

Les énergies nouvelles : situation actuelle et perspectives

Autor(en): **Castelli, G. F.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **74 (1983)**

Heft 2

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-904743>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Les énergies nouvelles: situation actuelle et perspectives

Rapport du Groupe d'experts sur les énergies nouvelles*)

Le rapport a pour objet d'illustrer la situation actuelle, le programme ainsi que les perspectives de développement, jusqu'à la fin de ce siècle, des sources d'énergie suivantes: utilisation directe de l'énergie solaire, énergie éolienne, énergie des mers, énergie géothermique, énergie de recyclage des déchets. Ces différentes sources sont étudiées non seulement sous l'angle de leur utilisation pour la production d'électricité mais également sous celui de leur faculté de se substituer à l'énergie électrique.

Die heutige Situation sowie die Entwicklungschancen bis zum Jahr 2000 der direkten Nutzung der Sonnen-, Wind- und Meeresenergie, der Erdwärme sowie der Nutzung von Abfällen werden erläutert. Diese unterschiedlichen Energiequellen werden einerseits aus dem Gesichtswinkel der Stromerzeugung, andererseits im Hinblick auf ihren Substitutionswert gegenüber der elektrischen Energie untersucht.

1. Généralités

Tout d'abord, il faut signaler que les sources d'énergie étudiées ici, présentent dans les différents pays d'Europe occidentale des caractéristiques qui peuvent, certes, varier considérablement d'une nation à l'autre, mais aussi, d'une région à l'autre et, dans certains cas, d'un endroit à l'autre d'une même région. Ainsi, le rayonnement solaire est beaucoup plus fort dans le sud de l'Europe qu'en Scandinavie; l'amplitude des marées dans certains pays méditerranéens est plus de dix fois inférieure à celle que l'on constate en certains sites d'Europe septentrionale; les perspectives de développement de l'énergie géothermique sont beaucoup plus importantes en *Italie* et en *Islande* que dans d'autres pays européens, et ainsi de suite.

Il est donc impossible pour la plupart des énergies nouvelles étudiées ici, de parvenir à des conclusions valables pour l'ensemble de l'Europe, car les perspectives de développement de chacune de ces sources dépendent dans une large mesure de facteurs locaux.

La politique énergétique d'un pays peut également avoir un impact considérable sur les perspectives de développement d'une source d'énergie. Ainsi, dans un pays qui s'est doté d'un programme nucléaire important, ou qui dispose de ressources hydrauliques abondantes et exploitables dans des conditions économiques, les énergies nouvelles seront confrontées à une vive concurrence. La situation pourrait être très différente dans un pays qui ne se serait guère engagé sur la voie du nucléaire.

Le coût de l'électricité produite est un autre facteur important pour les perspectives d'application de ces éner-

gies nouvelles. En effet, pour la plupart, les quantités fournies varient considérablement avec le temps; pour garantir un degré acceptable de fourniture, il faudra donc disposer d'installations de stockage appropriées et/ou d'une production d'appoint; pour les centrales reliées au réseau principal, il faudra que ce réseau puisse s'accommoder de cette variabilité. Par conséquent, le coût de l'électricité produite dépendra non seulement de la disponibilité de la source d'énergie, mais également des caractéristiques du réseau auquel sont reliées les centrales utilisant les énergies nouvelles, en particulier du niveau de production. Par conséquent, le coût de l'électricité produite à partir de ces énergies nouvelles dépend lui aussi de facteurs locaux et l'approvisionnement est moins sûr qu'avec l'électricité produite à partir des énergies traditionnelles, qui ont un important degré de fiabilité.

2. Situation actuelle et perspectives de développement des énergies nouvelles

2.1 L'utilisation directe du rayonnement solaire

2.1.1 Généralités

Le rayonnement solaire est sans nul doute la source d'énergie renouvelable la plus répandue. Il s'agit d'une énergie gratuite et non polluante, existant en quantités bien supérieures à la demande actuelle d'énergie. Ces caractéristiques de l'énergie solaire pourraient conduire à penser que son exploitation permettrait de résoudre les problèmes énergétiques du monde, et en particulier de notre monde occidental. Malheureusement, il n'en est rien,

*) Président du Groupe d'experts (subordonné au Comité pour la coordination de la recherche dans l'industrie électrique): G. F. Castelli, Vice Direttore degli Studi e Ricerche, Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, Corso Francia 31, I-10138 Torino.

du moins pas pour la période de temps envisagée dans le présent rapport car le délai de réalisation pratique est encore considérable. En fait, les avantages mentionnés ci-dessus sont contrebalancés par quelques inconvénients.

Tout d'abord, l'énergie incidente par unité de surface est relativement faible. En effet, l'énergie solaire disponible chaque année sur un mètre de la surface de la terre varie: environ 800 kWh thermiques dans les régions de l'Europe septentrionale, 1500 à 1800 kWh dans les régions les plus ensoleillées de l'Europe méridionale et 2500 à 2800 kWh dans les régions équatoriales. Les flux thermiques moyens correspondants sont donc de l'ordre de 0,1 à 0,2 kW thermique par m² en Europe et 0,3 kW par m² sous les tropiques.

Le faible niveau de ces flux énergétiques, combiné au rendement relativement faible de la conversion de l'énergie solaire en énergie utile, est un handicap considérable, qui oblige à couvrir de grandes surfaces pour obtenir des quantités d'énergie importantes. Par ailleurs, cette grande surface de capteurs solaires signifie non seulement un investissement très important, mais aussi une superficie de terrain considérable qui n'est pas toujours disponible, notamment dans les régions à forte densité de population, ce qui est le cas des pays d'Europe de l'Ouest.

Un autre inconvénient sérieux de l'énergie solaire est sa variabilité due à l'alternance des cycles journaliers et saisonniers et aux conditions atmosphériques. Cette variabilité entraîne notamment des différences au niveau du rapport rayonnement direct/rayonnement indirect du soleil, par suite de la couverture nuageuse. En décembre, la quantité d'énergie disponible peut être 20 à 30 fois inférieure à celle enregistrée en juin dans les régions situées les plus au nord de l'Europe et 4 à 7 fois inférieure dans les régions méridionales. Cette discontinuité du rayonnement solaire a des répercussions économiques évidentes, car lorsque la continuité des approvisionnements est essentielle, elle doit être compensée par des systèmes de stockage de l'énergie ou par des installations d'appoint utilisant d'autres sources d'énergie. Chacune de ces solutions engendre des dépenses qui grèvent sérieusement le coût de l'énergie obtenue à partir du rayonnement solaire.

Outre les utilisations fondamentales de l'énergie solaire, qui sont essen-

tielles à toute vie sur notre planète, les principales formes d'utilisation directe sont les suivantes:

- *Production de chaleur à faible température* (moins de 80 à 100 °C) essentiellement pour le chauffage de l'eau à usages domestiques ou industriels et pour le chauffage des logements.
- *Production de chaleur à moyenne et haute température* (en théorie, il est possible d'atteindre des températures supérieures à 5000 °C) pour des applications industrielles (traitement thermique, conversion en énergie mécanique ou électricité).
- *Production directe d'électricité par le procédé photovoltaïque.*

Ci-dessous, il est décrit la situation actuelle et les perspectives de développement des différentes applications de l'énergie solaire notamment en ce qui concerne la production électrique. Il est important de souligner l'influence considérable que les facteurs locaux (la quantité du rayonnement solaire total et direct, sa répartition sur l'année, les terrains disponibles, etc.) peuvent avoir sur les perspectives de développement de l'énergie solaire en Europe. Il est évident que les possibilités de développement dans un pays méditerranéen sont différentes de celles d'un pays d'Europe du Nord.

