

Travaux

JUILLET-AOÛT 2006

◆ INFRASTRUCTURES POUR ENR

TRAVAUX

n° 832

- Les énergies renouvelables dans la lutte contre le changement climatique et la préservation des ressources

HYDRAULIQUE

- Algérie. Le barrage de Koudiat Acerdoune en béton compacté au rouleau

GÉOTHERMIE

- Le site pilote de Soultz et ses prolongements européens
- La géothermie : le chauffage à haut potentiel

ÉOLIEN

- Parc éolien d'Ally (Haute-Loire)
- Sogea Ouest joue la carte de l'éolien
- Les fondations profondes au service de l'énergie éolienne


PHOTOVOLTAÏQUE

- Photovoltaïque : une technologie prometteuse pour le secteur du BTP

TRANSPORT D'ÉNERGIE

- Une technique innovante de renforcement de fondation pour pylônes électriques

N°832



Infrastructures pour énergies renouvelables

Energies renouvelables : un développement crucial pour la France

Par la loi du 13 juillet 2005, nous avons fixé les orientations de la politique énergétique pour plusieurs décennies et très clairement relancé le développement des énergies renouvelables en France. Elle comporte un objectif global de 10 % d'énergies renouvelables dans notre bouquet énergétique en 2010 (contre 6 % aujourd'hui).

Nous préparons notre pays à l'après-pétrole. Je suis notamment déterminé à ce que la France, premier producteur d'énergies renouvelables de l'Union européenne, conserve non seulement cette place, qu'elle a gagnée grâce à l'hydroélectricité, mais aussi accroisse la part des énergies renouvelables dans son bouquet énergétique. Nous y travaillons chaque jour.

Nous avons lancé récemment un plan ambitieux de développement des biocarburants, visant à porter leur incorporation à 10 % du volume d'ici 2015 : 5,75 % à l'horizon 2008, 7 % à l'horizon 2010 et 10 % à l'horizon 2015, plaçant la France au premier plan au sein de l'Union européenne.

En matière de production d'électricité, nous avons pris un engagement de 21 % d'énergie renouvelable en 2010. L'année 2005 a confirmé l'essor de l'éolien avec une production qui dépasse le milliard de kWh et des capacités installées qui ont doublé en un an. En 2007-2008, le premier

parc éolien en mer devrait être réalisé au large de Veulett-sur-Mer, pour une puissance de 105 MW. La France devient ainsi l'un des premiers marchés européens de l'éolien. Les constructions de parcs sont de grands chantiers.

Pour le chauffage résidentiel et l'industrie, nous avons pour objectif d'augmenter de 50 % notre production de chaleur renouvelable d'ici 2010, soit une augmentation de 5 millions de tonnes équivalent pétrole. Cela concerne essentiellement la biomasse, mais aussi le développement des pompes à chaleur performantes et la relance de la géothermie. Dans notre pays, compte tenu de notre parc de production d'électricité très peu émetteur de gaz à effet de serre, c'est sur la production de chaleur renouvelable que nous devons faire por-

ter l'effort, car il s'agit de se substituer à des énergies fossiles, fioul ou gaz naturel.

S'agissant de ce qui concerne encore plus directement votre profession, la nouvelle réglementation thermique pour l'habitat neuf impose une baisse de 15 % de l'énergie consommée par mètre carré et par an. Une réglementation analogue entrera prochainement en vigueur pour les rénovations et les travaux dans les bâtiments anciens. Je suis sûr que vous saurez imaginer les solutions qui permettront d'y parvenir. Pour

sensibiliser nos concitoyens, nous avons lancé des étiquettes énergies pour les logements, sur le modèle de celles désormais très connues pour l'électroménager. Enfin, depuis 2005, nous avons mis en œuvre un crédit d'impôts pour les équipements qui permettent des économies d'énergie (chaudières basses températures, matériaux isolants...). Plus de 500 000 ménages en ont profité en 2005, pour un coût estimé de 450 millions d'euros.

Enfin, je veux insister sur la nécessité de développer le solaire photovoltaïque dans les constructions neuves ou les rénovations. Mon ambition est de promouvoir des composants, comme par exemple les tuiles solaires, pour qu'ils deviennent des matériaux du bâtiment comme n'importe quel autre composant de la construction.

Je souhaite que les architectes et les maçons se les approprient et les mettent en place progressivement. A terme, il s'agit d'encourager l'innovation pour développer un marché significatif dans ce secteur et développer de nouveaux métiers, de nouvelles filières. Ces nouveaux bâtiments seront économes en énergie, voire producteurs nets d'énergie, tout en étant esthétiques.

A tous les professionnels de la construction que vous êtes, je veux dire que j'ai besoin de vous. Je sais pouvoir compter sur votre esprit d'entreprise et votre sens de l'innovation, pour bâtir ces nouveaux immeubles, cette nouvelle architecture durable qui nous permettra progressivement de tourner la page de l'ère du pétrole.



■ **FRANÇOIS LOOS**

**Ministre délégué
à l'Industrie**

Les énergies renouvelables contre le changement climatique des ressources

Les énergies renouvelables, issues du soleil ou de la chaleur de la terre, sont inépuisables et la ressource qu'elles représentent est plus de 10 000 fois supérieure à la consommation d'énergie de l'humanité. Elles n'ont que des impacts maîtrisables sur l'environnement et ne produisent pas de gaz à effet de serre pendant leur exploitation. A ce titre, leur développement est l'un des moyens de lutte contre le changement climatique.

Dans les trois types d'usage de l'énergie, carburants pour les transports, chaleur et électricité, les technologies existent et ont commencé à se développer rapidement, en particulier en Allemagne, Danemark, Espagne ou Japon. La France a pris des dispositions récentes, dans le cadre de la loi sur l'Énergie de juillet 2005, qui vont lui permettre de combler son retard.

La biomasse occupe une place à part car elle est la seule de ces ressources à pouvoir satisfaire aux trois usages de l'énergie, mais elle est en quantité limitée car également destinée à d'autres usages que l'énergie, comme l'alimentation et les matériaux. Il faudra donc donner des priorités à son usage énergétique.

Couplées aux équipements les plus performants, les énergies renouvelables peuvent prendre une grande part dans nos bilans énergétiques, mais il faudra du temps pour permettre à ces technologies diffuses de se généraliser. Des efforts de R&D sont encore nécessaires pour diminuer les coûts et être en mesure de gérer la variabilité de certaines de ces ressources.



© Valérie Petitjean

Photo 1
Parcs éoliens de Merdelou et Fontanelles, situés au sud de l'Aveyron, dans le Parc naturel régional des grandes Causses. Implanté à plus de 1100 m d'altitude, ce double parc bénéficie d'un très fort potentiel éolien, mais est soumis à des conditions climatiques sévères (vent moyen annuel de 10 m/s, nuages, brouillard, neige, givre...). Production attendue : 45 millions de kWh par an, soit la consommation électrique annuelle d'environ 20 000 habitants (hors chauffage).

Le parc éolien de Merdelou et Fontanelles constitue le premier exemple, en France, d'ouverture à l'épargne privée pour partie de l'investissement global de 21 millions d'euros.

Bureaux d'études : Valorem Bordeaux et EDM Béziers (Energies Du Midi), exploitant : Enertrag. Aveyron

Wind-power farms of Merdelou and Fontanelles, located in the southern Aveyron region, in the Grandes Causses Regional Nature Park. This double farm, located at an altitude of more than 1,100 m, benefits from a very high wind-power potential, but is subject to severe climatic conditions (average annual wind speed of 10 m/s, clouds, fog, snow, frost, etc.). Expected production: 45 million kWh per year, i.e. the annual electricity consumption of about 20,000 inhabitants (excluding heating).

The Merdelou and Fontanelles wind-power farm is the first example in France of calling on private savings for part of the overall investment of 21 million euros.

Engineering firms: Valorem Bordeaux and EDM Béziers (Energies Du Midi). Operator: Enertrag. Aveyron

■ QU'ENTEND-ON PAR ÉNERGIES RENOUVELABLES ?

Sont considérées comme énergies renouvelables (EnR) toutes les énergies issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique et biomasse), l'énergie issue du magma terrestre (géothermie), et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou du gradient thermique des mers sont également issues indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables.

Les filières technologiques existantes seront analysées suivant les trois utilisations de l'énergie :

chaleur, électricité et carburant pour transport (photo 1).

Les énergies renouvelables sont inépuisables puisque reproductibles mais elles sont disponibles en quantité limitée à un endroit et un instant donné. La ressource en énergie solaire, qui est la base de toutes les autres, hormis la géothermie et l'énergie marémotrice, est 10 000 fois supérieure à l'actuelle consommation d'énergie de l'humanité. Dans le cas de la biomasse, le caractère renouvelable n'est réel que si l'on veille à la pérennité de la ressource. C'est le cas en France où la croissance de la ressource végétale est supérieure à l'exploitation qui en est faite.

Les énergies renouvelables ont peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur ex-

dans la lutte tique et la préservation

Jean-Louis Bal



**DIRECTEUR ENERGIES
RENOUVELABLES
DES RESEAUX
ET DES MARCHÉS
ÉNERGÉTIQUES
Ademe**

exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux. Dans le cas de la biomasse qui émet du CO₂ lors de sa combustion, la même quantité de gaz carbonique est captée pendant la croissance des végétaux.

Les EnR peuvent néanmoins avoir des impacts environnementaux localisés. Les problèmes sont connus : impact paysager pour l'énergie éolienne ; émissions atmosphériques pour le bois combustible ; présence de contaminants dans le biogaz de décharge ; perturbation de l'écosystème local pour la petite hydraulique... Leur utilisation doit donc répondre à certains principes et réglementations pour limiter ces impacts locaux.

Un élément important pour évaluer la valeur d'un type d'énergie est la puissance qui peut être considérée comme garantie par cette énergie, c'est-à-dire fournie au moment où les consommateurs en ont besoin, en particulier pour les usages de l'électricité, énergie difficilement stockable. De ce point de vue, la situation des différentes filières est extrêmement variable. La géothermie fournit une puissance garantie et peut donc fonctionner en base, alors que le solaire et l'éolien sont des énergies fluctuantes. Entre les deux, l'hydroélectricité et les bioénergies offrent plus de souplesse avec certaines capacités de stockage. Une centrale hydraulique pourra à certaines heures absorber les excédents de production d'autres centrales en leur permettant de fonctionner à leur puissance nominale et, donc, avec une meilleure efficacité. Le solaire et l'éolien, même s'ils fluctuent, ne sont pas aléatoires car prévisibles, et peuvent avoir une valeur en terme de puissance électrique conventionnelle évitée pour les réseaux si les pointes de consommation sont simultanées à l'occurrence de ces énergies et que le foisonnement des sources dispersées est suffisant. Ce peut être le cas du solaire et de la consommation engendrée par la climatisation ou de l'éolien et de la pointe de consommation en hiver.

On conçoit néanmoins que le stockage de l'énergie, particulièrement électrique, même sur quelques heures, peut apporter une grande valeur ajoutée aux EnR et que cela devrait être un important thème de recherche pour les années à venir.

En dehors de quelques segments de marché particulier et hormis l'hydroélectricité, les EnR ne sont pas encore pleinement compétitives sur un plan économique. Leur développement demandera encore un soutien financier public continu à tout le moins tant que leurs avantages environnementaux

et sociaux n'auront pas reçu de contrepartie économique ou tant que les impacts négatifs des autres énergies, notamment les émissions de gaz à effet de serre, n'auront pas été intégrés dans leurs coûts. En effet, le marché ne prend pas en compte naturellement des technologies dont les avantages économiques ne seront visibles qu'à long terme et dont les avantages sociaux, environnementaux et stratégiques ne reçoivent pas de valorisation financière. D'autre part, les technologies EnR se caractérisent, comme le nucléaire, par un investissement élevé et de faibles frais de fonctionnement. Leur coût global actualisé, c'est-à-dire calculé sur la durée d'amortissement, est donc très sensible au taux d'actualisation qui reflète le degré de préférence de l'investisseur pour le présent par rapport au futur.

■ LA CONTRIBUTION ACTUELLE DES EnR AUX BILANS ÉNERGÉTIQUES ET LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT À L'HORIZON 2010

En France et en Europe

La contribution des énergies renouvelables représente environ 6 % de la consommation nationale en énergie primaire, situation similaire à celle de l'ensemble de l'Union européenne. Les contributions les plus élevées viennent des filières "anciennes", comme l'hydraulique et le bois énergie. Les productions thermiques, essentiellement le bois, fournissent environ 10,15 Mtep. Les productions électriques ont contribué en 2003 à la production de 71,7 TWh (soit 15 % de la consommation d'électricité), la contribution essentielle étant apportée par l'hydroélectricité (93 %). Enfin, les biocarburants sont aujourd'hui incorporés à hauteur de 0,4 Mtep, soit 0,8 % en moyenne dans les carburants routiers classiques. En dehors des variations de l'hydraulique dues à la pluviométrie, ces productions sont stables. Seule, la production d'énergie à partir de déchets urbains solides connaît une progression régulière notable.

La loi POPE (Programmation fixant les Orientations de la politique énergétique) du 13 juillet 2005 a adopté un objectif global pour les énergies renouvelables à l'horizon 2010 : passer de 6 à 10 % de la consommation en énergie primaire. Cet objectif est décliné par usage :



Figure 1
Production
d'énergie renouvelable
*Renewable
energy production*

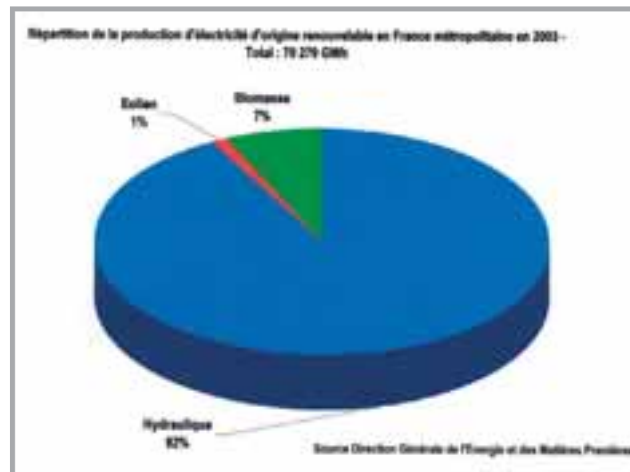


Figure 2
Potentiel
d'énergie renouvelable
*Renewable
energy potential*

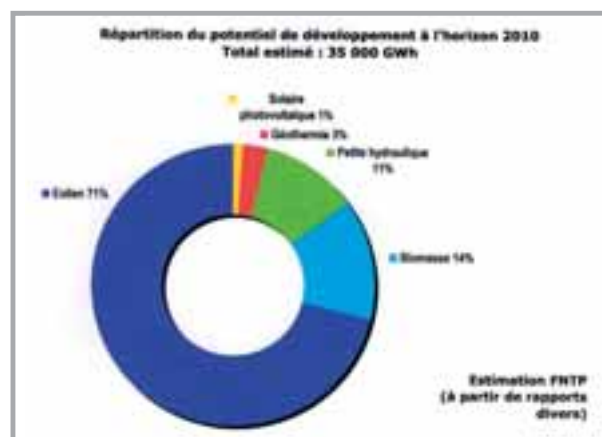


Figure 3
Eolien monde :
historique 1996-2004
et perspectives
*Wind power in the world :
history 1996-2004 and outlook*

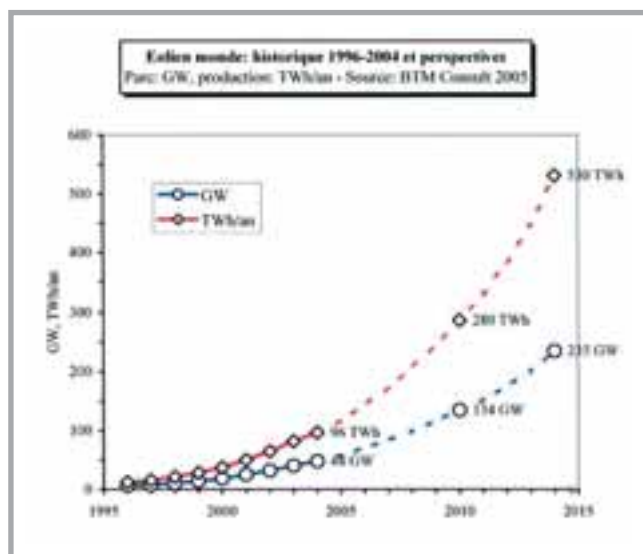
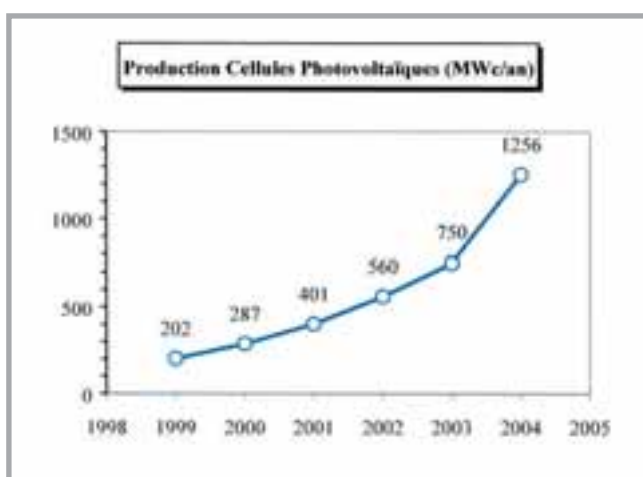


Figure 4
Production cellules
photovoltaïques (MWc/an)
*Photovoltaic cell production
(MWc/year)*



- ◆ 21 % de la consommation d'électricité par EnR contre 14 % actuellement ;
- ◆ 5,75 % de la consommation de carburants routiers à partir de biocarburants ;
- ◆ Augmenter de 50 % la consommation en EnR thermiques (bois, solaire, géothermie).

Concernant les biocarburants, la loi d'orientation agricole propose d'avancer l'échéance à 2008 et d'adopter les objectifs 2010 et 2015 de 7 et 10 %. Au niveau mondial, la contribution totale des EnR était estimée par BP à 18,4 % des 10 800 Mtep consommée en 2002, avec la répartition suivante : hydraulique 5,5 %, biomasse dite "traditionnelle" 10,6 % et l'ensemble des "nouvelles" EnR 2,3 %. Notons que l'estimation de la part de la biomasse "traditionnelle" est forcément très imprécise puisque la grande majorité des flux ne fait pas l'objet de transactions commerciales déclarées.

Ces données "instantanées" ne traduisent cependant pas la dynamique de nombreuses filières EnR qui seront analysées dans les paragraphes suivants (figures 1 et 2).

LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLECTRICITÉ ÉOLIENNE

La figure 3 résume le développement de l'énergie éolienne dans le monde de 1995 à 2004 et son développement à 5 et 10 ans tel qu'estimé par le bureau danois spécialisé en éolien, BTM Consult [1].

Les marchés annuels correspondants sont très importants : de 8200 MW en 2004, le marché mondial est évalué par BTM Consult à 17 600 MW/an en 2009 (avec une montée en puissance de l'éolien en mer à hauteur de 2645 MW/an en 2009) et de l'ordre 29000 MW/an en 2014 (photo 2).

LA PROGRESSION DU SOLAIRE PV (PHOTOVOLTAÏQUE)

Pour l'électricité photovoltaïque, la figure 4 résume la croissance très forte du marché annuel de production des cellules photovoltaïques (source : Photon International, N° 3/2005, mars 2005). Celui-ci a dépassé largement les mille mégawatts en 2004, pour un chiffre d'affaires consolidé de la profession supérieur à 5 milliards d'euros.

Le Japon domine clairement le marché avec 47 % de la production, mais l'Europe a une forte position de challenger avec plus de 27 % loin devant les Etats-Unis avec 11 %.

Selon l'Observatoire des énergies renouvelables, OBSERV'ER [2], le parc de systèmes photovoltaïques à fin 2004 en Europe est de 1004 MW, dont 410 MW installés durant l'année 2004. Ce marché est principalement représenté par l'Allemagne suite à la loi sur les énergies renouvelables, qui garantit sur



Photo 2

Parc éolien du Cap Corse, situé sur les communes d'Ersa (tranche 1) et de Rogliano (tranche 2). Achévé en novembre 2000, ce double parc éolien de 12 MW produit annuellement 30 millions de kWh (kilowattheures), soit l'équivalent de la consommation électrique annuelle de 12 000 habitants, hors chauffage. Bureau d'études et maître d'œuvre : SCITE, maître d'ouvrage et exploitant : Sif Energie. Programme Eole 2005.

Cape Corsica wind-power farm, located in the districts of Ersa (unit 1) and Rogliano (unit 2). Completed in November 2000, this double wind-power farm of 12 MW capacity produces 30 million kWh (kilowatt-hours) annually, i.e. the equivalent of the annual electricity consumption of 12,000 inhabitants, excluding heating.

Engineering firm and project manager : SCITE; Owner-operator : Sif Energie. Eole 2005 Programme

20 ans un tarif suffisamment rémunérateur pour les investisseurs (57,4 c€/kWh pour les "toits PV" de moins de 30 kW et 44 c€/kWh pour des systèmes de plus de 100 kW reliés au réseau).

Avec le nouveau tarif annoncé en France le 15 mai 2006, (30 c€/kWh + un bonus de 25 c€/kWh s'il y a intégration au bâtiment, sur 20 ans), et compte tenu du meilleur ensoleillement dans notre pays, l'expansion du marché photovoltaïque observée ces dernières années en Allemagne et plus récemment en Espagne a des chances de se reproduire en France (photo 3).

■ QUELLES AUTRES SOURCES RENOUVELABLES POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ ET QUELLES PERSPECTIVES DE MOYEN TERME ?

Si la réduction des coûts de l'éolien en mer et du photovoltaïque est un objectif identifié de longue date et dont la faisabilité ne fait guère de doute, il faut insister sur l'importance tout à fait stratégique de disposer de technologies pouvant produire de l'électricité de façon relativement abondante et garantie.

