

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	81 (1990)
<b>Heft:</b>	2
<b>Artikel:</b>	Possibilités technologiques pour l'approvisionnement de demain
<b>Autor:</b>	Hossli, W.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-903068">https://doi.org/10.5169/seals-903068</a>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 21.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Possibilités technologiques pour l'approvisionnement de demain

W. Hossli



**La sauvegarde de l'environnement est désormais l'élément dominant de toute considération de nature énergétique. Les méthodes et techniques mises au point dans ce but présentent de bons résultats et débouchent sur un vaste potentiel de développement.**

## Souci pour l'environnement

Contrairement au congrès mondial précédent, qui se préoccupa surtout des réserves limitées d'énergie primaire, la réunion de Montréal a été marquée par le souci des atteintes à l'environnement résultant de l'utilisation des différentes sources d'énergie.

Toutes les technologies d'avenir susceptibles de transformer les matières premières en énergies utiles ont fait l'objet d'une présentation sous l'angle spécifique de leurs avantages écologiques. On accorda à Montréal une attention particulière aux possibilités d'éviter ou de réduire les émissions polluantes et, surtout, celles du CO<sub>2</sub> compte tenu du rôle qu'il joue dans «l'effet de serre».

C'est une approche qui devait mettre en relief l'énergie nucléaire, même si tous les participants étaient bien conscients que le problème de l'acceptation par le public était loin d'être résolu. C'est ce qu'a notamment souligné dans son exposé introductif l'Anglais Lord Marshall of Goring.

## Energie nucléaire

Sur le plan technique, les progrès réalisés dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sont évidents. Ils s'ajoutent à ses atouts en matière de protection de l'environnement: pas de rejets toxiques en cours d'exploitation, pas de production de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), pas de consommation d'oxygène, et possibilité de récupérer les rejets de chaleur à des fins de chauffage urbain, ce qui permet de surcroît de réduire le recours aux combustibles fossiles. Bien que les avis divergent, le stockage final

des déchets radioactifs est technique résolu.

Le risque potentiel d'accidents est un autre point de critique que subit le nucléaire. Or, les taux de sécurité d'exploitation, qui avaient d'ores et déjà atteint un niveau standard très satisfaisant, ont été récemment marqué par d'incontestables progrès, dont nous présentons ci-après quelques exemples:

## Réacteurs avancés à eau légère

Presque tous les fabricants de réacteurs à eau légère travaillent sur de nouveaux concepts de techniques de sûreté. Ces travaux, même s'ils n'ont pas été réalisés avec des techniques et des moyens équivalents, révèlent une tendance commune. L'un des principaux objectifs visés est de pouvoir se passer d'interventions humaines en cas de perturbation ou tout au moins de ménager aux techniciens des délais d'action beaucoup plus longs. Comment? En substituant aux mesures de sécurité actives des mécanismes de prévention passifs qui s'enclenchent de manière automatique. Outre le renforcement des coefficients de température négatifs, on recourt notamment à la force de gravité, à la convection naturelle ou à la vaporisation, afin d'assurer l'apport et la circulation des moyens réfrigérants sans devoir se préoccuper des systèmes actifs de la centrale, telles les pompes et leurs commandes. C'est ainsi que les délais ne nécessitant aucune intervention humaine en cas de perturbation sont sensiblement rallongés. On évoque à ce propos des ordres de grandeurs de plus d'une semaine.

### Adresse de l'auteur

Walter Hossli, directeur ABB ASEA Brown Boveri SA, case postale 8131, 8050 Zurich

## Réacteurs à haute température refroidis au gaz

Ce type de réacteur présente grossièrement les mêmes caractéristiques de sûreté que les modèles à eau légère avancés, avec l'avantage supplémentaire de la mise à disposition de grandes quantités de chaleur à haute température, indispensable pour certains procédés de fabrication industrielle.