2.1.2 Production solaire de chaleur à basse température

L'élément de base des centrales solaires de production de chaleur à faible température (80 à 100 °C) est le capteur plan. Avant la crise de l'énergie, ce type de capteur solaire était déjà très utilisé dans certains pays comme Israël et le Japon. Désormais, il est utilisé dans le monde entier, tout d'abord pour des essais expérimentaux, puis pour des installations de démonstration et enfin au niveau commercial. Pour donner une idée de l'ordre de grandeur, on a estimé que la superficie totale des capteurs plans installés dans les pays européens les plus importants à la fin de 1980, est d'environ 500 000 m²; en 1980, la fabrication de tels capteurs solaires a avoisiné les 250 000 m². Dans certains pays, la diffusion des capteurs solaires a été favorisée par des subsides gouvernementaux et des aides financières, alors que dans d'autres elle s'est produite sans qu'il y ait eu de mesures analogues d'encouragement.

Si ces chiffres sont faibles (notamment en ce qui concerne la contribution énergétique de ces capteurs), ils indiquent en revanche un intérêt mani-

festé des industriels et l'existence d'un marché potentiel qui, du moins dans certains pays européens, est important. L'utilisation de capteurs plans pour la production d'eau à basse température destinée à des applications industrielles et domestiques est d'ores et déjà en passe de concurrencer l'électricité: elle la concurrence déjà dans certaines situations favorables.

A cet égard, il ne faut pas oublier que l'économie des capteurs solaires pour la production d'eau chaude, dépend d'un certain nombre de facteurs tels que le coût et le rendement du capteur, les frais d'installation (lesquels peuvent varier selon les caractéristiques du bâtiment et selon que l'installation s'effectue au stade de la conception de l'immeuble, de sa construction ou alors qu'il est déjà occupé), la durée de vie des capteurs, le niveau d'ensoleillement à l'endroit où le système est installé, la taille de l'installation, les frais financiers, le prix de l'énergie avec laquelle l'énergie solaire est en concurrence, le schéma d'utilisation de l'eau chaude (qui détermine le stockage requis), le prix de l'énergie d'appoint et ainsi de suite.

Etant donné le grand nombre de facteurs qui interviennent dans l'évaluation de l'économie d'une installation solaire à capteurs plans et la grande variabilité de chacun de ces facteurs dans les différents pays, il est extrêmement difficile, sinon impossible, d'établir de façon générale la viabilité économique de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude. Et cependant, dans l'état actuel des connaissances, il est raisonnable de dire que l'énergie solaire peut, dans des circonstances favorables, concurrencer ou presque l'électricité.

Quels sont à l'heure actuelle les obstacles à une plus grande utilisation des capteurs solaires à la place de l'électricité pour la production d'eau chaude?

En bref, et sans tenir compte des obstacles d'ordre juridique ou administratif auxquels on se heurte dans certains cas, le principal handicap est le coût de l'investissement. En effet, le coût élevé des équipements, combiné à une incertitude quant à la durée de vie réelle des composants, à la permanence de leur fiabilité et à leur coût d'entretien, tend à jeter le doute sur l'économie des capteurs solaires, même dans des situations favorables. Il faut ajouter à cela la réticence de certains consommateurs, ainsi que la participation et les efforts incontestablement plus grands que ce type d'équipement

exige de l'utilisateur, tant au niveau de l'installation qu'au niveau de l'exploitation et de l'entretien. De ce fait, les capteurs solaires n'ont réalisé jusqu'ici qu'une percée relativement limitée et bien souvent le développement de leur utilisation a été essentiellement le fait de consommateurs ayant des revenus supérieurs à la normale ou de fortes motivations idéologiques.

Par ailleurs, l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau chaude se substitue généralement à des formes et à des sources d'énergie coûteuses. Aussi cette utilisation est-elle encouragée dans bon nombre de pays, notamment dans les pays industrialisés du monde occidental.

Ainsi, les gouvernements de la plupart des pays représentés dans notre groupe ont d'ores et déjà pris certaines dispositions ou sont en passe de les prendre: exonérations fiscales, subventions ou prêts au consommateur, octroi de fonds pour la mise en œuvre des programmes de recherche et pour la construction d'installations de démonstration. Bien souvent, les producteurs d'énergie électrique participent directement à ces mesures d'incitation, plus précisément en ce qui concerne la construction d'installations de démonstration, l'information du public et la promotion de programmes d'essais des composants. En *Italie*, où les conditions d'ensoleillement sont plus favorables que dans la plupart des autres pays d'Europe, outre les différents types de mesures mentionnées ci-dessus, l'*Ente Nazionale per l'Energia Elettrica* (ENEL) lance un programme de promotion des capteurs solaires; ce programme prévoit une diffusion de l'information aux consommateurs, l'homologation des composants et l'octroi de prêts aux utilisateurs pour surmonter l'obstacle majeur que constitue un investissement initial élevé. Ces prêts seront récupérés sur un certain nombre d'années, par mensualités facturées sur les notes d'électricité.

L'objectif principal de ces mesures est une réduction des coûts, par une extension du marché, une amélioration de la conception et de la construction des composants et systèmes, enfin un accroissement de la fiabilité et de la durée de vie des composants.

Dans la situation actuelle, il est difficile de prévoir la percée que réaliseront les capteurs solaires dans le domaine de la production d'eau chaude à usages domestiques. Certes, différentes prévisions ont été effectuées et certains pays ont fixé leurs objectifs

pour l'horizon 1990 ou 2000, mais on est généralement convaincu que certains éléments essentiels sur lesquels se fonde une prévision fiable n'ont pas encore été définis à ce jour.

Le temps devrait jouer en faveur des capteurs solaires: en effet, le coût des panneaux solaires diminue alors que le coût de l'énergie qu'ils remplacent, augmente. L'utilisation de capteurs solaires pour la production d'eau chaude devrait par conséquent se poursuivre à un rythme accru, notamment dans les pays bénéficiant d'un bon ensoleillement et, dans un premier temps, dans les constructions nouvelles essentiellement. On peut estimer aisément les conséquences qu'aurait sur la demande d'électricité une adoption généralisée des capteurs solaires pour la production d'eau chaude domestique. Dans la communauté européenne, 8 à 10% environ de l'électricité consommée est utilisée pour la production d'eau chaude à usages domestiques (chaudières, lave-linge, lave-vaisselle), à des températures que peuvent fournir les capteurs solaires standards. Si l'on suppose, ce qui ne semble guère probable, que les capteurs solaires assureront un quart de cette demande dans les 15 à 20 années à venir, la consommation d'électricité diminuerait d'environ 2 à 3%.

Les perspectives d'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage des logements, marché potentiel beaucoup plus important puisqu'il représente dans la communauté européenne un tiers environ de l'énergie utile consommée, sont beaucoup moins prometteuses. Le coût d'investissement d'une installation de chauffage solaire en Europe est encore si élevé, qu'une telle installation est loin d'être économique. A l'heure actuelle, il est beaucoup plus rentable d'investir dans des mesures permettant d'économiser l'énergie, lesquelles permettront de réduire considérablement la consommation d'énergie à des fins de chauffage. Il semble donc raisonnable d'accorder, comme le font certains pays européens, une importance fondamentale à la promotion et à l'application de mesures de conservation de l'énergie afin de réduire la consommation de pétrole.

On peut donc penser que la diffusion des capteurs solaires utilisés pour le chauffage ne se produira que pour un prix de l'énergie bien supérieur à son niveau actuel.

