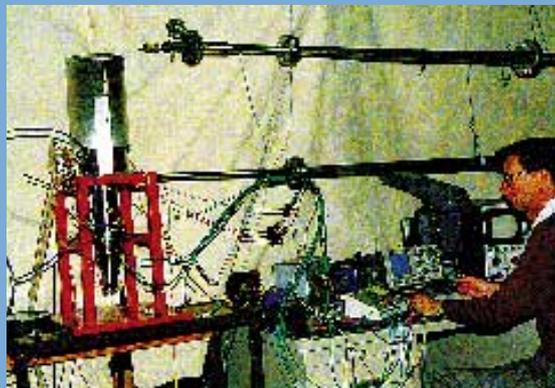


La recherche énergétique relevant des pouvoirs publics en Suisse



Pourquoi cette brochure?

Ce n'est pas par souci de notoriété que l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) vient allonger la liste des parutions suisses. A l'origine de la présente brochure, il y a quelques bonnes raisons et un événement.

Première raison: chaque année, **la collectivité publique suisse consacre 200 millions de francs à la recherche énergétique**, une bonne partie de ce montant étant destinée à soutenir les travaux qui se font dans le secteur privé. Si la population est informée à intervalles réguliers de l'affectation des sommes engagées, ce n'est en général que par de brefs communiqués de presse. Or elle a droit à davantage de précisions. Tel est le but de cette publication, plus détaillée sans être trop longue.

Deuxième raison: **la combustion d'hydrocarbures dans le chauffage et dans les transports est la cause principale de pollution de l'environnement**. Ainsi, rechercher des techniques énergétiques nouvelles et plus efficaces, c'est travailler à la protection de l'environnement.

Troisième raison: **encore aujourd'hui, la Suisse importe 80 % de l'énergie dont elle a besoin**, sous forme de pétrole et de produits pétroliers, principalement; en outre, les réserves d'hydrocarbures ne sont pas inépuisables. En explorant des techniques innovatives et plus efficaces, la recherche énergétique a donc un rôle vital à jouer. Une importance primordiale revient ensuite au transfert des résultats obtenus, c'est-à-dire à leur application dans des produits et des procédés de tous les jours. Par les choix qu'il opère, le simple citoyen décide bien souvent de la percée d'un tel produit ou de son rejet. Il doit donc savoir le pourquoi et le comment de la recherche. Tel est l'objet de cette brochure.

Quant à l'événement qui justifie, à nos yeux, cette publication, c'est **la réorganisation de l'OFEN en 1996**. L'intention est de coordonner encore mieux les travaux de recherche dans notre pays, notamment le transfert des résultats dans la pratique.

Il faut mentionner une quatrième bonne raison. **Car si le contenu de la brochure doit en intéresser plus d'un, pour quelques personnes, il est carrément important**: celui qui a une idée à creuser pourrait y trouver les voies et moyens d'obtenir une aide technique, voire financière.

Entre l'exhaustivité souhaitable et la brièveté souhaitée, cette publication n'échappe pas au compromis. Nous espérons pourtant qu'elle rendra service.

Office fédéral de l'énergie

Printemps 1997

»L'énergie est le sang de l'économie
et une clef de la protection de
l'environnement«

Jeanne Hersch
philosophe, Genève

Impressum:

Office fédéral de l'énergie,
3003 Berne

Cette brochure s'obtient gratuitement, au même titre que tous les rapports annuels et finaux concernant la recherche énergétique, chez:
ENET, Schachenallee 29, 5000 Aarau, fax 062 - 834 03 23, ou
Thunstrasse 115, 3000 Berne 16, fax 031 - 352 77 56

La recherche énergétique – une tâche également politique

Ce qui est vrai pour la recherche en général s'applique tout particulièrement à la recherche énergétique: un pays industrialisé tel que la Suisse, modérément doté en sources d'énergie, ne peut se maintenir dans la compétition économique internationale qu'en appliquant des techniques innovatives. Il faut toutefois préciser que **les priorités de la recherche énergétique se sont nettement déplacées ces dernières décennies**. Si la **sécurité d'approvisionnement**, notion quantitative, figurait seule au premier rang des préoccupations dans les années 1970, dix ans plus tard, des notions qualitatives telles que la **protection de l'environnement** et l'économie des ressources sont devenues prépondérantes. Cette mutation des valeurs n'a pas tardé à influencer la politique suisse de l'énergie et les principes directeurs de la recherche énergétique publique.

La recherche énergétique absorbe **10 %** des dépenses globales consacrées en Suisse à la recherche et au développement, soit **un milliard de francs par année**, approximativement; rapporté au produit national brut, le montant n'est nulle part plus élevé, sauf au Japon. Le secteur privé en fournit les quatre cinquièmes. Cependant, il en consacre plus de 80 % au développement de produits et moins de 20 % à la recherche énergétique proprement dite, y compris le développement préindustriel. Ainsi, celle-ci est **soutenue à parts à peu près égales par l'économie privée et par la collectivité**.

Des fonds publics pour la recherche privée, cela ne va-t-il pas à l'encontre des principes helvétiques? Certes, l'industrie suisse a toujours tenu à son indépendance. **Mais depuis les années 1980**, la coopération avec les pouvoirs publics dans la recherche, avant tout dans le domaine de l'énergie, s'est faite de plus en plus étroite. Aujourd'hui, le secteur privé a son mot à dire jusque dans la définition de la recherche énergétique des pouvoirs publics. Il faut ajouter que dans ce domaine spécifique, le principe qui veut que l'Etat assume la formation et la recherche fondamentale, alors que la recherche pratique et le développement relèvent du secteur privé, n'est que partiellement valable: **les bas prix des agents énergétiques classiques entravent l'application de techniques nouvelles**, quand ils ne l'empêchent pas, parce que le développement comporte un risque financier excessif pour l'économie privée.

De son côté, **le citoyen manifeste un intérêt incontestable** pour la diffusion des techniques énergétiques nouvelles, surtout si elles sont peu polluantes, de sorte que les pouvoirs publics se doivent de mener leurs recherches main dans la main avec le secteur privé. Il en résulte sans doute quelques problèmes de répartition, mais les possibilités de mise en oeuvre des résultats obtenus sont bien meilleures.

L'orientation générale est donnée dans le **«Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération»**, mis à jour tous les quatre ans par la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE) et soumis pour approbation au Conseil fédéral. L'OFEN assure la coordination des travaux et leur suivi.

La priorité de la politique suisse de l'énergie: un approvisionnement énergétique durablement sûr, peu polluant et économiquement supportable.



Recherche dans le domaine des **transports**: ce véhicule électrique non polluant, fabriqué en Suisse, pourrait devenir un taxi de l'avenir. En 1996, il a été utilisé pour amener les visiteurs à l'exposition d'automobiles de Leipzig.



Recherche dans le domaine des **diverses biomasses**: les procédés nouveaux appliqués dans l'installation de compostage à Baar se traduisent par des retombées minimales pour l'environnement.

Petit vocabulaire de la recherche énergétique

La **recherche énergétique** comprend l'acquisition et le transfert d'enseignements scientifiques, techniques, économiques et socio-politiques pouvant servir à couvrir les besoins actuels et futurs d'énergie de manière efficace, économique et compatible avec l'environnement.

Le gros de l'effort de **la recherche énergétique publique** concerne les travaux axés sur l'application: ses résultats devraient se retrouver dans un produit, dans une installation transformatrice d'énergie, dans l'amélioration de mesures ou de procédés connus, etc.

La recherche énergétique est **de nature interdisciplinaire**, car elle allie la mécanique et l'électrotechnique à la physique, la chimie, la science des matériaux, la biologie et l'informatique, ainsi que l'économie et la sociologie. Il en résulte souvent des synergies profitables pour la recherche énergétique, surtout en Suisse, où les mêmes instituts, voire les mêmes personnes s'occupent à la fois de la recherche énergétique et d'autres recherches.

Les **installations pilotes et de démonstration** sont un élément essentiel de la recherche énergétique, parce qu'elles accélèrent le transfert des résultats dans la pratique.

L'**installation pilote** est une première réalisation hors laboratoire, à une échelle permettant de vérifier le fonctionnement.

Si les essais sont concluants, on passe ensuite à l'**installation de démonstration** en vraie grandeur; alors on pourra faire une appréciation sévère des qualités techniques, économiques et écologiques de l'installation et en **évaluer les chances sur le marché**.

Enfin, il n'est pas rare que la **mise sur le marché** interpelle aussi la recherche, avec des questions d'acceptation du produit, de retombées sur l'environnement et d'intégration économique, et avec des problèmes qui relèvent des sciences sociales.

Le pourquoi
de la
recherche
publique

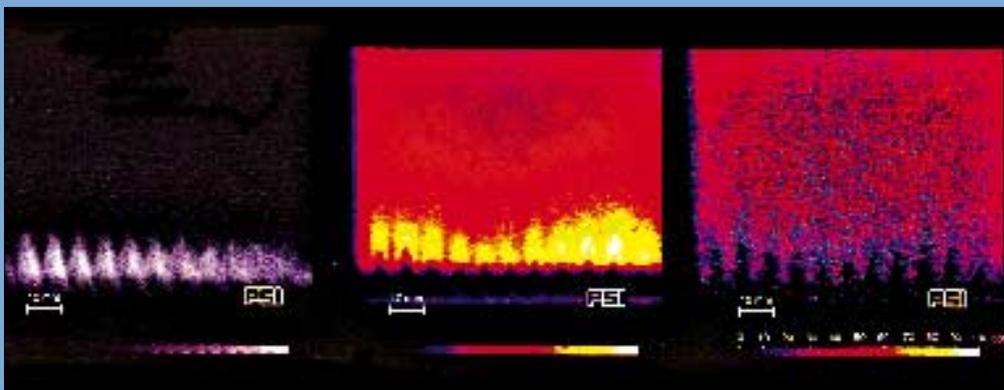
Stratégie de la recherche énergétique pour le proche avenir

La réorientation de la politique de l'énergie au cours des années 1970 a fait de la recherche énergétique l'un des piliers de son action. Dans l'intervalle, on a formulé les principes qui la régissent:

- ❑ La recherche énergétique doit obéir aux impératifs du mandat politique donné par la Constitution fédérale: dans les limites de leurs compétences, **la Confédération et les Cantons s'emploient à promouvoir un approvisionnement énergétique suffisant, diversifié, sûr, économique et compatible avec les exigences de la protection de l'environnement, ainsi qu'une consommation économe et rationnelle de l'énergie.**
- ❑ Les **priorités** de la recherche énergétique s'inspirent des **perspectives à long terme de la politique de l'énergie.**
- ❑ Il faut viser une **recherche de grande qualité, bien coordonnée.** La continuité en sera assurée par l'octroi durable des moyens nécessaires en personnel et en argent.
- ❑ La recherche énergétique doit être entreprise et menée **dans les institutions existantes.**
- ❑ Dans les domaines de recherche les plus prioritaires, il faut encourager la **formation de groupes de chercheurs suffisamment bien dotés sur les plans personnel et matériel** pour assurer la continuité des travaux et leur haut niveau.
- ❑ **La Confédération soutient les travaux du secteur privé dans le respect du principe de subsidiarité** (c.-à-d. là où les moyens de l'économie privée ne suffisent pas).
- ❑ La recherche énergétique doit s'appuyer sur une **vision globale**, qui tienne compte en particulier des liens entre la technique et l'environnement ainsi que des aspects socio-économiques; on encouragera l'innovation.
- ❑ Grâce à la **collaboration internationale**, on accroîtra l'efficacité des moyens mis en oeuvre.
- ❑ La recherche énergétique publique doit également assumer une part de responsabilité dans la **formation et le perfectionnement de personnel** scientifique et technique, dans le **transfert des connaissances** (mise en oeuvre des résultats dans la pratique) et dans **l'information du public** sur les enseignements nouveaux obtenus.

De ces principes découle la **stratégie de la recherche énergétique pour le proche avenir.**

- ❑ Contribuer à **réduire la consommation d'énergie par l'augmentation du rendement final ainsi qu'en améliorant et en renouvelant les techniques** requises pour produire, transformer, stocker et distribuer la chaleur et l'électricité. Développer le **recours aux agents renouvelables.**
- ❑ Poursuivre la recherche de **techniques de combustion et de chauffage plus propres et plus efficaces**, sans négliger les nouveaux agents énergétiques chimiques.
- ❑ Continuer d'assurer la **sécurité de la production d'électricité nucléaire** et poursuivre les travaux sur la **fusion nucléaire comme option à long terme** (en renonçant toutefois à l'étude des réacteurs surgénérateurs).
- ❑ **Etudier les phénomènes dans leur intégralité**, c'est-à-dire avec leurs tenants et leurs aboutissants (p.ex.: flux globaux de matières, énergie grise, problèmes de risque, développement durable).
- ❑ **Intégrer les conditions générales dictées par la société et par l'économie**, ainsi que l'évolution de la demande et de l'offre.



La recherche dans le domaine de la **combustion et de la carburation**: l'Institut Paul-Scherrer (PSI) a étudié par des procédés laser la formation et la distribution des polluants d'un brûleur à gaz commercial à prémélange. A gauche, chimiluminescence de la flamme, au milieu, distribution des radicaux OH, à droite, celle du monoxyde d'azote. De telles images peuvent indiquer des améliorations à apporter.

Principes
et
stratégie

Le cadre: domaines, programmes, projets et experts

L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) est chargé de coordonner la recherche énergétique soutenue par les pouvoirs publics, de suivre les travaux et d'en assurer la complémentarité au plan international. Il bénéficie de l'appui de la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE).

L'OFEN a confié l'ensemble de la recherche énergétique suisse à trois de ses sections:

- Utilisation rationnelle de l'énergie.
- Énergie renouvelable.
- Domaines spéciaux.