Il faut, avant tout, rappeler que la première des productions d'électricité renouvelables est l'hydroélectricité et qu'elle a encore au niveau mondial de larges possibilités d'expansion. On considère généralement que 10 % seulement de son potentiel technico-économique est exploité. En France, les possibilités d'accroissement de sa contribution sont relativement faibles mais réelles, environ 7 TWh/an soit l'équivalent de la production d'une tranche nucléaire. L'hydroélectricité, de lacs ou de barrages, a pour caractéristique de pouvoir stocker l'énergie sous forme d'accumulation d'eau et de



© Simon Pierre Mosse/Ademe

pouvoir démarrer une production quasi instantanément. Elle peut donc répondre facilement aux pointes de la demande d'électricité et absorber les excès de productions d'autres sources si celles-ci sont supérieures à la demande, ce qui pourra être le cas de l'énergie éolienne lorsque la puissance installée aura dépassé les 10 000 MW. Les exigences de la future loi sur l'eau pourraient toutefois avoir pour conséquence une diminution de la production hydroélectrique.

La géothermie des roches profondes pourrait apporter de la souplesse à la gestion d'un système énergétique beaucoup plus largement basé sur les EnR.

Les roches du sous-sol sont en permanence réchauffées par le flux thermique venant du centre de notre planète.

A titre d'exemple, dans le cas d'une roche à 200 °C, l'énergie libérée par un refroidissement de 20 °C pourrait produire de 10 à 15 MW électriques pendant 20 ans, à raison de 8000 heures/an, ou permettre de distribuer, sur la même période, près de 100 MW thermiques. Les régions intéressantes sont celles sous lesquelles la température aug-

Photo 3
Electrification solaire par des cellules photovoltaïques installées en toiture de la remise d'une maison individuelle à Besançon. Une des premières expériences de raccordement au réseau, de l'électricité produite par voie solaire photovoltaïque

Solar electric power via photovoltaic cells set up on the roof of the shed of a detached house in Besançon. One of the first experiments in connection to the grid, solar electric power produced by photovoltaic cells



Photo 4
Microcentrale hydraulique
de Rochefort-sur-Nénon
dans le Jura
Micro hydraulic power plant
of Rochefort-sur-Nénon
in the Jura



© Simon Pierre Mosse/Ademe

► mente en fonction de la profondeur plus vite que la moyenne et où les conditions géologiques permettent de développer des méthodes efficaces d'extraction de la chaleur.

C'est ainsi qu'un programme de recherche européen sur l'exploitation de la chaleur des roches fracturées chaudes a été initié en Alsace.

Le site expérimental, à quelque 50 km au nord de Strasbourg, est considéré comme représentatif des conditions qui règnent dans les régions de "graben" où les roches profondes sont "naturellement" fissurées. De telles régions couvrent de vastes étendues en Europe et dans le monde, dont environ 30 000 km² sous la seule surface du territoire français métropolitain.

Un pilote scientifique prévu pour fournir 5 MW électriques et 20 MW thermiques est en cours d'installation actuellement sous la responsabilité d'un groupement européen d'intérêt économique comprenant notamment EDF (photo 4).

■ LES USAGES THERMIQUES DE L'ÉNERGIE

Les usages thermiques à basse température qui représente en France le tiers des consommations d'énergie finale sont ceux qui peuvent être le plus facilement satisfaits par l'utilisation des EnR et qui sont directement à portée des décisions du citoyen. On redécouvre à cette occasion tout l'intérêt de la bonne conception de l'architecture et de la construction ainsi que de la valorisation des énergies lo-

cales (bois, solaire et géothermie) pour lesquels des technologies parfaitement maîtrisées sont disponibles : chaudières bois, planchers solaires et pompes à chaleur géothermiques.

L'utilisation directe du rayonnement solaire peut viser au chauffage de l'eau sanitaire, mais aussi, comme le bois énergie dont il peut être complémentaire, au chauffage de l'habitat. Le bon ensoleillement du territoire, y compris dans le nord du pays, permet de couvrir de 40 à 70 % des besoins cumulés en eau chaude sanitaire et en chauffage (photo 5).

Cela doit s'intégrer dans une démarche plus globale de proposition des technologies performantes dans l'habitat : un logement neuf bénéficiant de chauffage solaire et des concepts et produits actuels de l'architecture climatique peut voir ses besoins thermiques réduits à 20 kWh/m²/an (moyenne européenne) contre 182 kWh/m²/an pour la moyenne des logements français en 1997. En réhabilitant des logements anciens avec les mêmes produits et services, il est possible de ramener leur consommation à 50 kWh/m²/an. Il est donc techniquement et économiquement possible en combinant efficacité énergétique et usage de l'énergie solaire de diviser la consommation totale du secteur du logement d'un facteur supérieur à 4. Il en est de même pour le secteur du bâtiment tertiaire.

La France dispose de plusieurs types de ressources géothermales. Les ressources basse enthalpie (de 50 à 100 °C) sont principalement situées dans les

Bassins parisien et aquitain, à des profondeurs comprises entre 600 et 2000 m. Elles se valorisent directement à des fins de chauffage (photo 6).

Les ressources à très basse enthalpie (inférieure à 50 °C) présentes sur la quasi-totalité du territoire dans des aquifères peu profonds se valorisent à l'aide de pompes à chaleur (PAC), sachant que les PAC peuvent être réversibles et assurer la climatisation en période chaude en restituant les calories au sous-sol. Les PAC géothermales réversibles destinées au chauffage et à la climatisation sont des appareils très performants sur le plan énergétique (coefficient de performance pouvant aller jusqu'à 5, c'est-à-dire qu'elles peuvent fournir en énergie thermique jusqu'à 5 fois l'énergie électrique qu'elles absorbent).

En France, 40 % des ménages habitant une maison individuelle se chauffent au bois, totalement ou partiellement. Cela représente en énergie primaire de l'ordre de 7,3 Mtep et en énergie utile 20 % des besoins thermiques de l'ensemble du parc d'habitat individuel. D'autre part, environ 1500 chaufferies collectives et industrielles consomment de leur côté un peu plus d'un Mtep de bois. Cela représente un prélèvement de 35 millions de m³ de bois. Le potentiel théorique de prélèvement supplémentaire sur le seul gisement forestier est estimé, suivant une récente étude de l'Ademe [3], à 7,2 Mtep pour la récolte des rémanents liés à l'exploitation actuelle du bois d'œuvre. Un second gisement supplémentaire de 4,8 Mtep pourrait être exploité si les prélèvements de bois d'œuvre étaient intensifiés sans outrepasser la croissance de la forêt.

Une autre étude de l'Ademe, encore à publier, montre que, dans un scénario dit "facteur 4", où la consommation des bâtiments serait réduite et les appareils actuels de chauffage au bois progressivement remplacés par des appareils performants déjà existants sur le marché, le chauffage au bois continuerait à fournir 20 % des besoins thermiques de l'habitat individuel en 2020, malgré l'accroissement de ce parc, tout en réduisant la consommation de bois en énergie primaire à 4 Mtep. Cette réduction libérerait donc 3,3 Mtep d'énergie primaire pour d'autres usages décrits au paragraphe consacré aux transports.

Une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment, résidentiel ou tertiaire, pourra donc s'articuler sur la nécessaire combinaison de l'efficacité énergétique et l'usage des énergies renouvelables avec des principes différents suivant que l'on s'adresse aux bâtiments existants (60 à 70 % des bâtiments de 2050 existent déjà aujourd'hui) ou aux bâtiments encore à construire (30 à 40 % des bâtiments de 2050). Les énergies pouvant être distribuées par réseau, géothermie, bois, biogaz, chaleurs fatales, doivent être utilisées pour alimenter des bâtiments



Photo 5
Des panneaux solaires photovoltaïques installés en toiture procurent à ce chalet une autonomie électrique. Saint-Véran, Hautes-Alpes, région Provence Alpes Côte d'Azur

Photovoltaic solar panels installed on the roof provide this chalet with electricity autonomy. Saint-Véran, Hautes-Alpes, Provence Alpes Côte d'Azur region



Photo 6
Unité de captage géothermique composée de cuves et tuyauteries inoxydables implantées en pleine végétation tropicale. Région Guadeloupe Martinique
Geothermal power unit consisting of stainless steel tanks and pipes located in the midst of tropical vegetation. Guadeloupe Martinique region

existants aux consommations réduites. Les chauffe-eau solaires et les poêles/inserts bois peuvent être un appoint intéressant sur tous les logements où il est physiquement possible de les installer (bonne orientation, conduit de fumée). Dans les bâtiments neufs aux performances décrites précédemment, il n'est plus nécessaire de recevoir des apports thermiques très élevés et l'arsenal "pompes à chaleur, poêles/inserts bois, solaire thermique" peut assurer la quasi-totalité des besoins thermiques, les ressources énergétiques étant disponibles et les technologies fiables et performantes.

■ TRANSPORT : LES USAGES CARBURANTS DE L'ÉNERGIE

En dehors des cas où les moyens de transport sont mus par l'électricité, auquel cas l'on est renvoyé à la problématique de la production d'électricité, le seul apport des EnR à ce secteur est dû aux bio-

Photo 7
Fabrication de biocarburant.
Centrifugeuses
pour la neutralisation
de l'huile brute,
et pour le lavage.
Diester Industrie, Groupe
Prolea. Seine-Maritime

Biofuel production.
Centrifuges for neutralisation
of crude oil and for scrubbing.
Diester Industrie,
Prolea Group. Seine-Maritime



© Olivier Pascaud/Ademe

► carburants. On appelle biocarburants, les carburants liquides ou gazeux produits à partir de matières organiques végétales ou animales.

Les biocarburants, leur usage et la faisabilité des objectifs 2010

La directive européenne 2003/30 énumère dix biocarburants différents dont certains, principalement les éthers ne sont pas exclusivement produits avec des matières premières renouvelables. Il s'agit du bioéthanol, du biodiésel (esters d'huile végétale), du biogaz, du biométhanol, du biodiméthyléther, du bio-ETBE, du bio-MTBE, des biocarburants synthétiques, du biohydrogène et des huiles végétales brutes.

En France, seules deux utilisations ont été développées à ce jour :

- ◆ le bioéthanol et plutôt son dérivé, l'ETBE (éther), en mélange aux essences. Cette production est assurée à partir de betteraves et de blé ;
- ◆ un dérivé des huiles végétales (ester méthylique) en mélange aux gazoles. Cette production est assurée pour l'essentiel à partir de colza (photo 7). Ces biocarburants ne sont pas utilisés purs en France :
- ◆ ils sont principalement introduits en faible quantité dans les essences et gazoles, en tant que composants de formulation aux qualités techniques reconnues et pour leur contribution directe ou indirecte à la réduction de certaines émissions polluantes ;
- ◆ soit ils sont mélangés, en tant que co-carburants jusqu'à 30 %, pour être utilisés dans des flottes captives (bus, véhicules utilitaires...). C'est no-

tamment le cas de l'ester d'huiles végétales (diester).

En fonction des consommations prévues en 2010, il faudrait à cet horizon, pour satisfaire l'objectif de 7 % des carburants routiers, produire de l'ordre de 900 000 t d'éthanol et 2 600 000 t de diester. Les surfaces agricoles nécessaires seront de 270 000 ha (blé et betteraves) pour le colza et de 1 700 000 ha pour le diester (colza principalement), soit un peu plus que les surfaces en jachère (1 500 000 ha) mais bien moins que les surfaces consacrées aux cultures d'exportation. Il n'y a donc pas de problèmes de faisabilité agricole (photo 8).

Peut-on aller au-delà des objectifs 2010 ?

En France, le potentiel de biomasse encore mobilisable pour l'énergie, en plus des 10 Mtep déjà utilisées, est supérieur à 30 Mtep (les 12 Mtep encore mobilisables en forêt évoquées précédemment, les déchets agricoles et les possibles cultures énergétiques) dont environ 80 % sont constitués par la partie lignocellulosique de la biomasse.

Or, si l'on sait produire des biocarburants à partir des réserves de la plante, on ne dispose pas, à l'heure actuelle, de technologies pour la conversion industrielle de la biomasse lignocellulosique en carburants.

La lignocellulose, schématiquement les tissus de soutien des organes végétaux (tiges, troncs, feuilles...), représente le gisement en biomasse végétale le mieux réparti et le plus important sur le territoire national ou européen. Cette ressource peut-être caractérisée selon la typologie suivante : les résidus secs d'exploitation agricole et fores-

tière, les produits de l'exploitation forestière ou les cultures dédiées.

Pour convertir cette matière lignocellulosique, deux voies apparaissent possibles : la thermochimie et la biologie.

Ce sont là les deux grands axes du Programme national de recherche sur les bioénergies qui vient d'être adopté par l'Agence nationale de la Recherche et qui vise l'horizon 2010 pour disposer de technologies industriellement exploitables.

La biomasse entre chaleur, électricité et carburants

La biomasse ne résoudra pas à elle seule les problèmes d'approvisionnement en énergie et de réduction d'émissions de gaz à effet de serre. Cependant, 40 Mtep disponibles dans un pays qui en consomme 275, c'est une marge de manœuvre appréciable dont il conviendra d'arbitrer entre les différents usages, chaleur, électricité et carburants, pour en tirer le meilleur parti.

Dans l'état actuel des technologies, la production d'électricité seule apparaît réellement comme un gaspillage de ressources, les rendements de conversion de la combustion en chaudière suivie de production de vapeur alimentant une turbine sont de l'ordre de 20 %. Même en supposant que les technologies de gazéification permettent dans les prochaines années d'atteindre 40 % de conversion électrique, la cogénération semble une meilleure voie pour valoriser au mieux une ressource limitée. L'usage chauffage, comme évoqué précédemment, doit en premier lieu, être modernisé particulièrement dans l'habitat individuel où le même service pourrait être rendu en utilisant deux fois moins de biomasse. Parallèlement, il devra être développé sur des usages collectifs et industriels. Mais l'usage qui devrait donc être prioritaire, si les promesses de la production de carburants lignocellulosiques se confirment, c'est bien celui de substitution aux carburants fossiles dans les transports. Il n'y a pas aujourd'hui d'autres possibilités réalistes de substitution à court et à moyen terme. La partie de la ressource forestière utilisée à des fins énergétiques n'est qu'un sous-produit de l'exploitation forestière et, pour augmenter les prélèvements énergétiques, il faut en premier lieu augmenter l'exploitation du bois d'œuvre, ce que permet parfaitement la sous-utilisation actuelle de la croissance de la forêt française. Un usage accru du bois dans la construction aurait alors une cohérence parfaite avec une politique de valorisation énergétique de la biomasse. Les besoins en énergie à la construction seraient réduits, du carbone serait stocké, les performances thermiques des bâtiments s'en trouveraient améliorées et la disponibilité de la biomasse énergie augmentée. Un plan d'action biomasse serait une vraie stratégie "gagnant gagnant".



© Philippe Martelly/Ademe

Photo 8
Colonnes de distillation de biocarburant à Artenay dans le Loiret

Biofuel fractionating towers at Artenay in the Loiret region

■ CONCLUSIONS

Selon le rapport de la MIES (Mission interministérielle sur l'effet de serre) sur la division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici à 2050 (mars 2004), "il n'y a pas de division par 4 des émissions possible sans effort massif d'économies d'énergies et de développement des énergies renouvelables". Dans les scénarios 2050 étudiés, la part des EnR varie de 32 à 75 Mtep contre 18 Mtep actuellement, dans une consommation en énergie primaire allant de 187 à 400 Mtep.

Les ressources en énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire, sont immenses, physiquement bien supérieures aux besoins énergétiques. Les technologies sont aujourd'hui pour la plupart déjà disponibles et fiables, ou ne nécessitent que des progrès en terme de rentabilité qui viendront au moins autant du développement du marché que des efforts de R&D. Les taux de pénétration envisagés à l'horizon 2050 ne demandent aucun saut technologique mais une politique incitative est indispensable pour guider le marché vers ces objectifs d'intérêt collectif que sont la préservation de l'environnement et la sécurité d'approvisionnement. Pour qu'ils soient atteints, le couplage maîtrise des consommations et production renouvelable est indispensable. La hausse des prix de l'énergie, la conscience de chacun de l'imminence de l'épuisement progressif des ressources, et des impacts du changement climatique faciliteront la mise en œuvre de politique publique volontariste.



► ■ RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BTM Consult "International Wind Energy development : world Market Update 2004, Forecast 2005-2009", mars 2004. Site web : www.btm.dk
- [2] Observer, "Baromètre du solaire photovoltaïque Euroserv'er37, avril 2005". Téléchargeable sur : www.observ-er.org/s_accueil.asp
- [3] consultable sur : www.boisenergie.ifn.fr/index.php

ABSTRACT

Renewable energy sources in the fight against climate change and for conservation of resources

J.-L. Bal

Renewable energy sources such as the sun and the heat of the ground are inexhaustible and represent a resource more than 10,000 times greater than the energy consumption of humanity. They have only manageable impacts on the environment and produce no greenhouse gases from their exploitation. Accordingly, their development is one way of fighting against climate change. In the three types of energy applications, transport, heat and electricity fuels, the technologies are available and have begun to develop rapidly, especially in Germany, Denmark, Spain and Japan. France recently took measures, within the framework of the Energy Act of July 2005, which will enable it to catch up with them.

Biomass is a special case, because it is the only one of these resources suitable for the three uses of energy, but it is available in limited quantities because it is also used for applications other than energy, such as food and materials. Priority will therefore have to be given to its energy use.

Coupled with the most efficient equipment, renewable energy sources can play a major role in our energy balances, but time will be needed to allow these little-used technologies to come into widespread use. Further R&D efforts are needed to reduce costs and be able to manage the variability of some of these resources.

RESUMEN ESPAÑOL

Las energías renovables en la lucha contra el cambio climático y la preservación de los recursos

J.-L. Bal

Las energías renovables, procedentes del Sol o del calor de la tierra, son inagotables y el recurso energético que representan es más de 10 000 veces superior al consumo de energía de la humanidad. El impacto sobre el medio ambiente de estas energías se puede controlar y no generan ningún efecto

invernadero durante su explotación. A este respecto, su desarrollo constituye uno de los medios de lucha contra el cambio climático.

Para los tres tipos de empleo de la energía, carburantes para los transportes, calor y electricidad, las tecnologías existen y ya han comenzado a desarrollarse rápidamente, en particular en Alemania, Dinamarca, España y Japón. Francia ha tomado recientemente diversas disposiciones en el marco de la ley de Energía de julio de 2005, que le permitirán recuperar su demora.

La biomasa ocupa un puesto diferente debido a que es el único recurso que puede satisfacer a los tres usos de la energía, pero existe en cantidad limitada ya que también se utiliza para otros empleos que la energía, como la alimentación y los materiales. Por consiguiente, es preciso dar las prioridades a su utilización energética.

Combinadas con equipos de mayor rendimiento, las energías renovables pueden ocupar una parte preponderante en nuestros balances energéticos. Aún son necesarios esfuerzos de I+D para reducir los costes y encontrarse en condición para administrar la variabilidad de algunos de estos recursos.



Algérie

Le barrage de Koudiat Acerdoune en béton compacté au rouleau

L'ouvrage décrit dans cet article est le barrage de Koudiat Acerdoune situé en Algérie. Assurant à lui seul l'alimentation de cinq wilayas, il constitue un des ouvrages majeurs dans la politique de mobilisation des ressources en eau de ce pays. En effet, le Gouvernement a lancé un programme conséquent de mise en valeur et d'exploitation des ressources hydriques. L'objectif étant de fournir de l'eau potable 24 heures sur 24 aux Algérois. L'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) est le maître d'ouvrage de ces grands projets. Avec une capacité de 540 Mm³ et ses 116 m de hauteur, Koudiat Acerdoune demeure le second grand projet en Algérie.

L'hydraulique est la première énergie renouvelable pour produire de l'électricité. La multiplication des projets de construction de barrages témoigne de l'engouement à développer ce type d'énergie, reflet également de notre implication dans le développement durable.

L'eau, source de vie, est l'un des éléments essentiels du patrimoine commun de notre humanité.

Les demandes d'une population en progression constante et les modèles de consommation marqués par la pollution et le manque de contrôle de l'environnement ont fait de cette ressource naturelle un élément d'intérêt majeur à l'ordre du jour au plan international.

En Algérie, le développement économique et social demeure tributaire pour une grande part d'une utilisation rationnelle de l'eau dont la mobilisation insuffisante demande actuellement à être davantage maîtrisée et étendue.

Le programme du deuxième plan quinquennal présidentiel a consacré une enveloppe conséquente pour la poursuite des projets inscrits au titre de la politique de l'eau menée déjà depuis 5 ans par les pouvoirs publics, et ce pour assurer la disponibilité de l'eau potable 24 heures sur 24.

En matière de mobilisation des eaux de surface, l'Algérie dispose aujourd'hui de 57 barrages en exploitation pour une capacité totale de mobilisation de 6 milliards de m³, l'objectif à court terme selon les projets en construction et en étude étant de porter ce patrimoine à 70 barrages en exploitation pour une capacité mobilisée de 8 milliards de m³. Sous le triple effet de sa rareté, de sa dégradation qualitative, de la croissance des besoins de la population et des activités économiques, il faudra des efforts énormes pour assurer sa disponibilité et ceci s'illustre par le nombre important de chantiers ouverts et par l'ampleur de certains projets structurants tels que le barrage de Koudiat Acerdoune qui assure à lui seul l'alimentation de cinq wilayas.



Plan de situation
Location drawing

Le ton est donné : priorité à la gestion intégrée des ressources en eau ainsi que le management des services de l'eau et de l'assainissement. La mobilisation des ressources en eau est un des grands défis de l'Algérie. Le Gouvernement a lancé un programme conséquent de mise en valeur et d'exploitation des ressources hydriques. Ce programme s'articule autour de sept grands systèmes régionaux : Beni Haroun pour 504 Mm³/an, Mao pour 155 Mm³/an, Sétif Hodna pour 300 Mm³/an, Tacksebt pour 180 Mm³/an, El Tarf pour 100 Mm³, Saa pour 55 Mm³/an, Koudiat Acerdoune pour 178 Mm³/an.