2.1.3 Production de chaleur à moyenne et haute température pour les usages industriels

Produire de la chaleur à des températures suffisamment élevées pour que l'on puisse l'utiliser dans le cadre de procédés industriels ou pour la conversion en énergie mécanique ou en électricité, avec un niveau de rendement admissible, implique de concentrer les rayons du soleil et par conséquent seul le rayonnement direct peut être utilisé. Ce type d'application est donc d'un intérêt limité pour les pays présentant un faible rapport rayonnement direct/rayonnement diffus.

Les systèmes intéressants à l'heure actuelle sont, d'une part, les centrales à tour et champ d'héliostats, équipées de chaudières à eau, au gaz ou à métal fondu, et d'autre part, les centrales à capteurs paraboliques et cylindro-paraboliques (centrales du type à collecteurs distribués).

Des centrales expérimentales à tour et champ d'héliostats, ne produisant pas d'électricité, sont exploitées en *Italie* et aux *Etats-Unis d'Amérique* depuis un certain temps et la première centrale solaire du monde, la centrale *Adrano* d'une capacité de pointe de 1 MWe, a été connectée au réseau électrique italien en avril 1981. Cette centrale a été construite par un consortium d'entreprises françaises, allemandes et italiennes dont l'*Ente Nazionale per l'Energia Elettrica*, avec un financement partiel de la *Commission des Communautés Européennes*. Cette centrale d'*Adrano* sera bientôt suivie par une centrale à chaudière à eau d'une capacité de 1 MWe, qui en est actuellement à un stade de construction avancé à *Almeria (Espagne)*; par une centrale à chaudière à métal fondu de 500 kWe, également en construction à *Almeria* dans le cadre d'un programme de l'*Agence Internationale de l'Energie* comportant une active participation européenne; par la centrale *Thémis* (chaaudière à circulation de sels fondus) d'une capacité de 2,3 MWe, actuellement en cours de construction dans les Pyrénées françaises; par une centrale de 1 MWe en voie d'achèvement au *Japon*; et par une centrale de 10 MWe à *Barstow (Etats-Unis d'Amérique)*, qui est de loin la plus grande.

Ces centrales, à la construction desquelles participent activement les entreprises d'électricité des pays concernés, permettent d'acquérir une expérience qui sera précieuse pour l'évaluation de la fiabilité et de la durée de vie escomptée des composants, de leur

souplesse opérationnelle et de la possibilité de réduire leur coût.

De façon générale, il s'agit d'installations complexes dont la construction et l'exploitation font appel à une technologie relativement sophistiquée. Ces installations exigent d'immenses superficies de terrain (2,5 à 4 ha/MWe de pointe) et leur coût de construction est très élevé. De ce point de vue, les coûts de revient de la centrale d'Adrano sont significatifs (de l'ordre de 18 000 dollars par kWe de pointe) et ils semblent largement confirmés par les estimations de coûts des autres centrales en construction.

Etant donné la capacité de production annuelle de ces centrales (qui n'excédera probablement pas 1500 kWh/kW de pointe, même dans les régions d'Europe les plus ensoleillées), les coûts de l'électricité ainsi produite sont très élevés (2 \$ par kWh, voire davantage). Cependant, ces coûts ne sont pas directement applicables car ils concernent des prototypes relativement petits. A cet égard, les résultats d'études complémentaires qu'effectuent actuellement plusieurs pays, sur les coûts de production de l'énergie pouvant être obtenue dans des centrales plus importantes (jusqu'à 100 MWe) grâce à la mise en œuvre de techniques de construction et de montage plus élaborées et à l'utilisation de composants fabriqués en série, sont plus significatifs. Ainsi, une étude détaillée que l'Ente Nazionale per l'Energia Elettrica est en passe d'achever en Italie, semble indiquer que même en supposant un effort technologique considérable et une production à grande échelle, il est improbable que le coût de l'énergie ainsi produite soit inférieur à 0,25-0,30 \$ par kWh même dans les régions les plus ensoleillées, telles que l'Italie du Sud.

Sur la base de l'expérience acquise, des résultats des études et des caractéristiques inhérentes à ce type de centrale, l'avis général des experts du groupe est que, pendant la période couverte par le présent rapport, les centrales solaires à tour et champ d'héliostats ne contribueront à satisfaire que dans des proportions marginales à la demande d'électricité des pays industrialisés, tels que les pays européens. Pour que l'on installe ce type de centrale, il faudrait que la situation devienne beaucoup plus critique qu'elle ne l'est à l'heure actuelle, sur le plan des approvisionnements et du prix de l'énergie. Certes, on peut parvenir à des conclusions différentes et plus positives en

dehors de l'Europe, dans des régions isolées où les coûts de production de l'électricité sont extrêmement élevés, mais alors le degré de sophistication et de complexité de ces centrales ne serait guère compatible avec le degré de développement technologique qui caractérise généralement ces régions.

Le second type de centrale solaire, pour la production de chaleur à moyenne et haute température avec une capacité de conversion en électricité, est la centrale à collecteurs distribués, de forme parabolique ou cylindro-parabolique, qui concentrent les rayons du soleil. Du point de vue de la construction et de l'exploitation, ces centrales sont relativement complexes et semblent se prêter davantage à des capacités nominales limitées qu'aux capacités caractéristiques des centrales électriques. Le développement de ce type de centrale se poursuit dans plusieurs pays européens, notamment en Autriche, en France, en Italie, en Espagne et en Suède, mais il en est encore à un stade préliminaire.

La plus grande centrale à l'heure actuelle est celle d'Almeria (Espagne), d'une capacité de 500 kWe et d'une superficie de concentration du rayonnement de 6000 m². Cette centrale actuellement construite dans le cadre d'un programme de l'Agence Internationale de l'Energie, doit être mise en service en 1981. Plusieurs autres prototypes de dimensions moindres sont actuellement en exploitation, en construction ou en projet; ces prototypes vont d'une centrale de 100 kWe en Corse à quelques dizaines de kW thermiques dans plusieurs centrales expérimentales européennes.

Plusieurs de ces prototypes sont utilisés exclusivement pour la production de chaleur à moyenne température et sont installés à proximité d'industries de taille petite et moyenne, notamment dans le secteur agricole. Etant donné le degré limité des développements technologiques, il est impossible de faire des prévisions fiables quant à leurs perspectives. Là encore, le principal obstacle est le coût initial très élevé de ce type d'installation. Les perspectives d'application sont étroitement liées à l'importance de la réduction des coûts pouvant être obtenue par une simplification du matériel, la mise en œuvre de matériaux meilleur marché et l'adoption, chaque fois que cela est possible, de procédures normalisées de fabrication et de montage.

La situation est plus délicate encore pour les centrales à collecteurs distri-

bués. Ces centrales sont plus complexes et donc plus coûteuses; ainsi, le coût des centrales de grandes dimensions est du même ordre que celui des centrales à tour. En outre, ces centrales ne conviennent pas aux besoins des entreprises d'électricité. Il apparaît donc logique de supposer que dans les décennies à venir, les centrales solaires à collecteurs distribués ne contribueront que dans des proportions marginales à la satisfaction de la demande d'électricité en Europe. Si les programmes de développement en cours sont couronnés de succès, il pourrait être valable d'installer ce type de centrale pour la production de chaleur à usages industriels et même pour la production d'électricité dans des régions isolées où les coûts actuels d'électricité sont très élevés et où l'on trouve une main-d'œuvre techniquement qualifiée.

2.1.4 Cellules photovoltaïques

Le troisième mode d'utilisation du rayonnement solaire, est le procédé photovoltaïque qui permet de convertir directement ce rayonnement en électricité. C'est l'application qui contient le plus haut degré d'innovation et par conséquent où les possibilités de progrès technologiques et donc de réduction des coûts sont les plus grandes.