Ces trois sections s'occupent de **14 domaines tels que** le bois ou l'énergie nucléaire:

- Chaque domaine relève d'un responsable.
- Un domaine peut se subdiviser en plusieurs sous-domaines. Ainsi les »transports« comprennent les »transports en général« et les »véhicules légers«.
- Un quinzième domaine 'Bases de l'économie énergétique' n'a pas été attribué à une section spécifique: les autres domaines étant tous axés sur des questions techniques, celui-ci en élargit l'investigation aux problèmes économiques, politiques et de société.

La liste des domaines et sous-domaines ainsi que les adresses de tous les responsables et chefs de programmes se trouvent en troisième page de couverture.

Chaque sous-domaine comprend un programme de recherche avec installations pilotes et de démonstration ainsi qu'un programme de transfert et de marketing. Il y a une étroite coordination des activités orientées vers le marché avec le Programme ÉNERGIE 2000. Ainsi, dans le domaine »Utilisation active de l'énergie solaire«, les deux sous-domaines »Chaleur solaire« et »Photovoltaïque« possèdent de tels programmes; **chacun d'eux est dirigé par un chef de programme, lequel peut être le responsable du domaine.**

Celui-ci est assisté par les chefs de programmes, et aussi par un groupe d'experts. Ensemble, ils élaborent un **plan d'exécution détaillé** pour le domaine en question, en s'appuyant sur le »Plan directeur de la recherche énergétique de la Confédération« et en tenant compte des conditions générales politiques et économiques. **Un soutien est alors accordé à plusieurs projets.** L'essentiel de ceux-ci est aux mains des centres de recherche publics tels que les EPF ou l'Institut Paul-Scherrer (PSI). Mais l'OFEN soutient également l'industrie, des bureaux d'ingénieurs et des chercheurs isolés.

La **CORE** a été instituée en 1986. Elle réunit des représentants de l'industrie, de l'économie énergétique, des EPF, des Universités et des Hautes Ecoles Spécialisées, des Services cantonaux de l'énergie, du Fonds national de la recherche scientifique, des organes de promotion économique ainsi que du Conseil suisse de la science. Ses membres sont investis d'un mandat personnel. La Commission **est chargée d'assister le Conseil fédéral et le DFTCE pour tout ce qui a trait à la recherche énergétique de la Confédération et au transfert des résultats; elle fixe les grandes lignes de cette action.** Les principales retombées de ses travaux sont le »Plan directeur« déjà cité, mis à jour tous les quatre ans, et la »Conférence suisse sur la recherche énergétique«, qui a lieu tous les deux ans.

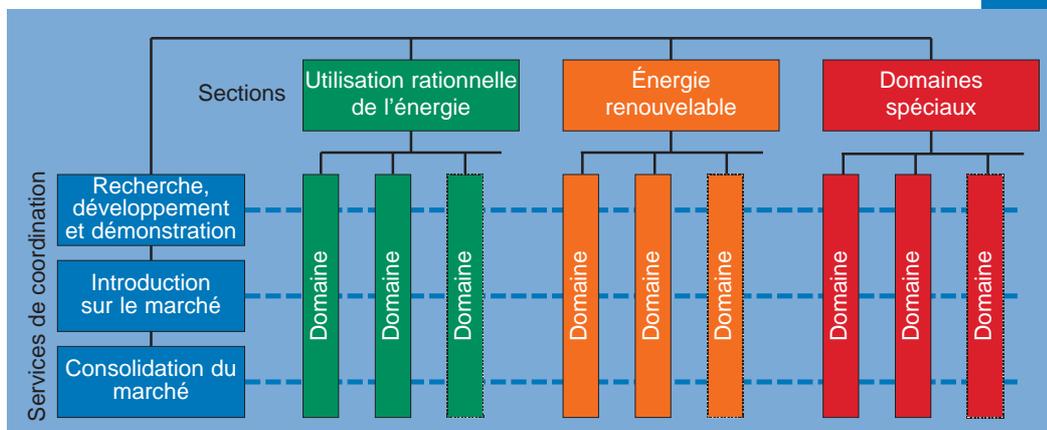
Petit vocabulaire de l'organisation

Coordination de la recherche énergétique: l'OFEN s'efforce de suivre et d'harmoniser entre elles toutes les activités de recherche (dans les Hautes Ecoles, dans le secteur privé et dans les autres institutions de recherche), afin de parvenir à la meilleure efficacité possible. Éviter les recouvrements, ne pas réinventer la roue, tel est son souci. L'OFEN utilise pour cela sa compétence technique, ses canaux d'information dans le pays comme à l'étranger et enfin des moyens financiers, dont il ne faut pas sous-estimer l'importance.

Suivre: si l'OFEN suit tous les projets de recherche soutenus par lui, cela signifie qu'il en vérifie continuellement les aspects techniques, que ce soit en étudiant les rapports que les mandataires doivent présenter à intervalles réguliers, en facilitant le transfert des connaissances ou en maintenant des contacts personnels entre le chef de programme et l'institution de recherche.

Domaines: tous les travaux de recherche énergétique, tant publics que privés, qui se poursuivent en Suisse se répartissent entre un certain nombre de domaines, qui sont des techniques ou des secteurs de travail. On a par exemple »l'enveloppe du bâtiment«, »la photovoltaïque«, »le bois«, »la géothermie«, »la fusion nucléaire« ou »le stockage de chaleur«.

Projet: c'est une recherche consacrée à un sujet très spécifique, généralement bien circonscrit dans la technique et dans le temps, par exemple le »Développement d'un système de façade avec modules à cellules photovoltaïques intégrés«.



Désireux d'améliorer le transfert des résultats de la recherche, l'OFEN en a modifié l'organisation en 1996. Auparavant, la recherche et le développement constituaient un domaine propre recouvrant tous les autres; désormais,

la recherche, le développement, la démonstration, la commercialisation et la consolidation du marché sont à l'ordre du jour dans tous les domaines.

Le bâtiment, une entité énergétique

Comme tous les pays industrialisés au climat tempéré, **la Suisse consent la plus importante dépense d'énergie dans le domaine du bâtiment**. En effet, le chauffage, puis l'alimentation en électricité et en eau, ainsi que la ventilation et la climatisation des immeubles d'habitation et de bureaux absorbent **la moitié de l'énergie de consommation**. C'est que de 1960 à 1975 environ, en période de haute conjoncture, les Suisses, habituellement si exigeants sur la qualité, ont souvent manqué de soin en construisant, et ils ont négligé la consommation d'énergie (le mazout était si bon marché). Ainsi, bien des immeubles de cette époque consomment aujourd'hui davantage d'électricité et d'énergie de chauffage que des constructions plus anciennes.

Le choc salutaire est venu de la crise du pétrole de 1973. Dans l'intervalle, des **progrès remarquables** ont été faits grâce à la recherche dans tous les secteurs du bâtiment: **les immeubles construits selon les plus récents enseignements ne consomment qu'une fraction de l'électricité et de l'énergie de chauffage naguère habituelle**. Mais le progrès n'affecte que lentement la consommation globale, parce que le volume annuel des constructions ne représente qu'une modeste fraction du parc. En effet, des décennies s'écoulent généralement avant que l'on rénove un bâtiment, et plus de temps encore avant une modernisation complète.

Voilà pourquoi le problème de la consommation excessive d'énergie ne saurait être résolu seulement par la découverte d'améliorations techniques possibles dans le bâtiment. Encore faut-il que l'application sur une large échelle suive sans tarder. Bien des obstacles s'y opposent, avant tout sous forme de recherches peu ou pas coordonnées entre elles: elles suivent souvent des voies parallèles ou qui ne se prêtent guère à une vue d'ensemble. Afin d'y remédier et d'accélérer le transfert, **l'OFEN a lancé, au milieu des années 1980, le programme de recherche «Utilisation rationnelle de l'énergie dans le bâtiment»**. En voici quelques-uns des résultats:

- Elaboration **d'instruments de planification** tels qu'un logiciel pour la **simulation des courants d'air à l'intérieur**, condition préalable à la bonne conception des équipements de ventilation et de climatisation. Schémas pour la construction et l'exploitation rationnelles d'écoles et d'hôpitaux.
- Développement de systèmes passifs à basse consommation d'énergie pour le refroidissement estival d'immeubles administratifs, avec test de bon fonctionnement.
- Développement d'un logiciel standard pour l'écobilan; **écobilan des principaux matériaux de construction et d'isolation**.

Le programme de recherche **«Architecture solaire»** de l'OFEN a **utilement complété** ces travaux. Il s'est concentré sur le mesurage de certains bâtiments, allant de la maison individuelle jusqu'à l'usine, et de nouveaux éléments propres à l'architecture solaire. On a ainsi détecté des erreurs initiales, mais on a aussi recueilli des enseignements décisifs, introduits ensuite dans des **banques de données et des programmes de calcul pour concepteurs**. Cela concerne avant tout les propriétés de nouveaux vitrages à faible transmission thermique, des systèmes d'éclairage naturel, des systèmes de chauffage solaire à air, une isolation thermique translucide, les atriums, les jardins d'hiver et les balcons vitrés, certaines conceptions globales de l'énergie et l'assainissement de bâtiments.

La recherche s'est donc bien rapprochée du but, qui a été précisé dans l'intervalle: la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) a en effet fixé un **échancier pour la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments**. Ainsi, en l'an 2000, un bâtiment neuf devrait consommer en moyenne 180 MJ/m²a, et en l'an 2020, 100 MJ/m²a seulement; après assainissement énergétique, les bâtiments existants auront droit à 50 % de consommation supplémentaire. A titre de comparaison: en 1970, un bâtiment neuf nécessitait quelque 570 MJ/m²a !

Petit vocabulaire du bâtiment

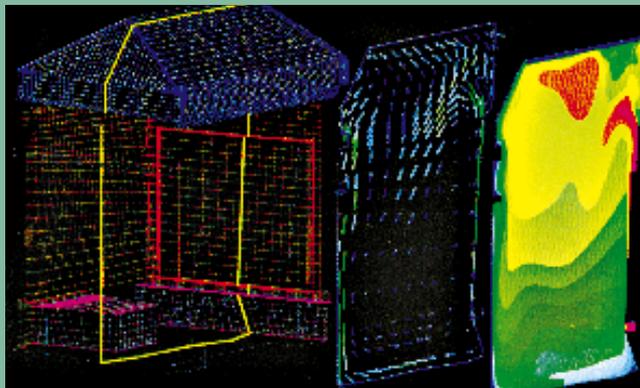
Le terme de **bâtiment** s'applique aux maisons, individuelles ou non, aux immeubles administratifs, commerciaux et industriels.

L'enveloppe du bâtiment, ce sont les éléments qui séparent l'intérieur de l'extérieur (atmosphère et sol), soit les murs, y compris les murs de la cave, les portes et fenêtres, le toit. Leur résistance au transfert de chaleur détermine l'essentiel des pertes thermiques du bâtiment.

L'isolation transparente est faite d'un matériau qui laisse le rayonnement solaire parvenir aux murs, dont il empêche le rayonnement thermique de s'échapper vers l'extérieur.

L'architecture solaire n'a pas un style spécifique. Elle revient à concevoir la forme du bâtiment, l'aménagement des surfaces vitrées et leur surface, la répartition des volumes et des masses accumulatrices de chaleur de façon à tirer le meilleur parti de la lumière et de la chaleur solaires. Elle vise aussi bien à réduire au minimum les besoins d'énergie non renouvelable qu'à éviter la surchauffe du bâtiment en été. On connaît **l'utilisation directe** de l'énergie solaire (le rayonnement incident réchauffe et éclaire) et son utilisation indirecte, au moyen de capteurs extérieurs au bâtiment, qui réchauffent l'air ou l'eau. Les **systèmes intégrés** impliquent des mesures harmonisées les unes par rapport aux autres pour réduire la consommation d'énergie.

L'écologie du bâtiment s'intéresse à tous les aspects de la construction écologique. Ainsi, on cherche à évaluer des matériaux de construction, voire des bâtiments entiers, quant à leur compatibilité avec l'environnement: cet **écobilan** se compose d'un **bilan des polluants** (synthèse de toutes les charges de l'environnement) et d'un **bilan énergétique** (somme des consommations d'énergie, de la production des matériaux jusqu'à leur élimination, sans négliger le transport). L'écobilan n'autorise aucun jugement simplificateur, mais il peut révéler certains défauts des produits et procédés, tout en



La recherche a abouti à une méthode de calcul des mouvements de l'air et de l'étagement des températures, p.ex. dans des atriums de bâtiments administratifs (ces cours intérieures couvertes favorisent l'utilisation de l'éclairage naturel). A gauche: atrium à Zoug. A droite:

le modèle de calcul et à côté (pour le profil marqué en jaune) le déplacement de l'air et la répartition des températures en hiver (rouge = chaud, vert = froid).

Le programme de recherches 1996/99 a pour objectif de **créer les conditions techniques à cet effet**. Connaissant les relations complexes qui existent entre les composants énergétiques du bâtiment et désireux d'en améliorer le rendement, l'OFEN a réuni les trois domaines «Systèmes techniques et enveloppe du bâtiment», «Installations CVC du bâtiment» et «Architecture solaire et éclairage naturel» en un **seul programme »Bâtiment«**. Les travaux sont axés sur 8 objectifs. D'ici à l'an 2000, la consommation finale d'énergie pour la préparation d'eau chaude, le chauffage, le refroidissement et l'électricité doit diminuer de 10 à 25 % et ce mouvement devra se répéter au cours de la décennie suivante; le taux de recul variera selon qu'il se rapporte à un bâtiment d'habitation ou de services et selon qu'il y a construction neuve ou rénovation. **L'accent sera mis sur l'assainissement énergétique des constructions existantes**, qui doit répondre aux impératifs du développement durable et se substituer à la stratégie actuelle de réparation. On s'attachera tout spécialement à l'écologie et à l'utilisation d'énergie renouvelable.