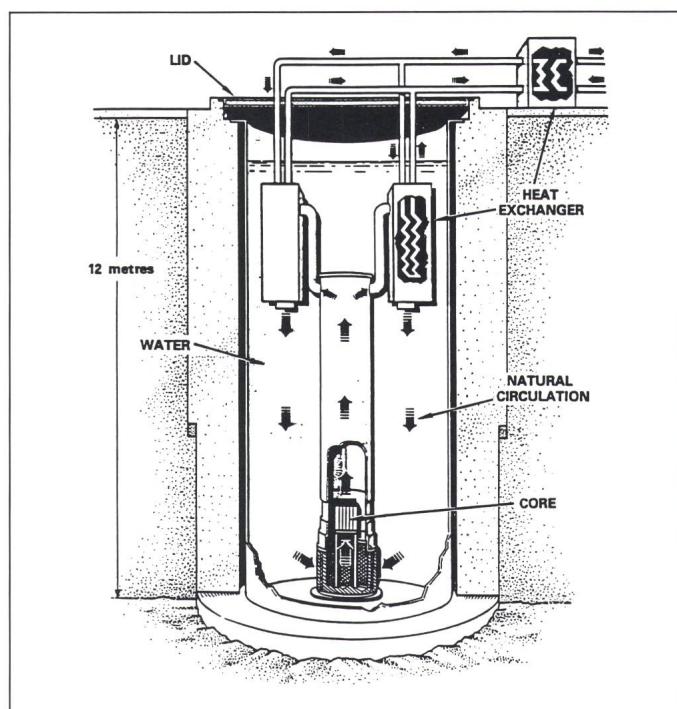
## Réacteurs de chauffage

A partir de ces technologies, on a développé des projets de petits réacteurs thermiques (de l'ordre de 10 MW) qui, grâce à leur simplicité, pour-

raient être exploités pratiquement sans personnel permanent et qui, grâce à leur stabilité inhérente, pourraient être installés dans des régions fortement urbanisées. Autre avantage: des durées d'exploitation de plusieurs années avec la même charge de combustible. Exemples: le réacteur canadien «Slowpoke» (fig. 1), le modèle à eau légère «Geysir» et celui à haute température refroidi au gaz GHR.

## Fusion nucléaire

De substantiels progrès ont été réalisés dans les connaissances théoriques et pratiques des phénomènes de fusion thermonucléaire. Des deux méthodes poursuivies, c'est celle de l'occlusion magnétique d'un plasma à très haute température (Tokamak, JET) qui semble présenter le plus rapide potentiel de réalisation, par rapport à celle du confinement inertial. Après les



**Figure 1**  
**Exemple d'un**  
**réacteur de**  
**chauffage: le**  
**réacteur canadien**  
**«Slowpoke»**

raient être exploités pratiquement sans personnel permanent et qui, grâce à leur stabilité inhérente, pourraient être installés dans des régions fortement urbanisées. Autre avantage: des durées d'exploitation de plusieurs années avec la même charge de combustible. Exemples: le réacteur canadien «Slowpoke» (fig. 1), le modèle à eau légère «Geysir» et celui à haute température refroidi au gaz GHR.

## Surgénérateurs

Les réacteurs à neutrons rapides, dont l'intérêt est surtout déterminé par

nombreux travaux théoriques des dernières décennies et au vu des expériences réalisées dans les différents centres de recherche sur la fusion, on peut désormais envisager la réalisation d'un «Engineering Test Reactor» (ETR). Il a été possible de mettre sur pied un tel projet sous le nom ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) dans le cadre de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). La phase de définition de cet ITER fut achevée en 1988. Les travaux de construction devraient aboutir d'ici la fin de 1990, alors que la mise en service est prévue vers 2002-05.