Lancé dans les années 50 et 60, en liaison avec les programmes spatiaux, le secteur photovoltaïque s'est considérablement développé dans les années qui ont suivi la crise de 1973, grâce aux programmes de développement et de recherche mis en œuvre essentiellement aux Etats-Unis d'Amérique, mais aussi dans plusieurs pays européens: Belgique, France, République fédérale d'Allemagne, Italie, Pays-Bas et Espagne.

En ce qui concerne les applications les plus intéressantes pour les consommateurs et les entreprises d'électricité, les centrales photovoltaïques présentent l'avantage particulier de se prêter à une large gamme de capacités nominales: depuis les petites centrales destinées à assurer des niveaux de charge limités, jusqu'aux centrales de taille moyenne pour alimenter des collectivités isolées et aux grandes centrales commerciales. En effet, les centrales photovoltaïques, notamment celles qui n'impliquent pas de concentration solaire, peuvent être de conception très simple, sans parties mobiles et nécessiter un entretien limité; elles convien-

ment parfaitement dans le cas d'utilisations isolées.

En dépit des progrès considérables accomplis ces dernières années les centrales photovoltaïques en sont encore à un stade de développement relativement peu avancé. Bon nombre de centrales sont en exploitation, mais leur capacité est réduite: de moins d'un kW à quelques dizaines de kW. Les plus grandes centrales prévues ont une capacité allant de quelques centaines de kW à un millier de kW maximum.

Le coût des centrales expérimentales actuelles est très élevé (10 000 à 30 000 \$/kWe de pointe) selon le degré de développement du secteur photovoltaïque dans les industries nationales. Dans le passé, certains composants, notamment les cellules solaires, ont vu leurs prix diminuer considérablement et cette tendance devrait se poursuivre. Cependant, les systèmes photovoltaïques comportent également un certain nombre de composants conventionnels, tels que les structures de support des panneaux, la préparation du site, le câblage, les systèmes de conditionnement de l'énergie électrique, etc.

Dans l'état actuel des techniques, les coûts de ces composants conventionnels sont généralement si élevés que même si le coût des cellules solaires était nul, l'électricité produite par des installations photovoltaïques serait malgré tout plus coûteuse que celle obtenue par d'autres moyens. Il en résulte une double obligation. D'une part, il est urgent de poursuivre les programmes de recherche visant à réduire considérablement le coût des cellules solaires et à accroître leur rendement dans la mesure du possible (ce qui aura pour conséquence de réduire la superficie des cellules nécessaires, la surface de terrain requise et les coûts correspondants). D'autre part, il est nécessaire de concentrer les recherches sur les éléments plus classiques des installations photovoltaïques de manière à réduire considérablement leur coût par la mise en œuvre de procédés de fabrication et de montage automatiques et par le développement de concepts entièrement nouveaux.

Cependant, la superficie de terrain nécessaire demeure un sérieux handicap pour les pays européens (il faut environ 50 à 100 km² pour obtenir la production annuelle d'une seule centrale classique de 1000 MWe).

Sans rentrer dans le détail des programmes de recherches et en se référant uniquement aux centrales de démonstration en construction en Euro-

pe, il faut mentionner le programme lancé par la *Commission des Communautés Européennes*, avec la participation de plusieurs producteurs européens d'énergie électrique et qui prévoit la construction, d'ici 1983, d'un certain nombre de centrales photovoltaïques d'une capacité allant de quelques dizaines de kWe à 300 kWe et représentant un total d'environ 1000 kWe. Une autre centrale mérite d'être mentionnée car elle sera la plus grande du monde: c'est la centrale «*Delphos*». Il s'agit d'un projet italien de construction d'une centrale photovoltaïque de 1000 kWe, dans les Pouilles, actuellement au stade des études et auquel participe activement l'*Ente Nazionale per l'Energia Elettrica*. L'énergie produite par cette centrale pourrait être dirigée vers le réseau ou alimenter une collectivité isolée du réseau principal.

Le but est d'acquérir suffisamment d'informations et d'expériences, grâce à ces centrales, pour pouvoir poursuivre les études d'un point de vue économique et technique et mettre en pratique les innovations et les résultats des programmes de recherches et de développement.

2.2 L'énergie éolienne

2.2.1 Caractéristiques et disponibilité

L'énergie éolienne présente un certain nombre de caractéristiques attractives; elle n'est pas polluante, elle est très répandue, et par rapport à l'énergie solaire et géothermique, elle a l'avantage d'être obtenue sous forme mécanique et par conséquent d'être facilement convertible en électricité.

En théorie, la quantité d'énergie éolienne disponible est considérable; cependant, son irrégularité et son intermittence, qui sont beaucoup plus prononcées que pour toute autre source d'énergie nouvelle, et une concentration relativement faible d'énergie (dans les régions les plus ventées, la densité de puissance moyenne du courant fluide peut atteindre 400 à 500 W/m² de surface totale frappée par le vent, ce qui correspond à 150-200 We/m²) limitent les possibilités d'utiliser cette source d'énergie dans des conditions économiques.

Etant donné les caractéristiques du vent (faible densité et grande variabilité), les dimensions des éoliennes doivent être considérables par rapport à leur capacité (le diamètre des pales d'un aérogénérateur de 1 MWe est de l'ordre de 50 à 60 m) et, par ailleurs, le

matériel doit être très robuste mécaniquement pour supporter les différentes conditions d'exploitation.

Contrairement à l'énergie solaire, il est très difficile et complexe d'évaluer le potentiel exploitable d'énergie éolienne d'un pays donné. En fait, s'il est possible de donner une première estimation du potentiel d'énergie solaire par interpolation des données d'ensoleillement d'un certain nombre de stations météorologiques réparties sur une superficie relativement grande, une estimation du potentiel d'énergie éolienne exige une connaissance des caractéristiques des vents sur le site proposé pour l'installation d'un aérogénérateur. A cet égard, il ne suffit pas d'avoir des cartes des vents car les caractéristiques des vents sont fortement influencées par la topographie locale. Il n'est donc pas très significatif d'utiliser des données recueillies à une certaine distance du site envisagé. Même pour une évaluation approximative du potentiel disponible d'énergie éolienne, il faudrait disposer certes d'une carte des vents mais surtout de données spécifiques aux sites envisagés. En outre, pour concevoir les systèmes de conversion, les évaluer d'un point de vue économique et technique et comparer différents sites, il est nécessaire de disposer de données ayant une importance statistique réelle et s'étendant sur une longue période.

La collecte de ces données est une opération complexe et coûteuse. On cherche à surmonter cette difficulté en perfectionnant les modèles mathématiques qui partent d'une représentation détaillée du terrain et d'une connaissance approfondie des caractéristiques du courant fluide dans certaines localités et qui permettent de procéder à des extrapolations pour estimer d'une manière rapide et relativement précise le potentiel éolien d'autres localités, situées à une certaine distance de celles pour lesquelles on dispose de mesures détaillées.

En ce qui concerne les pays d'Europe occidentale, il ressort des données dont on dispose que les régions les plus favorisées sont situées dans le nord (*Danemark, Suède, Royaume-Uni*, etc.) du fait, notamment, de l'existence de grandes étendues côtières.

Etant donné que l'on ne dispose pas encore de données exhaustives sur l'Europe occidentale, nous mentionnerons, pour donner une idée de l'ordre de grandeur, une estimation précise effectuée au *Danemark* sur des sites où il serait tout à fait possible

d'installer des aérogénérateurs. Quelques 2000 sites ont été ainsi localisés, représentant un potentiel global de 4 TWh/an (en supposant l'installation d'aérogénérateurs à hélice de 60 m de diamètre), sont légèrement plus de 15% de la demande actuelle d'électricité du Danemark. Etant donné que le Danemark est l'une des régions d'Europe les plus privilégiées de ce point de vue, ce chiffre peut donner une idée du potentiel d'énergie éolienne. A cet égard, il faut se souvenir que la capacité d'un aérogénérateur est proportionnelle au cube de la vitesse du vent; cela explique l'influence fondamentale des caractéristiques locales des vents sur les performances économiques et techniques d'un aérogénérateur et permet de comprendre pourquoi les perspectives d'utilisation économique de l'énergie éolienne peuvent varier considérablement d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre et même d'un site à l'autre.