L'Agence Nationale des Barrages et des Transferts (ANBT) est le maître d'ouvrage de ces grands projets, pour le compte du ministère des Ressources



Dérivation
de l'oued Isser
Wadi Isser diversion



Vue du site
du barrage
depuis l'aval
*View of the dam site
from downstream*



attribué sur solution d'un barrage en enrochements à la fin des années 90, puis résilié à la demande du bailleur de fonds, la BAFD, pour modifications substantielles du projet.

C'est ainsi que le projet a été relancé en appel d'offres national et international avec la solution d'un barrage en béton compacté au rouleau (BCR). L'entreprise Razel a été déclarée adjudicataire et l'ordre de service d'engager les travaux lui a été notifié le 19 août 2002.

Pour le projet du barrage de Koudiat Acerdoune, l'ANBT est le maître d'ouvrage, assisté par le bureau d'ingénieurs conseils Coyne et Bellier, qui a aussi pour mission l'établissement des plans d'exécution, sur la base des études contenues au dossier d'avant-projet détaillé.

► en Eau. Elle gère les barrages en exploitation et oriente ses efforts financiers sur l'exploitation des barrages.

Avec les grandes réformes en cours, l'ANBT est passée sous statut EPIC (Entreprise publique industrielle et commerciale), son objet commercial étant de fournir l'eau aux établissements de distribution.

Avec la mobilisation de cette eau, l'Algérois devrait être sécurisé définitivement par les deux grands projets que sont les barrages de Beni Amrane à Boumerdes et Koudiat Acerdoune à Bouira.

Koudiat Acerdoune, avec une capacité de 640 Mm³ demeure le second plus grand projet en Algérie, il alimentera cinq wilayas, le Sud et l'Est de Médéa, l'Ouest de Bouira, le Sud de Tizi Ouzou en passant par Draa El Mizan, Boghni, les Ouadhias et le Nord de M'Sila.

Il sera également le pourvoyeur principal en eau potable et en eau d'irrigation du périmètre des Issers, sur une surface de 20 000 hectares et jusqu'à la nouvelle ville de Boughezoul.

Pour information, ce projet avait été préalablement

■ CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE L'AMÉNAGEMENT

Ce barrage de type poids en BCR s'appuie sur une fondation rocheuse constituée de schistes marneux.

Retenue créée :

- 640 Mm³ dont 520 Mm³ utiles pour régularisation de 170 Mm³/an;

- 100 Mm³/an en alimentation d'eau d'irrigation (AEI);

- 70 Mm³/an en approvisionnement en eau potable (AEP).

Barrage :

- Hauteur sur fondation : 116 m;

- Longueur de crête : 425 m;

- Largeur en crête : 8 m.

La crue est évacuée par un évacuateur de surface à seuil libre d'une longueur de 136 m et un pont-route surmonte la crête du déversoir.

Galeries :

- Quatre niveaux de galeries prolongées dans les



Vue du site du barrage depuis l'amont

View of the dam site from upstream

rives permettent la réalisation des injections du voile d'étanchéité, et contiennent les dispositifs de drainage, et d'auscultation en phase d'exploitation.

Maîtrise de l'eau :

Pour la dérivation, deux pertuis en béton armé construits en rive gauche assurent la dérivation de l'oued en phase travaux. Ils sont réalisés sous protection de batardeaux.

En phase exploitation, l'un est équipé en vidange de fond, l'autre est obstrué et utilisé pour le passage des conduites de la prise d'eau vers l'aval. Après mise en service de la dérivation provisoire, la protection du chantier est assurée par deux batardeaux amont/aval.

L'ouvrage de prise d'eau s'appuie sur le parement amont.

■ DONNÉES GÉNÉRALES

- ◆ Bassin versant : 2 790 km² ;
- ◆ Longueur oued amont : 122 km ;
- ◆ Pente : 1,13 % ;
- ◆ Précipitations annuelles : 450 mm sur la moitié amont du bassin, 1 000 mm sur les chaînes montagneuses, pour une moyenne globale annuelle de 565 mm ;
- ◆ Température moyenne annuelle : 16 °C ;
- ◆ Apports moyens annuels : 206 Mm³ ;
- ◆ Taux moyen érosion : 1 500 t/an/km² ;
- ◆ Dépôt de sédiments dans la retenue : 4 Mm³/an ;
- ◆ Volume mort après 50 ans : 200 Mm³.

Géologie

Le site du barrage est implanté dans une zone appartenant aux atlas septentrionaux.

Les formations géologiques sont essentiellement composées de roches schisto-marneuses, calcaires dolomitiques, marnes schisteuses et calcaires (crétacé moyen, crétacé supérieur et jurassique inférieur).

Le barrage est fondé dans des terrains autochtones. Au droit du barrage, la vallée de l'oued Isser franchit en direction sud-nord un resserrement formé par deux collines à pentes assez raides : en rive gauche la colline de Koudiat Acerdoune culminant à 433 m, en rive droite la colline de Koudiate Ed Rez culminant à 500 m.

De manière très générale et en résumé, les terrains de fondations du barrage sont des schistes marneux, recouverts par une zone d'altération formée de schistes décomposés, et des éboulis de pente.

Séismicité

La zone de Koudiat Acerdoune est caractérisée par des séismes relativement fréquents et d'amplitude réduite à moyenne.

Matériaux de construction

Suite au passage de la solution barrage souple à la solution barrage rigide (BCR) des reconnaissances complémentaires ont été entreprises visant à l'exploitation des zones alluvionnaires proches du barrage.

Deux grandes zones ont été identifiées pour l'exploitation des matériaux alluvionnaires devant permettre la fabrication des granulats béton.

Révisions de projet

Dès le démarrage du chantier, des difficultés significatives sont venues perturber la bonne exécution des travaux :

- ◆ difficultés imprévues et répétées posées par les terrains du massif de fondation du barrage ;
- ◆ difficultés liées à la nature des alluvions du site devant servir à la fabrication des granulats béton (fractions importantes de schistes et de marnes). Ces deux natures de difficultés sont à l'origine d'im-



Fond de vallée
prêt à recevoir
les premiers mètres cubes
de BCR

Valley floor ready to receive
the first cubic metres
of roller-compacted concrete



portantes variations techniques et contractuelles du marché.

En 2003, différents glissements sont apparus dès l'ouverture des excavations en rive gauche et ont affecté quatre zones. Ces instabilités ont été chaque fois traitées par l'enlèvement des matériaux "glissés" jusqu'à la rencontre des horizons supposés stables. Le confortement s'effectuant par ancrage et béton projeté.

Bien entendu, ces reprises se sont déroulées dans des conditions de travail délicates, d'accès difficiles, d'exiguïté des zones, et de coactivité.

En 2004, de nouvelles manifestations inquiétantes sont apparues. Alors que les travaux de la rive droite se déroulaient exactement comme prévu, que les travaux de résorption des glissements de la rive gauche permettaient d'envisager la dérivation de l'oued, il a été découvert une fissure traversant maisons et terrains situés dans la partie haute de la rive gauche.

Par ailleurs, le contrôle topographique par lecture de repères sur la paroi rive gauche a bien mis en évidence un mouvement généralisé à composante horizontale. Les mesures réalisées sur 5 mois ont permis d'évaluer ce déplacement à 17 cm, par contre les ouvrages réalisés en pied de rive (peruis de dérivation) n'étaient pas affectés.

Le bureau d'ingénieurs conseils Coyne et Bellier a conclu alors à la mise en mouvement d'une grande masse de terrain, l'ampleur du phénomène appelant des mesures immédiates. La première a été

d'interrompre momentanément les activités dans les zones de travail des peruis de dérivation en pied de la rive. La seconde de renforcer les mesures de surveillance topographique, puis de mettre en place une procédure d'alerte avec surveillance en continu. Cette dernière disposition conditionnant la reprise des activités en pied de la rive gauche. Ces problèmes ont à nouveau mis en exergue l'insuffisance de connaissance du massif de fondation. Tout un programme de reconnaissances complémentaires et d'essais en laboratoire (CETE Aix-en-Provence) a dès lors été établi.

Ainsi, l'ensemble des informations obtenues avec leurs interprétations, ont conduit à une révision lourde du projet, une reprise complète de la rive gauche avec des quantités additionnelles d'excavations de 2 500 000 m³, une reprise partielle de la rive droite avec des quantités additionnelles d'excavations de 350 000 m³, et une stabilisation généralisée des talus par ancrages et béton projeté. La révision à la baisse des caractéristiques mécaniques de fondation a eu pour conséquence essentielle sur le projet, l'épaississement de la section transversale du barrage.

Le volume du barrage en BCR est ainsi passé de 1 070 000 m³ à 1 600 000 m³. Compte tenu aussi du risque d'érosion régressive vers les rives au droit de la fosse de dissipation, un modèle réduit a été nécessaire pour finaliser les dispositions constructives de l'évacuateur de crues. Enfin, la totalité des imprévus, la révision du projet en cours de réali-

sation et l'augmentation de la masse des travaux, ont conduit à un nouveau délai contractuel de 67 mois au lieu des 35 mois initiaux.

■ LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

Comme évoqué plus haut, le passage de la solution barrage en remblai à la solution barrage en BCR a nécessité de compléter l'inventaire des ressources en matériaux disponibles, principalement dans la cuvette de la retenue.

Ces matériaux disponibles sont, bien entendu, les matériaux alluvionnaires du lit et des terrasses de l'oued Isser.

Par ailleurs, il était mentionné au marché l'existence de calcaire affleurant en rive droite laissant entrevoir la possibilité d'ouvrir une carrière, mais les reconnaissances ont vite démontré que ce site ne pouvait être retenu.

Les matériaux alluvionnaires, après traitement, doivent assurer les besoins en granulats du béton conventionnel et du béton compacté au rouleau.

Les matériaux alluvionnaires sont très vite apparus comme devant nécessiter un traitement lourd pour l'élaboration de granulats béton conformes aux spécifications.

Cette nature des alluvions différente et non conforme à celle spécifiée au DAO est caractérisée, avec ses conséquences, comme suit :

- ◆ composition pétrographique avec fraction importante de schiste préjudiciable à la qualité des bétons ;
 - ◆ fraction inférieure à 80 μ présentant un IP > 14 à comparer aux spécifications limitant cet IP à 6 ;
 - ◆ dégradabilité dans le temps et fragilité des granulats produits (schiste).
- Razel a fait le choix de dissocier la fabrication des granulats BCR et BCR.
- Conséquences de la nature des alluvions et principes retenus pour la fabrication des granulats BCR :
- ◆ élimination des fines considérées comme nocives (déboureur et traitement des sables) ;
 - ◆ réduction granulométrie de D_{max} 63 à 50 mm ;
 - ◆ production à flux tendu (nécessité d'homogénéiser les stocks d'alluvions) ;
 - ◆ station de traitement des matériaux de capacité portée à 1 000 t/h ;
 - ◆ consommation d'eau nécessaire à la production d'une tonne de granulats à hauteur de 4 m³, requérant le recyclage (la quantité d'eau disponible de l'oued étant insuffisante à l'étiage) ;
 - ◆ évacuation des boues ;
 - ◆ pertes pour matériaux impropres estimées à 19 % augmentant d'autant les quantités d'alluvions à extraire ;
 - ◆ remplacement des fines nocives éliminées (< 80 microns) par du filler calcaire d'apport.



Les premiers mètres cubes de BCR

The first cubic metres of roller-compacted concrete

■ LE DÉVELOPPEMENT DES BARRAGES EN BCR

La technologie des barrages en BCR est récente. Depuis 1980, époque des premiers ouvrages réalisés, plus de 250 barrages ont été construits, de hauteur et d'importance modestes au début, c'est le cas pour les barrages réalisés en France. Il en existe aujourd'hui plus d'une trentaine dépassant une hauteur de 100 m ; la hauteur de 200 m est maintenant approchée comme par exemple le barrage de Miel en Colombie à 188 m, le barrage de Longtan en Chine à 192 m et le barrage de Thadan en Chine à 218 m.

Les plus importants barrages en BCR sont en Chine, au Japon et en Amérique du Sud.

Les barrages en BCR sont principalement des barrages poids, mais rien n'empêcherait d'appliquer aussi cette technologie à des barrages voûte.

Le matériau BCR utilisé est un béton devant répondre à des caractéristiques de qualité intrinsèque et à des propriétés spécifiques lors de la mise en œuvre garantissant autant que possible l'absence de zones de faiblesse dans le barrage (en particulier étanchéité).

La différence essentielle avec un béton classique en est la consistance qui lui permet de supporter le serrage par rouleau vibrant lourd.

Les qualités intrinsèques restent la résistance à la compression, la densité, l'imperméabilité, la durabilité, elles en sont "l'aspect béton".

Les propriétés spécifiques sont l'absence de ségrégation, la maniabilité, et le temps de recouvrement entre couches, propriétés proches de "l'aspect sol".

CONCLUSION

Ouvrage majeur dans le programme de mobilisation des ressources en eau, le barrage de Koudiat Acerdoune devrait être mis en eau fin 2007, avec un achèvement total programmé en avril 2008. Les ouvrages de transfert, de pompage, de traitement de l'eau, sont aussi à présent lancés. Le système complet devrait être opérationnel en 2009. Malgré les difficultés rencontrées en cours de réalisation et l'augmentation de son coût, il conserve ses attributs d'ouvrage exceptionnel par le volume d'eau mobilisé et sa proximité des centres d'utilisation.

TABLEAU DES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Excavations : 4 900 000 m³
- Ancrages : 210 000 ml
- Béton projeté : 190 000 m²
- Forages pour injection : 150 000 ml
- Béton conventionnel : 310 000 m³
- Béton compacté au rouleau : 1 600 000 m³
- Extraction des alluvions : 3 000 000 m³
- Ciment : 295 000 t
- Filler calcaire : 200 000 t
- Machines de production : 120 u
- Puissance mobilisée : 45 000 CV
- Effectifs moyens sur la durée du chantier : 700 personnes

ABSTRACT

Algeria. The Koudiat Acerdoune dam of roller-compacted concrete

J.-B. Arnold

The structure described in this article is the Koudiat Acerdoune dam in Algeria. Providing by itself the power for five wilayas, it is one of the major projects in the policy of developing the use of water resources in the country. The government has launched a major programme for the development and exploitation of water resources. The objective is to supply the inhabitants of Algiers with potable water round-the-clock. The Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) is the contracting authority for these major projects. With a capacity of 540 m cu. m and a height of 116 metres, Koudiat Acerdoune is the second largest major project in Algeria.

RESUMEN ESPAÑOL

Argelia. La presa de Koudiat Acerdoune en hormigón compactado mediante rodillo

J.-B. Arnold

La obra que figura descrita en el presente artículo es la presa de Koudiat Acerdoune ubicada en Argelia. Esta presa que por sí sola asegura la alimentación de cinco wilayas, constituye una de las más importantes obras en la política de movilización de los recursos hídricos de este país. Efectivamente, el Gobierno ha iniciado un programa significativo de valorización y explotación de los recursos hídricos. El objetivo consiste en suministrar el agua potable durante las 24 horas diarias a la población de este país. La Agencia Nacional de Presas y Transferencias (ANBT) actúa como entidad contratante para estos grandes proyectos. Con una capacidad de 540 Mm³ y sus 116 m de altura, Koudiat Acerdoune sigue siendo el segundo proyecto en Argelia.

Electricité et géothermie : le site pilote de Soultz et ses prolongements européens

Le BRGM, fort de ses 30 années d'expérience en géothermie, est à l'origine avec ses partenaires allemands d'un projet pilote de géothermie EGS (Enhanced Geothermal Systems) ou projet Soultz, situé en Alsace du Nord, qui consiste à récupérer l'énergie thermique des roches profondes à l'aide d'un fluide caloporteur pour produire en surface de l'électricité. Ce type de projet nécessite une bonne connaissance du sous-sol à partir d'informations collectées dans des forages profonds. Les résultats encourageants du projet Soultz ont fait des émules à l'échelle européenne avec la réalisation de nouveaux forages de reconnaissance en Allemagne et en Suisse. De plus, sous l'impulsion de l'Europe, les acteurs de la filière géothermie EGS s'organisent via une action de coordination intitulée ENGINE dans le but de dynamiser les recherches sur le développement des réservoirs géothermiques non-conventionnels.

■ GÉOTHERMIE ET ÉLECTRICITÉ

La géothermie ou exploitation de l'énergie thermique du sous-sol est "plurielle" puisqu'elle s'intéresse aux applications thermiques depuis la sub-surface (chauffage individuel grâce aux pompes à chaleur sur aquifères) jusqu'à la géothermie des zones géologiquement actives qui permet la production d'électricité à partir de fluides hydrothermaux naturellement portés à haute température. L'utilisation de l'énergie thermique contenue dans le sous-sol pour produire de l'électricité ou géothermie haute enthalpie est connue depuis plus d'un siècle en Europe, à Larderello (Italie). Géologiquement, il s'agit de régions volcaniques qui renferment des fluides hydrothermaux ayant des caractéristiques thermodynamiques capables de produire de la vapeur, et donc d'actionner un groupe turbo-alternateur pour produire des mégawatts géothermiques. En Europe, les principales régions géologiquement favorables sont essentiellement des provinces volcaniques actives comme celles de la Toscane en Italie, de l'Islande, des Açores et certaines îles helléniques. Par ailleurs, les départements français d'outre-mer (DOM) comme la Guadeloupe, la Martinique et La Réunion présentent également des conditions favorables au développement de la géothermie haute enthalpie. En effet, sur l'île de Basse-Terre en Guadeloupe, la centrale géothermique de Bouillante produit de l'électricité d'origine géothermale avec 15 MW électriques à partir de la vapeur contenue dans les roches volcaniques fracturées (photo 1). Cette production locale représente déjà presque 10 % des besoins de l'île ce qui la rend particulièrement attractive économiquement dans le contexte insulaire des DOM, régions dépourvues en électricité électronucléaire. Parallèlement au potentiel des ressources géothermiques haute enthalpie des régions volcaniques



Photo 1
La centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe
Bouillante geothermal power station in Guadeloupe

comme celles des Antilles françaises, la production électrique d'origine géothermique en métropole et en Europe continentale va être conditionnée par l'exploitation de réservoirs non conventionnels. Il va s'agir d'exploiter par forage les formations géologiques non volcaniques qui forment la plate-forme européenne. Le principe de base consiste à stimuler, par différentes techniques, des roches chaudes peu perméables pour augmenter de façon significative leur perméabilité et donc les débits de production. Le projet pilote européen de Soultz-sous-Forêts en Alsace du Nord se place résolument

Albert Genter
RESPONSABLE
DE "L'UNITÉ GÉO-ÉNERGIE"
BRGM Orléans

André Gérard
COORDINATEUR SCIENTIFIQUE
"GEIE EMC SOULTZ"
GEIE Exploitation Minière de la Chaleur -
Kutzenhausen

Laurent Le Bel
CHARGÉ DE MISSION - DIRECTION
DE LA RECHERCHE
BRGM Orléans

Patrick Ledru
COORDINATEUR DU "PROJET
ENGINE" - DIRECTION
DE LA RECHERCHE
BRGM Orléans

1984	Premiers travaux du BRGM à l'origine du projet Soultz
1987	Réalisation du premier forage de reconnaissance GPK1 à 2000 m
1990	Réalisation d'un réseau de puits d'observations microséismiques et du forage d'exploration entièrement carotté EPS1 à 2250 m
1992	Approfondissement du forage GPK1 à 3600 m (T=165°C)
1995	Réalisation du forage GPK2 à 3878 m
1997	Réalisation d'un test de circulation de 4 mois entre GPK1 et GPK2 (débit 25l/s)
2000	Approfondissement du forage GPK2 à 5010 m (T= 203°C)
2002	Réalisation du forage GPK3 à 5 km, à proximité immédiate de GPK2. La distance horizontale entre les parties non tubées de GPK2 et GPK3 est de 650 m
2003/2004	Stimulation de GPK3 et tests de circulation entre GPK3 et GPK2. Réalisation du forage GPK4 à 4985 m. La distance horizontale entre les parties non tubées des puits GPK3 et GPK4 est de 700 m
2004/2005	Stimulation de GPK4 et tests de circulation de 5 mois entre le puits central d'injection (GPK3) et les deux puits latéraux de production GPK2 et GPK4

Tableau I
Principales étapes
du projet Soultz

*Main stages
of the Soultz
project*



Photo 2
Le rig du forage GPK3
de Soultz
dans la campagne
alsacienne

*The Soultz GPK3
drilling rig in the Alsatian
countryside*

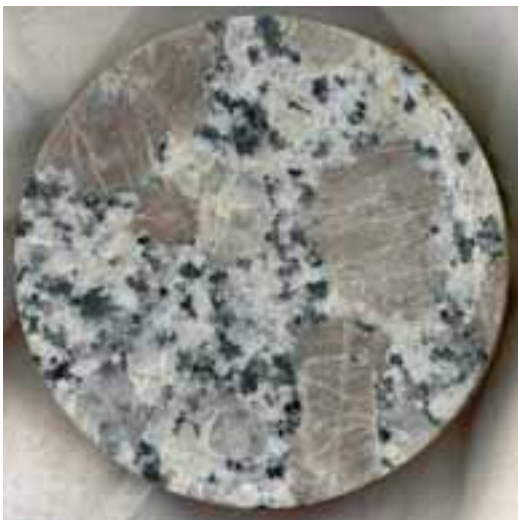


Photo 3
Le granite de Soultz. Echantillon
de carotte prélevé à 3510 m

*Soultz granite. Core sample
taken at 3510 m*

▶ dans cette perspective d'augmentation de la perméabilité d'un granite profond où règne une température de 200 °C (www.soultz.net). Ce projet consiste à extraire de la chaleur des roches profondes en injectant de l'eau froide par un forage central d'injection et en récupérant un fluide réchauffé dans deux forages latéraux de production. Au cours des vingt années de recherche et de développement soutenues par les politiques publiques, les expérimentations encourageantes réalisées à Soultz ont montré l'importance des conditions géologiques profondes. Conjointement au projet Soultz, de nouvelles innovations technologiques réalisées sur le cycle de conversion de l'énergie ont permis d'exploiter des réservoirs géothermiques qualifiés de moyenne énergie (100 à 130 °C) pour produire de l'électricité comme en Autriche, en Allemagne et en Islande. La recherche de réservoirs analogues en France ouvre de nouvelles perspectives de développement pour la production d'électricité et de chaleur. Enfin, l'Europe s'est fixée pour objectif d'accroître la production d'électricité et de chaleur d'origine géothermale d'un facteur 2 à 3 d'ici 2010. Dans cette perspective, le BRGM vient de lancer une action de coordination, ENGINE, avec l'appui

de l'Union européenne et de 30 partenaires. Ce projet vise à fédérer les acteurs de la géothermie, encore trop peu coordonnés à l'échelle nationale et européenne, en se focalisant sur le développement de nouveaux réservoirs non conventionnels. Ainsi, pour optimiser l'exploitation de l'énergie des roches profondes, plusieurs défis doivent être relevés :

- ◆ un défi technologique qui consiste à extraire des réservoirs non conventionnels encore plus de calories par la mise en œuvre de nouvelles technologies, qui restent à inventer et à expérimenter; et
- ◆ un défi économique qui consiste à minimiser les coûts de reconnaissance, d'exploration et d'exploitation de ces réservoirs profonds ou nouvelles cibles géothermiques.