## Les énergies renouvelables

### Energie solaire

Outre les techniques désormais bien connues de fourniture de chaleur au moyen de capteurs solaires, qui se heurtent toutefois à des problèmes de coûts, les spécialistes réunis à Montréal se sont notamment intéressés aux possibilités de production d'électricité. Un procédé susceptible de se développer sous certaines conditions présente un potentiel non négligeable. Dans ce système, qui porte le nom de «Luz», le rayonnement est piégé dans des espace d'auges solaires contenant un fluide caloporteur. Une fois réchauffé, celui-ci est transporté dans un générateur de vapeur, afin d'y être transformé en électricité au moyen d'une installation sophistiquée de turbine à vapeur avec resurchauffe. Les auges de captage suivent la course du soleil sur un seul essieu, ce qui réduit considérablement les coûts de l'installation. En cas d'utilisation particulière (par exemple la nuit), il est possible de réchauffer le fluide caloporteur dans des chaudières d'appoint à mazout ou à gaz. Les puissances nettes actuellement disponibles se situent autour de 80 mégawatts. Plusieurs de ces installations sont en exploitation ou en construction en Californie. L'électricité qu'elles produisent est injectée dans le réseau public à des prix généralement concurrentiels.

La transformation photovoltaïque du rayonnement solaire en électricité n'a pas perdu de son intérêt. Le gros des efforts de développement réside dans l'amélioration des taux de conversion et la diminution des coûts de fabrication. Les cellules de silicium monocristallines présentent de prometteuses perspectives pour ce qui concerne les taux de conversion, ainsi que les piles en couches minces pour ce qui touche aux coûts de production. Une solution de compromis pourrait apparaître avec le développement des cellules polycristallines. Des progrès réels devront encore être réalisés avant que l'on parvienne à tirer de cette technologie une énergie concurrentielle. Aujourd'hui, les coûts par unité d'énergie restent près de dix fois plus élevés que pour l'électricité issue de centrales conventionnelles (hydraulique, charbon, fuel, gaz, nucléaire).

### Hydroélectricité

Les spécialistes n'envisagent pas de progrès techniques de grande portée

dans le domaine de l'exploitation du potentiel hydroélectrique mondial. Tout au plus va-t-on développer le recours aux minicentrales pour mettre en valeur les capacités hydrauliques locales. De grands ouvrages pourront être construits dans des régions reculées avec les technologies traditionnelles, quoique se posera souvent le problème du transport de l'électricité produite sur d'immenses distances jusqu'aux centres de consommation.

Une forme particulière d'énergie hydraulique réside dans l'exploitation du mouvement des marées. Les baies en forme d'entonnoirs soumises à de fortes amplitudes s'y prêtent particulièrement bien. Outre l'extension de l'installation pilote d'Anapolis, sur la côte orientale du Canada (Fundy Bay), il est aujourd'hui beaucoup question de la construction d'une centrale marémotrice dans l'estuaire de Severn, en Grande-Bretagne, pour laquelle on prévoit une puissance totale de 8640 MW, ce qui correspond à 1100 MW de puissance constante.

## Eolienne

On n'envisage pas non plus de progrès décisifs en matière d'énergie éolienne. Les perspectives ne sont guère favorables. Des mesures systématiques sur de longues périodes, notamment aux Pays-Bas, révèlent que le rendement des génératrices éoliennes reste relativement faible à cause des fluctuations des vents et n'excède pas, dans de bonnes conditions, des taux de 15 à 25%. La production d'électricité en devient beaucoup trop onéreuse.

Même s'ils peuvent contribuer à une production d'électricité sans émissions nocives, ces systèmes restent marginaux et ne pourront guère devenir véritablement concurrentiels, à l'exception des grandes centrales hydrauliques de conception traditionnelle.

## Hydrogène

L'hydrogène est en soi un remarquable agent énergétique dans la mesure où sa combustion, à l'exception d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), ne produit pas de gaz toxiques, ni de  $\text{CO}_2$ . Et les oxydes d'azote peuvent être éliminés par voie catalytique.

Cela étant, l'hydrogène ne se trouve pas en quantités suffisantes à l'état naturel. Il faut donc le produire artificiellement. On peut en tirer de l'électrolyse, mais celle-ci exige d'importantes quantités d'électricité nécessaires, et

l'on se retrouve alors confronté au problème de la production de courant. Une autre possibilité réside dans la production thermolytique d'hydrogène. Mais là encore, il faut mettre préalablement en œuvre un procédé pour fournir l'énergie thermique aux (hautes) températures nécessaires, soit à partir des énergies fossiles avec leurs atteintes à l'environnement, soit avec le nucléaire avec ses problèmes d'acceptation par le public. Quant à l'idée du recours à l'énergie solaire dans des zones désertiques ou dans l'espace, sa concrétisation, pour autant qu'elle soit réaliste, n'est dans tous les cas pas pour demain.