Pour atteindre les objectifs, on a assigné aux travaux de R&D de ce »programme Bâtiment« les priorités suivantes:

- **Systèmes techniques et enveloppe du bâtiment:** élaborer des **instruments de conception pour l'optimisation énergétique** de solutions globales dans le respect de l'écologie; créer de **nouveaux matériaux isolants** dont le facteur k se situe entre 0,20 et 0,25 W/m² K pour 5 à 8 cm d'épaisseur, ainsi que des techniques simplifiées de façonnage et de montage; développer des fenêtres ayant un meilleur bilan énergétique et des méthodes d'assainissement des fenêtres; définir des procédés simples de vérification de la qualité énergétique.
- **Installations du bâtiment:** définir les éléments d'une **évaluation écologique globale**, déconstruction comprise; décrire des **solutions standard pour l'assainissement** d'anciens chauffages (avec des techniques nouvelles telles que la pompe à chaleur et le couplage chaleur-force); développer une **chaudière à mazout** de moins de 70 kW de puissance ayant un **rendement à l'année d'au moins 95 %** et des brûleurs à mazout et à gaz consommant moitié moins de courant; développer des isolants de haut rendement (p.ex. par le vide) pour le chauffage, ainsi que de nouveaux **systèmes asservis d'aération d'appartement**, réglables selon la qualité de l'air.
- **Architecture solaire et éclairage naturel:** établir un catalogue de solutions éprouvées, surtout dans des bâtiments basse énergie, pour l'utilisation intensive du rayonnement solaire comme source de lumière et de chaleur (gain direct et systèmes d'aération solaires); développer des modules peu coûteux **d'isolation thermique translucide** avec protection incorporée contre la surchauffe; programmes de calcul et manuels pour concepteurs de systèmes d'éclairage naturel.

Les montants prévus au programme 1988 pour des installations P+D étaient trop modestes pour que le **transfert des résultats** de la recherche puisse être qualifié de totalement réussi. Du moins le projet »Flux d'air dans les bâtiments« a-t-il donné d'importantes impulsions aux professionnels de la ventilation. Quant au programme 1996/99, au chapitre du transfert, il prévoit l'assainissement modèle d'immeubles locatifs et de bureaux typiques par les difficultés qu'ils causent; des campagnes d'information viendront s'y ajouter. Elles devront innover, car trop souvent, les architectes et les maîtres d'ouvrage ne sont pas au courant des innovations, étant submergés par des rapports nombreux et parfois illisibles sur les projets réalisés.



Ce locatif de Plan-les-Ouates a bénéficié d'une aide au titre de projet de démonstration. L'application des plus récents enseignements a permis de lui conférer un indice énergétique de 250 MJ/m²a, soit le tiers d'un immeuble normal.



L'architecture traditionnelle n'interdit pas le recours à des éléments de construction peu gourmands d'énergie. Cette maison de Gonten stocke la chaleur des capteurs à air dans des dalles en béton.

fournissant aux autorités des éléments de décision.

L'éclairage naturel consiste à utiliser la lumière du jour. Il s'agit d'économiser la lumière électrique et d'accroître le bien-être, surtout dans les bureaux de grande surface. On y parvient par l'aménagement particulier des fenêtres, d'atriums (cours intérieures vitrées), de réflecteurs, de miroirs ou de »puits« qui amènent la lumière du jour vers l'intérieur.

Par **les systèmes du bâtiment**, on entend l'ensemble de l'enveloppe, de l'intérieur et des installations, qui déterminent la consommation d'énergie.

Les **installations CVC du bâtiment** réunissent les amenées d'électricité, d'eau et les équipements sanitaires, le chauffage, la ventilation/climatisation ainsi que le système de communication à large bande (pour le réglage et la commande des autres installations).

La qualité énergétique d'un bâtiment et de ses installations s'exprime par **l'indice énergétique**, qui donne la consommation d'énergie au mètre carré de surface utile, soit la **consommation spécifique** du bâtiment. En 1970, l'indice moyen était de 570 mégajoules par année (MJ/m²a) pour le chauffage et de 200 MJ/m²a pour l'électricité. Un bâtiment construit selon les plus récents enseignements possède des valeurs très inférieures (env. 150 MJ/m²a pour le chauffage et 30 MJ/m²a pour l'électricité) et il semble que l'on pourra encore les réduire de moitié d'ici en 2020.

Dans les bureaux surtout, le **refroidissement** de l'air en période chaude est de plus en plus demandé. Comme la climatisation ordinaire consomme beaucoup d'électricité, le **refroidissement passif** fait de plus en plus d'adeptes: on envoie dans des conduites posées dans les sols et dans les plafonds de l'air nocturne, de l'air refroidi dans des conduites souterraines, de l'eau souterraine ou d'un lac.

Domaines
Systèmes et enveloppes du bâtiment

Installations CVC

Architecture solaire et éclairage naturel

Installations et appareils électriques à basse énergie

Sur les anciens modèles de **téléviseurs** et d'**ordinateurs**, le **gaspillage d'électricité** est perceptible: même lorsqu'ils sont en veilleuse - ou en «standby» -, ils réchauffent la pièce dans laquelle ils se trouvent. Bien des **pompes de circuits de chauffage** sont également de grosses consommatrices de courant. Considéré à l'unité, ce gaspillage ne va pas changer la face du monde, certes; seulement, le nombre de ces appareils peut se chiffrer par millions et, **additionnées, leurs pertes, mêmes minimes, représentent des valeurs considérables**. Un autre facteur encore ne doit pas être négligé: souvent, il est possible d'améliorer le **rendement de la production de courant** et de réduire les **pertes générées par la distribution du courant dans le réseau**.

Certes, la recherche et le développement (R&D) en matière de production et de distribution sont depuis toujours l'apanage des fabricants et des exploitants; néanmoins, à la fin des années 1980, l'OFEN s'est estimé responsable de les inciter à **concentrer leurs recherches sur les possibilités de réduire la consommation** des appareils et des installations électriques. Le programme de recherche lancé en 1990 a porté ses fruits. Deux exemples parmi d'autres:

- Des connaissances de base et des propositions ont été élaborées en vue de **réduire les pertes des appareils électroniques** de bureau et de divertissement en veilleuse.
- On est parvenu à **tripler le rendement d'un prototype de petite pompe de circulation**.

Le programme 1996/99 met en évidence les secteurs prioritaires dans lesquels la **recherche est nécessaire** pour exploiter les potentiels d'amélioration supplémentaires.

- Les transformateurs et les câbles constitués de **supraconducteurs à haute température** laissent entrevoir la possibilité de transporter le courant sans pertes. Découvertes en 1986 en Suisse, ces céramiques font l'objet d'une recherche soutenue dans le monde entier parce que, moyennant des coûts de refroidissement acceptables, elles n'offrent pas de résistance électrique et, partant, pas de pertes (celles-ci se traduisent par une élévation de la température). Un des problèmes à résoudre est celui de la fabrication de fils et de rubans à partir de ces **matériaux fragiles**.
- En 1990, une étude a montré que les moteurs standard asynchrones triphasés de moins de 22 kW de puissance, utilisés dans le monde entier par l'artisanat et l'industrie, présentent des pertes particulièrement élevées. Raison pour laquelle il faut optimiser les systèmes d'entraînement au moyen d'un **«moteur intégral»** qu'il s'agira de développer et dans lequel seront déjà incorporés un convertisseur de fréquence (de manière à diminuer la consommation) ainsi que l'asservissement.
- Dans les réseaux informatiques, un «power-management», c'est-à-dire un système d'exploitation automatisé d'ordinateurs et de parties de réseaux, axé sur la demande, permettrait d'économiser beaucoup de courant (p.ex. par le déclenchement automatique durant la nuit et les week-ends).
- Il s'agira enfin de promouvoir le «demand-side-management» ou gestion de la demande (l'action ciblée sur les utilisateurs finals de courant pour favoriser une utilisation plus rationnelle de l'énergie).

Les projets touchant la production de courant à partir d'énergie renouvelable sont inscrits dans d'autres programmes (petits aménagements hydroélectriques, photovoltaïque et installations éoliennes).

Les travaux de R&D axés sur les pertes des appareils électroniques de bureau et de divertissement en veilleuse («les consommateurs cachés de courant») ont eu des effets à l'échelon national et international: la Suisse est le premier pays à avoir instauré des valeurs-cibles pour ces pertes, et les fabricants étrangers ont commercialisé des appareils consommant nettement moins d'énergie. Il serait opportun que la recherche en cours se **traduise par des applications aussi efficaces**.

Petit vocabulaire de l'électricité

Le courant triphasé produit dans les **centrales**, par exemple hydroélectriques, est porté à de hautes tensions dans des **transformateurs** et transporté sous cette forme par le biais de **lignes aériennes** vers des **stations de distribution** (la haute tension diminue les pertes dues au transport). Dans ces stations, il est retransformé à des tensions plus basses, puis amené aux **consommateurs** par des **lignes de distribution**.

Les lignes aériennes et de distribution, les transformateurs et les stations de distribution forment un **réseau électrique**. Plusieurs réseaux réunis forment un **réseau interconnecté**, dont le but est d'assurer l'alimentation électrique à partir d'autres centrales de production au cas où l'une d'elles tombe en panne.

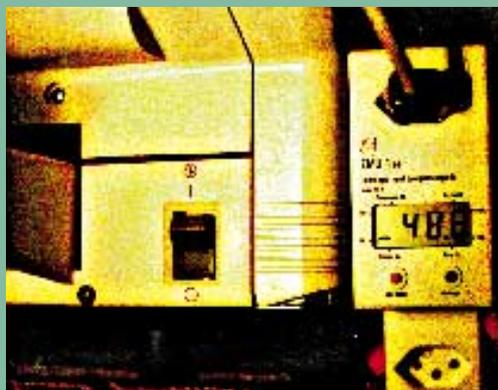
Pour diminuer les **pertes de réseau** dues à la résistance électrique, on cherche à fabriquer des câbles constitués de **supraconducteurs à haute température**, car ces derniers ont une résistance électrique nulle lorsqu'ils sont refroidis (au moyen d'azote liquide) à une température inférieure à environ -150°C .

Les petits **producteurs de courant décentralisés**, p.ex. les petits aménagements hydroélectriques, peuvent aussi refouler du courant dans le réseau, mais leur apport est très marginal à cause de l'irrégularité de leur production.

Les **aménagements à accumulation** servent à couvrir les grandes pointes de consommation. Les variations plus faibles peuvent aussi être compensées à l'aide de dispositifs de **stockage de courant**, p.ex. des accumulateurs.

Des pertes se produisent également dans les engins **consommateurs d'électricité** - moteurs et appareils - notamment à cause de leur résistance, mais aussi du fait de leur construction pas toujours optimale.

Le **rendement** d'un système est le rapport entre la puissance qu'il fournit et celle qu'il absorbe; le rendement utile est le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie consommée.



Bien que déconnecté, cet appareil en veilleuse consomme près de 50 W (mesure à droite). Les «gaspilleurs cachés» tels ce photocopieur ont été mis au jour grâce aux programmes de l'OFEN, puis améliorés par leurs fabricants.

Ce nouveau moteur électrique intégral de 3 kW est un «entraînement complet» économisant de l'énergie grâce au convertisseur de fréquence «intégral» (à gauche), qui en règle le régime.

Domaine
Electricité,
appareils

Chaleur ambiante et rejets de chaleur

En Suisse, la chaleur à basse température utilisée pour chauffer les locaux, produire de l'eau chaude et faire fonctionner des procédés industriels accapare plus de la moitié de l'énergie finale. La plupart des **chauffages fonctionnent au mazout ou au gaz** et ont un rendement, rapporté à l'énergie du combustible ou à l'énergie finale, de l'ordre de 80 % pour les anciennes installations et de près de 100 % pour les plus modernes! Dans ce domaine, économiser de l'énergie revient donc à mettre au point des systèmes de chauffage qui utilisent encore mieux l'énergie. Si ces installations sont alimentées par des énergies renouvelables comme la chaleur ambiante, c'est tout au bénéfice de celui-ci.

La pompe à chaleur (PAC) et le couplage chaleur-force ont des rendements énergétiques plus élevés et sont connus depuis très longtemps dans leurs applications individuelles. Mais ce n'est que depuis les crises pétrolières de 1973 et 1979 que l'on a pris conscience de leurs potentiels pour le chauffage général des locaux. Parallèlement, on a pu constater qu'il était hautement nécessaire d'intensifier la recherche et le développement pour les perfectionner afin d'en faire des installations de chauffage économiques et fiables. On a donc massivement accentué le soutien accordé à ces travaux en Suisse (et sur le plan international). A la fin de 1995, les **résultats de ces travaux** se présentaient comme suit:

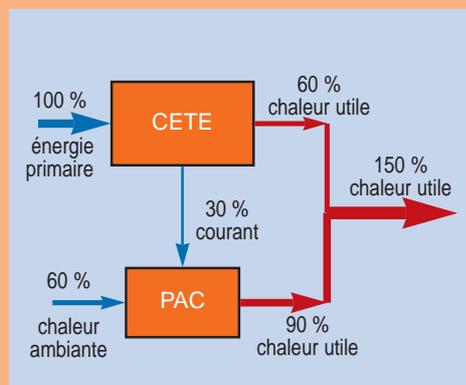
- Du côté des sources de chaleur (il s'agit de la chaleur ambiante), on a sensiblement amélioré les connaissances permettant de dimensionner de façon optimale les sondes géothermiques.
- Les **fluides caloporteurs** à effet de serre modéré ou nul supplantent les traditionnels CFC. Ils nécessitent cependant une adaptation des composants des installations et de la gestion.
- **PAC électriques**: essais visant à ajuster leur puissance calorifique à la demande et, partant, à économiser beaucoup d'énergie, grâce à des compresseurs à régime variable; développement d'une petite PAC destinée à remplacer les chauffages électriques à accumulation.
- Confirmation de la découverte, par un inventeur suisse, d'un **nouveau type de PAC à absorption** (sans compresseur) présentant un **rendement de 140 %**, et vérification de son bon fonctionnement.
- La combinaison d'une CETE et d'une pompe à chaleur (mue par le courant produit par la CETE) peut fournir un **rendement énergétique de 200 %**. Expérimentation de **CETE fonctionnant au bois, au diesel avec dénitruration des gaz d'échappement** et de **petites CETE**.