2.2.2 Systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Les éoliennes peuvent être classées en différentes catégories, selon la direction de l'axe de rotation du rotor par rapport à la direction du vent. On distingue ainsi: les machines à axe horizontal, les machines à axe vertical et les rotors à axe horizontal perpendiculaire au vent.

Les deux premières catégories sont les plus adaptées à une conversion économique de l'énergie éolienne en énergie électrique, et jusqu'ici ce sont les aérogénérateurs à axe horizontal qui ont été les plus étudiés.

Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisent des machines qui fonctionnent à une vitesse fixe ou variable et différents types de générateurs électriques. Les caractéristiques fonctionnelles de ces systèmes varient très largement, ce qui peut nécessiter un équipement très complexe et coûteux pour contrôler la vitesse de l'aérogénérateur ou pour le raccorder au réseau électrique.

Habituellement, les systèmes de conversion de l'énergie éolienne sont regroupés en trois catégories: petites éoliennes ($D \leq 10$ m), éoliennes de taille moyenne ($10 M < D \leq 50$ m) et grandes éoliennes ($D > 50$ m), D désignant le diamètre du rotor.

Les petites éoliennes sont destinées la plupart du temps à des utilisateurs individuels, dans des régions isolées, en vue d'applications spécifiques ou pour un usage direct.

Les aérogénérateurs de taille intermédiaire pourraient être très utiles pour alimenter des collectivités isolées ou reculées (encore que les possibilités soient relativement peu nombreuses en Europe occidentale), sous réserve de disposer d'une capacité de stockage suffisante. Cependant, ces aérogénérateurs représentent bien souvent l'étape intermédiaire vers l'acquisition du savoir-faire indispensable à la mise au point de grands aérogénérateurs pouvant être raccordés au réseau électrique. En effet, l'installation de grands aérogénérateurs à fonctionnement fiable et économique, constitue l'objectif principal des programmes de développement actuellement mis en œuvre dans de nombreux pays industrialisés du monde occidental car ils offrent de plus grandes possibilités de réduction des coûts et pourraient contribuer de façon plus significative à la satisfaction des besoins globaux en énergie. Dans une gamme de capacité inférieure (moins de 100 kW), de nombreux prototypes ont été mis au point pour alimenter en énergie électrique les consommateurs isolés, de petites collectivités et des fermes. Plusieurs agencements ont été proposés, mais ils diffèrent tellement par leurs caractéristiques de construction et de fonctionnement que toute généralisation est délicate.

En ce qui concerne les éoliennes de capacité plus importante (500 kW et plus), deux prototypes de 630 kW sont opérationnels au Danemark depuis 1979-1980 et les prototypes de 2000 kW, 2500 kW et 3000 kW sont désormais en exploitation aux Etats-Unis d'Amérique. D'autres prototypes, d'une capacité de 2 à 4 MWe, sont en cours de construction, en République fédérale d'Allemagne, en Suède, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis d'Amérique. D'autres pays, les Pays-Bas et l'Italie par exemple, ont également lancé des programmes visant à développer les aérogénérateurs de taille intermédiaire ou grande.

L'expérimentation sur le terrain des grandes éoliennes vise essentiellement à optimiser la conception et les performances des différents composants, la solution des problèmes technologiques qui permettra de réduire les coûts de fabrication et l'évaluation de la fiabilité pour toutes les conditions de vent. Les résultats obtenus jusqu'ici sont prometteurs; si le développement du matériel dans les différents pays se poursuit comme prévu, si les résultats de l'expérimentation sur le terrain sont

satisfaisants et si l'expérience acquise est disséminée et échangée, on pourrait disposer vers le milieu de la décennie actuelle, de systèmes suffisamment fiables de conversion de l'énergie éolienne.

2.2.3 Perspectives d'application

Parmi les applications possibles de l'énergie éolienne, l'utilisation d'aérogénérateurs de taille petite ou moyenne pour alimenter en électricité des consommateurs dispersés, des collectivités isolées et des îles de faible superficie, ne semble pas d'une importance primordiale en Europe. Cependant, dans les pays en voie de développement ou dans les régions isolées ou reculées d'autres continents, ces générateurs pourraient trouver de nombreuses applications, même dans un proche avenir (mais là non plus, leur contribution par rapport à la demande globale d'énergie ne serait pas très significative). En fait, comme nous l'avons indiqué précédemment, l'énergie éolienne ne peut avoir un rôle significatif que si elle est produite par de grandes éoliennes installées individuellement ou par groupes de plusieurs unités pour constituer des centrales éoliennes d'une capacité globale de plusieurs dizaines ou centaines de MW.

Les perspectives d'application de ces grands aérogénérateurs dans les différents pays, sont étroitement liées à trois catégories de facteurs. Tout d'abord, des facteurs locaux parmi lesquels figurent non seulement les caractéristiques des vents, mais également le coût de l'énergie produite par ces aérogénérateurs; comme nous le verrons dans la troisième partie de ce rapport, ce coût dépend lui aussi de nombreuses variables locales: variation dans le temps du rendement de l'aérogénérateur, courbe de demande du réseau et parc d'équipements de production du système dans lequel est inséré l'aérogénérateur. L'influence de ces facteurs locaux est telle que les perspectives des aérogénérateurs peuvent être négligeables dans une région et en revanche très prometteuses dans une autre.

La quantité de terrain disponible et l'acceptation par le public de ces installations, constituent un deuxième groupe de facteurs étroitement liés, en partie du moins, à la situation locale. Pour une centrale éolienne comportant un certain nombre d'aérogénérateurs et située en terrain plat, la densité maximum d'électricité produite sur les sites les plus favorables (sur la base des

connaissances actuelles) est généralement inférieure à 10 MWe par km².

2.3 L'énergie des mers

2.3.1 Usines marémotrices

Un certain nombre de petits «moulins à marée» ont été exploités dans le passé, mais seules les installations avec bassin de retenue permettent de domestiquer de manière importante et à un coût acceptable, l'énergie des marées. Les hautes eaux de la marée montante sont confinées derrière un barrage et restituées à la mer par des turbines à eau lorsque la marée descend. Etant donné que le niveau des marées varie selon un cycle journalier de 12,4 heures qui se superpose sur un cycle lunaire de 14 jours, le rendement (qui est proportionnel au carré de l'amplitude des marées) varie considérablement avec le temps. Des propositions plus coûteuses prévoient un deuxième barrage permettant la production d'électricité pour satisfaire à la demande en période de pointe.

L'énergie des marées dans le monde, est estimée à environ 3000 GW, mais la plupart de cette énergie se dissipe en eaux peu profondes et il serait beaucoup trop coûteux d'envisager de la domestiquer, sauf en un petit nombre de sites où la topographie du littoral amplifie le mouvement des marées, leur conférant une amplitude exceptionnelle. En dehors de quelques petits projets réalisés dans l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques et en Chine, la seule usine marémotrice construite jusqu'ici est l'usine française de La Rance, d'une capacité de 240 MWe, construite sur l'estuaire du même nom. Cette usine fonctionne avec succès depuis 1966 et produit chaque année 0,5 TWh d'électricité.