■ PRÉSENTATION DU SITE PILOTE DE SOULTZ

La géothermie haute enthalpie conventionnelle s'attache à exploiter des réservoirs hautes températures et fortement perméables de manière à produire de la vapeur pour faire fonctionner un turboalternateur. Le projet Soultz est un projet de recherche à long terme qui vise à mettre en place une nouvelle forme de géothermie dont le principe ou concept EGS (Enhanced Geothermal Systems) consiste à extraire de la chaleur contenue dans des roches cristallines très peu perméables. Le projet est né il y a 20 ans d'un accord de coopération franco-allemand, suite à des travaux préliminaires menés par le BRGM avec le soutien de l'ADEME pour la France et par le Geologisches Landesamt du Baden-Wurtemberg pour l'Allemagne. Les principales étapes de la construction de la partie souterraine du pilote de Soultz sont résumées dans le tableau I. Le concept actuel de la géothermie profonde tel qu'il est mis en œuvre à Soultz consiste donc à injecter dans un puits central des volumes d'eau suffisants qui circulent et se réchauffent au travers du réseau de fractures naturelles puis ressortent par deux forages périphériques de production (photo 2). Cette circulation forcée de fluides dans ce triplet de forages s'opère via un échangeur naturel de chaleur de grande dimension dont la perméabilité est liée au réseau de fractures préexistant. La température de 200 °C qui règne à 5 km de profondeur produira alors un fluide capable d'actionner une turbine et la production d'électricité. Cette géothermie dans les roches cristallines chaudes et fracturées a été successivement qualifiée par les Anglo-Saxons de HDR (Hot Dry Rocks), HFR (Hot Fractured Rocks) et maintenant de EGS (Enhanced Geothermal Systems). Compte tenu de l'évolution scientifique du concept d'exploitation de la chaleur des roches fracturées, le terme "Dry" de HDR n'est plus utilisé, notamment en raison de la présence systématique de fluides naturels à grandes



Photo 4
Les têtes de puits des trois forages de Soutz
The wellheads of the three Soutz boreholes

profondeurs. Au niveau thermique, des calculs théoriques ont montré que le refroidissement de 20 °C, d'un bloc de granite d'un kilomètre de côté, par une circulation d'eau provoquerait l'extraction d'une quantité de chaleur équivalente à la combustion de 1275 millions de tonnes de pétrole. Cette énergie pourrait alimenter des réseaux de chauffage urbain, ou bien produire environ 13 MW électriques pendant 20 ans.

La recherche d'un massif rocheux chaud a donc conduit l'équipe franco-allemande à sélectionner, en 1987, un site dans le fossé du Rhin supérieur qui correspond géologiquement à une zone de fossé d'effondrement ou graben. Sur cette zone se superpose une intense anomalie géothermique dont le paroxysme est centré sur la région de Soutz-sous-Forêts, située à 50 km au nord-ouest de Strasbourg. Par ailleurs, cette zone était déjà bien connue pour son pétrole, ses eaux thermales et surtout pour sa géologie. En effet, l'exploration pétrolière, aujourd'hui abandonnée, du champ de Pechelbronn avait permis d'accumuler une grande quantité d'information (forages, sismique, géologie) très utile pour les reconnaissances géothermiques. Les études géologiques menées par le BRGM à partir des résultats des forages profonds ont montré qu'un massif de granite datant de 330 millions d'années était recouvert par plus de 1400 m de sédiments (photo 3). Dans ce graben, toute la région est affectée par un système de failles bien développé qui découpe le substratum du fossé rhénan en une série de blocs. Dans ce dispositif, les forages de Soutz ont été implantés sur un bloc en position haute ou horst de Soutz.

La construction de la partie souterraine du pilote de Soutz est achevée avec la réalisation de trois forages à 5 km (photo 4). Les trois puits sont issus de la même plate-forme et la distance des têtes

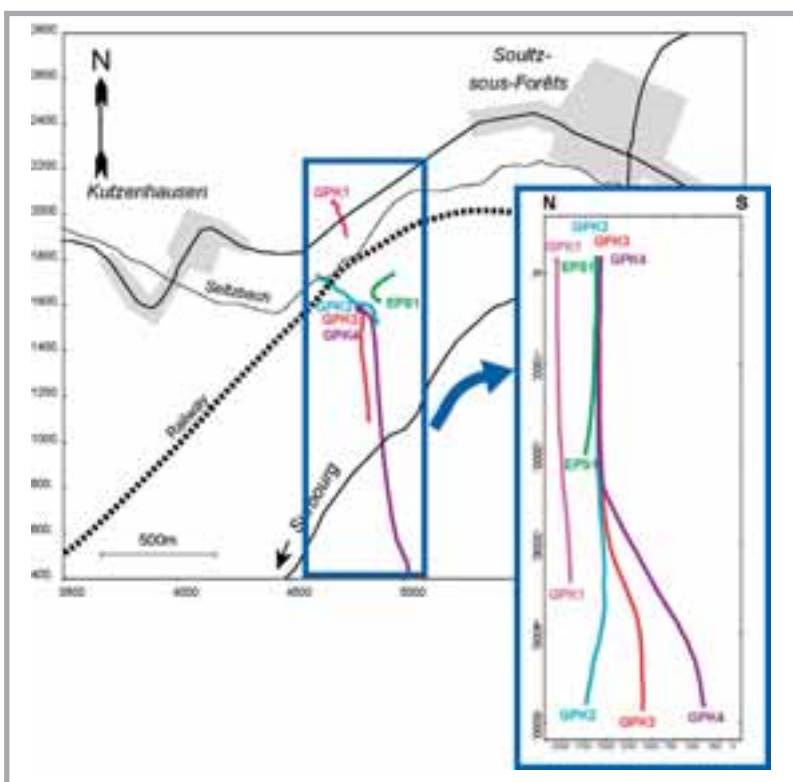


Figure 1
Coupe schématique montrant le dispositif de forages réalisé à Soutz. En surface, leur espacement est de 6 m tandis qu'à 5 km de profondeur, il est de 700 m
Schematic cross section showing the borehole system implemented at Soutz. On the surface, they are spaced 6 metres apart, while at a depth of 5 km their spacing is 700 m



Photo 5
Exemple de granite altéré et fracturé.
Forage GPK1 1380 m
Example of altered, fractured granite.
GPK1 borehole, 1380 m

de puits en surface est de 6 m. Ensuite, les puits sont globalement verticaux jusqu'à 2700 m, s'inclinent puis se reverticalisent afin d'obtenir une distance horizontale interpuits de 700 m environ à 5 km de profondeur (figure 1). Dans la partie profonde non tubée, c'est-à-dire entre 4,5 et 5 km de profondeur, le diamètre des forages est de 8,5 pouces. Les nombreuses failles recoupées par les forages se caractérisent par la présence de fortes concentrations de fractures et la transformation minéralogique du granite. Les études pétrographiques et minéralogiques ont montré que le granite était intensément altéré par les effets de circulations hydrothermales anciennes et actuelles. Cette hydrothermalisation du granite se traduit par de fortes valeurs de porosité du granite (dissolution des minéraux primaires) et des précipitations minérales (argile hydrothermale, calcite, quartz secondaire). Au cours de l'histoire géologique, le couple fracturation-altération hydrothermale a permis le développement dans le massif granitique de Soutz de véritables zones fracturées perméables et poreuses (photo 5). Ces zones fracturées sont par ailleurs le siège de circulations hydrothermales actuelles



Photo 6
Vue du site de géothermie de Soutz pendant un test de circulation

View of the Soutz geothermal power site during a circulation test

comme en témoignent les études géochimiques réalisées sur les fluides par le BRGM. En effet, des circulations d'eaux chaudes naturelles sursaturées en sel (saumures) ont été mises en évidence dans tous les forages profonds. Ces saumures (100 g/l) en circulant dans les failles du granite participent à de larges mouvements de convection à l'échelle du graben et sont à l'origine de l'anomalie thermique, essentiellement visible dans les sédiments qui jouent le rôle de couverture isolante sous laquelle s'accumule la chaleur. La perméabilité naturelle de ces failles, qui favorise la remontée d'eaux chaudes, montre des débits faibles mais non négligeables. Ce sont ces zones fracturées faiblement perméables qui font l'objet des expérimentations in situ et en particulier des stimulations hydrauliques conduites dans la partie découverte des forages.

L'implantation des forages profonds à 5000 m n'a pas été faite au hasard mais tient compte de l'orientation du champ de contraintes par rapport aux directions de fracturation. En effet, la géométrie du réseau de fractures et celle du champ de contraintes mécaniques en place montrent une orientation schématiquement N-S. Ce parallélisme entre l'orientation des fractures dominantes et des contraintes dans le granite de Soutz est également un résultat favorable au développement de la géothermie EGS. Les injections sous pression créent une augmentation irréversible de la perméabilité dans l'environnement proche autour des forages. Cette augmentation se caractériserait par des ruptures ou microglissements s'opérant sur les fractures naturelles. Lors des stimulations hydrauliques, la microsismicité induite par ces injections se marque par un nuage de micro-événements sismiques alignés selon une orientation compatible avec le champ

de contrainte en place. Ce mécanisme d'irréversibilité serait d'autant plus facilité que la fracturation dominante et la contrainte principale horizontale sont colinéaires. Lorsque les injections s'arrêtent et les efforts hydromécaniques se relâchent, les fractures naturelles ne se remettent pas exactement dans leur position initiale laissant ainsi des anfractuosités capables d'absorber davantage de fluide avec une pression moindre lors des circulations successives. Ces effets complexes thermo-hydro-mécaniques ont également fait l'objet de travaux de modélisation couplée par le BRGM dans le but d'essayer de reproduire, puis si possible, de prévoir l'évolution des courbes pression-débits réalisées pendant les essais hydrauliques.

Les tests de circulations réalisés à Soutz en 1997 ont montré des résultats encourageants et 10 MW thermiques ont été produits. Pendant 3 mois, une boucle de circulation a été créée entre deux puits distants horizontalement de 500 m à environ 4 km de profondeur (tableau I). Ce record mondial du plus grand échangeur EGS a permis au projet de se poursuivre avec la réalisation du triplet de forage à 5 km. La maîtrise de la séquence stimulation puis circulation interpuits sur des zones fracturées naturellement perméables est donc un des objectifs majeurs du projet Soutz. Les différents types de stimulation à mettre en œuvre doivent conduire à des effets bénéfiques sur la perméabilité : stimulation hydraulique par mécanisme d'irréversibilité, stimulation chimique (injection d'acide) par dissolutions minérales préférentielles (calcite), stimulation thermique par contraction thermique locale du granite susceptible de générer une microfissuration. L'originalité du projet pilote de géothermie de Soutz réside donc dans la compréhension des mécanismes qui assure le développement de l'échangeur de chaleur créé par la stimulation.

L'objectif des travaux en cours est de démontrer que l'on peut réaliser une boucle expérimentale entre le triplet de puits profonds à 5 km. Des tests de circulation (15 l/s) et de traçages ont eu lieu au second semestre 2005 (photo 6). Plus de 200000 m³ de saumure géothermale ont été produits par les forages GPK2 et GPK4, après avoir été injectés via le forage GPK3. Les tests de traçages associés ont confirmé les résultats obtenus en 1997. En effet, moins de 30 % seulement du traceur (fluorescéine) a été récupéré après 5 mois de circulation ce qui suppose des apports de fluides géothermaux du granite environnant puisque les volumes de fluides produits et injectés sont restés les mêmes.

Le projet Soutz est jusqu'en 2007 dans la phase d'évaluation du pilote scientifique avec un objectif de 1,5 MW électrique puis de 6 MW électriques. La phase de prototype industriel est envisagée jusqu'en 2010 (25 MW électriques) pour ensuite évoluer vers une phase de développement industrielle et de distribution à partir de 2015.

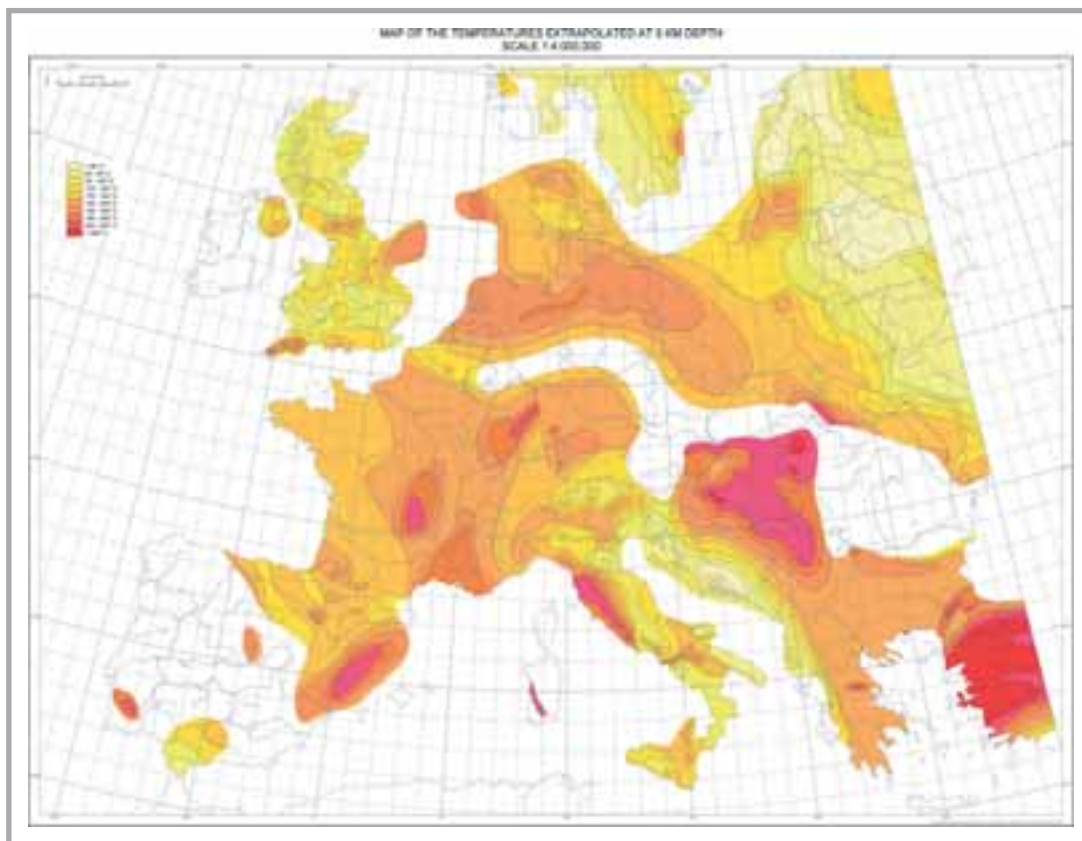


Figure 2
Carte des températures
extrapolées à 5 km
de profondeur
Map of temperatures
extrapolated to a depth of 5 km

■ GÉNÉRALISATION DU CONCEPT EGS EN FRANCE ET EN EUROPE

Les résultats encourageants observés à Soultz nous ont conduits à rechercher d'autres zones potentielles en France et dans le reste de l'Europe. A partir de l'analyse de la carte des températures extrapolées à 5 km de profondeur, les zones les plus chaudes de la plate-forme ouest européenne sont mises en évidence (figure 2). Les anomalies thermiques de premier ordre correspondent au Bassin pannonien au centre de l'Europe, le fossé rhénan (Soultz), au Massif central français, à la zone marine face à la Catalogne en Espagne, à la Toscane en Italie et à la Turquie. En France, les zones EGS potentielles couvrent une surface de 30 000 km² et correspondent géologiquement à des grabens, c'est-à-dire des structures géologiques analogues à celles de Soultz.

Par ailleurs, l'avancée conjointe des progrès technologiques pour la production d'électricité issue de fluides géothermaux et des techniques de stimulations hydrauliques en contexte EGS devrait abaisser les conditions de température nécessaires pour produire de l'électricité. A l'échelle de la France, les ressources géothermales qualifiées autrefois de moyenne température pourraient devenir opérationnelles pour la production électrique avec des centrales géothermiques à fluide binaire. C'est le cas par exemple, pour la centrale de Altheim en Autriche qui produit 500 kWe à partir d'aquifères calcaires du Jurassique exploités à 106 °C à la profondeur de 2 300 m. C'est également le cas pour

tous les projets de forage en cours de développement dans la partie nord allemande du Fossé rhénan supérieur et qui ont pour cible le Trias fracturé. De ce fait, de nouvelles zones géologiques localisées non seulement dans les fossés tertiaires mais également sous les bassins stables offrent des perspectives de développement et donc un potentiel géothermique intéressant qui reste à estimer et à explorer.

■ LES RÉSERVOIRS GÉOTHERMIQUES NON CONVENTIONNELS

Pour pouvoir produire de l'énergie sous forme d'électricité et de chaleur (cogénération) à partir des réservoirs géothermiques, il faut être capable de maîtriser des réservoirs qualifiés de non conventionnels c'est-à-dire peu perméables (type Soultz) ou encore plus difficiles à forer car présentant des conditions thermodynamiques extrêmes, comme les réservoirs supercritiques d'Islande ou encore les réservoirs sédimentaires profonds d'Allemagne du Nord où l'on souhaite développer la perméabilité matricielle de grès par stimulation. En plus des sites EGS actifs en Europe comme celui de Soultz, le projet suisse de Bâle localisé également dans le fossé rhénan mais dans sa partie sud, vient juste de démarrer et son premier puits est en cours de percement. Ce projet vise, d'ici 2009, à mettre en place un triplet à 5 km pour produire de l'électricité et de la chaleur pour 5 000 loge-





Photo 7
Vue du forage de Gross Schonebeck (Berlin)
View of the Gross Schonebeck borehole (Berlin)

ments (3 MW électriques, 20 MW thermiques) et à réduire les émissions de CO₂ de 40 000 t par an (www.geothermal.ch). L'investissement pour ce prototype se chiffre autour de 100 millions de francs suisse et le coût de l'électricité est estimé entre 15 et 20 centimes le kWh (www.dhm.ch). Parallèlement à ces projets EGS en milieu cristallin et fracturé, les projets islandais sur les réservoirs supercritiques et allemand de Gross Schonebeck sur les réservoirs sédimentaires (www.gfz-potsdam.de) sont également au stade de la réalisation des forages (photo 7). Le nouveau forage de Gross Schonebeck en cours de foration près de Berlin, d'un coût de 10 M€ environ, est programmé pour aller à 4 300 m de profondeur. Il constitue le second forage incliné d'un doublet géothermique EGS. Cette activité d'exploration des milieux profonds est encouragée par les innovations technologiques en matière de forage, par les recherches en cours sur l'exploration géophysique profonde (projet européen I-GET) mais également par les progrès en cours sur l'efficacité énergétique des machines thermodynamiques (projet européen LOW BIN). Enfin, dans le but de fédérer les connaissances et les savoir faire européens en matière de géothermie EGS, l'Union européenne vient de lancer une action de coordination ENGINE qui vise la création d'un véritable réseau européen des systèmes géothermiques assistés. Ces différents projets devraient conduire à la réévaluation du potentiel géothermique des différents pays européens avec des prolongements en France dans les DOM et en Italie. En effet, les zones périphériques des champs hydrothermaux classiques (Bouillante en Guade-

loupe, Larderello en Italie) sont généralement très chaudes (températures > 250 °C) mais peu perméables. Tous les progrès techniques qui consisteront à maîtriser l'augmentation de perméabilité seront autant d'atouts pour élargir les zones d'intérêt et le potentiel de ces réservoirs en exploitant le stock thermique de ces régions volcaniques.

■ LE PROJET EUROPÉEN ENGINE

Le projet ENGINE ou ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe est une action de coordination du 6^e Programme-cadre Recherche et Développement de l'Union Européenne dédiée à l'énergie géothermique. Le principal objectif de cette action est la coordination des recherches en cours sur les Systèmes Géothermiques Améliorés ou ENhanced Geothermal Systems (EGS), depuis l'exploration de la ressource géothermale jusqu'à la mise en exploitation des systèmes de production de chaleur et d'électricité. L'action de coordination doit faire un bilan sur les activités EGS en cours et prévues en Europe, en se focalisant sur l'intégration des connaissances et des savoir-faire et la définition de concepts innovants pour la recherche et l'utilisation de la ressource EGS. Le projet ENGINE rassemble 31 partenaires européens représentant 16 pays d'Europe. Outre la France, les pays associés à cette démarche sont l'Allemagne, le Danemark, l'Espagne, la Grèce, la Hollande, la Hongrie, l'Italie, l'Islande, la Lituanie, la Norvège, la Pologne, la Roumanie, la Russie, la Suisse, et la Turquie. Les participants à cette action de coordination sont des scientifiques (étudiants, chercheurs, enseignants d'université), des ingénieurs et techniciens spécialistes de la thématique énergie, des responsables d'entreprise et des décideurs publics ou privés.