Il est cependant nécessaire d'effectuer d'**autres travaux de R&D**, avec les objectifs pour 1996/99:

- Développement de **PAC économiques**, fiables et pouvant également être intégrées dans les circuits de chauffage à haute température que l'on trouve dans les bâtiments d'un certain âge.
- Approfondissement des connaissances sur l'emploi de différents **caloporteurs, surtout naturels**.
- Construction de **CETE fonctionnant avec des piles à combustible** à titre d'installations P+D.
- **Optimisation des systèmes**, c'est-à-dire amélioration du rendement énergétique et de la sûreté de fonctionnement, p.ex. combinaison de CETE et de pompes à chaleur ou de la nouvelle PAC à absorption avec une chaudière à gaz (en vue de couvrir la demande de pointe).

Les moyens de soutenir, notamment des installations P+D, étant plutôt restreints, les projets doivent être impérativement sélectionnés en fonction de leur qualité et de l'urgence du problème à régler.

Un fait est révélateur des résultats obtenus dans le **transfert**: à la fin de 1995, plus de 47'000 pompes à chaleur étaient installées en Suisse. Des **rencontres** et des **cours**, mais aussi des **publications**, informent en permanence sur les derniers progrès. Il est souhaitable que les partenaires industriels participent encore plus activement à la R+D.



Si, avec le courant produit dans une centrale à énergie totale équipée (CETE), on entraîne encore une PAC, les 100 % d'énergie primaire permettront de produire 150 % ou plus de chaleur utile.

PAC d'un nouveau genre: son élément central est un tube de résonance de 5 m de long dans lequel une colonne de gaz oscillante transmet l'énergie du moteur Stirling à une PAC du même nom.

Petit vocabulaire de la chaleur

La chaleur ambiante, qui compte parmi les sources d'énergie renouvelable, est contenue dans l'air et dans le sol (eaux souterraines, rivières et lacs).

Par **rejets de chaleur**, on entend les flux de chaleur produits par des procédés techniques et qui s'échappent dans l'atmosphère sans être utilisés; ce peut être, par exemple, la chaleur contenue dans l'air évacué des bâtiments ou celle que les moteurs transmettent à l'eau de leurs circuits de refroidissement.

La chaleur ambiante et les rejets de chaleur ont en général **une température trop basse** pour être exploités directement à des fins de chauffage, de production d'eau chaude ou pour opérer un procédé industriel.

On peut les utiliser en les faisant transiter par des **pompes à chaleur (PAC)**, car celles-ci vont augmenter leur température dans certaines limites (p.ex. porter la température d'une eau souterraine de 10 à 40 °C pour le chauffage par le sol). Ces pompes fournissent plus d'énergie »payante« qu'elles n'en consomment.

Dans les PAC, la chaleur récupérée va provoquer l'évaporation d'un **fluide caloporteur** (p.ex. de l'ammoniac). Cette vapeur est ensuite comprimée, ce qui élève encore sa température. Lorsqu'elle se condense dans un condenseur, la vapeur du caloporteur fournit de la chaleur utile au circuit de chauffage. La compression se fait généralement au moyen d'un compresseur. Si ce dernier est actionné par un moteur électrique, on parle de PAC électrique, s'il est entraîné par un moteur à combustion, on parle de PAC à moteur.

On appelle **couplage chaleur-force (CCF)** un système qui utilise les rejets de chaleur produits par une machine. C'est le cas, par exemple, d'une **centrale à énergie totale équipée (CETE)**, dans laquelle un moteur à combustion entraîne une génératrice de courant et de laquelle on soutire en parallèle, à des fins de chauffage, la chaleur que contiennent l'eau de refroidissement et les gaz d'échappement.

Domaine
Chaleur
ambiante,
couplage
chaleur-
force

Capteurs solaires pour l'eau chaude et le chauffage

Les éléments architecturaux tirent parti de l'énergie solaire du fait de leur seule morphologie: les fenêtres, p.ex., laissent passer les rayons du soleil, mais empêchent la chaleur absorbée de s'échapper vers l'extérieur. Aucun de leurs composants n'étant mobile, on parle de l'utilisation « passive » de l'énergie solaire. En revanche, dans le circuit des **capteurs** que les architectes implantent en toiture, des **composants »actifs« tels que pompes et vannes** contrôlent l'écoulement du fluide caloporteur.

En Suisse, l'utilisation « active » de l'énergie solaire remonte déjà à la crise du pétrole de 1973. Des petites et moyennes entreprises (PME) ont commencé à commercialiser des capteurs plans puis des installations solaires complètes. L'encouragement apporté aux investissements par les Cantons a favorisé et favorise encore leur diffusion. Et l'application des résultats de la R&D financés par les pouvoirs publics a contribué à faire, de ces installations destinées à chauffer l'eau et à assurer l'appoint, voire l'intégralité, du chauffage grâce au soleil, des systèmes parfaitement rodés. Avec plus de 500'000 m² de capteurs, dont la moitié environ servent à ventiler le foin dans des centaines de fermes, **la Suisse compte aujourd'hui parmi les pays qui en ont la plus forte densité par habitant**. Le Technicum intercantonal de Rapperswil possède un centre d'essai unique au plan international. Et les concepteurs peuvent disposer de programmes de calcul informatiques de toute première qualité.

Mais alors, pourquoi poursuivre les recherches? Parce que **l'on accorde à l'utilisation active de l'énergie solaire une grande importance dans le remplacement du mazout et, par conséquent, dans la lutte contre la pollution de l'air** (le rendement annuel de 1 m² de capteur plan dépasse les 350 kWh, soit 45 l de mazout). Autres bonnes raisons: même les installations éprouvées sont sujettes à amélioration, et il faut absolument en abaisser le prix pour pouvoir les diffuser comme souhaité.

La réduction des coûts de revient de la chaleur est donc, avec l'assurance de la qualité, le but prépondérant du programme de recherche 1996/99 de l'OFEN:

- De **nouveaux matériaux et de nouvelles conceptions** doivent encore améliorer le rendement et abaisser les coûts de production des **capteurs vitrés et de leurs composants** - absorbeurs, vitrages, isolation thermique, raccords des conduites, pompes solaires.
- Les **capteurs non-couverts**, p.ex. en acier inoxydable, **s'intègrent bien dans les toitures et les façades**, mais il faut encore en perfectionner la conception afin d'en faire des systèmes.
- Sur un plan général, il faut créer des **systèmes de capteurs qui s'intègrent mieux et plus simplement** pour en faire, par exemple, des éléments architecturaux de façades.
- Il faut définir et développer une **installation compacte et standardisée de production d'eau chaude dans les maisons abritant plusieurs appartements**.
- La recherche sur un prototype doit démontrer les **possibilités d'une petite centrale solaire de 10 à 15 kW de puissance électrique**, équipées de capteurs tubes et d'une turbine à vapeur spéciale pour les régions de montagne.

Pour promouvoir le **transfert**, il faut - en plus des rencontres de spécialistes, des articles spécialisés et des informations générales, largement diffusées - construire de nombreuses installations P+D qui présentent aux maîtres d'ouvrage des systèmes actifs de chauffage et de préparation d'eau chaude optimisés tout en étant très pratiques, faciles à comprendre et bon marché.



Depuis 1990, un banc d'essai et de recherche sur les capteurs solaires, pionnier en Europe, est en place au Technicum intercantonal de Rapperswil. Sur l'image, on voit le stand en plein air doté d'un système de mesure automatisé.

Nouvelle toiture solaire en absorbeurs inox intégrés: rendement inférieur de 1/3 à celui des capteurs vitrés, mais prix nettement plus avantageux. Sur l'image: essai en grandeur réelle à Saillon.

Petit vocabulaire du capteur

Le rayonnement solaire a une irradiance très faible - en moyenne 0,1 kW/m² en Europe centrale (contre 500 kW/m² sur les parois de la chambre de combustion de brûleurs à mazout ou à gaz). De ce fait, de grandes surfaces sont nécessaires pour récolter cette énergie. Plus le rendement de ces aires et capteurs est élevé, plus leurs coûts seront bas. Les capteurs sont donc **l'élément clé** de l'utilisation active de l'énergie solaire.

Dans un **capteur**, un absorbeur reçoit le rayonnement solaire et le restitue sous forme de chaleur à un gaz ou à un liquide caloporteur, lequel, à son tour, la transmet là où elle sera utilisée. Les nombreuses formes de capteurs correspondent aux applications ou aux températures qu'il s'agit d'atteindre. Les formes de base importantes en Suisse sont les suivantes:

- Les **capteurs plans** (pour l'eau chaude et le chauffage) possèdent en guise d'absorbeur une plaque de métal ou de plastique noirie. Le fluide caloporteur est l'air ou un mélange d'eau et d'antigel appelé «sol». Dans les capteurs couverts d'un vitrage, le verre empêche la déperdition de la chaleur rayonnée par l'absorbeur. **Rendements de 35 % environ, température du caloporteur jusqu'à 150 °C**. Les capteurs non vitrés peuvent atteindre 60 °C, mais sont sensiblement meilleur marché du fait de l'absence de couverture et d'étanchéité.
- Dans les **capteurs tubes ou évacués**, l'absorbeur est entouré d'un tube de verre vide d'air, ce qui diminue fortement les pertes thermiques. Rendements de plus de 50 %, températures jusqu'à 250 °C, utilisables aussi pour produire de la chaleur industrielle et de la vapeur, mais onéreux.

Un système de capteurs comprend le capteur proprement dit, les structures portantes ainsi que les tubes et raccords. Son «intégration» en toiture ou en façade évite l'emploi des éléments architecturaux traditionnels.

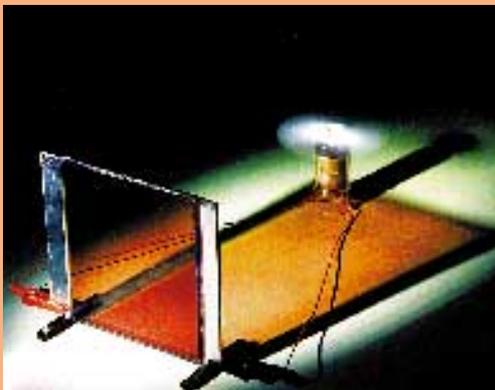
Sous-
domaine
**Chaleur
solaire**

Du courant produit sur les toits et les façades

La photovoltaïque a de quoi plaire: exposée à la lumière du soleil, une petite plaque de semiconducteur produit du courant sans faire de bruit, sans mouvement et sans émissions. Des modules et des installations sont commercialisés depuis les années 1970. **La Suisse ayant un double intérêt à développer la photovoltaïque – production indigène d'électricité et perspective d'exporter cette technologie – la recherche a bénéficié très tôt d'un soutien.** Au milieu de la décennie actuelle, les principaux résultats obtenus étaient les suivants:

- ❑ **Connaissances étendues acquises par les chercheurs et l'industrie en matière de planification, de construction d'installations et de leurs composants**, connaissances qui ont été déposées non seulement dans des produits, mais encore dans des programmes informatiques de dimensionnement et de simulation d'installations photovoltaïques, ainsi que dans des banques de données réunissant les modules que l'on trouve sur le marché.
 - ❑ **Des travaux d'avant-garde ont été accomplis dans le développement de composants**, p.ex. d'onduleurs, de techniques de fixation et de connexion des modules.
 - ❑ La Suisse est aussi un **pionnier de l'intégration des systèmes photovoltaïques dans les bâtiments** (motif: manque de terrains disponibles). Les tuiles solaires et les éléments de façade photovoltaïques sont des produits développés en Suisse, que l'on trouve déjà dans le commerce.
 - ❑ Grâce à la recherche fondamentale sur les **nouveaux matériaux photovoltaïques et les nouvelles technologies cellulaires**, les chercheurs suisses progressent parmi les pays à l'avant-garde. Avec ses quelque mille installations totalisant plus de 8 MW de puissance de crête – des plus petites de quelques watts à la centrale de 500 kW du Mont Soleil –, **la Suisse est le pays du monde qui a la plus forte densité de cellules photovoltaïques par habitant.** De toutes récentes estimations attestent de 100 à 200 km² de surfaces de toitures et de 45 à 75 km² de façades propices à la photovoltaïque; ces surfaces pourraient totaliser une puissance installée (avec des cellules actuelles) de 15'000 à 27'000 MW, suffisante pour couvrir une part respectable de la demande d'électricité nationale.
- Le revers de la médaille est que cette électricité est coûteuse: dans le meilleur des cas, un kWh de courant d'origine photovoltaïque revient actuellement à 90 centimes (contre 5 ct. pour l'hydroélectricité et 10-15 ct. pour le courant d'origine nucléaire). De ce fait, **partout dans le monde, les recherches visent à en abaisser le coût** par la mise au point de procédés de production ou de conception de cellules meilleur marché, et de systèmes moins coûteux ou par l'amélioration du rendement des cellules. C'est aussi dans cette ligne que s'inscrivent les objectifs de la recherche suisse 1996/99:
- ❑ Recherche et développement dans le secteur des matériaux, visant à créer des cellules constituées de couches de silicium extrêmement minces, des cellules multicouches (p.ex. cellules tandem, dans lesquelles deux cellules minces, constituées de matériaux ayant une sensibilité spectrale différente – par exemple, l'une dans le rouge, l'autre dans le violet du rayonnement solaire –, sont accolées l'une à l'autre) ou encore des **cellules obéissant à des techniques d'un genre nouveau.**
 - ❑ Systèmes et produits destinés à être **intégrés dans des bâtiments.**
 - ❑ Poursuite de la **simplification de la technique des systèmes.**

Depuis toujours, le **principal objectif et le critère de sélection de l'encouragement prodigué à la recherche photovoltaïque est le transfert.** Modules, onduleurs et nouvelles solutions d'intégration dans les bâtiments sont développés en collaboration avec l'industrie. Les auxiliaires de planification et les ouvrages de référence, eux aussi, soutiennent la mise en pratique. Les installations P+D servent également à la formation (depuis les écoles professionnelles jusqu'aux universités).