En Europe occidentale, deux sites seulement se prêtent à l'installation d'usines marémotrices importantes. Il s'agit en France de la baie du Mont-Saint-Michel et au Royaume-Uni de l'estuaire de la Severn. Sur ces deux sites, l'amplitude annuelle moyenne des marées est supérieure à 8 m.

En France, un certain nombre de projets ont été proposés pour exploiter les marées du Mont-Saint-Michel. Le plus économique consiste à aménager un seul bassin au niveau des Iles Chauvsey, qui permettrait d'obtenir une production maximum de 12 TWh par an, pour un coût estimé bien supérieur à celui de l'énergie nucléaire. Au Royaume-Uni, des projets concernant l'aménagement de l'estuaire de la Severn

sont à l'étude depuis plus de 50 ans. En 1978, le gouvernement a fait entreprendre une nouvelle étude, qui a été terminée en 1981.

Selon l'emplacement du barrage, on pourra obtenir une production d'électricité de l'ordre de 20 TWh par an et le projet le plus économique envisagé permettrait de produire environ 13 TWh par an.

Une grande retenue marémotrice pourrait avoir un impact considérable sur l'environnement local: à côté de quelques effets bénéfiques, elle aurait un certain nombre d'inconvénients, notamment une gêne de la circulation maritime due aux écluses, un accroissement des coûts de drainage des terres et une perturbation des populations de poissons et d'oiseaux, inconvénients qui sont difficiles à prédire.

Les deux projets mentionnés ci-dessus pourraient fournir environ 40 TWh d'électricité par an, à un coût supérieur à celui de l'énergie nucléaire mais vraisemblablement concurrentiel par rapport à celui de l'énergie produite dans les centrales au charbon, si les prix de ce combustible augmentent considérablement en termes réels. Cela équivaut à moins de 3 % de la demande actuelle totale d'électricité dans les pays d'Europe de l'Ouest. Certes, on pourrait accroître légèrement ce pourcentage en exploitant des projets plus petits et moins économiques mais la contribution totale de cette forme d'énergie est relativement faible. Si la technologie n'est pas nouvelle, en revanche, l'échelle de construction l'est. Les coûts et les délais de construction sont donc sujets à une très grande incertitude.

2.3.2 L'énergie des vagues

Tandis que les vents concentrent l'énergie solaire, la mer accroît la densité de puissance en absorbant l'énergie du vent pour former des vagues. Les données relatives à la fréquence et à la hauteur des vagues dans la moitié nord de l'océan Atlantique indiquent un niveau de puissance annuelle moyenne de l'ordre de 80 kW/m, ce qui donne environ 300 GW de puissance de houle qui s'approche de l'Europe occidentale depuis l'Atlantique. L'énergie des vagues atteint des niveaux bien inférieurs dans les eaux plus abritées et ne constitue une ressource potentielle en Europe que pour les pays ayant une grande façade atlantique, c'est-à-dire le Portugal, la France, le Royaume-Uni, l'Irlande, la

Norvège et l'Islande. Parmi eux, le Royaume-Uni et la Norvège ont des programmes de recherche sur l'exploitation de cette énergie.

Au Royaume-Uni, l'énergie des vagues est étudiée depuis 1974. Les dépenses affectées à ces recherches sont de l'ordre de 9 millions de dollars par an. Environ dix dispositifs différents de conversion de l'énergie des vagues sont à l'étude; tous sont testés à une échelle réduite dans des cuves d'essais et plusieurs de ces dispositifs en sont actuellement au stade des essais sur modèle de plus grande échelle, en pleine mer.

Ces dispositifs convertissent l'énergie des vagues en électricité au moyen d'une turbine à air ou d'une pompe hydraulique. En Norvège, un autre type de dispositif est à l'étude, dans lequel des plaques immergées concentrent les vagues sur une turbine à eau installée sur la terre ferme.

Les principaux problèmes économiques et techniques que posent les systèmes étudiés au Royaume-Uni concernent les ouvrages massifs et donc coûteux qu'il faut mettre en place pour obtenir un niveau d'absorption raisonnablement élevé de l'énergie, le coût important du système de conversion de la puissance, du transport de l'électricité et du maintien de l'installation dans les conditions très rudes qui sont celles de la pleine mer sur une durée de vie de vingt ans, le risque potentiel pour la navigation maritime, etc.

Le dispositif norvégien permet d'éviter certains de ces problèmes mais il en est encore à un stade de développement peu avancé.

On a estimé en 1978 que les premiers projets britanniques permettraient de produire une électricité dix fois plus chère que celle obtenue à partir de l'énergie nucléaire. Des progrès considérables ont été réalisés depuis lors; néanmoins, il semble improbable à l'heure actuelle que ces coûts puissent être abaissés en dessous de 0,1 \$ environ par kWh.

Les estimations les plus détaillées du potentiel que constitue l'énergie des vagues ont été effectuées pour le Royaume-Uni où l'on compte environ 1000 km de sites possibles en bordure de l'Atlantique, au large de l'ouest de l'Ecosse et du sud-ouest de l'Angleterre: l'énergie moyenne produite est estimée à environ 7 GWe, soit 60 TWh par an. Si l'on extrapole ces résultats pour l'ensemble de l'Europe, on obtient une production totale de l'ordre de 200 TWh par an, soit environ 12% de la de-

mande actuelle d'électricité en Europe occidentale.

Certes, l'exploitation de l'énergie des vagues en est encore à un stade de développement peu avancé, mais de tout évidence, la part de cette source d'énergie dans la satisfaction de la demande énergétique européenne ne saurait être que limitée. Elle n'est vraisemblablement pas envisageable à court et moyen terme et par ailleurs son coût sera considérablement supérieur à celui de l'énergie nucléaire.

2.3.3 Les courants océaniques

En principe, les courants océaniques peuvent actionner des turbines, selon un principe analogue à celui des turbines éoliennes. Certes, les vitesses maximum sont considérablement inférieures mais cet avantage est très largement compensé par une densité bien supérieure du fluide et une variabilité moindre. Ainsi, on a estimé que les courants de marées pourraient produire environ 100 TWh aux alentours du littoral du Royaume-Uni. Cependant, la gêne qui en résulterait pour la navigation maritime serait considérable car les sites les plus favorables se trouvent pour la plupart sur des routes de navigation et les ressources exploitables seraient donc bien inférieures. En outre, le coût des turbines serait très élevé; un courant fort de 3 m à la seconde produirait une hauteur de chute d'eau maximum d'environ 0,25 m contre 12 m environ pour un projet type d'installation marémotrice à barrage. Les turbines à faible hauteur de chute d'une puissance de 10 MWe, utilisées à l'usine marémotrice de la Rance, ne donneraient donc qu'une production maximum de 200 k We.

Pour ces différentes raisons, les courants océaniques ne devraient pas constituer une source d'énergie viable.

2.3.4 Conversion de l'énergie thermique des océans

L'une des techniques possibles pour exploiter l'énergie solaire consiste à utiliser l'écart de température entre les eaux a été lancée en France il y a cinquante ans environ, avec la construction d'une petite usine expérimentale; elle est désormais reprise aux Etats-Unis d'Amérique. Cependant, ce mode de production d'énergie électrique ne pourrait être viable que dans des régions où l'écart de température entre la surface et le fond des océans est de 20 °C, voire davantage. Par conséquent, l'application de cette méthode

est limitée aux régions tropicales et n'est pas possible en Europe.