## Energies fossiles

Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) sont utilisées soit directement à des fins de combustion et de carburants, soit indirectement pour produire de l'électricité dans des centrales conventionnelles. Dans un cas comme dans l'autre, on voit apparaître divers développements visant à réduire les taux de gaz polluants et de  $\text{CO}_2$  produits par unité d'énergie finale.

Il existe, pour tous les types de combustibles, des procédés modernes d'épuration des gaz d'échappement qui permettent pour le moins de réduire de manière sensible les polluants  $\text{NO}_x$  et  $\text{SO}_x$ . Les dispositifs de désulfuration peuvent capturer plus de 90% des oxydes de sulfure en les transformant en gypse ou en soufre élémentai-

re, respectivement en acide sulfurique. Mais là encore, ce sont de nouveaux types de déchets qu'il faut également neutraliser. Même s'ils sont utiles pour certaines applications industrielles, les masses produites sont telles qu'il faut d'ores et déjà créer des sites de stockage pour les accueillir.

En revanche, il n'existe aucune possibilité de retenir le gaz carbonique. On assiste bien à quelques tentatives de procédés complexes mais qui convergent vers la solution douteuse de dépôts souterrains. On peut toutefois agir sur les quantités de  $\text{CO}_2$  produites en utilisant davantage de combustibles avec des taux de carbone réduits, à commencer par le gaz naturel.

## Charbon

Dans des grandes chaudières conventionnelles, il est possible de réduire de plus de moitié la production de  $\text{NO}_x$  grâce à une configuration particulière des brûleurs avec une combustion quasi stoechiométrique et une arrivée d'air d'appoint destiné à la postcombustion. En outre, des adjonctions de chaux ou de dolomie permettent de lier le soufre en cours de combustion et de le soustraire au circuit en tant que partie constitutive des cendres volantes. Enfin, les cendres présentent un important potentiel de réutilisation pour la fabrication de matériaux de construction.

On arrive aux meilleures résultats avec des chaudières à colonne fluidi-

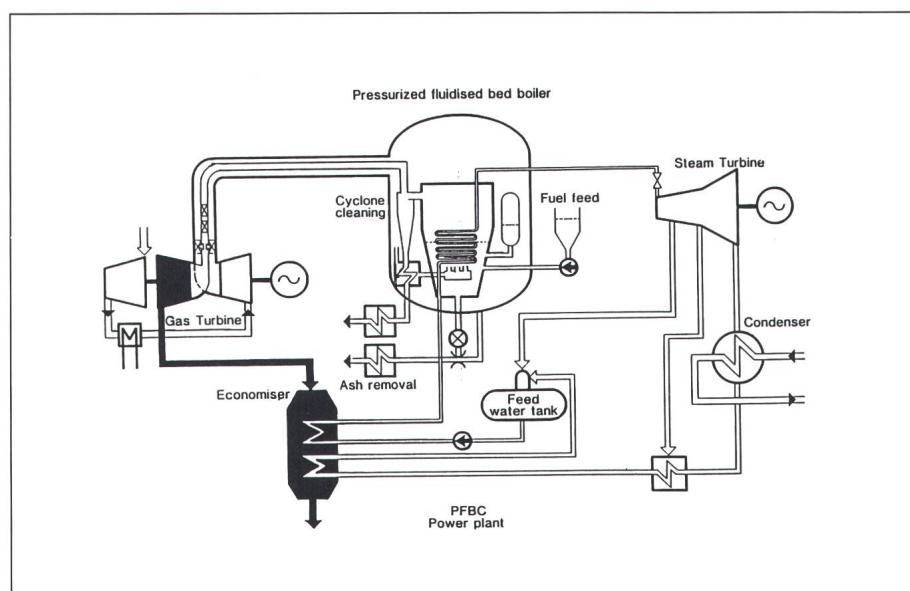


Figure 2 Principe d'une chaudière à colonne fluidisée; Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC)