Les informations concernant les activités et les résultats du projet ENGINE sont accessibles sur le site internet du projet (<http://engine.brgm.fr>).

Afin d'atteindre ces objectifs, l'action de coordination ENGINE qui s'étale sur 30 mois, prévoit notamment l'organisation de trois colloques et de sept workshops spécialisés dans différentes villes d'Europe (Orléans, Pise, Potsdam, Strasbourg, Utrecht, Zurich...). En tant que coordinateur de cette action, le BRGM a déjà organisé à Orléans la conférence de lancement du 12 au 15 février 2006, qui a réuni plus de 100 participants. Entre juin et novembre 2006, trois workshops thématiques sont programmés :

- ◆ un workshop sur la stimulation des réservoirs et

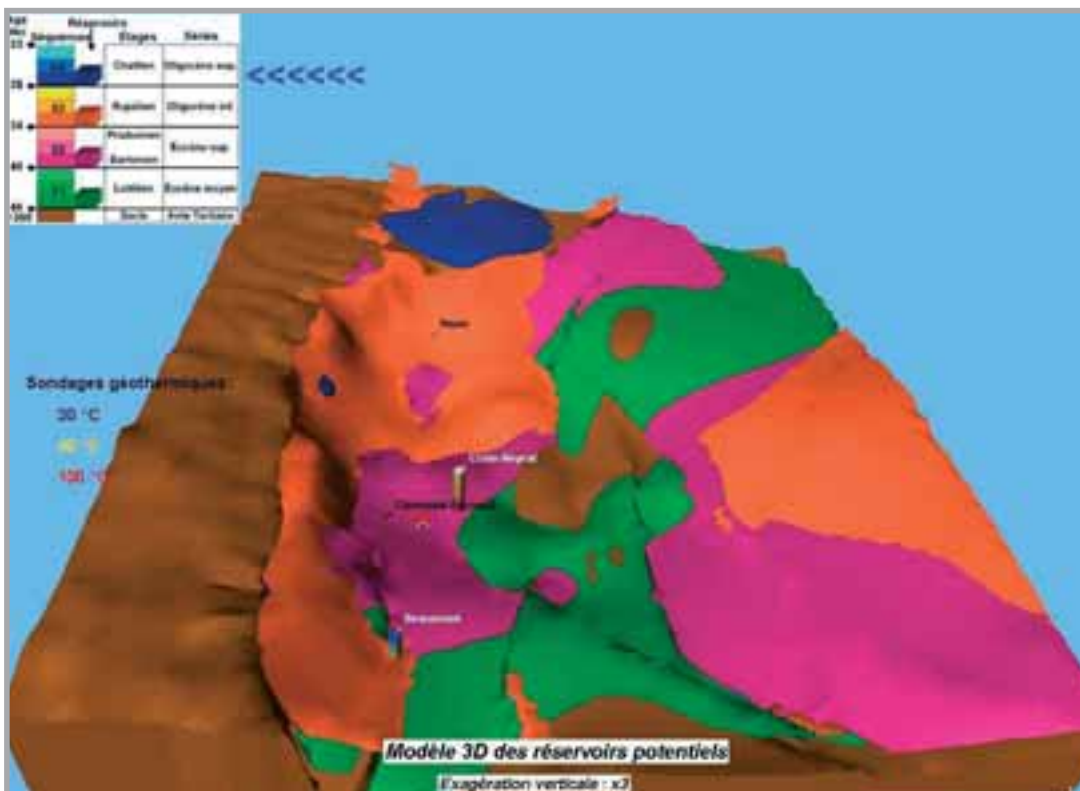


Figure 3
Représentation du modèle 3D des réservoirs géothermiques de Limagne (nord Massif central)
Representation of the 3D model of the Limagne geothermal reservoirs (northern Massif Central hills)

la microsismicité induite se tiendra à Zurich en Suisse entre le 29 juin et le 1^{er} juillet;

◆ un workshop sur les cycles de conversion de l'énergie focalisé sur la génération d'électricité à partir des systèmes EGS se déroulera à Strasbourg entre le 14 et le 16 septembre;

◆ un workshop sur la définition, l'exploration et le développement des réservoirs EGS aura lieu à Potsdam en Allemagne entre les 5 et 7 novembre. Les principaux thèmes de recherche sur les réservoirs non conventionnels portent sur les méthodes d'exploration géophysique des ressources profondes, sur les outils de modélisation de réservoirs, sur la stimulation des réservoirs, sur l'amélioration des cycles thermodynamiques, sur l'instrumentation haute température, sur les techniques de forage et de développement de réservoirs, sur les aspects socio-économiques, sur l'analyse de risques associés à la géothermie... Au niveau de la modélisation des réservoirs EGS, les progrès des outils de représentation 3D et de simulation des propriétés pétrophysiques des réservoirs sont également des enjeux importants pour l'exploration des ressources profondes (figure 3).

ABSTRACT

Electricity generation from deep rocks : the Saultz scientific pilote project

A. Genter, A. Gérard, L. Le Bel, P. Ledru

Based on a significant experience in geothermal energy, BRGM initiated with German partners, the launching of the largest European EGS project (Enhanced Geothermal Systems), namely the geothermal Saultz project located in northern Alsace, aiming to extract heat from hot, low permeable deep-crystalline rocks in order to built electricity. This kind of project needs a good geological characterisation of the deep geothermal heat exchanger based on high quality datasets collected in new deep boreholes. Based on the good results derived from hydraulic tests carried out at Saultz, new projects are currently starting in Europe such as in Germany and Switzerland. Moreover, through a European Coordination Action called ENGINE (ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe), a new collaborative project has been launched recently aiming to promote researches dedicated to unconventional geothermal resources.

RESUMEN ESPAÑOL

Electricidad y geotermia : la planta piloto de Saultz y sus prolongaciones europeas

A. Genter, A. Gérard, L. Le Bel y P. Ledru

El BRGM, con la pujanza de sus 30 años de experiencia en geotermia, es al origen con sus socios alemanes de un proyecto piloto de geotermia EGS (Enhanced Geothermal Systems) o también denominado proyecto Saultz, ubicado en Alsacia del Norte, que consiste en recuperar la energía de las rocas profundas por medio de un fluido vector de calor para producir electricidad en la superficie. Este tipo de proyecto precisa disponer de un perfecto conocimiento del subsuelo a partir de informaciones compiladas en diversas perforaciones profundas. Los resultados alentadores del proyecto Saultz vinieron a reproducirse a escala europea con la realización de nuevas perforaciones de reconocimiento en Alemania y en Suiza. Además, bajo el impulso de Europa, los protagonistas

del sector geotermia EGS se organizan vía una acción de coordinación que lleva por título ENGINE con el objetivo de dinamizar las investigaciones acerca del desarrollo de depósitos geotérmicos no convencionales.

La géothermie : le chauffage

Un exemple d'installation

France Géothermie mise sur l'énergie du futur. Ecologique, économique et performant, le chauffage par géothermie est une énergie à haut potentiel.

Figure 1
Système de captage sur nappe phréatique

Groundwater collection system

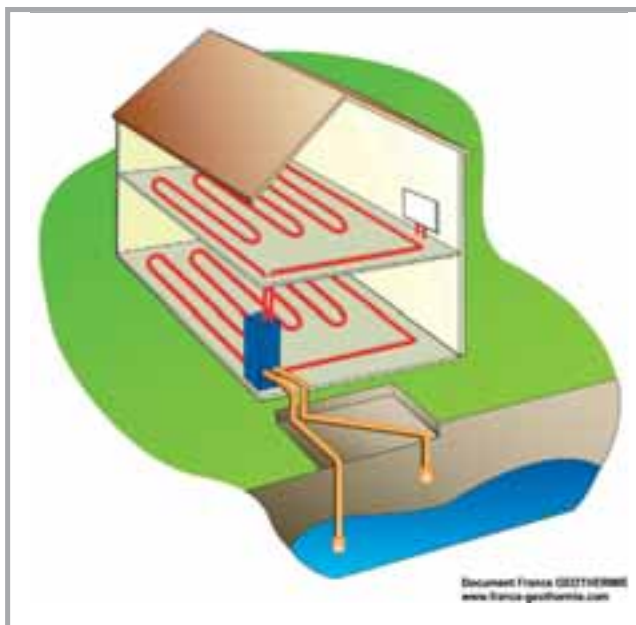
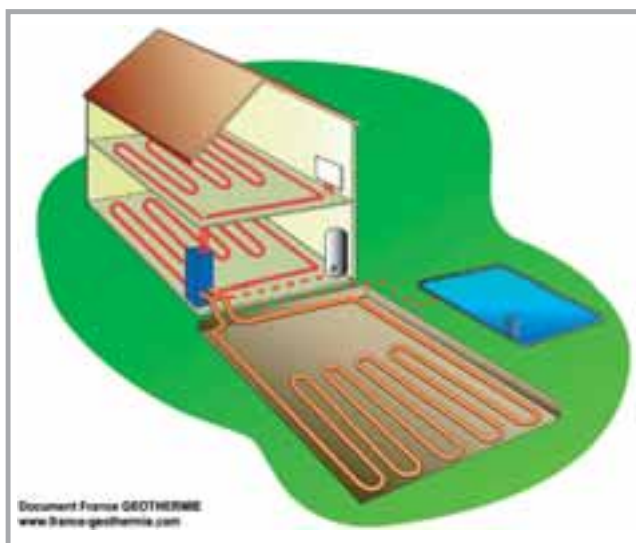


Figure 2
Système de capteurs enterrés horizontalement

Horizontal underground collector system



Installation géothermique en cours
Geothermal heating installation work in progress



France Géothermie s'est imposée dans une nouvelle installation de chauffage géothermique d'une maison individuelle de 230 m² à Tournefeuille, près de Toulouse, en recourant à des capteurs sur nappe phréatique (figure 1).

Cette maison était équipée d'une chaudière au fioul vieille de 25 ans avec radiateurs en fonte. Un puits était disponible à 25 m du bâtiment. Les dépenses de chauffage se montaient à 3 000 € par an en 2004.

Le client a contacté le concessionnaire France Géothermie 31 (Loïc Arnaud à l'Union). Celui-ci, après étude, a montré l'intérêt d'utiliser le puits existant pour capter dans la nappe phréatique une eau allant de 13 °C à 17 °C. Une pompe Salmson a été immergée dans le puits à 8 m de profondeur. Cette pompe, d'une puissance de 1 800 W, débitait 4 m³/h et fournissait une eau à température de 65 °C. Les radiateurs en fonte ont été conservés. Un délai d'une semaine seulement s'est écoulé entre l'étude préalable et la mise en route de la nouvelle installation.

Ce nouveau chauffage géothermique revient à 690€ par an, soit une économie de plus de 75 % par rapport au fioul (chiffres calculés sur la base du prix de l'énergie à l'hiver 2004 ; aujourd'hui, l'économie serait supérieure à 80 %!).

Le client a investi 18 000 € pour sa nouvelle installation et a bénéficié d'une déduction fiscale de 50 % sur l'équipement de pompage et la PAC (pompe à chaleur).

Ce système de chauffage géothermique sur nappe phréatique représente aujourd'hui 10 % à 15 % des chantiers, contre 80 % pour les capteurs enterrés. Il offre pour les particuliers l'un des meilleurs coefficients de performance (figures 2 et 3).

A noter qu'il n'est pas nécessaire de demander une autorisation pour capter dans la nappe phréatique en dessous d'un débit de 8 m³/h (moyenne pour la géothermie : 4 m³/h) et qu'il faut utiliser un puits pluvial pour les rejets.

■ QU'EST-CE QUE LA GÉOTHERMIE ?

Chauffé par le soleil, l'air et la pluie, le sol autour d'une maison constitue un réservoir qui reçoit en permanence de l'énergie sous forme de calories. Le principe de la géothermie est de capter cette énergie inépuisable par le biais d'une pompe à chaleur (PAC) pour chauffer une habitation, une piscine, ou produire de l'eau chaude sanitaire.

à haut potentiel

Le mode de fonctionnement de la géothermie est simple. Il s'apparente à celui d'un réfrigérateur :

- ◆ des capteurs traversés par un fluide frigorigène ou de l'eau glycolée, enterrés à l'extérieur de la maison, récupèrent les calories (c'est l'équivalent de l'évaporateur à l'intérieur du réfrigérateur);
- ◆ la PAC élève les calories en température (c'est l'équivalent du compresseur du réfrigérateur);
- ◆ un plancher chauffant, des radiateurs ou des convecteurs restituent la chaleur à l'intérieur de la maison (c'est l'équivalent de la grille arrière du condenseur du réfrigérateur) (figure 4).

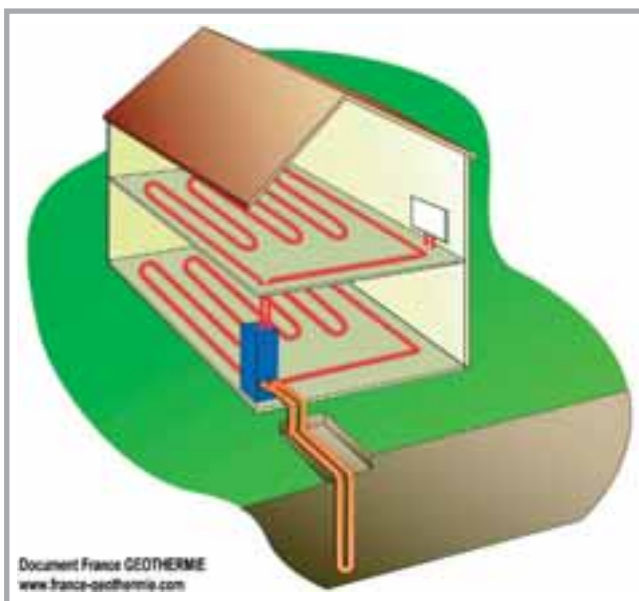


Figure 3
Système de capteurs enterrés verticalement
Vertical underground collector system

■ DES COEFFICIENTS DE PERFORMANCE EXCELLENTS

L'atout majeur de la géothermie est son excellent COP (coefficient de performance) qui peut procurer jusqu'à 75 % d'économie sur la facture d'électricité par rapport aux autres énergies.

En effet, dans le cas d'un chauffage à l'électricité, au gaz propane ou au fioul, le COP est de l'ordre de 1 : pour 1 kWh d'électricité consommé, 1 kWh est restitué. Dans le cas d'un chauffage par géothermie, le COP peut atteindre 4 : pour 1 kWh d'électricité consommé, 4 kWh sont restitués !

A titre d'exemple, pour une habitation de 130 m² en zone climatique moyenne, la consommation annuelle d'un chauffage au gaz propane est de l'ordre de 1410€, celle de la géothermie de 308€, soit près de 5 fois moins ! Le coût de l'installation d'un chauffage par géothermie est rapidement amorti dans un délai de 4 ans par cette faible consommation.

Le chauffage par géothermie vise non seulement le marché de la maison particulière en construction, mais aussi celui de la rénovation et du remplacement de chaudières électriques, gaz ou fioul (90 % des chantiers). Dans ce dernier cas, le système s'adapte à la plupart des émetteurs hydrauliques (plancher chauffant, radiateur, ventilo-convecteur).

La géothermie est de plus en plus rentable en raison :

- ◆ du coût croissant des énergies traditionnelles;
- ◆ des incitations fiscales : crédit d'impôt de 50 % des dépenses et TVA à 5,5 % en rénovation;
- ◆ des subventions de l'ANAH (Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat) : jusqu'à 20 % du montant des travaux + primes jusqu'à 1800€.

Le chauffage par géothermie, en économisant l'énergie dans l'habitat, contribue aussi à la réduction des gaz à effet de serre.

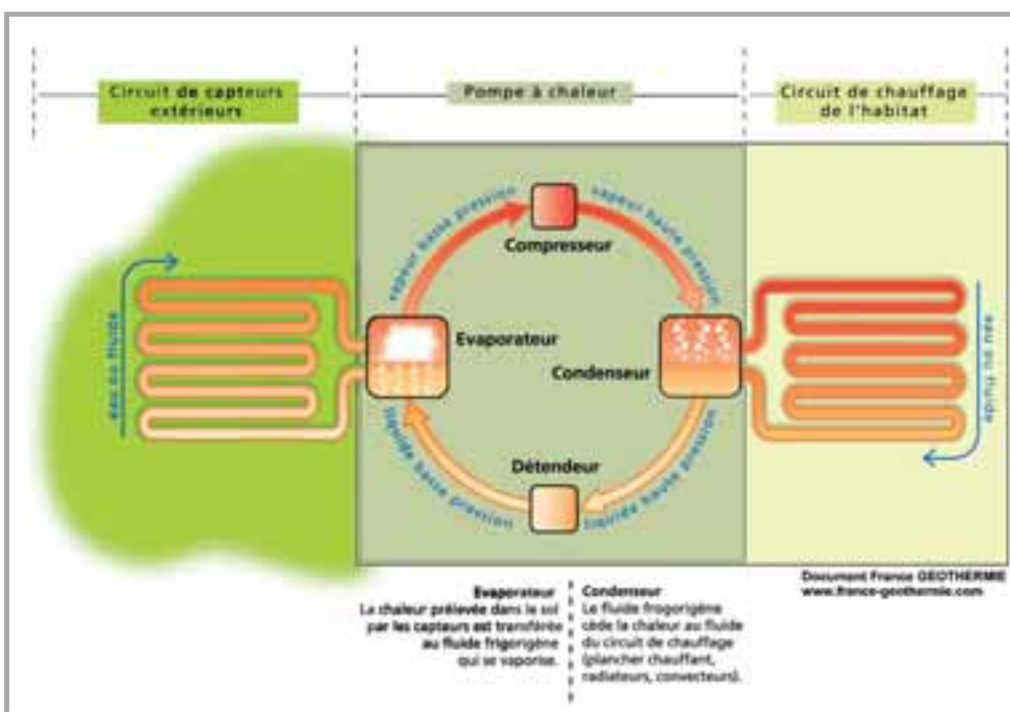


Figure 4
Schéma de principe de la géothermie
Schematic diagram of geothermal power facility

DES AVANTAGES ENCOURAGEANTS

Incitations fiscales

Un crédit d'impôts de 50 % pour l'installation d'un chauffage géothermique dans l'habitation principale est accordé jusqu'au 31 décembre 2009. Le montant des dépenses ne peut excéder 8000€ pour une personne seule et de 16000€ pour un couple marié.

Primes et subventions

L'ANAH (Agence Nationale d'Amélioration de l'Habitat) accorde des subventions jusqu'à 20 % et des primes jusqu'à 1800€.

Aides EDF

EDF accorde de nombreux accompagnements financiers, des primes et des prêts à taux réduits.

FRANCE GÉOTHERMIE

France Géothermie est depuis 1995 le leader français en matière d'étude, de conception, de fabrication et de commercialisation de systèmes de chauffage géothermique avec la plus large gamme de solutions de chauffage géothermique. L'entreprise se positionne sur le développement, la distribution et l'installation de PAC thermodynamiques haut de gamme, bénéficiant notamment des certifications Eurovent, Promotelec, Vivrelec et Cetiat (Centre technique des industries aérouliques et thermiques). Elle propose un nouveau générateur de Chauffage haute efficacité (C HE) pour la rénovation.

Comme l'explique Jean-Paul Cammarano, p.-d.g. de France Géothermie " nous développons quatre techniques de captage afin d'adapter les besoins en géothermie à toutes les configurations géographiques.

Les capteurs horizontaux, enterrés à une profondeur de 0,60 m à 0,80 m, nécessitent une surface de terrain de 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer. Les capteurs verticaux sont installés dans un ou plusieurs forages de 80 à 120 m de profondeur. Les capteurs sur nappe phréatique offrent le meilleur rendement, avec un COP de 5,21 (avec la solution Isara C HE, régime d'eau 30 - 35 °C). Enfin, les capteurs aériens reposent sur l'installation d'une PAC air/eau avec plancher chauffant en hiver et rafraîchissant en été."

France Géothermie propose à ses clients, en fonction des volumes à chauffer et de leurs besoins, plusieurs gammes de produits à systèmes eau/eau, fluide/eau, fluide/fluide, air/eau et air/air. Des options sont également disponibles : planchers chauffants basse température, radiateurs et ventilo-convecteurs, rafraîchissement, chauffage des piscines et eau chaude sanitaire.

Face au potentiel considérable de la géothermie (voir encadré), France Géothermie, qui compte déjà 50 concessionnaires exclusifs franchisés et 140 partenaires, a pour objectif d'ouvrir 20 nouvelles concessions chaque année dans toute la France.



© France Géothermie

Installation par forage France Géothermie
France Géothermie borehole installation

BOOM SUR LES PAC

Selon l'Association Française des Pompes à Chaleur (AFPC), seuls 5 % des foyers sont équipés d'une PAC, mais 71 % des Français se disent prêts à le faire.

Evolution du nombre de PAC vendues en France :

- 1997 : 1 700 PAC
- 2005 : 25 000 PAC
- 2010 (prévision) : 500 000 PAC

Evolution 2005-2006 :

- Marché français : + 25 à 30 %
- France Géothermie : + 62 %

Plancher eau
Water floor



© France Géothermie

ABSTRACT

Geothermal power : high-potential heating. Example of a system

L. Français

Environmentally friendly, economical and efficient, geothermal heating captures energy from the ground via a heat pump. France Géothermie, the French leader in this area, has designed and executed an exemplary heating renovation project for a detached house in the Haute-Garonne region. The technique adopted is ground-water collection, which offers an excellent performance coefficient and represents 15 % of projects. This new heating system allows owners to achieve 80 % savings by comparison with their old fuel-oil heating system. The other geothermal heating techniques are underground horizontal collectors, vertical collectors installed in boreholes and above-ground collectors. France Géothermie is a rapidly expanding firm in a market that is growing strongly : 7 French people out of 10 say they are prepared to switch over to geothermal power due to the increasing cost of traditional energy sources.