Les nouvelles cellules photovoltaïques »nanocristallines« de l'EPF Lausanne reposent sur des colorants organiques. Les cellules se trouvent encore au stade du développement; il reste à démontrer leur stabilité à long terme.



Ces plaques transparentes, dans lesquelles sont incorporées des cellules PV sont un exemple d'intégration au bâtiment d'un système PV qui laisse également passer la lumière naturelle.

Petit vocabulaire de la photovoltaïque

Par **photovoltaïque** (PV), on entend la technique des cellules solaires constituées de semiconducteurs. Dans ces cellules, une couche sépare deux semiconducteurs ayant une conductivité différente. La lumière du soleil détache des charges dans cette couche intermédiaire, produisant ainsi une tension électrique continue, de l'ordre de 0,5 V. Pourvue de contacts sur ses faces antérieure et postérieure, cette petite plaque forme une **cellule photovoltaïque.**

Les **semiconducteurs les plus appropriés** sont le silicium, et, dans certains cas, p.ex. l'arséniure de gallium.

Les cellules PV du commerce se composent généralement de silicium cristallin ou amorphe. Ce sont les cellules au silicium monocristallin qui ont le meilleur rendement (15 %); pour une taille classique de 100 cm², elles fournissent au maximum (au zénith en été) environ 1,5 Wp (watt peak = unité de puissance de crête). Les cellules au silicium polycristallin ont un rendement de 12 % et celles au silicium amorphe de 6 % (ce matériau se **dégradant**).

Les produits nouveaux sont, p.ex., les couches minces de silicium cristallin ou les **couches nanocristallines rendues sensibles à la lumière par la présence de colorants** (ceux-ci transforment la lumière du soleil en électricité).

Connectées les unes aux autres et encapsulées pour résister aux intempéries, les cellules forment un **module PV**, plusieurs modules constituent un champ PV. Ce dernier, doté des éléments additionnels nécessaires, est appelé installation PV. Les **installations PV** peuvent être exploitées **en îlot** ou **raccordées au réseau**. Le couplage au réseau nécessite un onduleur qui transforme en courant alternatif le courant continu produit par les cellules.

Les installations PV se montent pour elles-mêmes (p.ex. sur un toit ou sur le sol) ou peuvent être **intégrées à un bâtiment** (les modules forment alors la toiture ou la façade).

Sous-domaine
Photo-voltaïque

Pour l'énergie du bois et de la biomasse

La biomasse qui se développe en Suisse sur une période d'une année pourrait couvrir une grande partie de la demande énergétique du pays. Mais seul le bois sert de combustible, depuis toujours dans les régions rurales et depuis plus récemment dans les cheminées des maisons citadines. Le bois de feu, avec ses 2,2 millions de m³, ne représente que le tiers de la totalité du bois utilisé en Suisse (les deux autres tiers se partageant à parts égales entre l'industrie du papier et de la construction et les fabriques de meubles). Le bois pousse plus vite qu'on ne le coupe: **sans surexploiter les forêts, on pourrait produire deux ou trois fois plus de bois de feu qu'aujourd'hui.**

Les pouvoirs publics soutiennent et coordonnent la R&D sur la biomasse dans le but d'en augmenter l'utilisation (et d'en abaisser les coûts) parce qu'elle est une **source d'énergie indigène et, qui plus est, renouvelable, et qu'elle revêt un intérêt tant pour la sécurité de notre approvisionnement que pour la protection de l'environnement.** L'OFEN a divisé cette recherche en deux secteurs.

Dans le **secteur »bois«**, qui englobe le **bois de forêt, les déchets** (sous-produits de scierie) et le **bois de récupération**, la recherche a fait de grands progrès ces dernières années. Grâce à l'application des résultats obtenus, on trouve **sur le marché actuel des installations de combustion écologiques de toutes classes de puissance et qui ont un rendement élevé** (à fin 1995, on comptait en Suisse 620'000 fours et fourneaux à bûches, environ 4500 installations de combustion automatiques ainsi que 26 installations fonctionnant avec du bois de récupération). De ce fait, durant la période 1996/99, seule une **recherche ponctuelle est encore nécessaire:**

- Les **petites installations de combustion à bois alimentées manuellement doivent être mieux adaptées aux besoins des maisons à basse énergie** – faible puissance de chauffe et longues périodes de fonctionnement.
- **Dans les installations automatiques, la priorité va à la poursuite de la réduction des émissions polluantes:** chambres de combustion à combustion totale; mesures de réduction des oxydes d'azote; rétention des particules de suie.

Dans le **secteur »autre biomasse«**, grâce aux bons résultats de la R&D, on considère également que de **nouveaux travaux de recherche ne sont plus nécessaires que dans certains domaines** (à l'exclusion des déchets organiques et des eaux usées issues des stations d'épuration, de l'incinération des ordures et des décharges), à savoir:

- **Développement et optimisation des installations de biogaz et de gazéification** des déchets agricoles, communaux et industriels.
- Poursuite des **recherches sur la combustion de l'herbe à usage énergétique ou du »jonc de Chine«**, pour résoudre certains problèmes, posés p.ex. par l'adhérence de la cendre (dans la chambre de combustion) et par les dépôts (dans les chaudières).
- **Adaptation de moteurs aux biocarburants non traités** (p.ex. huile de colza); à l'inverse, **adaptation de carburants aux moteurs** (p.ex. traitement du biogaz pour en faire un gaz combustible à forte proportion de méthane, similaire au gaz naturel).

Pour favoriser **l'application des résultats obtenus**, on encourage la publication de rapports, les rencontres de spécialistes et la réalisation d'installations P+D. Dans le secteur »bois«, celles-ci sont, p.ex., une installation de combustion à faibles émissions, fonctionnant au bois de récupération et, dans le secteur »autre biomasse«, p.ex., une installation d'estérification de l'huile de colza.



Ce composteur à Baar traite 18'000 t de déchets biologiques par année. Le nouveau procédé fournit même un excédent de courant et ne produit pas d'eaux usées grâce à un biofiltre (sur l'image) destiné à purifier l'air évacué.



Les grandes installations de combustion à bois fonctionnent avec des copeaux (bois déchiqueté). Pour des questions de rentabilité, on débite ce bois en forêt, à l'aide de machines spéciales.

Petit vocabulaire de la biomasse

Par **biomasse**, au sens énergétique, on entend tous les résidus et les substances organiques issus de l'agriculture, de la sylviculture, de l'horticulture, des ménages, de l'artisanat et de l'industrie à partir desquels on peut produire de l'énergie: fumier, purin, paille, bois, plantes à amidon et scieries, eaux usées contenant des nutriments produites par les fabricants de denrées alimentaires, boues d'épuration et ordures.

Comme l'être humain et l'animal se nourrissent de plantes et parce que celles-ci croissent grâce au soleil (avec un rendement utile de 0,1 %), l'énergie de la biomasse est de l'**énergie renouvelable**. La croissance annuelle de la biomasse végétale sur la Terre est estimée à 200 milliards de tonnes, soit une valeur énergétique égale à l'ensemble des ressources connues de combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon).

Les **principaux procédés de transformation** permettant de tirer de l'énergie de la biomasse sont la combustion, la gazéification (par chauffage en absence d'air), la fermentation (alcoolique) ainsi que l'utilisation d'huiles végétales en guise de biocarburants.

La biomasse est un **mélange complexe d'hydrates de carbone**. C'est pourquoi sa transformation énergétique produit des **polluants**, notamment de la cendre, du dioxyde de carbone (CO₂), des oxydes d'azote, de l'anhydride sulfureux et des hydrocarbures, ainsi que de la suie et des poussières.

Par rapport aux combustibles fossiles, la biomasse a l'avantage de présenter un bilan **CO₂ neutre**: elle a absorbé pour se former autant de CO₂ qu'elle en dégage lors de son utilisation à des fins énergétiques. Cependant, cela en interdit la sur-exploitation.

En général, le **bois de récupération** contient des produits chimiques, p.ex. des enduits de protection; sa combustion requiert donc des procédés spéciaux qui en réduiront les émissions.

Domaines

Bois

Autres
biomasses

De l'énergie thermique (et électrique?) tirée des profondeurs

Pour la Suisse aussi, la chaleur du sous-sol est **une source d'énergie intéressante, pratiquement inépuisable**, exploitable grâce à des techniques spécifiques. Au milieu des années 1970, la Confédération a créé une «Commission fédérale pour la géothermie et le stockage souterrain de chaleur». Les travaux de recherche lancés par elle ont notamment abouti, en **1982**, à l'élaboration d'**une carte géothermique de la Suisse**, qui présentait deux régions, le **Plateau et la fosse du Haut-Rhin, comme susceptibles de receler des gisements d'eau chaude**. Un chercheur suisse a inventé la sonde géothermique (SGT) en 1980. C'est essentiellement à ces deux techniques que s'est adressé l'encouragement prodigué à la recherche. **Etat de la R&D au milieu des années 1990.**

- Les **questions scientifiques fondamentales posées par les sondes géothermiques sont résolues** (p.ex. que le sous-sol ne se refroidira pas); de bonnes solutions techniques ont été trouvées.
- La **première sonde géothermique profonde destinée au chauffage de locaux** a été mise en service en 1995 à Weggis.
- Des **sondages profonds destinés à détecter la présence d'eau chaude** ont échoué en divers endroits, mais ont été couronnés de **succès à Riehen** (où l'on a créé un réseau de chauffage à distance). La carte géothermique du Plateau suisse a été complétée.
- **Potentiels estimés des SGT et des eaux souterraines profondes: 6 % de la demande thermique.**
- A partir de 1995, **utilisation des eaux usées chaudes produites par le tunnel** de la Furka dans un réseau de chauffage à distance réalisé à Oberwald. Etudes portant sur les températures, le remblai et le chimisme d'autres projets de tunnels (exemples: tunnel de base du Hauenstein, Mappo Morettina, Ricken et tunnel routier du St-Gothard).
- **Savoir-faire en matière de »Hot Dry Rock« (HDR) et »Hot Wet Rock« (HWR)** par la participation à des projets internationaux de recherche.

Il est important de **continuer les recherches afin d'améliorer ou de consolider la rentabilité et l'écologie de ces techniques** et d'élucider les problèmes de fond qui se posent encore.

- Les projets de **SGT** ont pour but d'améliorer la conductibilité thermique des matériaux de bourrage, de réaliser des sondes plus profondes et de plus grandes sections, d'utiliser aussi cette énergie **pour la réfrigération en été**, de développer des sondes ouvertes (c'est-à-dire amenant directement les eaux souterraines à une pompe à chaleur), **d'optimiser les champs de SGT** et les pieux énergétiques et, enfin, de **préparer l'élimination ultérieure des sondes**.
- **Des mesures de base doivent encore être effectuées sur les sondes profondes**, afin de pouvoir optimiser – techniquement et économiquement – les installations d'une certaine ampleur.
- Etudes portant sur l'utilisation des eaux usées des tunnels du projet AlpTransit .
- Expérimentation de **techniques de forages de petits diamètres** («slimhole») susceptibles d'en réduire de moitié les coûts.
- **On vise également à faire de l'eau chaude un usage en cascades.**
- **Préparation d'une installation HDR ou HWR suisse** pour produire du courant et de la chaleur.

La réussite de **l'application** des SGT (même avec des SGT profondes) se reflète dans les plus de 6000 installations en service en Suisse, ce qui place notre pays dans le peloton de tête à l'échelon mondial. La coopération étroite entre chercheurs et fabricants de SGT vise à augmenter le rendement des sondes et à en diminuer les coûts. Quant aux sondages profonds, même les échecs ont élargi le **champ des connaissances**, ce dont bénéficieront les futures entreprises.



Les cloisons antibruit de l'installation de forage géothermique profond de Reinach, BL, étaient destinées à protéger les riverains du bruit des perforatrices. Une fois les travaux achevés, les lieux ont été remis dans leur état initial.



Une douzaine de SGT destinées à chauffer un immeuble locatif sont déjà plongées dans les forages. Les registres de tubes amenant l'eau à la pompe à chaleur sont encore à l'air libre.

Petit vocabulaire de la géothermie

La **géothermie**, ou **chaleur du sous-sol**, provient du noyau terrestre, où la température est de 6000 °C, et de la radioactivité de la croûte terrestre. En moyenne, la température augmente de 30 °C par 1000 m de profondeur, pour atteindre environ 70 °C à 2000 m (température moyenne à la surface: 10 °C).

Les **sondes géothermiques** (SGT) sont disposées dans les **couches »peu profondes«**, jusqu'à quelques centaines de mètres, exploitant ainsi de la chaleur à une température de 20 à 30 °C. La technique est la suivante: on enfonce un tube en U en matière plastique de quelques cm d'épaisseur dans des forages de 150 à 200 m de profondeur, et on **bouffe les interstices** d'un matériau ayant une bonne conductibilité thermique. Le »sol« dont sont emplis les tubes s'échauffe de quelques degrés, puis une **pompe à chaleur** en porte la température à 30 à 50 °C pour le **chauffage au sol**.