2.3.5 Gradients de salinité

En principe, on peut produire l'électricité en utilisant la différence de teneur en sel de l'eau douce et de l'eau de mer, à l'embouchure des fleuves. Si l'on place dans la mer et dans le fleuve des électrodes, séparées par une membrane d'épaisseur appropriée, il se produit une tension. Cette technique fait l'objet de certaines recherches aux Etats-Unis d'Amérique. Cependant, même si l'on arrive à mettre au point une membrane appropriée ayant une durée de vie acceptable, la densité d'énergie est très faible (environ 1 W/m² de surface de membrane); il faudrait donc de très grandes surfaces de membrane présentant une résistance élevée aux courants.

Cela entraînerait un investissement et des coûts de pompage considérables. Il semble donc improbable que cette source d'énergie puisse devenir viable.

2.3.6 Conclusions

De toutes les sources d'énergie marines étudiées, seules les marées et les vagues semblent offrir des perspectives d'exploitation intéressantes dans quelques pays européens. L'énergie d'origine marémotrice ne peut satisfaire la demande européenne actuelle en électricité que dans une proportion très limitée, de moins de 5%. Néanmoins, bien que le coût soit supérieur à celui de l'électricité d'origine nucléaire, cette source d'énergie pourrait concurrencer dans l'avenir la production d'électricité dans les centrales au charbon. L'énergie des vagues offre des ressources plus importantes mais à un prix de revient supérieur et cette source d'énergie ne pourrait au maximum satisfaire que 12% environ de la demande européenne actuelle d'électricité.

2.4 L'énergie géothermique

2.4.1 Généralités

L'énergie géothermique est utilisée depuis de nombreuses années pour la production à l'échelle industrielle d'électricité et de chaleur, dans certaines régions du monde où cette énergie est particulièrement abondante (systèmes hydrothermiques); il ne s'agit donc pas à proprement parler d'une source d'énergie nouvelle. Cependant, au cours des dernières années, on s'est intéressé de plus près à

d'autres types de systèmes géothermiques, tels que les roches chaudes et sèches, dont l'utilisation implique la mise en œuvre de technologies nouvelles. De nouveaux procédés et de nouveaux types d'installations sont également mis au point pour permettre une exploitation économique de certains types de systèmes hydrothermiques (saumures chaudes, par exemple) qui ne peuvent être exploités de façon rentable avec les techniques existantes. Ces secteurs de l'énergie géothermique font l'objet à l'heure actuelle de nombreux travaux d'études, de recherche et de développement, tout comme les autres sources d'énergie nouvelle.

Le potentiel géothermique de la terre, c'est-à-dire la teneur en chaleur de la croûte terrestre, est considérable en dépit des contraintes économiques et techniques qui limitent ses possibilités d'exploitation, mais dans l'état actuel des techniques il n'est possible d'utiliser qu'une fraction très infime de cette chaleur.

Actuellement, les seules ressources géothermiques exploitées commercialement sont les systèmes hydrothermiques. Ces systèmes se caractérisent par des formations rocheuses permettant la circulation d'une certaine quantité d'eau (aquifères). Lorsque des conditions géologiques et thermodynamiques particulières permettent l'accumulation de vapeur dans un aquifère, on parle de système à dominante de vapeur. Lorsque le fluide reste sous forme liquide, on parle de système à dominante d'eau. Les systèmes du premier type produisent généralement une vapeur surchauffée, avec des températures pouvant osciller entre 130 °C et plus de 350 °C. Les systèmes du deuxième type se caractérisent par des fluides qui, selon la nature du gisement géothermique, peuvent avoir des températures très différentes (allant de quelques dizaines de degrés à plus de 350 °C) et une teneur en sel souvent très élevée.

Les seules ressources géothermiques exploitées aujourd'hui dans des conditions commerciales, sont les systèmes hydrothermiques. En Europe, ces systèmes alimentent une capacité de production de 472 MWe dont 440 MWe en Italie et 32 MWe en Islande. La capacité totale installée dans le monde est de l'ordre de 1900 MWe.

La part de l'énergie thermique dans la couverture de la demande d'énergie est faible, mais elle appelée à augmenter considérablement dans les années à venir, par suite des nombreux travaux

en cours pour rechercher de nouveaux gisements géothermiques et mettre au point de nouvelles techniques d'exploitation des fluides géothermiques. Bien qu'il soit difficile de prédire l'importance de cet accroissement en raison essentiellement des incertitudes que l'on a quant aux caractéristiques du fluide, qui peuvent réduire considérablement, voire interdire l'exploitation des gisements géothermiques, il est raisonnable de penser que la *quantité d'électricité d'origine hydrothermique pourra certes être importante en termes absolus, mais continuera de ne représenter qu'une part relative infime*, limitée à quelques pays. En ce qui concerne l'Europe occidentale, les seuls pays où les perspectives de développement de l'énergie produite par des systèmes hydrothermiques à dominante de vapeur ou d'eau soient prometteuses, sont l'Italie et l'Islande. L'Italie a lancé un programme intensif de recherche et d'exploration; plusieurs nouveaux gisements, pour la plupart à dominante d'eau, ont été découverts. Cependant, même si ce programme était couronné de succès, la part des nouvelles installations dans la fourniture d'électricité ne serait pour les quinze prochaines années que de l'ordre de 3 TWh an.

Les roches chaudes et sèches offrent des perspectives potentiellement plus intéressantes mais aucune technique éprouvée ne permet aujourd'hui d'utiliser cette ressource. Il nous est donc impossible de dire quand elle deviendra commerciale.

L'utilisation de l'énergie géothermique pour la fourniture de chaleur a connu un nouvel essor après la crise pétrolière de 1973 et l'augmentation du prix des combustibles traditionnels qui en a résulté. Cependant, l'incitation d'ordre économique doit être étudiée cas par cas, à la lumière des différents facteurs locaux dont les principaux sont les caractéristiques du fluide disponible et l'éloignement du gisement géothermique par rapport aux centres de consommation.

2.5 L'énergie de récupération des déchets

2.5.1 Utilisation des déchets urbains pour la production mixte de chaleur et d'électricité dans des centrales chaleur-force

En Europe, la production de déchets urbains par habitant est de l'ordre 0,3 à 0,5 tonne par an, ce qui nous donne 15 millions de tonnes par an en France, 14 millions de tonnes en

Italie et 7 millions de tonnes aux Pays-Bas.

La composition et les caractéristiques physico-chimiques des déchets urbains solides ne varie pas de façon appréciable d'un pays à l'autre. Pour établir la composition par unité de poids, nous pouvons supposer les chiffres suivants: substances celluloseuses 20 à 35%, matières organiques 25 à 45%, matières plastiques 5 à 11%, verre 5 à 10%, métaux 5 à 8%, textiles 1 à 5%. La valeur calorifique dans les grands centres urbains est de l'ordre de 2000 kcal/kg en hiver et 1300 kcal/kg en été; en zone rurale, les chiffres sont respectivement de 1500 kcal/kg et 1200 kcal/kg.

En Europe, les premiers incinérateurs de déchets urbains solides ont été installés immédiatement après la Seconde Guerre mondiale. A l'heure actuelle, plusieurs centaines d'installations de ce type sont exploitées en Europe, mais un petit nombre d'entre elles seulement ont été conçues pour récupérer l'énergie utile. Cette valorisation énergétique est obtenue par production de vapeur utilisée ensuite pour le chauffage ou pour la production mixte chaleur-force.

Les centrales mixtes chaleur-force, qui nous intéressent dans le cadre du présent rapport sont nombreuses dans l'ensemble de l'Europe; elles sont généralement exploitées par l'organisme chargé de la collecte des ordures ménagères et souvent par l'entreprise d'électricité au niveau municipal. Etant donné qu'il ne nous est pas possible de toutes les mentionner ici, nous nous contenterons de citer quelques exemples: trois grandes centrales situées à proximité de Paris, peuvent traiter 2,3 millions de tonnes de déchets par an et produisent 140 millions de kWh d'énergie électrique par an; une centrale de 30 MWe située à Edmonton, Royaume-Uni; quatre centrales aux Pays-Bas, qui peuvent traiter environ 2 millions de tonnes de déchets par an; deux centrales à Vienne qui traitent environ 350 000 tonnes de déchets par an.