RESUMEN ESPAÑOL

La geotermia : la calefacción de elevado potencial. Un ejemplo de instalación

L. Français

Ecológico, económico y de elevado rendimiento, la calefacción por geotermia capta la energía del suelo por mediación de una bomba de calor. France Géothermie, líder francés en este sector, ha llevado a cabo el estudio y la realización de una obra ejemplar de renovación de calefacción para una casa individual en el departamento de Haute-Garonne. El principio adoptado ha sido la captación en capa freática, que permite obtener un excelente coeficiente de rendimiento y representa un 15 % de las realizaciones. Este nuevo procedimiento de calefacción permite al dueño un ahorro del 80 % por comparación con la antigua calefacción por fuelóleo. Las demás técnicas de calefacción geotérmica corresponden a los captadores horizontales enterrados, los captadores verticales instalados en las perforaciones así como los captadores aéreos. France Géothermie es una empresa que acusa un desarrollo significativo en un mercado de importante crecimiento : 7 franceses sobre 10 dicen estar preparados para pasar a la geotermia por motivos de coste incremental de las energías tradicionales.

Parc éolien d'Ally

Moins de 12 mois pour faire sortir de terre le plus grand parc éolien de France

Avec 26 aérogénérateurs de 1,5 MW, le plus grand parc éolien français est entré en service en décembre 2005, au terme d'un chantier marathon conduit par Cegelec, qui a associé compétence en génie civil, expertise électrique et maîtrise de la gestion de projet et justifié ainsi sa place de leader dans la réalisation d'infrastructure des parcs éoliens.

Porté par le Conseil municipal depuis 1999, autour de M^{me} Olnol, maire d'Ally, le projet du parc éolien d'Ally-Mercœur a depuis le début suscité l'adhésion des habitants. Sur un site occupé traditionnellement par les moulins à vent, il s'inscrit également dans la modernité, en contribuant à la fois au développement durable et au dynamisme économique de la commune.

■ PREMIÈRE CONTRAINTE : LE FACTEUR TEMPS

En choisissant Cegelec comme maître d'œuvre des infrastructures du projet, General Electric Wind Energy (GEWE), constructeur des éoliennes et co-développeur du parc avec Sofiva, s'était tourné vers une entreprise qui est familière de ses turbines de 1,5 mégawatt : Cegelec en a déjà implanté six à Peyrelevade (Corrèze), et 25 à Haute-Lys, dans le Pas-de-Calais, site codéveloppé par Cegelec et Espace Eolien Développement et auquel Ally a ravi le titre de "plus grand parc éolien de France". Ce sont ces mêmes turbines qui ont été retenues sur le site d'Ally, pour obtenir le meilleur rendement possible et la meilleure rentabilité économique : en effet, les études de vent, menées par le cabinet britannique Garrad Hassan, avaient conduit à inscrire Ally en classe IEC 3 avec des vents d'une grande régularité mais d'une force moyenne. Toutefois, pour bénéficier des meilleures conditions tarifaires consenties par EDF, il fallait mettre le parc en service avant la fin de 2005.

■ LE CHOIX DE CEGELEC : UN ACTEUR COMPLET DE L'ÉOLIEN

La connaissance des aérogénérateurs de GEWE n'a pas été le seul atout de Cegelec sur le site d'Ally. Si ce chantier n'a pas sollicité la compétence de l'entreprise dans la fourniture d'installations



© Cegelec

Vue d'un chemin avant et après son aménagement. Le relief du site a exigé des aménagements particuliers pour permettre aux convois exceptionnels de franchir les zones les plus vallonnées. Plus de 15 km de pistes agricoles ont été élargies et renforcées

View of a path before and after its development. Given the site relief, special development work was required to enable exceptionally large convoys to pass through the most undulating areas. More than 15 km of agricultural tracks were widened and reinforced



© Cegelec

clés en main, il a bénéficié de façon essentielle de sa capacité à associer ingénierie électrique et génie civil, et de son expertise en conduite de projets pour mettre en œuvre la solution opérationnelle et économique la mieux adaptée :

- ◆ définition des matériels électriques – câbles, fibres optiques, transformateurs, cellules de protection, postes de livraison auxquels sont connectées les éoliennes des quatre sous-sections du parc (trois de sept éoliennes et une de cinq);
- ◆ études de génie civil et d'accessibilité – amé-

Benoît Pueyo



DÉPARTEMENT ÉNERGIE
Cegelec

Alain Viard



DIRECTEUR
DU DÉPARTEMENT
ÉOLIEN
Cegelec

Des terrassements importants ont été nécessaires pour établir des plates-formes de levage parfaitement planes sur des zones pentues

Major earthworks were needed to establish perfectly flat lifting platforms in steep areas



© Cegelec

► nagement des pistes pour faire arriver en plein milieu du Massif central des nacelles de 50 t et des pales de 38,5 m de long, aménagement d'une quinzaine de kilomètres de chemins d'accès, construction de 26 plates-formes de 800 m² pour le levage des éoliennes, etc.

■ OFFRIR UNE SOLUTION ÉCONOMIQUEMENT RENTABLE POUR LE PROJET

La nécessité de présenter une offre compétitive dépendait, bien entendu, de la capacité de Cegelec à obtenir des conditions favorables sur le matériel grâce au potentiel de commande qu'il représente chez les équipementiers : Areva, pour les postes de livraison, ou Nexans, pour le câble, ont fait des offres compétitives.

Elle était liée aussi à sa capacité à mobiliser des entreprises familières des conditions climatiques et géologiques locales, et équipées pour les affronter : Cegelec a pu ainsi s'appuyer sur un maillage étroit d'agences locales, en l'occurrence celle du Puy-en-Velay, et sur l'entreprise de terrassement Marquet, retenue sur appel d'offres, qui disposait des équipements adaptés à un terrain de qualité, permettant une bonne assise des éoliennes, mais assez rocheux et nécessitant des outils adaptés. En outre, leur habitude du climat local leur facilitait le travail d'enfouissement des câbles (environ 17 km de tranchées) dans des conditions rigoureuses, sans attendre le printemps. Enfin, la décision d'installer sur le site une centrale à béton, également confiée à une entreprise locale, a permis des gains supplémentaires en termes de temps.

■ FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS : ANTICIPER ET GÉRER LA COACTIVITÉ

Le parc éolien d'Ally-Mercœur était à l'étude depuis 2000 et le permis de construire avait été délivré en octobre 2002 mais, du fait des délais inhérents au développement de ces parcs, les premiers travaux n'ont démarré qu'à l'automne 2004. Et c'est seulement début 2005 que le chantier a vraiment pris son rythme, sur la base d'un précontrat avec le maître d'ouvrage, Boralex Massif Central, alors même que le financement principal était en cours de finalisation.

Il n'y avait en effet pas de temps à perdre pour tenir l'engagement de livrer les premiers kilowattheures avant la fin de l'année. Pour cela, la définition des matériels a été concentrée sur deux mois, en s'appuyant sur les études préalables réalisées en phase de négociation. Quant à la recherche des sous-traitants et aux études d'accessibilité et

© Cegelec

Enfouissement des câbles HTA et du fourreau pour fibre optique par un soc vibrant. Cette technique est adaptée au type de sols rencontré sur le site. La fibre optique a ensuite été introduite dans le fourreau par soufflage

Burying of MV cables and optical fibre sheathing by a vibratory plough. This technique is appropriate for the type of soils encountered on the site. The optical fibre was then inserted into the sheath by blowing



© Cegelec

Vue du ferrailage de l'éolienne avant coulage de la semelle. Les barres sont constituées d'aciers HA 500, de diamètre compris entre 16 et 32 mm. Le ferrailage total du massif représente un poids de 25 t

View of the wind generator reinforcements before pouring the foundation slab. The bars consist of HA 500 high-adhesive-strength steel, of diameter ranging between 16 and 32 mm. The total foundation reinforcements weigh 25 tonnes



© Cegelec

de génie civil, elles avaient été anticipées, dès la fin 2004. Mais ce n'était pas suffisant!

Pour gagner encore en rapidité, Cegelec a su tirer parti de la taille du site (15 km de piste) pour mener plusieurs chantiers simultanément. Son expérience en conduite de projets, que ce soit avec General Electric mais aussi avec d'autres partenaires, a ici joué à plein pour optimiser la gestion de l'espace et du calendrier, en ordonnant les travaux pour gagner du temps sans causer de gêne : terrassement, études de tracé, voirie, enfouissement des câbles, livraison et montage des pâles et des nacelles, etc.



© Cegelec

La fondation d'éolienne est coulée en deux phases : semelle d'environ 190 m³ de béton C30/37 puis le fût de béton C35/45. Le site étant situé à 1 000 m d'altitude dans le Massif central, les bétons ont été prévus pour être exposés au gel, et un produit de protection a été appliqué sur la surface de chaque fût

The wind generator foundation is poured in two stages : foundation slab of about 190 cu. m of C30/37 concrete, then the C35/45 concrete frame. The site being located at an altitude of 1 000 metres in the Massif central hills, the concretes were designed for exposure to frost and a protection product was applied to the surface of each frame

■ LA COURSE CONTRE LE TEMPS DÉBUTE... SOUS LA NEIGE!

En janvier, tandis que les équipes de terrassement préparent les voies d'accès et les plates-formes, l'équipe Réseaux de l'agence Cegelec du Puy-en-Velay commence à installer et à enfouir les câbles sous la neige. Et malgré le début du dégel, qui réduit l'accessibilité du site et retarde l'installation de la centrale à béton, les équipes de Cegelec Toulouse entament les travaux de génie civil proprement dit en mars, à partir de centrales fixes hors site, en empruntant des itinéraires secondaires au prix de dommages à la voirie qui ont été réparés depuis.

Une fois les excavations creusées, sur chaque plate-forme, un socle de béton octogone de 14 m de diamètre est coulé à deux mètres de profondeur, surmonté d'un cylindre de 5 m de diamètre, dans lequel est intégrée une virole métallique de 4 m de diamètre. Les 230 m³ de béton de chaque fondation sont destinés à supporter les 209 t de l'éolienne.

Jusqu'en avril, Cegelec gère ainsi trois corps de métiers en simultané – le terrassement, l'enfouissement et le génie civil –, sur le plus grand parc éolien de France : une expérience précieuse capitalisée pour l'avenir.

■ À 85 MÈTRES DANS LE CIEL D'ALLY

Fin mai, une nouvelle phase s'enclenche avec l'arrivée des premiers éléments d'éoliennes : les pâles de 38,5 m et 6,5 t et les grues qui les monteront à 85 m, fixées à des nacelles de 50 t. Le montage est réalisé par General Electric, mais Cegelec continue à gérer le chantier et planifie les livraisons de matériel électrique pour en assurer la fluidité. Par la suite, Cegelec interviendra sur le raccordement haute tension du réseau enterré, connecté aux postes de livraison eux-mêmes reliés au réseau EDF 20 kV : les premières mises sous tension sont effectuées en août et septembre et la mise en pro-



© Cegelec

Coactivité sur le site : à l'arrière plan l'équipe d'enfouissement réseau achève ses travaux entre E1 et E2 alors que les premières pâles sont livrées à proximité des plates-formes et fondations déjà achevées

Concurrent work on site : In the background, the network burying team completes its work between E1 and E2 while the first turbine blades are delivered near the already completed platforms and foundations



© Cegelec

La structure PPM de l'éolienne GE comporte à son premier étage le transformateur 1 600 kVA, le disjoncteur BT 690V et la cellule de protection fusible HTA 20 000 V. Au deuxième étage se situent les armoires de contrôle GE

The PPM structure of the GE wind generator comprises, in its first stage, the 1 600 kVA transformer, the LV 690-V circuit-breaker and the 20,000-V MV fuse protection unit. The GE control cabinets are located on the second stage



La grue télescopique 500 t, aidée par un système "superlift" met en place le mât intermédiaire. L'éolienne est en tout composée de quatre tronçons de mât

The 500-tonne telescopic crane, aided by a "superlift" system, sets up the intermediate mast. The wind generator consists of four mast sections in all

© Cegelec

© Cegelec

duction se fera progressivement, jusqu'à l'inauguration, le 27 octobre. Le transfert de propriété à Boralex Massif Central a eu lieu fin décembre, à l'issue du nombre d'heures de fonctionnement prévu contractuellement pour valider, optimiser et régler la centrale.

UN CHANTIER QUI NE LAISSE QUE DES BONS SOUVENIRS

Au final, le pari du délai a été tenu et la qualité est au rendez-vous. Le bilan du chantier d'Ally-Mercœur est d'autant plus positif que, dans un monde où les projets éoliens se font parfois "attaquer", il a toujours été porté localement. Aujourd'hui, les administrés de M^{me} Olagnol sont fiers de leur parc. Une association a été créée pour la mise en valeur du patrimoine éolien, la restauration de moulins à vent et la visite du parc. En outre le chantier a créé trois emplois directs et 70 emplois indirects. Il ne restait plus qu'à effacer toute trace du chantier en remettant chemins et clôtures en état, ce qui a été fait entre septembre 2005 et mars 2006.



Vue de l'éolienne E1 avant démantèlement de la plate-forme de levage

View of wind generator E1 before dismantling the lifting platform

© Cegelec

ABSTRACT

Ally wind-power farm. Less than 12 months to set up the largest wind-power farm in France

B. Pueyo, A. Viard

With 26 wind-power generators of capacity 1.5 MW, the largest French wind-power farm came into operation in December 2005, on completion of a marathon project carried out by Cegelec, involving a combination of civil engineering competencies, electrical engineering expertise and project management skills, thus illustrating its position as the leader in execution of wind-power farm infrastructure.

RESUMEN ESPAÑOL

Parque eólico de Ally. Menos de 12 meses para que surja de tierra el más importante parque eólico de Francia

B. Pueyo y A. Viard

Con 26 aerogeneradores de 1,5 MW, el más importante parque eólico francés ha entrado en servicio en diciembre de 2005, al término de unas obras maratón encabezadas por Cegelec, que ha combinado competencia en ingeniería civil, pericia eléctrica y dominio de la gestión de proyecto, y ha justificado así su puesto de líder en la ejecución de infraestructura de parques eólicos.

Sogea Ouest joue la carte de l'éolien

Gilles Martin



DIRECTEUR
COMMERCIAL
Sogea Ouest

Éric Grandguillot



GÉRANT
Bureau d'études AI'Tech

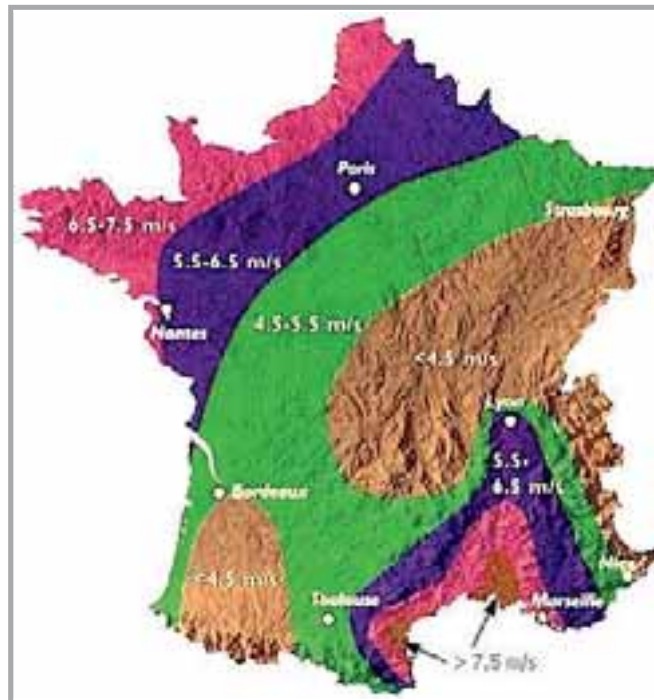
Souhaitant formaliser son offre de génie civil pour la construction de parcs éoliens, en plein essor dans la région, la direction régionale Ouest de Sogea Construction (groupe VINCI) en est arrivée à élaborer, avec le bureau d'études spécialisé AI'Tech, une offre de développement de projet calquée sur son activité de montage immobilier. Après avoir déposé un premier dossier pour un parc de 11,5 MW en Vendée, les deux partenaires travaillent sur deux nouveaux projets et explorent de nouvelles voies de développement.

Exploité dans d'autres pays d'Europe depuis 20 à 25 ans, l'éolien n'a commencé à se développer en France qu'à partir de 2001, année où obligation a été faite à EDF de racheter et de distribuer l'électricité produite à partir des énergies renouvelables. De 60 MW, la puissance installée connaît alors une rapide croissance, atteignant 390 MW à la fin 2003 et 757 MW à la fin 2004, tandis que la production annuelle passe de 455 GWh en 2003 à 1 061 GWh, soit 1,061 TWh (milliard de kilowattheures) en 2005.

En dépit de cet essor spectaculaire (+ 148 % pour la production entre 2004 et 2005), l'Hexagone reste très en retard sur ses voisins européens. En Allemagne, par exemple, la puissance installée atteint 18 428 MW, en Espagne 10 027 MW et au Danemark 3 122 MW. Le nombre de parcs français est également en net retrait : 70 contre 1 000 outre-Rhin, et pas un seul parc offshore... Ainsi la France paraît-elle mal partie pour atteindre l'objectif de 21 % d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables en 2010 ⁽¹⁾ fixé par la loi de programmation et d'orientation de la politique énergétique du 13 juillet 2005. D'ici cette date, la puissance à installer pour l'éolien représente en effet entre 7 000 et 14 000 MW, autrement dit de 1 000 à 1 200 nouveaux parcs – un marché d'autant plus attractif que les énergies classiques se renchérissent et se raréfient.

■ UNE RÉFLEXION "POUR VOIR"

"Il y a plusieurs années que nous avons commencé à réfléchir à une offre spécifique "éolien", parce que nous étions fréquemment sollicités par des bureaux d'études, le plus souvent étrangers, sur des lots de génie civil et de génie électrique, raconte Gilles Martin, directeur commercial de Sogea Ouest. Cela nous a conduits à nous intéresser à ce métier, et cette réflexion, que nous avons d'abord engagée "pour voir" a pris petit à petit un autre tour. Tout d'abord, nous avons ressenti que nous



avons affaire à un marché en plein essor et que nous avons la chance d'être situés dans une des zones géographiques les plus favorables pour nous y développer. Et puis, très vite, nous nous sommes dit que, sur ce marché, nous pouvons faire autre chose et dans de meilleures conditions de rentabilité que des travaux de fondations. Quoi ? Eh bien, notre métier d'ensemblier : concevoir des projets, les développer, les construire et les revendre clés en main à des investisseurs ⁽²⁾ –, ce qui, dans un environnement différent, est le schéma même de notre activité de montage immobilier."

Résolue à explorer la filière de l'intérieur pour en comprendre les rouages, Sogea Construction doit

De tous les pays d'Europe, la France possède le deuxième potentiel éolien après le Royaume-Uni, et la région Ouest se prête plus particulièrement à l'aménagement de parcs

Source : TBSP, suivi de l'éolien en France (www.suivi-eolien.com)

Of all the countries of Europe, France has the second largest wind-power potential after the United Kingdom, and western France is especially suitable for the development of farms

Source : TBSP, Monitoring of wind power in France (www.suivi-eolien.com)

1. Cette part n'est actuellement que de 14 %.

2. Le développement s'arrête à l'obtention du permis de construire; le "clés en main" intègre la construction, hors fourniture des machines à la charge de l'investisseur.



▶ toutefois trouver un partenaire. L'occasion se présente en 2003 avec un projet apporté par le bureau d'études nantais Al'Tech⁽³⁾, qui venait de réaliser avec EDF le parc de Boin (huit machines, 20 MW de puissance installée), en Vendée, pour l'aménagement d'un nouveau site dans ce même département. Le 4 décembre 2003, un contrat est signé entre Sogea Ouest et Al'Tech pour le développement d'un parc de cinq machines (d'une puissance totale de 11,5 MW) sur les communes de

LA RÉALITÉ DES RISQUES

"Le danger pour l'avifaune et le bruit sont les deux principaux risques mis en avant par les adversaires de l'éolien, explique *Éric Grandguillot, le gérant d'Al'Tech*. En ce qui concerne les oiseaux, des études ont établi que sept oiseaux en moyenne sont tués chaque année par éolienne. Pour mesurer la réalité de cet impact, on peut rapprocher cette donnée des 50 oiseaux tués chaque année par kilomètre d'autoroute ou de ligne à haute tension. Surtout, il faut savoir que ce risque peut être prévenu s'il est intégré dès la conception du parc, en évitant par exemple d'installer des machines dans les couloirs migratoires.

Pour le bruit, il faut se souvenir des premières machines, avec leurs pales de bois ou d'aluminium qui tournaient jusqu'à 60 tours par minute. Ces premiers modèles n'ont pas grand-chose à voir avec les machines modernes, qui sont équipées de pales en matériaux composites dont la vitesse de rotation est comprise entre 10 et 18 tours par minute. En France, nous devons également respecter une législation qui est l'une des plus strictes qui soient, puisqu'elle interdit de dépasser de 3 dB le bruit ambiant du site*. Sur les 70 parcs français, il n'y a eu de problèmes réellement liés au bruit que sur trois sites. Le premier, en Charente-Maritime, à cause de pales mal adaptées et d'une mauvaise gestion du problème, qui est aujourd'hui résolu. Dans les Côtes-d'Armor, les éoliennes qui avaient été installées sur un site n'étaient pas des modèles certifiés. Là aussi, le problème est aujourd'hui réglé. Reste un cas, dans le Nord de la France, concernant un riverain demeurant à proximité immédiate d'un site. Mais celui-ci avait semble-t-il refusé une proposition de relogement qui lui avait été faite avant la mise en route de l'installation..."

* En Allemagne, la législation ne prend pas en compte la notion de bruit ambiant et interdit tout impact supérieur à 45 dB.