sée (Fluidized Bed Combustion). La température de combustion étant seulement 850 °C on peut réduire très fortement la formation de NO<sub>x</sub>. De telles chaudières peuvent être conçues pour travailler à la pression atmosphérique en tant que «Bubbling Fluidized Bed Combustion» (BFBC) ou «Circulating Fluidized Bed Combustion» (CFBC) ou encore, pour le travail sous pression, en tant que «Pressurized Fluidized Bed Combustion» (PFBC). Grâce aux dimensions réduites de ce système, on peut s'attendre pour le PFBC à des coûts réduits et, simultanément, un plus grand potentiel pour la réalisation de grands unités de production.

Ce même PFBC permet d'autre part la mise en œuvre d'un processus combiné intégré, c'est-à-dire une combinaison de procédés avec turbines à gaz et à vapeur (fig. 2) qui, grâce à un meilleur rendement, débouche sur une certaine réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie. Les petites quantités d'éléments polluants subsistantes satisfont dès lors à toutes les prescriptions, en partie très sévères, sur la protection de l'air en vigueur dans le monde.

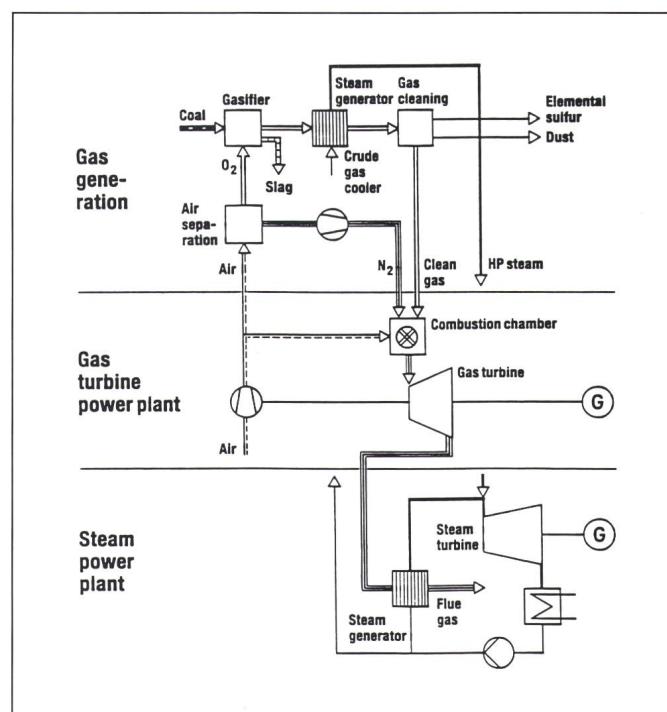
Il existe un autre procédé, qui en est toutefois encore à un stade d'expérimentation: la gazéification du charbon, connue sous le nom «Integrated Gasification Combined Cycle Plant» (IGCC) (fig. 3). Il s'agit, comme son nom l'indique, de transformer le charbon en gaz au moyen de différents procédés chimiques (Lurgi, Texaco, Shell, par exemple, ont chacun le sien). Le gaz peut être ensuite normalement utilisé dans une centrale mixte.

Si l'on compare la centrale mixte PFBC, relativement simple, avec une usine IGCC, on constate que les rendements sont pratiquement égaux. Mais ces deux systèmes devront encore faire leurs preuves dans la pratique. C'est pourquoi il est prématuré de prendre des paris sur les chances de l'une ou l'autre de ces technologies.