La **géothermie »profonde«**, faisant intervenir des températures jusqu'à 200 °C, requiert des forages de quelques milliers de mètres de profond, essentiellement dans des **»anomalies géothermiques«** où le »gradient de température« est supérieur à la moyenne de 30 °C par 1000 m. Hormis les **forages destinés à trouver de l'eau chaude**, on se sert de trois techniques:

Les **sondes géothermiques profondes**, p.ex. disposées dans des forages borgnes de 2000 m servant à la prospection de pétrole, pénètrent dans des zones où la température peut atteindre 70 °C et rendent superflue la pompe à chaleur.

Dans le **procédé dit HDR** (Hot Dry Rock), de l'eau froide sous pression se réchauffe dans des couches rocheuses sèches dans lesquelles on a créé des fissures par pression hydraulique.

Dans le **procédé HWR** (Hot Wet Rock), on perce des nappes aquifères à des températures de 100 °C et plus.

Ces deux procédés fournissent de la vapeur que l'on peut utiliser ensuite pour produire du courant et de la chaleur.

Sous-domaine
Géothermie

Du courant produit par le vent ...

Depuis la crise du pétrole de 1973, les **installations éoliennes** connaissent un bel essor dans le monde entier. **En Suisse, ce n'est guère que dans les reliefs montagneux, par exemple au Chasseral, que l'on trouve des sites offrant les conditions anémométriques requises.** L'énergie éolienne ne fournira donc jamais qu'une contribution marginale à l'approvisionnement électrique de notre pays, raison pour laquelle **il n'a jamais été question de mener nos propres recherches technologiques dans ce domaine.** Force est cependant de constater que **le courant électrique produit par l'exploitation de l'énergie du vent pourrait jouer un certain rôle à l'échelon local et régional.** L'OFEN a donc voulu savoir, en 1987, quel pourrait être **le potentiel éolien »économiquement utile« sur le plan suisse: 3 % de la consommation actuelle d'électricité.** A l'époque, on estimait entre 75 et 150 kW la puissance de crête maximale d'une éolienne. Or, dans les années 1990, ce sont plutôt les éoliennes de 500 à 600 kW qui sont devenues la norme. Et comme elles produisent à des conditions beaucoup plus favorables, le potentiel devrait donc être sensiblement plus élevé.

Après l'installation d'une éolienne de 30 kW sur le Sool en 1986, onze centrales éoliennes, dont la puissance pouvait aller jusqu'à 600 kW, ont été mises en service de 1990 à 1996. D'autres sont en projet. On espère abaisser à 30 ct./kWh le prix de revient du courant ainsi produit (contre 10 ct./kWh sur la côte allemande de la mer du Nord, ou par les centrales hydrauliques 6 ct./kWh).

Les pouvoirs publics contribuent au **transfert** en subventionnant les **programmes de mesure réalisés sur les éoliennes.** Les résultats servent à élaborer une banque de données destinée à faciliter le choix et l'étude des sites potentiels. Une carte des vents et des zones naturelles placées sous protection doit permettre de déterminer les régions les plus propices à l'utilisation du vent.

... et par l'eau

Les premières centrales hydrauliques produisant du courant électrique datent du XIXe siècle et étaient de petites installations. Au tournant du siècle, on en compta rapidement plusieurs milliers dans notre pays. Plus tard, nombre d'entre elles furent abandonnées parce que les nouvelles grandes centrales hydroélectriques étaient beaucoup plus rentables. Dans les années quatre-vingt, la politique énergétique reconnut en elles l'appoint d'une **énergie propre.** On recensait alors **1000 installations en fonction,** qui fournissaient **9 % du courant produit par l'ensemble du parc hydroélectrique suisse.**

Le **programme DIANE »petits aménagements hydroélectriques«** de l'OFEN, qui a démarré en 1992, a pour objet de déterminer le potentiel de ces installations dans les conditions actuelles; il conclut que **la production de courant par ces petites centrales peut être doublée.** Pour cela, il faut non seulement remettre en activité des installations laissées à l'abandon et augmenter la capacité de celles qui continuent à produire, mais encore en **construire de nouvelles.** Celles-ci pourraient se situer sur des réseaux d'eau potable et d'eau usée présentant une hauteur de chute et un débit suffisants.

Le principal objectif de l'encouragement à la recherche est d'accroître la production et la rentabilité, en général par le biais de l'amélioration des rendements. De très petites centrales transportables (»pico-centrales«) pourraient alimenter en électricité des exploitations agricoles de montagne. Pour être bien accueillies par le grand public, il faut que les installations s'intègrent dans le paysage.

Pour **mettre en pratique** les résultats des travaux de recherche, on est en quête d'installations P+D dignes d'être soutenues. Des rencontres annuelles de spécialistes et un grand congrès sont prévus. Un **»Manuel des petits aménagements hydroélectriques«** contenant toutes les informations utiles aux maîtres d'oeuvre et aux exploitants paraîtra en 1997.



Éolienne de 150 kW, Obergrenchenberg (30 m de haut, diamètre du rotor 24 m, 140'000 kWh/an): démonstration de cette gamme de puissance, évaluation de l'impact sur le paysage.



Petit aménagement hydraulique de 110 kW au Toggenbourg, remis en service en 1996 moyennant mesures de protection de l'environnement: p.ex. conservation de la digue datant de 1894, salle des machines munie d'un vitrage antibruit.

Petit vocabulaire éolien

Les **installations éoliennes** modernes comportent une turbine et une génératrice de courant.

Actuellement, la **turbine éolienne** est généralement une hélice à axe horizontal et à 2 ou 3 pales (différentes des larges pales des moulins à vent d'autrefois), montée sur un mât ou une tour (avec la génératrice); dans le cas des rotors à axes et pales verticaux, la génératrice peut être placée au sol. Les hélices à haut régime ont de meilleurs rendements. Les éoliennes sont qualifiées de petites jusqu'à 100 kW de puissance, de moyennes jusqu'à 1 MW (la hauteur du mât et le diamètre de l'hélice peuvent atteindre 50 m), et de grandes au-delà de cette puissance.

A proximité du sol, la végétation et les constructions **freinent le vent,** raison pour laquelle on place les turbines sur de hautes tours.

Petit vocabulaire des petits aménagements hydroélectriques

Les **petits aménagements hydroélectriques** sont des installations de moins de 10 MW de puissance. Les très petits aménagements ou pico-centrales ont une puissance inférieure à 300 kW.

Ce sont des types de turbines éprouvés, p.ex., des turbines à circulation, Pelton, Francis ou Kaplan, ainsi que des pompes inversées. Grâce à des **turbines à bulbe** bon marché, il est possible d'exploiter avec de bons rendements, et donc de manière rentable, même des chutes de très faible hauteur. Ces turbines réduisent la hauteur et permettent donc de construire de petites salles des machines peu visibles dans le paysage.

La **rentabilité** repose sur un dimensionnement optimal, une construction peu coûteuse et un **débit annuel régulier,** ainsi qu'une **exploitation entièrement automatique, ne requérant pas la présence de personnel.**

Sous-domaines

Vent

Petits aménagements hydroélectriques

Stockage: chimie solaire, ...

Dans le sillage de la crise pétrolière de 1973, les travaux de recherche sur les fours solaires ont fait germer l'idée d'utiliser le rayonnement solaire concentré pour produire non seulement de l'électricité, mais encore de **l'hydrogène et d'autres agents énergétiques chimiques pouvant jouer le rôle d'accumulateurs**. Très vite, les travaux effectués en Suisse ont placé notre pays à la pointe de la **chimie solaire**, en compagnie des Etats-Unis, de l'Allemagne et d'Israël. Les récents travaux novateurs menés dans notre pays traitent, p.ex., de la production d'hydrogène par dissociation de l'eau.

Dans le programme de recherche 1996/99, l'OFEN donne la priorité aux procédés qui semblent rentables et applicables à l'échelon industriel en Suisse dans un laps de temps adéquat:

- **Perfectionnement des absorbeurs solaires** fonctionnant, respectivement, à des températures entre 80 et plus de 800 °C et destinés à la production d'eau chaude et au séchage des aliments, mais aussi aux applications de la chimie solaire à haute température.
- En **chimie solaire à haute température**, p.ex., transformation d'oxydes métalliques au moyen de gaz naturel et d'eau pour produire des métaux et du gaz combustible
- Utilisation d'hydrogène non seulement comme combustible (p.ex. pour les moteurs), mais encore comme matière première chimique. Poursuite des travaux visant à trouver de meilleurs hydrures métalliques comme accumulateurs à hydrogène.
- En vue de résoudre le problème du CO₂: **production de substances chimiques de haute valeur**, p.ex. du méthanol, à partir du CO₂ par réactions catalytiques sélectives avec l'hydrogène.
- **Dissociation photoélectrique de l'eau** au moyen de semiconducteurs spéciaux.

De nombreux résultats des recherches menées en chimie solaire ne seront **applicables que dans un avenir éloigné**.

... réservoirs d'eau et sol

Depuis 1970, le **stockage de la chaleur** est un sujet important de la recherche énergétique, surtout parce qu'il permet **de compenser les variations de l'intensité du rayonnement solaire dans le temps**. Un grand nombre de projets coordonnés par l'OFEN ont apporté de précieux résultats – p.ex., le fait que les accumulateurs de chaleur latente n'entrent pour ainsi dire pas en ligne de compte à cause de leur toxicité et de leurs coûts trop élevés, et que les aquifères (de l'eau chaude est injectée sous pression dans une couche souterraine en été pour en être extraite en hiver) n'entrent en considération que dans des cas très favorables. Les **travaux d'avant-garde réalisés en Suisse** sont l'accumulateur à diffusion et la découverte d'un phénomène: dans les récipients contenant de l'eau très chaude, il se forme des couches isothermes qu'il est possible d'utiliser de manière à économiser l'énergie.

Le programme de recherche 1996/99 se concentre sur les accumulateurs d'eau chaude et au chauffage, dans les bâtiments existants et dans ceux dont on envisage la rénovation. Ses priorités:

- **Réservoirs d'eau très chaude pour l'accumulation diurne/nocturne**: ce sont les accumulateurs de loin les plus importants actuellement; on peut encore en améliorer la mise en charge solaire (p.ex. par la création systématique de couches isothermes) tout en augmentant l'efficacité du système.
- **Accumulateurs à diffusion** pour des températures entre 30 et 80 °C, et de taille moyenne, incorporant entre 10 et 100 sondes géothermiques (pour des immeubles locatifs): optimisation requise du type de sondes, de leur géométrie, des matériaux utilisés et du dimensionnement des systèmes.

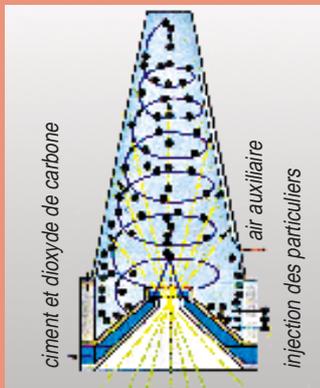
L'application de la recherche sur le stockage de la chaleur se fait essentiellement par le biais de programmes de mesure.



Stockage de rejets de chaleur pour un complexe d'habitation à Buchrain, comportant 19 sondes géothermiques de 200 m de profondeur.



Au foyer du miroir parabolique de 90 m² du PSI est disposé un réacteur solaire à cyclone de 56 kW, chauffé par le rayonnement solaire concentré.



Réacteur solaire à cyclone: la poudre de calcaire injectée réagit pour former du ciment et du dioxyde de carbone.

Petit vocabulaire de la chimie solaire

La **chimie solaire** s'occupe de la production peu polluante de matières premières et de substances chimiques par l'action du rayonnement solaire concentré et/ou de la chaleur solaire. Le potentiel important qu'elle comporte laisse entrevoir une large application de l'énergie solaire en lieu et place des combustibles fossiles. On distingue trois procédés de base:

- La voie **thermochimique** utilise la chaleur solaire comme «moteur» de réactions chimiques nécessitant de grandes quantités d'énergie (p.ex. la calcination préparative du ciment).
- La **photochimie** se sert directement du rayonnement solaire absorbé par des réactifs.
- La **photoélectrochimie** se sert du courant électrique d'origine solaire (p.ex. photovoltaïque) pour opérer des réactions électrochimiques (p.ex. l'électrolyse de l'eau).

On peut aussi envisager des combinaisons de ces trois procédés.

Petit vocabulaire du stockage de la chaleur

Les **accumulateurs de chaleur** servent à équilibrer l'offre et la demande de chaleur. Deux notions importantes:

- La **chaleur perceptible ou sensible** se traduit par une élévation de la température du matériau accumulateur.
- Lorsqu'il absorbe ou fournit de la **chaleur latente**, un matériau fond ou se solidifie sans changer de température. Dans la pratique, on groupe les accumulateurs de chaleur (exemples) ainsi:
 - Accumulateurs à eau très chaude: récipients dotés d'une isolation thermique; jusqu'à 100'000 m³, et à 95 °C.
 - Accumulateurs à chaleur latente: de la glace ou certains sels.
 - Accumulateurs à diffusion, dans la terre ou les couches rocheuses: chargés et déchargés par des sondes géothermiques; la chaleur ou le froid fournis diffusent dans le sol.