Vix et du Gué-de-Velluire, à l'intérieur des terres, non loin du marais poitevin.

Aux termes de ce contrat, Al'Tech est en charge de la qualification du site (recensement des servitudes et des contraintes d'implantation, approche paysagère, prise en compte de la répartition de l'habitat, dialogue avec les administrations), des études techniques (pose d'un mât de mesure, évaluation du potentiel éolien, étude des conditions de raccordement, étude des conditions d'accès), des études d'impact sur l'environnement (obligatoire pour tout projet d'une puissance supérieure à 2,5 MW), de diverses demandes d'autorisation et de la constitution du dossier de permis de construire. De son côté, Sogea Ouest est dans un double rôle de maître d'ouvrage, apportant sa bonne connaissance des réseaux locaux, et d'entreprise à même de fournir travaux de fondations et de génie électrique en lien avec les entreprises locales de VINCI Energies.

■ RÉPONDRE AUX QUESTIONS ET LEVER LES CRAINTES

"La relative improvisation des débuts de l'éolien en France (la procédure de développement n'a été finalisée qu'en janvier 2003), les attentes excessives et les déceptions font que l'éolien n'a pas très bonne presse", note Gilles Martin. Pour Sogea Ouest, en contact quotidien avec les riverains et les élus au travers de ses chantiers (centres d'incinération des ordures ménagères, stations de traitement des eaux, équipements publics...), ces projets doivent être menés en réelle concertation. C'est la raison d'être des débats publics organisés dès que le conseil municipal ou le conseil communautaire a rendu un avis favorable sur un projet. "On constate en effet qu'il subsiste dans l'opinion beaucoup de questions et de craintes touchant les soi-disant risques de l'éolien (voir encadré), poursuit Gilles Martin. Notre premier devoir est d'apporter informations et explications sans chercher à forcer la main. Ainsi les études du parc de Vix n'ont été lancées qu'au terme de la phase de concertation."

Après le dépôt du dossier à l'été 2005 et le passage en commission des sites au début juin 2006, l'enquête publique est en cours et la décision concernant le permis de construire devrait intervenir d'ici l'automne.

3. Créé en 1999, Al'Tech représente entre 10 et 15 % du marché du développement de parcs éoliens en France et a obtenu à ce jour les permis de construire d'une puissance installée de 230 MW.

■ DEUX "5M" SUR LE SITE DU CARNET

Sans attendre l'aboutissement de cette démarche, qui se traduira pour Sogea Ouest par la vente du projet à un investisseur, les deux partenaires ont commencé à monter de nouveaux dossiers. Le premier, sur la commune de Saint-Herblain, où sont implantées Sogea Ouest et Al'Tech, concerne le site de 70 ha de l'ancienne déchetterie de Nantes, fermée depuis 20 ans, non loin du pont de Cheviré. Fortement encouragé par la municipalité et Nantes Métropole, la communauté d'agglomération nantaise, ce parc, baptisé Tougas, pourrait, après avoir été déclassé, accueillir trois ou quatre éoliennes, et son dossier devrait être déposé fin 2007, début 2008.

Le second projet, qui a eu les honneurs de la presse locale en avril, concerne le site du Carnet (communes de Saint-Viaud et de Frossay), à mi-chemin de Nantes et de Saint-Nazaire, sur la rive sud de l'estuaire de la Loire, où l'implantation d'une centrale nucléaire avait provoqué d'importantes manifestations voici plus de 20 ans. Le projet est d'implanter là deux "M5", des machines de 160 m de haut, d'un diamètre de pale de 126 m (approximativement deux terrains de football) et d'une puissance de 5 MW, fabriquées par l'Allemand REpower, qui n'a à ce jour installé qu'un prototype à Cuxhaven (Allemagne). *"C'est un projet qui ne se réalisera pas avant 2008 au plus tôt, souligne Gilles Martin, mais nous voyons comme un signe de bon augure l'avis "très favorable" qui lui a été donné par le directeur du port autonome de Nantes, qui est propriétaire des terrains, à la veille des réunions publiques qui ont commencé à se tenir à la fin avril."*

Au-delà, le développement des parcs éoliens, comme le montage immobilier, pose la question du foncier. Or la recherche de foncier est un investissement lourd, sur lequel Sogea Ouest estime aujourd'hui prématuré de s'engager. Cela n'interdit pas d'avancer, notamment en explorant les ressources de synergies au sein du groupe VINCI. *"Du foncier, il en existe en effet, précisément en région Ouest, tout au long des quelque 1 000 km d'autoroutes du réseau de Cofiroute, l'un des concessionnaires autoroutiers du groupe VINCI, où pourraient, comme cela se fait à l'étranger, être aménagés des parcs."* Si aucun projet n'est à ce jour formalisé, de premiers contacts ont été noués par Sogea Ouest et Al'Tech avec Cofiroute, pour expertiser ses ressources foncières qui, estime Gilles Martin, *"pourraient permettre de créer de 10 à 15 parcs au moins"*.

ABSTRACT

Sogea Ouest opts for wind power

G. Martin, E. Grandguillot

Wanting to set out formally its civil engineering proposal for the construction of wind-power farms, which are developing rapidly in the region, the western regional department of Sogea Construction (VINCI group) managed to work out, with the specialist engineering firm Al'Tech, a project development proposal modelled on its property development activity. After filing an initial dossier for an 11.5 MW farm in the Vendée region, the two partners are working on two new projects and are exploring new areas of development.

RESUMEN ESPAÑOL

Sogea Ouest apuesta por el eólico

G. Martin y E. Grandguillot

Deseando formalizar su oferta de ingeniería civil para la construcción de parques eólicos, en pleno auge en la región, la dirección regional Oeste de Sogea Construction (grupo VINCI) consiguió elaborar, conjuntamente con la oficina de estudios especializados Al'Tech, una oferta de elaboración de proyecto calcada en su actividad de instalación inmobiliaria. Tras haber depositado un primer dossier para un parque de 11,5 MW en el departamento de Vandea, los dos socios trabajan sobre dos nuevos proyectos y exploran nuevas vías de desarrollo.

Les fondations profondes éolienne

Dans le cadre du déploiement des énergies renouvelables, Spie Fondations a développé une grande expertise dans les fondations des éoliennes. Ces machines produisant des efforts importants, leur ancrage au sol doit en effet être profond et répondre à des normes spécifiques. Avec une centaine de chantiers dans ce secteur, le savoir-faire de Spie Fondations est aujourd'hui largement reconnu.

Photo 1
Pylône de 100
à 120 m de haut
Pylon
100 to 120 m high



Photo 2
Pales de 70 m
d'envergure
Blades
of 70 m span



■ L'ÉNERGIE SE DIVERSIFIE PARTOUT DANS LE MONDE

L'évolution récente du prix du pétrole devrait inciter les décideurs à s'orienter vers d'autres sources, notamment les énergies renouvelables.

L'éolien constitue une énergie qui s'est développée en Europe du Nord (18 400 MW installés en Allemagne ou en Scandinavie) et en Europe du Sud (10 000 MW installés en Espagne). La France en revanche, est à la traîne avec seulement 757 MW à fin 2005, alors même que le gisement français est le deuxième d'Europe. Elle doit accélérer la

mise en œuvre de parcs éoliens car elle s'est engagée sur le plan européen à avoir 21 % d'électricité renouvelable avant 2010. Ainsi avant cette date 10 000 MW devront être installés.

■ SPIE FONDATIONS ET LES PROJETS ÉOLIENS

Depuis 2000, Spie Fondations s'est intéressée aux projets éoliens, notamment aux fondations des pylônes.

Leader depuis le début des années soixante dans les fondations de pylônes électriques pour EDF, Spie Fondations s'est ensuite diversifiée en se tournant logiquement vers les pylônes de télécommunications. Dans la foulée, il était naturel qu'elle investisse pour répondre aux attentes du secteur de l'éolien.

Les constructeurs ont fait progresser les machines en diminuant les nuisances tout en augmentant les capacités. Ainsi en quelques années, après des machines de 0,750 MW puis 1,500 MW, il est devenu courant aujourd'hui d'installer des éoliennes de 2,5 ou 3,0 MW, avec des pylônes de 100 à 120 m de haut et des pales de 70 m d'envergure (photos 1 et 2), ce qui correspond à la surface d'un terrain de football!

Ces machines, entièrement automatisées, développent au niveau de leur base des sollicitations très importantes pouvant atteindre des moments de renversement de 5 000 à 6 000 T.M. avec des efforts alternatifs. Des exigences particulières sont par ailleurs demandées, notamment :

- ◆ condition de non-soulèvement pour une semelle superficielle ou d'absence de traction dans les pieux en fondations profondes (cas du "lift-off");
- ◆ limitation de la rotation du massif à 0,10°;
- ◆ vérification de la raideur angulaire dynamique $K_{\omega, dyn}$ (de 20 000 à 100 000 MNm/rad);
- ◆ vérification de la raideur horizontale dynamique $K_{xy, dyn}$ (de 150 à 375 MNm).

L'étude générale porte sur une multitude de cas de charges tant en exploitation, qu'en immobilisation, qu'en entretien. Ainsi, selon la norme IEC 61400-1 § 7.4 nous avons :

- ◆ en phase d'exploitation : 9 cas;
- ◆ en phase d'exploitation + incident : 3 cas;
- ◆ au démarrage : 3 cas;
- ◆ en arrêt normal : 2 cas;
- ◆ en arrêt d'urgence : 1 cas;
- ◆ en immobilisation : 2 cas;
- ◆ en immobilisation + incident : 1 cas;

au service de l'énergie

Jean-Louis Touquet



DIRECTEUR
DÉPARTEMENT
LIGNES & PIEUX
Spie Fondations



Photos 3 et 4
Forage de pieu
Pile drilling

◆ en phase de transport, assemblage, entretien/réparation : 1 cas ;
soit 22 cas de charges (durée de vie : 20 ans).

■ UNE OFFRE COMPLÈTE POUR DES FONDATIONS SPÉCIALES

Les fondations sont généralement constituées de massifs béton armé. de très grande section de 15 à 20 m de côté, mais dans des cas spécifiques liés à la géologie rencontrée, les fondations profondes peuvent être une solution élégante et sécurisante. Dans ce cadre, Spie Fondations propose à ses clients une offre complète comprenant :

- ◆ étude de conception et d'exécution des fondations ;
- ◆ fondations profondes (photos 3, 4 et 5) ;
- ◆ massif béton armé (photo 6) ;
- ◆ scellement de la virole (interface entre massif et mât) ;
- ◆ mise à la terre ;
- ◆ remise en état.

Les fondations profondes sont de tout type : pieux forés, pieux battus, micropieux, etc. Dans tous les cas, ces fondations sont très armées pour reprendre de tels efforts et les calculs sont menés avec les normes européennes, avec des études spécifiques sur la fatigue des matériaux (béton, aciers, sou-



Photo 5
Essai de traction
Tensile test



Photo 6
Massif béton armé
Reinforced concrete foundation

dures...). A ce titre le constructeur fournit les données inhabituelles suivantes :

- ◆ spectre des étendues de variations d'efforts (ΔF_x ΔF_y ΔF_z) et de moments (ΔM_x ΔM_y ΔM_z);
- ◆ valeurs moyennes (F_{xm} F_{ym} ... M_{xm} ...);
- ◆ étendues d'efforts et de moments à dommage équivalent.

Pour l'étude des fondations spéciales sous charge cyclique, les règlements n'existent pas. Seuls les modèles développés en laboratoire et des résultats d'essais sur modèles réduits ou en vraie grandeur permettent d'approcher le comportement de ces dernières.

Spie Fondations a mené une synthèse technique permettant l'évaluation d'un coefficient de sécurité lui offrant la possibilité de proposer des solutions variantes intéressantes.

Spie Fondations a réalisé près d'une centaine de fondations d'éoliennes dans toutes les régions de France et dans des terrains de toute nature. Elle a acquis ainsi une réelle expérience et cette compétence est très appréciée des donneurs d'ordre.

ABSTRACT

Deep foundations for wind power

J.-L. Touquet

In the context of deployment of renewable energies, Spie Fondations has developed great expertise in wind generator foundations. Since these machines generate major forces, their ground anchorage must be deep and comply with specific standards. With about one hundred projects in this sector, Spie Fondations' know-how is now well recognised.

RESUMEN ESPAÑOL

Cimientos profundos al servicio de la energía eólica

J.-L. Touquet

Situándose en el marco del despliegue de las energías renovables, Spie Fondations ha desarrollado una pericia destacada en los cimientos para los aerogeneradores. Estas máquinas generan importantes esfuerzos, en efecto, su anclaje en el suelo deber ser profundo y corresponder a diversas normas específicas. Con un centenar de obras en este sector, la pericia y experiencia práctica de Spie Fondations esta hoy en día muy ampliamente reconocida.

Photovoltaïque : une technologie prometteuse pour le secteur du bâtiment et des travaux publics

Alexandre d'Angelo



EXPERT
EN TECHNOLOGIES
ENVIRONNEMENTALES
AUPRÈS
DE LA COMMISSION
EUROPÉENNE

Le soleil produit 10 000 fois plus d'énergie que n'en consomme actuellement toute l'humanité. L'exploitation d'une infime fraction de cette énergie (0,01 %) permettrait théoriquement de satisfaire la totalité de nos besoins énergétiques.

Les technologies photovoltaïques (PV) convertissent déjà l'énergie solaire en électricité pour alimenter des habitations, des caulettes et des bornes d'appel d'urgence. Une poursuite de la recherche devrait permettre de rendre ces technologies compétitives avec le coût de l'électricité du secteur.

La Commission européenne a donné une nouvelle impulsion politique à ce processus avec sa contribution au lancement, au printemps 2005, de la Plate-forme technologique européenne du photovoltaïque (<http://www.eupvplatform.org>), un groupe pluridisciplinaire chargé d'élaborer une stratégie de développement pour cette source d'énergie durable.

"Photovoltaïque" signifie littéralement "électricité produite par la lumière" – du grec "phos", qui signifie "lumière", et de "Volta", nom du physicien italien Alessandro Volta, pionnier de l'étude de l'électricité.

Le photovoltaïque (PV) n'est pas une discipline très connue, mais elle n'est pas nouvelle.

La technique consistant à convertir directement la lumière du soleil en électricité a été découverte en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel (père d'Henri, qui a donné son nom à l'unité de mesure de la radioactivité). Ses travaux furent repris et développés par l'industrie aéronautique pour équiper les engins spatiaux de panneaux photovoltaïques afin d'assurer leur autonomie énergétique.

Mais c'est seulement au cours des cinq dernières années que l'on a commencé à investir sérieusement dans cette technologie – un intérêt largement motivé par la hausse du cours du pétrole et par une sensibilisation croissante à la nécessité de protéger l'environnement.

Cette forme d'énergie offre deux avantages majeurs. D'une part, elle est propre, car elle produit de l'électricité sans émettre de gaz à effet de serre. A la différence d'autres sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie éolienne ou l'énergie de la houle, elle peut être déployée de façon décentralisée n'importe où dans le monde, puisqu'elle n'utilise que de la lumière, même de faible intensité.

D'autre part, elle peut contribuer à sécuriser la distribution de l'énergie en mettant les utilisateurs à l'abri des fluctuations des prix et de l'offre engendrées par les aléas de la situation internationale –

un atout important pour l'Union européenne, qui importe 50 % de l'énergie qu'elle consomme.

■ UN COÛT ENCORE TRÈS ÉLEVÉ

En 2000, l'énergie photovoltaïque représentait à peine 0,001 % de l'électricité produite en Europe ; des études indiquent qu'elle pourrait s'approcher du seuil des 5 % vers 2030. Le seul obstacle à une généralisation de cette source d'électricité est son coût.

La production de 1 kWh d'électricité PV dans l'UE coûte actuellement entre 0,30 et 0,60 euro (cette variation s'explique par le fait qu'il est moins coûteux de produire de l'énergie PV dans le Sud de l'Europe que dans le Nord). Ce coût est quatre fois plus élevé que celui du réseau électrique classique. Cependant, les progrès techniques réduisent graduellement l'écart. On estime que chaque fois que la production de panneaux PV double, le coût diminue d'environ 20 %. Selon les prévisions actuelles, l'énergie photovoltaïque devrait être compétitive par rapport au coût du secteur d'ici 2030, et peut-être même avant si le prix des énergies fossiles augmente de façon significative.

D'après certaines estimations, la technologie PV pourrait produire 4 % de l'électricité mondiale d'ici 2030. Et à l'horizon 2100, l'électricité solaire pourrait représenter 70 % de l'énergie mondiale.

■ LA COMMISSION EUROPÉENNE MOBILISE LES SYNERGIES

La Commission soutient activement le développement des technologies photovoltaïques, qu'elle



Photo 1
 Plus de 1 000 écoles sont alimentées par l'électricité photovoltaïque dans des régions isolées d'Afrique du Sud, où cette énergie permet une éducation de qualité notamment à travers l'accès à des outils pédagogiques audiovisuels

More than 1 000 schools are powered by photovoltaic electricity in isolated regions of South Africa, where this energy allows good-quality education especially by permitting access to audiovisual instruction facilities



© Courtesy Isofoton

Photo 2
 L'électricité photovoltaïque ouvre des espoirs colossaux en terme d'accès à l'eau et à des soins de santé

Photovoltaic electricity gives huge hopes for access to water and healthcare



© Courtesy Shell Solar

► considère comme l'une des priorités dans son programme relatif aux systèmes d'énergie durables. Elle a contribué pour plus de 250 millions d'euros aux recherches poursuivies dans ce domaine depuis les années quatre-vingt.

Ce soutien financier a pris une dimension politique en décembre 2003, avec l'institution du Conseil consultatif de la recherche sur les technologies photovoltaïques (PV-TRAC), composé de représentants des producteurs et des distributeurs d'énergie du monde de la recherche, du secteur de la construction et des agences gouvernementales.

Le Conseil a pour mission d'accélérer le développement d'une industrie PV européenne de rang mondial et compétitive pour la production d'électricité durable en élaborant une vision stratégique à l'horizon de 2030 et au-delà. Son rapport préliminaire (A Vision for Photovoltaic Technology for 2030 and Beyond), publié en automne, a souligné le vaste potentiel de cette technologie et identifié les principaux freins, techniques et autres, à son exploitation.

Il a, en particulier, recommandé la mise en place d'une plate-forme technologique européenne pour les technologies photovoltaïques, sur le modèle de la Plate-forme européenne pour les technologies de l'hydrogène et des piles à combustible, lancée en décembre 2003. Cette plate-forme mise en place au printemps 2005 réunit des représentants du monde scientifique, de l'industrie et des pouvoirs

publics en vue d'élaborer des initiatives, des programmes et des politiques dans le domaine de l'énergie PV.

Cette plate-forme collabore avec des organismes spécialisés – notamment, l'European Photovoltaic Industry Association (EPIA) – pour travailler sur le volet industriel et soutenir les études de faisabilité. Elle veille également à la prise en compte des dimensions économique et environnementale des nouvelles technologies pour que les composants des panneaux PV puissent être facilement recyclés à l'issue de leur cycle de vie (30 ans).

■ UNE ÉNERGIE DÉCENTRALISÉE

Le photovoltaïque représente à l'évidence un atout pour les entreprises qui développent cette nouvelle technologie. En s'établissant solidement sur ce marché émergent, elles renforceront leur compétitivité.

Le Japon, qui soutient activement la technologie PV, occupe actuellement une position dominante, avec 45 % du marché mondial. L'Europe, qui a devancé les Etats-Unis en 2002, vient en deuxième place, avec 28 %. Parmi les dix premières entreprises mondiales, cinq sont européennes, quatre sont japonaises et une est américaine.

L'électricité PV est déjà compétitive dans certains contextes. Parce qu'elle peut être indépendante du réseau national, elle revêt une importance particulière pour les populations et les entreprises implantées dans des régions isolées qui n'accèdent pas facilement au secteur. Elle constitue ainsi une précieuse source d'énergie pour les pays en voie de développement (photo 1).

La production locale d'électricité PV peut permettre de répondre aux deux priorités identifiées par le Sommet mondial sur le développement durable de Johannesburg : développer les sources d'énergie renouvelables et garantir l'accès à l'eau potable (photo 2), puisqu'il faut de l'énergie pour pomper l'eau, la transporter et la purifier.

L'énergie PV est également employée sur certains marchés de niche. Elle alimente par exemple des montres, des calculateurs, des parcmètres et les bornes d'appel d'urgence des autoroutes. Des constructeurs de voitures de luxe installent cette technologie sur le toit des véhicules pour faire fonctionner la climatisation.

C'est sans doute dans les équipements des habitations que l'utilisation des panneaux PV est la plus visible – et tout spécialement en Allemagne, où le coût est rendu plus accessible par un programme de rachat de l'électricité solaire produite par les particuliers.

En quatre ans, cette politique a permis de décupler le marché de l'énergie photovoltaïque et de réduire les prix de 20 %. De fait, l'Allemagne produit actuellement près de 90 % de l'énergie PV en Europe.

D'autres pays européens lui emboîtent le pas. Le photovoltaïque offre à l'industrie l'avantage d'une source d'électricité à la fois pérenne et écologique, compatible avec les principes de la responsabilité sociale des entreprises. Cette technologie satisfait en outre au double critère du développement durable défini il y a près de 20 ans : couvrir les besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins.

© Courtesy Phönix SonnenStrom AG



Photo 3
Exemple d'intégration architecturale du photovoltaïque sur des bâtiments

Example of architectural integration of photovoltaic power systems on buildings

■ ENJEUX POUR LE SECTEUR DU BÂTIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

Plusieurs aspects relatifs au photovoltaïque dans le bâtiment méritent d'être développés, notamment l'installation et la notion d'intégration du photovoltaïque dans les bâtiments.