## Pétrole, gaz

Il existe aujourd'hui déjà des procédés combinés pour produire dans de meilleures conditions écologiques de l'électricité en utilisant du fuel ou du gaz naturel comme énergie primaire. Et on entend bien les perfectionner à l'avenir. Grâce au taux de rendement favorable de ces installations – près de 50% – il est possible de réduire les émissions spécifiques de CO<sub>2</sub>. On peut même obtenir un rendement de plus de

**Figure 3**  
Principe de la gazéification du charbon; Integrated Gasification Combined Cycle Plant (IGCC)



80% en équipant la centrale électrique d'un système de chauffage à distance. Et puis le gaz présente des avantages supplémentaires. Il est pratiquement dépourvu de soufre et sa combustion, compte tenu de sa teneur élevée en hydrogène, dégage moins de CO<sub>2</sub> par kWh produit que les autres combustibles. En outre, la formation de NO<sub>x</sub> est fortement restreinte au moyen d'une chambre de combustion spéciale.

## Nouvelles techniques d'énergie

### Piles à combustible

Il est une autre méthode de production d'électricité qui fait l'objet de recherches depuis plusieurs années: la transformation de combustibles gazeux au moyen des piles à combustible, ce que les spécialistes appellent les «fuel cells». Pour réaliser la conversion, ces cellules sont soumises à un procédé électrochimique que l'on peut comparer à une électrolyse inversée. Contrairement à la batterie, qui constitue un système fermé, les piles sont alimentées en permanence avec des réactifs chimiques, c'est-à-dire du combustible et de l'oxygène, respectivement un agent oxydant, ce qui a pour effet d'entretenir une production de courant.

Les piles à combustible à base d'acide phosphorique utilisent aujourd'hui l'hydrogène. Elles travaillent à une température de 200 °C et atteignent un rendement de presque 50% (fig. 4).

Le développement de ce système se poursuit actuellement en vue d'obtenir des températures de service plus élevées, avec la combustion directe de gaz naturel. Les exemples les plus connus en sont les cellules issues de carbonates fondus ou les piles céramiques à haute température. On espère y réaliser des rendements de l'ordre de 60% (fig. 5). Un tel taux permettrait de maintenir la production de CO<sub>2</sub> à un niveau relativement bas puisque le combustible utilisé est du gaz naturel.

On prévoit pour le milieu des années 90 les premières installations de piles à combustible en usage commercial pour produire de l'électricité dans des gammes de puissance moyennes.

### Biomasse

Contrairement à certaines idées reçues, l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques n'est pas innocente. Sa combustion dégage des gaz polluants, essentiellement des oxydes d'azote et du gaz carbonique. La nécessité de réduire les NO<sub>x</sub> passe par des mesures techniques relativement onéreuses. En revanche, on peut estimer que le problème du CO<sub>2</sub> est bénin dans

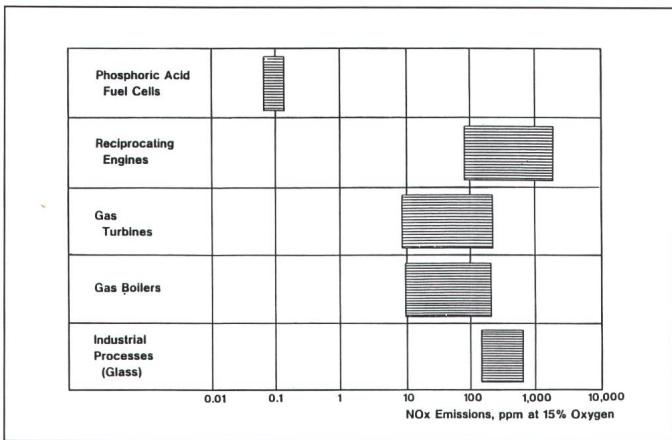


Figure 4 Comparaison des émissions de NO<sub>x</sub> propres à divers procédés

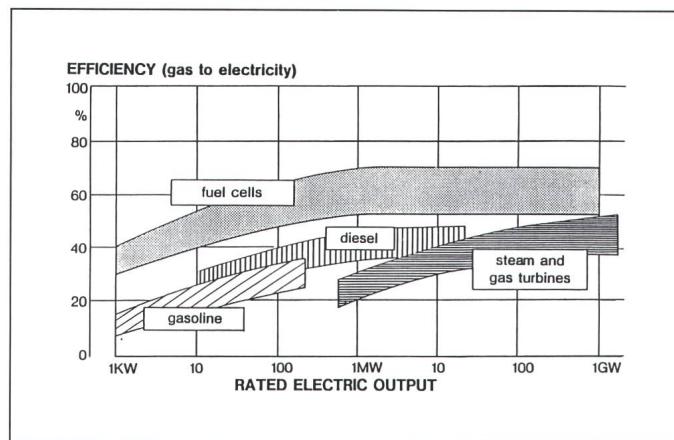


Figure 5 Comparaison du rendement de divers systèmes de transformation d'énergie pour la production d'électricité