2.5.2 Co-combustion des déchets dans les générateurs de vapeur des centrales thermiques

La co-combustion des déchets semble offrir des possibilités intéressantes. Après un conditionnement préalable approprié, les résidus sont brûlés avec un combustible fossile dans les chaudières des centrales à charbon.

Les principaux avantages de cette méthode sont un rendement de conversion élevé (bien supérieur à celui des incinérateurs de déchets) et la possibilité d'éliminer des quantités de déchets importantes dans les installations existantes. En revanche, les déchets doivent arriver à la centrale dûment pré-conditionnés et des problèmes de corrosion risquent de se poser dans les tubes de chaudières.

Du point de vue de l'environnement, le principal problème que pose cette méthode de la co-combustion, vient de l'éventualité d'une formation de polluants organo-chlorés, dans les produits de combustion.

3. Intégration au réseau des centrales utilisant des énergies nouvelles

L'intégration au réseau électrique des centrales utilisant des sources d'énergie nouvelles peut poser des problèmes très différents de ceux que l'on rencontre avec les centrales conventionnelles. Ces problèmes sont dus, notamment, à la disponibilité dans le temps et dans l'espace des sources individuelles, disponibilités qui varient considérablement d'une source à l'autre.

De ce point de vue, les sources d'énergie étudiées dans le présent rapport peuvent être divisées en trois catégories:

- La première catégorie*, qui englobe l'énergie géothermique et l'énergie résultant de la combustion de déchets dans des centrales thermiques, se caractérise généralement par une disponibilité à peu près continue des sources d'énergie; cela permet d'adapter la production de la centrale aux besoins du réseau.
- La deuxième catégorie*, dans laquelle on trouve l'énergie marémotrice, se caractérise par une disponibilité cyclique et prévisible, dont on peut tenir compte dans l'exploitation du réseau.
- La troisième catégorie*, qui englobe l'utilisation directe du rayonnement solaire, l'énergie éolienne et l'énergie des vagues, se caractérise par une extrême variabilité et intermittence des sources d'énergie; ces caractéristiques varient d'une source à l'autre et posent des problèmes spéciaux au niveau de l'intégration au réseau électrique.

Ce sont essentiellement les sources d'énergie de la troisième catégorie, qui nous intéressent ici.

Un deuxième point, qui est peut être caractéristique des sources d'énergie de la troisième catégorie par rapport aux énergies traditionnelles, est la capacité des installations de production qui leur sont associées. Cette capacité peut aller de quelques kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts. Il faut également souligner le fait qu'à l'heure actuelle on s'intéresse tout particulièrement au développement des très petites unités (d'une capacité comprise entre quelques kilowatts et quelques

dizaines de kilowatts) car certains experts considèrent que les installations de cette taille, conçues pour satisfaire des besoins spécifiques, seront les premières à être concurrentielles. Un développement futur de ces petites unités dispersées, et le caractère extrêmement variable de la production de ces centrales, poseraient manifestement des problèmes différents d'exploitation et de protection des réseaux, au niveau de la distribution, du transport et de la production.

Par ailleurs, il faut noter que ces petites unités raccordées au réseau de distribution peuvent être exploitées non pas par un service électrique mais par un consommateur individuel. Dans ce cas, s'ajoutent aux problèmes techniques, les problèmes de tarification et de contrat car le consommateur demandera à l'entreprise d'électricité, de lui assurer une fourniture d'appoint et pourra également lui demander de lui acheter son excédent de production.

Effets des champs électromagnétiques en relation avec la production et la distribution de l'électricité

Rapport du Groupe d'études médicales

Malgré les conclusions rassurantes de nombreuses études, le doute subsiste dans certains milieux que le courant ou les charges induites par des champs électriques intenses, même s'ils sont imperceptibles, peuvent avoir une influence néfaste sur la santé des personnes exposées. Le rapport présente une analyse critique des nombreux travaux réalisés (études d'exposition humaine, enquêtes de santé des travailleurs exposés, études de laboratoires sur des volontaires, études épidémiologiques, expérimentation animale) permettant de définir la méthodologie que de nouvelles études devraient respecter pour être crédibles.

Trotz der beruhigenden Schlussfolgerungen zahlreicher Studien besteht die Befürchtung, dass von starken elektrischen Feldern induzierte Ströme oder Ladungen, auch wenn sie nicht wahrnehmbar sind, die Gesundheit der ihnen ausgesetzten Personen beeinträchtigen können. Der Bericht enthält eine kritische Analyse der zahlreichen bisherigen Arbeiten (Untersuchungen der menschlichen Gefährdung, Reihenuntersuchungen von exponierten Arbeitern, Laboruntersuchungen an Freiwilligen, epidemiologische Untersuchungen, Tierversuche) und ermöglicht die Festlegung der für weitere Studien notwendigen Methodik.

Rapport établi par
J. Bonnel, Dr med., Central Electricity Generating Board,
Sudbury House, 15 Newgate Street, GB-London
EC1A 7AU.

1. Introduction

Le transport d'énergie électrique par des lignes électriques aériennes de courant alternatif haute tension est bien établi. De même certains problèmes qui y sont associés, notamment bruit, brouillage de la transmission radio et télévision et danger de courts-circuits sont bien maîtrisés. Des rapports concernant l'apparition de symptômes subjectifs tels que céphalées, lassitude, nausées et perte de libido chez des travailleurs de sous-stations en *Union des Républiques Socialistes Soviétiques* (URSS) ont été publiés en 1966 [1]. Ces rapports ont été suivis par d'autres publiés entre 1967 et 1972 en URSS [20; 34]. On a laissé entendre que ces symptômes étaient dus à l'exposition pendant le travail à des champs électriques intenses dans des sous-stations de 500 kV et 765 kV. Dans quelques-uns des rapports soviétiques, on a laissé entendre que les travailleurs avaient subi fréquemment de légers chocs et que ceux-ci étaient la cause de ces symptômes.

Malgré le contenu rassurant des rapports publiés par les chercheurs d'Europe occidentale et d'Amérique du Nord [21; 27; 37], un doute subsiste dans certains milieux que les courants ou les charges induites par des champs électriques intenses, même s'ils sont imperceptibles, peuvent détériorer la santé des personnes exposées.

Dans ce rapport, il sera question des travaux publiés précédemment sur le sujet en insistant en particulier sur les aspects qui se rapportent essentiellement aux études sur l'homme, tout en donnant une indication sur le travail futur dans les pays membres.

Michaelson [27], dans une analyse critique des rapports établis dans le domaine des réactions de l'homme aux expositions à la fréquence d'alimentation, a énuméré les déclarations faites au sujet des effets des champs haute tension sur la santé, à savoir:

- a) que les informations disponibles n'étaient pas suffisantes pour porter un jugement,
- b) que les champs électriques provoquent «probablement» des effets biologiques et agissent comme des agents stressants,
- c) que de légers effets de champs électriques ont été rapportés, et
- d) que des chercheurs soviétiques avaient fait état de symptômes subjectifs chez des personnes travaillant dans des sous-stations haute tension.

Afin d'étudier certains de ces effets possibles, de nombreuses expériences sur les animaux, de grande envergure et coûteuses, ont été entreprises aux *Etats-Unis d'Amérique*, en *France* et en *Italie*. Etant donné que l'une des difficultés liées à toutes les expérimentations animales est l'interprétation des