Lors de l'installation de panneaux photovoltaïques, il convient de prendre en considération le poids (ou surpoids) des panneaux photovoltaïques sur le bâtiment. En effet, les panneaux les plus répandus consistent en des cellules montées dans un cadre métallique recouvert d'une vitre. Ces dispositifs sont donc relativement lourds : 10 kg par mètre carré constitue un premier ordre de grandeur indicatif pour la surcharge imposée par la présence d'un panneau photovoltaïque (cet ordre de grandeur est donné à titre illustratif et doit être impérativement vérifié pour les panneaux spécifiquement envisagés). A cette surcharge s'ajoutent d'autres surcharges (neige...).

Certaines astuces ont été développées pour l'installation, notamment pour l'installation à grande échelle de panneaux photovoltaïques en plein champ en vue de produire de l'électricité en grande quantité : l'orientation des panneaux solaires est alors choisie pour maximiser le rendement.

Il convenait alors de produire et d'installer un pied : assez judicieusement, sur certains sites, le montage est réalisé sur des rails d'autoroute. Une telle façon de procéder présente l'avantage d'utiliser un élément (le rail d'autoroute) qui existe abondamment dans le commerce à un prix compétitif. Un autre aspect intéressant du photovoltaïque dans le bâtiment provient de l'intégration du photovoltaïque dans les bâtiments existants (ou BIPV en anglais pour Building Integration of PhotoVoltaic) (photo 3). L'esthétique, la création architecturale, l'efficacité énergétique, les fonctions techniques sont des composantes permettant de laisser libre court à la créativité.

Beaucoup de réalisations souvent remarquablement réussies voient le jour dans ce domaine, notamment certains exemples d'immeubles recouverts en façade. Un exemple de projet architectural particulièrement intéressant mérite d'être développé : la "Fontaine Solaire de l'Europe".

© 2005 Médiathèque de la Commission européenne & l'artiste plasticien Dang



■ UN EXEMPLE ORIGINAL DE PROJET : LA FONTAINE SOLAIRE DE L'EUROPE (photo 4)

La Fontaine Solaire de l'Europe¹ consiste en un panneau photovoltaïque (ou un ensemble de panneaux photovoltaïques) orné de douze étoiles jaunes comme le drapeau européen. Le panneau photovoltaïque produit de l'électricité utilisée pour faire circuler l'eau de la fontaine ; cette eau jaillit par les étoiles et circule en circuit fermé.

Cette œuvre aborde les thèmes contemporains du développement durable, en particulier : l'eau, l'énergie renouvelable, l'environnement, l'aide au développement, la technologie, la recherche, l'industrie, l'économie, les aspects sociaux...

Les problématiques de la satisfaction des besoins en eau (actuellement 1 milliard d'individus n'a pas accès à l'eau potable) et en électricité (actuellement 1,7 milliard d'individus n'a pas accès à l'électricité) sont présentes dans l'œuvre. Ces deux sujets



1. Pour contacter l'artiste plasticien Dang en vue d'une réalisation : www.dang.be

Photo 4

Image de synthèse présentant un projet pour la Fontaine Solaire de l'Europe (collection Commission européenne)

Composite image showing a project for the Solar Fountain of Europe (European Commission collection)



Photo 5
Le Commissaire européen à l'environnement, Stavros Dimas, inaugure une représentation de la Fontaine Solaire de l'Europe au cours de l'ouverture de la Semaine Verte "Green Week 2005" à la Commission européenne le 31 mai 2005

The European Commissioner for the Environment, Stavros Dimas, inaugurates a representation of the Solar Fountain of Europe during the opening ceremony for the "Green Week 2005" at the European Commission on 31 May 2005

(électricité et eau) ont fait l'objet de deux initiatives majeures au Sommet mondial sur le développement durable à Johannesburg en 2002. La satisfaction de ces besoins primaires est essentielle pour la paix dans le monde.

La Fontaine Photovoltaïque de l'Europe fait jaillir l'eau qui est source de vie, d'abondance et de prospérité. A travers cette œuvre, l'Europe, symbolisée par la Fontaine Solaire Européenne, est "source" de bien-être et de paix.

De façon très concrète, dans les pays du Sud, l'électricité photovoltaïque est communément utilisée pour pomper et purifier l'eau pour les humains. Cette technologie ouvre des espoirs colossaux pour la fourniture d'eau dans les pays en voie de développement.

Le Commissaire européen à l'environnement, M. Stavros Dimas, a inauguré une représentation de la Fontaine de l'Europe au cours de l'ouverture de la Semaine Verte "Green Week 2005" à la Commission européenne le 31 mai 2005 (photo 5).

La photo de la Fontaine Solaire de l'Europe a été acquise par la Commission européenne fin décembre 2005.

Dans le but de donner à la Fontaine Solaire de l'Europe un visage humain, sa réalisation devrait par exemple être jumelée avec la réalisation d'un projet de fourniture d'eau dans un pays en voie de développement.

Dans l'hypothèse d'une réalisation itinérante (installée de ville en ville à travers l'Europe), à l'issue du circuit, les panneaux pourraient être offerts pour la réalisation d'un site d'approvisionnement d'eau (pompage et purification) dans un pays en voie de développement.

ABSTRACT

Photovoltaic power : a promising technology for the building and public works sector

A. d'Angelo

The sun produces 10,000 times more energy than the whole of mankind currently consumes. By harnessing just a small fraction of this (0.01 %), we would, in theory, be able to satisfy all our energy needs. Photovoltaic (PV) technologies are already converting the energy from the sun's rays to produce electricity for such varied uses as domestic homes, personal calculators and emergency telephones on motorways.

Further research should enable PV to become cost-effective with traditional techniques.

The European Commission has injected new political impetus into the process with the creation in spring 2005 of the European Photovoltaic Technology Platform (www.eupvplatform.org), a multidisciplinary group to devise a strategy for developing this particular form of sustainable electricity production.

RESUMEN ESPAÑOL

Fotovoltaico : una tecnología prometedora para el sector de la construcción y de obras públicas

A. d'Angelo

El sol produce 10000 veces más energía que el consumo actual de toda la humanidad. El aprovechamiento de una ínfima fracción de esta energía (0,01 %) permitiría teóricamente de satisfacer la totalidad de nuestras necesidades energéticas.

Las tecnologías fotovoltaicas (PV) convierten ya la energía solar en electricidad para alimentar a las viviendas, calculadoras así como puestos de llamada de emergencia. Proseguir las investigaciones debería permitir a estas tecnologías llegar a ser competitivas por comparación con el coste de la electricidad del sector. La Comisión europea ha dado un nuevo impulso político a este proceso mediante su contribución en el lanzamiento, durante la primavera de 2005, de la Plataforma tecnológica europea del fotovoltaico

(www.eupvplatform.org), un grupo pluridisciplinario encargado de la elaboración de una estrategia de desarrollo para esta fuente de energía sostenible.

Une technique innovante de renforcement de fondation pour pylônes électriques

Suite aux avaries sur le Réseau de Transport d'Electricité lors des tempêtes de 1999, RTE a entrepris un programme de sécurisation du réseau. Ce programme comprend des renforcements de superstructures (les pylônes) et d'infrastructures (les fondations).

Une solution innovante signée Scetauroute, complémentaire aux méthodes de renforcement classique des fondations, est actuellement en cours de validation auprès de RTE. L'article décrit cette innovation.

■ CONTEXTE ET ENJEUX

Les tempêtes des 26 et 27 décembre 1999 sont encore présentes dans toutes les mémoires. La puissance dévastatrice des vents a privé d'électricité des millions de Français – entre autres dégâts.

Sur le territoire couvert par l'entreprise de service public "RTE EDF Transport", des lignes à haute et très haute tension (HT/THT) ont été endommagées du fait de la destruction totale ou partielle de quelque 1 000 pylônes sur 270 000.

RTE EDF Transport est le gestionnaire du Réseau de Transport de l'Electricité français. Il exploite, entretient et développe le réseau haute tension depuis les centrales de production jusqu'aux transformateurs appartenant au réseau de distribution moyenne tension.

Pour accroître la capacité de son réseau à faire face à ces événements climatiques exceptionnels, RTE a engagé depuis l'année 2000 un vaste programme de sécurisation mécanique s'élevant à 1,7 milliard d'euros sur 15 ans.

Cette action conduit notamment à installer des pylônes anti-cascades et augmenter la robustesse des pylônes intermédiaires.

En cohérence avec le renforcement des superstructures (les pylônes), les infrastructures (les fondations) sont également renforcées, le plus souvent par une technique de micropieux.

Une solution innovante signée Scetauroute, complémentaire aux méthodes de renforcement classique des fondations, est actuellement en cours de validation auprès de RTE.

Le système concerne les ouvrages de tension supérieure ou égale à 63 000 volts, et plus généralement l'ensemble des structures dont les fondations sont soumises à un effort d'arrachement. Il consiste à rendre plus solidaire le terrain environnant pour lui permettre d'opposer davantage de résistance aux sollicitations transmises par le pylône sous

l'effet du vent ou du givre, c'est l'effet "racine". Simple dans son principe, le système ne s'applique pas directement à la fondation mais au sol qui l'environne, sans liaison mécanique ni intervention lourde.

L'enjeu est d'importance, le réseau HT et THT de RTE totalisant quelque 100 000 km de lignes. Quand on sait que les pylônes utilisés à l'étranger sont bâtis, dans leur grande majorité, sur le même principe, les perspectives qui s'ouvrent au système Scetauroute sont pour le moins prometteuses. Une même démarche de sécurisation des réseaux est à l'étude en Europe et sur les autres continents. Ce potentiel explique le dépôt d'un brevet international.

■ L'INNOVATION ET LE PROJET

L'objectif de Scetauroute est d'offrir à RTE une alternative qui s'appuie sur l'expérience développée dans les projets d'infrastructures linéaires en traitement des sols et en renforcement des talus par clouage.

Le procédé innovant consiste donc à renforcer le sol autour de la fondation pour améliorer sa résistance à l'arrachement pour des charges intermédiaires, plutôt que de renforcer la fondation elle-même. Le procédé innovant développe quatre concepts. Un premier concept est actuellement en cours d'essai et de validation en vue d'une exploitation industrielle. Il consiste à réaliser un traitement du sol en place par des liants hydrauliques de façon à constituer une dalle de sol traité.

Cette dalle permet d'améliorer la résistance au cisaillement du sol environnant, de mobiliser un volume de terre plus important par le poids mort et les frottements latéraux.

Cette amélioration permet de reprendre le différentiel entre la tenue initiale du massif et le nouvel objectif de tenue fixé dans le cadre de la

Michel Deniot



CO-INVENTEUR
ET DIRECTEUR
DU PROJET
Scetauroute

Jérôme Dufour



CHARGÉ D'AFFAIRES
FONDATIONS
RTE

François Depardon



CO-INVENTEUR. ADJOINT
AU DIRECTEUR
DE LA DIRECTION
GÉOTECHNIQUE
ET MATÉRIAUX
Scetauroute

Bruno Mazare



CO-INVENTEUR.
RESPONSABLE
DU SECTEUR
FONDATIONS
À LA DIRECTION
GÉOTECHNIQUE
ET MATÉRIAUX
Scetauroute

Mise en œuvre de la dalle
en sol traité

*Laying the slab
in treated soil*



► sécurisation. Elle permet de s'adapter à une gamme d'efforts différentiels à reprendre allant de 20 à 400 kN, voire plus (figure 1).

Points forts de l'innovation

La solution Scetauroute est innovante à plusieurs titres :

- ◆ elle renforce le sol environnant plutôt que la fondation elle-même ;
- ◆ elle mobilise un volume de sol plus important autour de la fondation – effet "racine" ;
- ◆ elle évite la mise en œuvre de liens mécaniques avec la fondation superficielle existante et le pylône ;
- ◆ elle transpose un savoir-faire autoroutier de traitements de sol à des lignes électriques, avec une mise en œuvre utilisant des moyens du type agricole pour des petites quantités ;
- ◆ elle fait travailler la technique du traitement de sol à l'arrachement, en utilisant les caractéristiques mécaniques des matériaux (cohésion, frottement et résistance à la traction) par un effet racine.

Principaux avantages

Respect du milieu naturel et développement durable

L'enfouissement du système évite les impacts sur l'exploitation des couches supérieures qui restent ainsi disponibles pour leur utilisation naturelle. L'innovation Scetauroute utilise 90 à 95 % du sol en place. L'emploi de produits industrialisés est donc extrêmement limité.

Les liants issus de produits naturels classiques sont conformes à la réglementation en vigueur et non polluants. L'emploi de composant à faible émission de poussière rend leur dispersion très limitée en phase travaux et totalement nulle en phase exploitation.

La mise en œuvre est assurée par des engins de type agricole ce qui limite considérablement l'impact des travaux de renforcement sur les accès, les sites ou les cultures environnantes.

Les travaux n'occasionnent pas de transport en décharge de matériaux excédentaires.

Ces points confèrent à la solution Scetauroute un caractère environnemental prépondérant en totale harmonie avec la politique et les engagements de RTE en la matière.

Amélioration continue

L'innovation proposée à RTE s'inscrit dans le processus de sécurisation du réseau sans rupture du service. Les travaux de renforcement sont réalisés sur les ouvrages en exploitation sans arrêt ni coupure du transport d'énergie.

Au-delà de la simple application de la réglementation, RTE et Scetauroute, attentifs au développement durable, s'inscrivent dans une démarche continue de prévention des impacts environnementaux, tout en préservant les intérêts économiques de tous les utilisateurs de l'électricité.

Cette démarche se traduit concrètement au travers des premiers avantages procurés par l'innovation. Ils sont liés au fait qu'il n'y ait pas de conséquence sur la servitude ou l'emprise du pylône et au po-

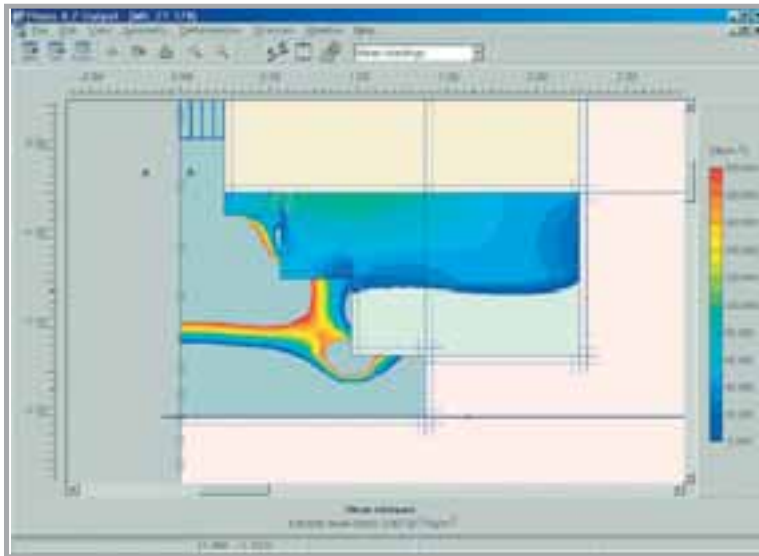
Dalle de sol traité
en place
autour d'une fondation
expérimentale de pylône

*Slab in treated soil
in place
around an experimental
pylon foundation*



Modélisation
par élément fini
des contraintes
dans le sol traité

*Finite element modelling
of stresses
in the treated soil*



Essai
d'arrachement
sur massif
de fondation
renforcé

*Pull-out test
on reinforced
foundation block*



La phase expérimentale comprenait :

- ◆ plusieurs séries d'essais destructifs en vraie grandeur sur des fondations de pylônes de type cheminée-dalle dans différents types de sols ;
- ◆ une justification détaillée des modèles de calcul par méthodes aux éléments finis ;
- ◆ une validation par un organisme de contrôle agréé.

L'objectif de cette phase était de valider et certifier la solution en précisant les efforts mobilisables à l'arrachement ainsi que les déformations des massifs avant la rupture.

La phase préindustrielle comprendra plusieurs chantiers expérimentaux d'environ une vingtaine de pylônes chacun. L'objectif est de corroborer les coûts et les délais de réalisation.

Cette technique, en cours de validation, permettra à Scetauroute de proposer cette solution aux autres gestionnaires de réseaux intervenant en Europe mais aussi dans d'autres pays dont les réseaux ont été éprouvés par les tempêtes ou cyclones.

Résultats de la phase expérimentale

Les essais destructifs réalisés sur les fondations de pylônes existants et les calculs numériques menés sous PLAXIS ont permis d'atteindre les objectifs de la phase expérimentale. Ils mettent en évidence :

- ◆ l'accroissement de la résistance à l'arrachement apporté par le sol placé au-dessus de la fondation avec un faible déplacement de l'ensemble (inférieur à 10 mm) ; le concept de l'innovation "Effet racine" fonctionne ;
- ◆ un gain sur les efforts à l'arrachement parfois supérieur aux attentes : la tenue du système a été parfois supérieure à la capacité du dispositif d'essai (1 450 kN) ;
- ◆ les caractéristiques mécaniques à la traction des sols traités sont compatibles avec la résistance intrinsèque attendue de la dalle (de 150 à 350 kPa selon la nature des sols) ;
- ◆ le savoir-faire et la méthode de traitement de sol type "autoroutier" (gros débit) sont transposables à des petites quantités à condition de mettre en place un mode opératoire et un système de contrôle spécifique.

Les résultats obtenus sont très encourageants. La phase préindustrielle devrait valider les rendements attendus.

En marge de la phase expérimentale, Scetauroute a conçu et réalisé des essais expérimentaux d'arrachement clés en main avec la mise au point :

- ◆ une instrumentation de précision informatisée permettant d'observer en temps réel les déplacements de l'ordre du 1/10 de millimètre sur le fût du massif mais aussi sur toute l'emprise du système ;
- ◆ des restitutions 3D permettant de visualiser en temps réel le comportement du système renforcé.

■ TRANSFÉRABILITÉ ET PERSPECTIVES

En cas de validation générique, l'innovation sera intégrée à la liste des systèmes de renforcement reconnus efficaces par RTE.

Elle peut être dimensionnée par une méthode de calcul voisine des formules analytiques standards utilisées par RTE pour le calcul de ces ouvrages. L'innovation met en œuvre des moyens matériels et humains normalement utilisés par les entreprises de terrassement dans le domaine des TP ou du type agricole (malaxeur, godet cribleur, dame vibrante, mini-station de concassage, traitement de matériaux). Elle est donc accessible aux entreprises de travaux publics spécialisées dans le traitement de sol. Cela permet à RTE d'élargir le panel et activer ainsi la concurrence parmi les entreprises susceptibles d'effectuer des travaux de sécurisation pour son compte.

Le développement des trois autres concepts incluant le clouage pourrait être envisagé pour répondre à des renforcements présentant des configurations spécifiques (faible entraxe, massifs déjàugés...).

Prise en compte des contraintes

Scetauroute a pris en compte les contraintes d'exploitation dans la conception de son innovation :

- ◆ personnel habilité pour exécuter des travaux sur ouvrages stratégiques en exploitation et sous tension (THT);
- ◆ garantie de stabilité de l'ouvrage lors des travaux (massifs déchaussés);
- ◆ évite la mise en œuvre de pistes d'accès aux ouvrages par l'emploi de moyens légers ou du type agricole;
- ◆ enfouissement du système, aucun impact pour l'exploitation des couches supérieures cultivées;
- ◆ pas de conséquence sur la servitude ou l'emprise du pylône;
- ◆ l'innovation ne dégrade pas la résistance de la fondation initiale (marge de sécurité + contrôle qualité du traitement).

■ CONCLUSION

La phase expérimentale d'essai d'arrachement sur des fondations superficielles renforcées par dalle de sol traité a permis de valider le fonctionnement du concept et le principe de dimensionnement du procédé.

La concrétisation de l'innovation a été rendue possible grâce à la mise en commun des savoir-faire techniques et une collaboration étroite entre RTE, Scetauroute et Guintoli. Le SETP du Centre national d'expertise du réseau (CNER) de RTE EDF Transport qui, avec l'appui et les moyens des Groupes d'ingénierie maintenance réseau (GIMR), a :



Mise en œuvre des traitements de sol *in situ*

Application of soil treatments in situ



Dispositif expérimental d'essai d'arrachement
Experimental pull-out test system

- ◆ mis en place un solide processus de validation du procédé;
- ◆ contribué aux réflexions permettant d'adapter le procédé aux lignes à haute et très haute tension. La Direction du développement de Scetauroute qui, avec l'appui de la Direction géotechnique et matériaux, a permis de conduire avec succès :
- ◆ la définition des attentes et des besoins du maître d'ouvrage (RTE);
- ◆ la proposition de solutions concrètes innovantes dont le dimensionnement est justifié scientifiquement;





Pilotage informatique de l'essai d'arrachement
Computer controller for the pull-out test

- ◆ l'adaptation de l'expérience globale de l'entreprise acquise dans l'ingénierie du traitement de sol après 30 ans d'application dans le domaine autoroutier ;
- ◆ le management et la réalisation de toutes les étapes du projet jusqu'à la validation du procédé. La Direction régionale Nord Normandie de Guintoli qui, avec l'appui de la Direction technique du groupe et de GTS, a contribué à l'application du procédé.

ABSTRACT

An innovative foundation reinforcement technique for electricity pylons

M. Deniot, J. Dufour, Fr. Depardon, Br. Mazare

Following damage to the electricity transport network during the 1999 storms, RTE undertook a programme to make the network more secure. This programme comprises superstructure reinforcements (the pylons) and infrastructure reinforcements (the foundations).

An innovative solution from Scetauroute, complementary to the conventional foundation reinforcement methods, is currently undergoing validation with RTE. The article describes this innovation.

RESUMEN ESPAÑOL

Una técnica innovadora de refuerzo de cimientos para torres eléctricas

M. Deniot, J. Dufour, Fr. Depardon y Br. Mazare

A raíz de las averías en la Red de Transporte de Electricidad durante los ciclones de 1999, RTE ha llevado a cabo un programa de securización de la red. Este programa incluye diversas consolidaciones de las superestructuras (las torres) y de infraestructuras (los cimientos).

Una solución innovadora firmada Scetauroute, complementaria con los métodos de consolidación convencional de las cimentaciones, se encuentra actualmente en curso de validación con RTE. En el presente artículo se describe esta innovación.