Sous-domaines
**Chimie solaire/
hydrogène**

**Stockage
de la
chaleur**

Une combustion propre grâce au laser et à l'ordinateur

La **combustion du pétrole et du gaz naturel** couvre la plus grande partie de la demande actuelle d'énergie. Revers de la médaille, elle est **aussi la principale source de polluants atmosphériques**. C'est ce qui a incité les chercheurs du monde entier à y travailler davantage dans les années quatre-vingt. Jusqu'alors, la construction de brûleurs et de moteurs obéissait essentiellement à la méthode »par tâtonnements«. C'est **en 1988 que l'OFEN a lancé le programme de recherche sur la combustion**, dans le but de **créer une base scientifique à l'intention de l'industrie** dans ce domaine où presque tout reste à faire dans notre pays. La recherche sur la combustion s'est concentrée dans trois instituts de l'EPF Zurich et à l'Institut Paul-Scherrer (PSI):

- L'une de ses priorités était le **procédé au laser optique**, technique standard de diagnostic des processus de combustion. Son principe: un rayon laser pénètre, p.ex., dans la chambre de combustion d'un moteur diesel; au contact des particules de substances polluantes, ce faisceau est diffusé et la diffusion donne – optiquement et après conversion via un ordinateur – des renseignements sur la nature, la taille, la concentration et la vitesse des particules. A leur tour, ces données permettent de décrire les mécanismes de formation des polluants. **Le PSI et l'EPFZ sont parvenus à développer des méthodes internationalement reconnues**, p.ex., un procédé de résolution au 100 millionième de milliardième de seconde grâce auquel on peut désormais étudier les processus les plus rapides.
- La deuxième priorité était la **simulation numérique des processus de combustion**, autrement dit leur modélisation mathématique assistée par ordinateur, une méthode qui complète de procédé au laser optique. Ici, les chercheurs de l'EPFZ ont développé notamment un programme de simulation qui permet d'**importants gains de temps** dans la construction de brûleurs peu polluants pour chauffages au mazout.
- Troisième priorité: amélioration de méthodes d'**analyse des polluants et étude de la formation de ces substances** dans les brûleurs et les moteurs, p.ex. dans le cas des moteurs diesel à injection. On a surtout **approfondi la connaissance de la réduction des oxydes d'azote dès le brûleur et la chambre de combustion**, résultats qui seront appliqués à la prochaine génération de brûleurs.
- Quatrième priorité: **nouvelles techniques de combustion peu polluantes**, p.ex. la combustion catalytique, et de **nouveaux procédés de filtrage**, p.ex. pour la suie produite par les poids lourds diesel.

Au milieu des années 1990, on savait que **la méthode par tâtonnements était définitivement révoquée** du fait de la recherche intensive menée à l'échelon international et de ses résultats. Au cours de la **période 1996/99**, il faudra donc se concentrer systématiquement sur la **résolution des tâches incomplet à l'industrie suisse**, celle-ci devant elle-même se familiariser avec les nouvelles possibilités. Les priorités énoncées demeurent cependant, car il faut assurer la continuité et suivre l'évolution internationale – l'informatique et le laser ouvrent sans cesse de nouveaux horizons. Toutes ces priorités ont un dénominateur commun: **la réduction »intégrée« des polluants**, c'est-à-dire la mise au point de systèmes qui empêchent la production de polluants dès le stade de la combustion, plutôt que l'adjonction, en bout de chaîne, »d'usines chimiques« servant à les retenir.

Il est rarement possible d'appliquer directement les résultats de la recherche sur la combustion menée dans les Hautes Ecoles à des produits commercialisables. Aujourd'hui, **de plus en plus de firmes cherchent à coopérer** parce qu'elles ont pris conscience du potentiel de ces institutions, mais aussi des sommes considérables que leur coûteraient leurs propres travaux de recherche. Il faudra désormais abolir les barrières en réalisant des projets communs d'installations P+D.

Petit vocabulaire de la combustion

Par **combustion**, on entend généralement la réaction chimique rapide, exothermique, d'un combustible avec l'oxygène de l'air, accompagnée de la formation d'une flamme – le procédé de transformation énergétique le plus répandu.

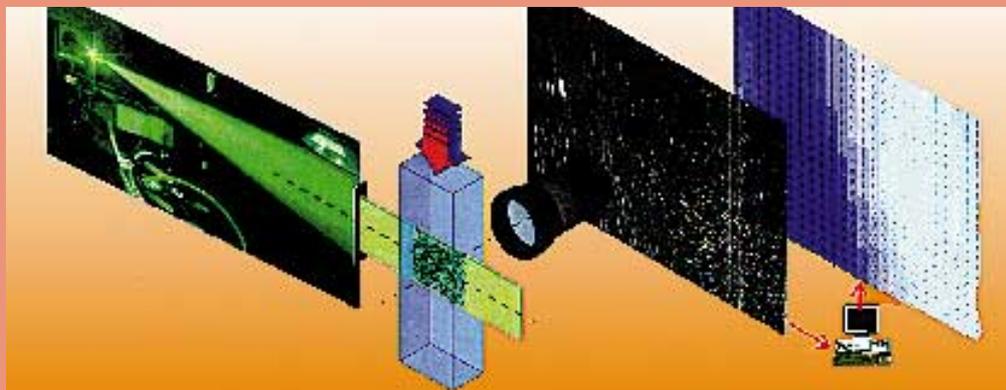
La **production de polluants** est déterminée par la composition du combustible et la température de combustion: lorsqu'il brûle dans de l'oxygène pur (O_2), le carbone (C) forme du dioxyde de carbone (CO_2). Durant leur combustion dans de l'oxygène pur, les hydrocarbures purs produisent, eux, du CO_2 et de l'eau.

Les combustibles ne sont jamais purs et les processus de combustion, jamais idéaux. Normalement, le comburant est de l'air et non pas de l' O_2 pur. Or, l'air contient 21 % de l' O_2 , mais aussi 77 % d'azote (N_2). Durant la combustion, ce dernier se combine à l'oxygène (d'autant plus que la température est élevée) pour former des oxydes d'azote (gaz à effet de serre et précurseurs de l'ozone). Si la combustion est incomplète, p.ex. si l'air manque ou si la température est trop basse, il se forme non seulement du CO_2 , mais encore du **monoxyde de carbone** (CO), très toxique, et de la **suie**.

Il existe des procédés qui **réduisent les émissions** de ces polluants et d'autres substances (p.ex. la dénitruration par abaissement de la température de combustion), qui **transforment certains polluants** (avec des catalyseurs) ou qui les **brûlent** (p.ex. la suie extraite des filtres).

Dans le but de remédier par des dispositifs techniques à ces phénomènes secondaires indésirables, la **recherche sur la combustion** veut répondre à une question: comment et où, à l'intérieur des chambres de combustion et des moteurs, les polluants se produisent-ils?

Dans la combustion »froide« ou »catalytique«, le combustible (p.ex. du gaz naturel) et l' O_2 ou l'air sont amenés sur des catalyseurs et il est possible d'abaisser la température de la réaction jusqu'à la température ambiante par dosage du combustible.



Diagnostic par laser: un rayon laser (gauche) pénètre dans la zone de combustion (bleue). Ce faisceau est diffusé par des particules de combustible. Les rayons diffusés latéralement sont focalisés par une optique (au milieu) sur un film où les traces lumineuses représentent l'écoulement des particules dans la zone de combustion. L'analyse informatisée visualise le champ de vitesse (droite) dans le plan du rayon laser.

Sous-domaine
Combustion

Recherche sur la sûreté des centrales nucléaires

Avec une part de près de 40 %, les centrales nucléaires sont l'un des principaux piliers de la production suisse de courant électrique après les aménagements hydroélectriques. C'est ce qui explique pourquoi la politique énergétique tient fermement à l'énergie nucléaire, tant pour aujourd'hui que **pour l'avenir**. **Cette option, mais aussi la nécessité d'exploiter les centrales actuelles en toute sécurité, impliquent une recherche** qui comporte deux volets: la recherche technico-scientifique et la recherche réglementaire sur la sûreté. Comme les deux se complètent mutuellement, elles sont soutenues par les pouvoirs publics et coordonnées par l'OFEN. Les chercheurs impliqués doivent suivre en permanence l'évolution de la science et de la technique afin de maintenir leur niveau de compétence, et participer à des projets internationaux.

La **recherche technico-scientifique en matière de sûreté nucléaire** a pour but de recueillir de nouvelles connaissances sur la sûreté des réacteurs, d'évaluer la marge de sûreté qu'offrent les installations actuelles et d'examiner l'efficacité des nouvelles dispositions. En Suisse, elle est concentrée à l'Institut Paul-Scherrer (PSI), où sont menés des projets à moyen et à long terme. L'adaptation des priorités aux nouveaux besoins et aux progrès technico-scientifiques se fait donc par étapes successives. Durant la période 1996/99, les travaux devront être davantage centrés sur les besoins des centrales nucléaires suisses et des autorités de surveillance:

- Dans **l'analyse des accidents**, on étudie certains cas, on en modélise le déroulement et des relâchements de radioactivité, puis on vérifie ces modèles au moyen d'expériences spécifiques. On obtient alors des renseignements sur les améliorations possibles de la sûreté des centrales nucléaires. C'est aussi de cette façon que l'on observe le vieillissement des installations consécutif, notamment, à la corrosion de leurs composants.
- Les analyses de la sûreté des **dépôts finals de déchets radioactifs** concernent en particulier la rétention des substances radioactives dans les dispositifs de confinement des dépôts.

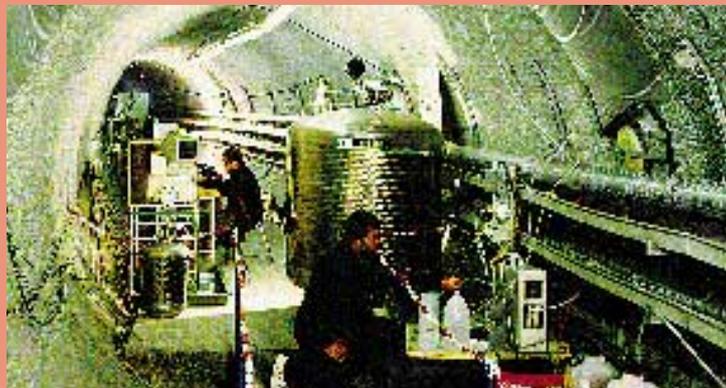
La mission de la **Division principale de la sûreté des installations nucléaires (DSN)** de l'OFEN, autorité de surveillance de la Confédération, consiste à évaluer la sûreté des centrales nucléaires suisses et, le cas échéant, à imposer les mesures requises pour l'améliorer. A cet effet, la DSN effectue une recherche dite **recherche réglementaire**, par l'intermédiaire du PSI, des Hautes Ecoles et des entreprises d'ingénierie de Suisse et de l'étranger, auxquels elle confie des projets. La recherche menée par la DSN repose sur la continuité, raison pour laquelle ses priorités pour la période 1996/99 ne changent pas par rapport au programme précédent:

- Amélioration des analyses d'accidents pour centrales nucléaires suisses. Analyses anticipées allant du simple incident d'exploitation jusqu'à l'accident de dimensionnement sur la base des expériences. Définition des mesures de protection contre d'éventuels accidents.
- Surveillance du vieillissement des composants et des ouvrages mécaniques et électriques dans le but de garantir la sûreté des centrales nucléaires indépendamment de leur âge.
- Développement de méthodes fiables d'évaluation de la sûreté des dépôts finals.
- Approfondissement des connaissances en matière de radioprotection des centrales nucléaires.

Mettre en pratique les résultats de la recherche sur la sûreté, c'est non seulement accroître les compétences des chercheurs, de la DSN et des exploitants de centrales, mais encore améliorer la sûreté de ces dernières, que ce soit sur injonction de la DSN ou pour répondre aux intentions des exploitants eux-mêmes. Ces améliorations complémentaires se font en permanence.



L'installation d'essai thermohydraulique PANDA au PSI sert à démontrer le fonctionnement de systèmes de sûreté passifs.



Dans le laboratoire souterrain du col du Grimsel, dans l'embranchement d'une galerie de la centrale hydroélectrique, des expériences sont effectuées dans la perspective d'un dépôt final pour déchets radioactifs. Ici une installation de mesure de la propagation («migration») de radionucléides dans le rocher.

Petit vocabulaire de la sûreté des réacteurs

Dans le réacteur d'une **centrale nucléaire**, la fission contrôlée de noyaux d'atomes dégage de la chaleur que l'on utilise ensuite pour produire de la vapeur. Celle-ci entraîne un turbogénérateur qui produit de l'électricité. En fonctionnement normal, les centrales nucléaires émettent dans l'environnement de minimes quantités de substances radioactives, que les autorités de surveillance considèrent comme inoffensives.

Par **accidents**, on entend des situations qui s'écartent de l'ordinaire, tel qu'il figure dans les prescriptions, et qui aboutissent à provoquer le rejet de polluants dans l'environnement et à créer un danger pour la santé de la population.

Les centrales nucléaires sont construites de manière à supporter ce qu'on appelle **l'accident pris de dimensionnement** («le plus grave accident possible»). En l'occurrence, on admet que la défaillance du système de refroidissement du réacteur peut entraîner des destructions à l'intérieur du bâtiment du réacteur (p.ex. la fusion du cœur) sans toutefois provoquer un relâchement de radioactivité susceptible d'exposer la population à des doses excessives.

Mesures de sécurité:

- Application des phénomènes physiques propres à assurer l'arrêt du réacteur en cas d'incident.
 - Système de refroidissement d'urgence fiable pour combattre la surchauffe.
 - Confinement des produits de fission radioactifs par plusieurs barrières successives – combustible solide, gaines des barreaux de combustible étanches, cuve pressurisée du réacteur en acier spécial, enceinte de confinement (enveloppe de sécurité étanche en tôle d'acier abritant le réacteur), bâtiment du réacteur en béton armé.
 - Protection contre les actions extérieures par des mesures techniques (construction) et organisationnelles.
- La probabilité de survenance d'un accident majeur, le «risque résiduel», même si elle est infime, n'est pas nulle.

