvelable dans le monde et en France en termes d'indépendance énergétique et d'innovations technologiques : géocooling, systèmes hybrides, pompes à chaleur à absorption ou systèmes géothermiques stimulés (EGS).

L'ouvrage s'adresse s'adresse à un large public : particuliers, professionnels et décideurs.



### Siège social

20 avenue du Grésillé 49004 Angers Cedex 01 Tél. : 02 41 20 41 20

# www.ademe.fr

Réf. ADEME : 6447



### Centre scientifique et technique

3, avenue Claude Guillemin - BP 36009 45060 Orléans Cedex 2 Tél. : 02 38 64 30 28

### editions.brgm.fr

ISBN: 978-2-7159-2454-3 Réf. BRGM: ENJ007