la mesure où l'accroissement naturel de la biomasse est en équilibre avec sa combustion, les nouvelles pousses absorbant l'équivalent de gaz carbonique produit.

## Economies, améliorations chez le consommateur

Il convient aussi de ne pas perdre de vue les nombreuses possibilités qui nous permettent, sans pour autant devoir renoncer à leur usage, de réduire de manière significative nos besoins en énergie – qu'il s'agisse de combustibles ou d'électricité – et d'atténuer d'autant les rejets de polluants et de gaz carbonique.

La réduction des pertes dans le domaine du transport et de l'utilisation de l'électricité est un premier pas dans ce sens. Il existe de nombreux moyens techniques pour y parvenir. En matière de transport, on peut diminuer les pertes en utilisant des tensions plus élevées pour les systèmes de courant alternatif ou par le recours à la transmission de courant continu à haute tension.

Les supraconducteurs sont également riches en promesses: une fois opérationnels, ils permettront aux appareils et systèmes électriques de travailler pratiquement sans perte. Grâce à l'optimisation des réseaux et à une bonne gestion des charges, avec l'aide

de l'électronique moderne, il devient en outre possible de rationaliser la production d'énergie.

L'amélioration des taux de rendement permet d'économiser de l'énergie de base dans toutes les formes de conversion, des appareils électroménagers les plus simples aux équipements industriels les plus sophistiqués. Les pompes à chaleur ont la particularité de mettre en valeur les basses températures de l'environnement, ce qui conduit à des économies massives de combustibles fossiles ou d'électricité de chauffage.

L'ensemble de ces possibilités, ainsi que d'autres, pourraient se traduire par des diminutions, directes ou indirectes, des émissions de gaz polluants et de CO<sub>2</sub>, tout en préservant simultanément les réserves d'énergie brute que recèle notre planète.

Les objectifs définis dans le cadre de la Conférence mondiale de l'énergie de 1989 ne sont donc pas contradictoires avec ceux de la réunion de 1986. Les uns et les autres se soudent au contraire en une stratégie globale cohérente.

## Résumé

S'il existe des méthodes éprouvées pour réduire les effets nocifs de certains gaz tels les SO<sub>x</sub>, les NO<sub>x</sub>, le CO, les hydrocarbures ou autres fréons, ou pour les «capturer», tel n'est pas le cas

pour le CO<sub>2</sub>. Il n'y a guère que des mesures d'économies des combustibles fossiles ou de substitution qui pourraient réduire de manière significative l'accumulation de gaz carbonique. Et ils sont nombreux ceux qui, à Montréal, ont souligné le rôle que pourrait jouer l'énergie nucléaire dans ce domaine, notamment avec la mise en œuvre d'une nouvelle génération de réacteurs dotés de systèmes de sécurité passifs.

Dans le domaine des énergies fossiles, ce sont les économies, la diminution des pertes et la réduction des rejets polluants et de gaz carbonique qui sont au premier plan des préoccupations. A cet égard, il convient de mettre en œuvre toutes les possibilités d'amélioration, même si certaines contributions peuvent s'avérer négligeables. C'est la somme des efforts consentis qui conduira au succès. Ceci vaut tant pour les producteurs que pour les consommateurs. Une utilisation plus rationnelle de l'énergie par le couplage chaleur-force, à commencer par les centrales électriques équipées de réseau de chauffage à distance, devra être favorisée le plus largement possible.

Telles sont quelques-unes des nombreuses possibilités évoquées dans le cadre de la Conférence mondiale de l'énergie à Montréal. Il revient à chacun de les mettre en œuvre là où il le peut.