Sous-domaines
Technique et sûreté nucléaire

Recherche réglementaire sur la sûreté

A petits pas vers un objectif ambitieux: la fusion nucléaire

La recherche sur la fusion – tentative de reproduire sur Terre les réactions thermonucléaires qui se passent dans le Soleil – remonte aux années 40. En dépit des obstacles – ils dépassent tout ce qu'on avait prévu –, trois facteurs ont conduit les chercheurs à persévérer: l'eau de mer contient des quantités inépuisables de deutérium, le combustible nécessaire pour la fusion; 1 g de ce combustible produit autant d'énergie que 6 tonnes de pétrole; et enfin, les experts croient pouvoir développer des réacteurs sûrs, toujours sous contrôle, et qui ne produiraient pas de déchets hautement radioactifs.

La recherche sur la fusion n'est pas seulement complexe, elle est aussi extrêmement onéreuse. C'est ce qui a poussé **les pays européens à s'unir**, dans les années 1950 déjà, **en une communauté baptisée EURATOM** (voir p. 21), et à partager ainsi les coûts et les tâches. La Suisse a pu y adhérer comme membre à part entière dans les années 1970. **L'objectif principal de ces prochaines années s'appelle ITER**; il s'agit du premier véritable réacteur expérimental, sur le modèle du confinement magnétique, produisant plus d'énergie qu'il n'en consomme. C'est en 1998 que sera prise la décision de son emplacement et de ses dimensions. Le Japon, la Russie, les Etats-Unis et le Canada participent au projet ITER aux côtés d'EURATOM.

Les tâches de la Suisse dans le programme EURATOM sont gérées par le Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) de l'EPF Lausanne. Le CRPP, qui accomplit également la plupart des travaux de recherche, comporte un sous-groupe en fonction au PSI.

- **Les questions physiques du confinement magnétique** sont étudiées expérimentalement et théoriquement. Sur le Tokamak TCA, on a trouvé, dans les années 1980, que les plasmas ayant une forme en D, en O ou en S possèdent une densité plus élevée que les plasmas de section circulaire (la densité élevée est l'un des principaux «critères d'allumage», à côté de températures supérieures à 100 millions de degrés). De ce fait, on étudie actuellement de telles sections sur le **Tokamak à configuration variable (TCV)**. Ce système permet d'opérer des variations importantes de la hauteur et de la largeur du tore. D'autres expériences effectuées sur le TCV concernent le **chauffage du plasma par couplage d'ondes radio à haute fréquence**. De leur côté, les travaux théoriques, étayés par des simulations numériques très coûteuses, visent à modéliser les expériences.
- Un élément prépondérant des futurs réacteurs est la **«première paroi»**, qui isole la chambre à plasma de l'extérieur. Cette paroi est traversée par les neutrons qui transmettent l'énergie de fusion et qui se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière; elle est donc radioactivée et se fragilise. Par conséquent, on teste sur un accélérateur de protons des matériaux de construction solides et peu activables, notamment des **aciers spéciaux, ainsi que des éléments du système ITER et des revêtements** (en vue de réduire les atomes arrachés aux parois, qui polluent le plasma).
- L'une des tâches qui incombent également à la Suisse est **le développement et l'essai de grandes bobines d'électro-aimants supraconductrices** supportant les champs magnétiques élevés du réacteur ITER.

Même si le projet ITER devait être une réussite, c'est-à-dire s'il aboutissait à un bilan énergétique positif, en l'état actuel des connaissances, on pourrait difficilement envisager la construction d'une centrale nucléaire basée sur la fusion avant le milieu du siècle prochain.

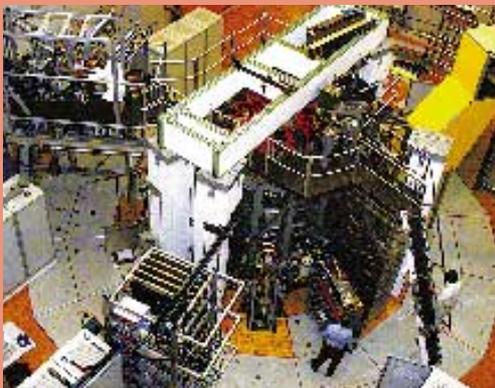
Les expériences du CRPP sont déjà **mises en pratique** aujourd'hui, en collaboration avec des entreprises industrielles suisses, dans **le revêtement plasmatique hautement résistant d'outils**, p.ex. par des couches de diamant obtenues par dépôt dans un plasma de carbone.

Petit vocabulaire de la fusion nucléaire

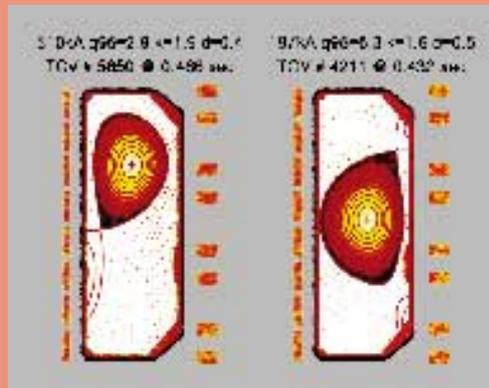
La **fusion nucléaire** est le processus fondamental de la production d'énergie dans les étoiles: des noyaux des atomes les plus légers – hydrogène normal, hydrogène lourd (deutérium) et superlourd (tritium), ainsi qu'hélium – «fusionnent» en libérant de l'énergie.

L'argument qui sous-tend les efforts visant à faire fonctionner des réacteurs de fusion sur Terre est le fait que 1 g de combustible contient autant d'énergie que 6 t de pétrole. Mais cela suppose que l'on parvienne à rapprocher l'un de l'autre les noyaux (de charge positive) en vainquant leurs forces électriques de répulsion respectives de manière à ce qu'aigissent les forces d'attraction de masse. Cela n'est possible que lorsque les atomes ont une très grande énergie cinétique, c-à-d qu'ils sont portés à des températures de plusieurs millions de Kelvin (K). Au centre du Soleil, la température atteint 15 millions de K et la densité 150 g/cm³ du fait que la masse de l'astre du jour est égale à 300'000 fois celle de la Terre. Comme il est impossible d'atteindre une telle densité sur notre planète (plomb 11,3 g/cm³), la température doit atteindre au moins 100 millions de K.

La **recherche sur la fusion** se concentre sur le confinement magnétique. A quelques milliers de K déjà, la matière devient ionisée, se sépare en noyaux électriquement positifs et en électrons négatifs. Un tel **plasma** peut être confiné dans des champs magnétiques, que l'on crée dans une machine appelée Tokamak: un tube sous vide d'air, formant un anneau (tore), est rempli de matériau de fusion ionisé. Le tore forme le bobinage d'un transformateur. Si l'on enclenche celui-ci, le matériau de fusion devient un courant annulaire et le champ magnétique l'oblige à circuler au milieu du tore. En raison des chocs qui se produisent entre ses particules, le plasma s'échauffe à millions de K. On peut augmenter cette température en injectant des faisceaux d'ions de haute énergie ou par couplage d'ondes électromagnétiques.



Le TCV (Tokamak à configuration variable) du CRPP à Lausanne. Sur la passerelle, à gauche en haut, sont installés les guides d'ondes pour la très haute fréquence de 82,4 GHz, qui sert de chauffage d'appoint du plasma.



La recherche sur le TCV se concentre sur la création de formes intéressantes de plasma. Ici, deux formes calculées à partir de mesures effectuées sur la section de l'anneau du TCV.

Sous-domaine

Fusion nucléaire

Accumulateurs pour le ménage, la voiture et l'industrie

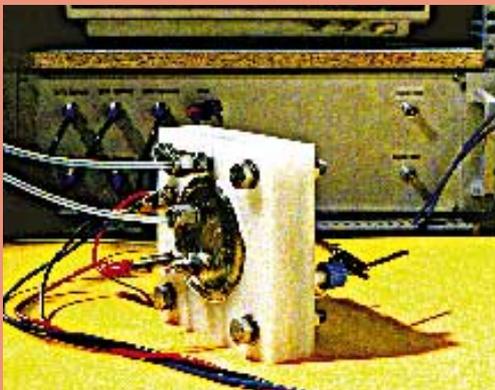
Les batteries sont les principaux dispositifs de stockage d'électricité. Les accumulateurs servent au démarrage des véhicules à moteur ou à l'alimentation de secours des hôpitaux en cas de coupure de courant. **On estime que 3 millions d'accumulateurs au plomb sont en service en Suisse et que plus de 50 millions de batteries et de petits accumulateurs destinés aux petits appareils électriques et électroniques sont vendus chaque année.**

Les batteries **peuvent poser des problèmes d'élimination à cause de leur nombre et de leur teneur en polluants** (p.ex. le cadmium dans certains modèles). Les accumulateurs au plomb usagés sont recyclés presque à 100 %. On sait également recycler des autres batteries, mais leur collecte est très lacunaire. Quant aux substances polluantes, elles sont de plus en plus remplacées par des matériaux plus écologiques. Les batteries non rechargeables sont aussi des **gouffres énergétiques**: leur fabrication engloutit 50 fois plus d'énergie qu'elles ne pourront en fournir. Quant aux **accumulateurs actuels, ils sont trop lourds pour la voiture électrique. L'utilisation d'énergie renouvelable** par le biais de cellules photovoltaïques, elle aussi, **nécessite de meilleurs accumulateurs.**

Cela montre bien qu'**il est nécessaire de continuer les recherches, tant sur les anciens que sur les nouveaux types de batteries** et, cela, aussi dans une perspective écologique. Comme il faut préserver la compétitivité et la performance de l'industrie suisse des batteries, l'OFEN encourage la recherche depuis 1988. La période 1996/99 s'inscrit dans la ligne tracée durant la période 88/95, qui a vu **les progrès déjà importants** aboutir à la réalisation de nouveaux produits. **La recherche s'est focalisée sur quatre principaux types de batteries:**

- **L'accumulateur au plomb:** de loin le plus économique actuellement, **son perfectionnement vise essentiellement l'utilisation dans la voiture hybride diesel/électrique.** Celle-ci possède deux types d'entraînement, un moteur diesel et un moteur électrique. Deux objectifs sont prioritaires: réduire le poids des électrodes (aujourd'hui environ 11 kg dans l'accumulateur d'une voiture) et mettre au point des chargeurs intelligents, adaptant automatiquement le courant de charge à l'état de l'accumulateur (vu la concurrence mondiale, la Suisse se concentre sur les composants clés).
- **L'accumulateur zinc/air** justifie un développement 100 % suisse. **Pour un véhicule électrique,** il offre une densité de puissance plus élevée que l'accumulateur au plomb. Les obstacles qu'il reste à surmonter sont le mouillage et la stabilité de l'électrode à l'air ainsi que la carbonisation de l'électrolyte. Un modèle opérationnel devrait être prêt au montage en 1999.
- **L'accumulateur nickel/hydrure métallique** pourrait remplacer l'accumulateur nickel/cadmium, car le cadmium est toxique pour l'environnement. On est à la recherche de meilleurs alliages pour l'électrode d'hydrures métalliques; la tâche en incombe à 100 % à la Suisse.
- **L'accumulateur ions-lithium** est celui dont **on attend la plus grande charge massique** (340 Ah/kg contre env. 20 Ah/kg pour l'accumulateur au plomb actuel). Les électrodes contiennent du lithium, un métal léger hautement réactif, et des oxydes métalliques ou des polymères. Comme cet accumulateur est déjà fabriqué par millions d'unités au Japon pour l'électronique portable, la chance de la Suisse réside dans la recherche d'applications spéciales de l'électrode au lithium, un composant clé, ainsi que des questions de sécurité du système.

Les applications ne sont prometteuses que si la recherche se concentre sur les modèles et composants les plus porteurs; raison pour laquelle l'industrie et l'OFEN sont en étroit contact pour en fixer les priorités. Un projet P+D d'accumulateur nickel/hydrures métalliques de 12 V et 9 Ah, a réalisé plus de 600 cycles de charge.



Une pile zinc/air rechargeable sur les bancs d'essai de l'Institut Paul-Scherrer pour un nouvel accumulateur. La capacité nominale de la pile est de 2,4 Ah, sa tension au repos de 1,4 V environ.



Composants de la pile zinc/air: la main tient l'électrode de zinc enveloppée dans un matériau de séparation poreux; la partie sombre dans le boîtier est l'électrode bifonctionnelle à air.

Petit vocabulaire des accumulateurs

Dans les **piles électrochimiques**, des réactions chimiques entre deux électrodes de composition différente produisent de l'énergie, qui est transformée ensuite en courant électrique (et en chaleur). Les électrodes sont constituées de matériaux qui fournissent de l'oxygène (p.ex. air, oxydes) et d'un matériau oxydable (p.ex. plomb, hydrogène, zinc). Elles sont séparées l'une de l'autre par un électrolyte (p.ex. acide, polymères spéciaux ou céramiques) qui conduit les ions, porteurs des charges électriques, d'une électrode à l'autre – un courant électrique.

Dans les **piles dites primaires**, les réactions cessent dès que les électrodes sont consommées – processus irréversibles. Dans les **piles dites secondaires**, une charge provenant d'une source extérieure permet d'inverser la réaction, d'où le nom d'**«accumulateurs»**.

Il existe de nombreuses combinaisons d'électrodes et d'électrolytes. La tension est généralement entre 1 et 2 V. Pour obtenir des tensions plus élevées, on relie plusieurs piles en **batteries**.

Seules les batteries avec une faible autodécharge et dont les matériaux constitutifs ne coûtent pas cher ont une valeur pratique. Les principales piles primaires sont de types **carbone/zinc** et **alkali/manganèse**; toutes deux sont à **usage domestique**, p.ex. pour les lampes de poche et les appareils électroniques courants. Les **piles au lithium** remplacent de plus en plus les modèles au **mercure** dans les appareils auditifs, les montres et les appareils photo.

Le principal **accumulateur** est dit **«au plomb»** (électrodes de plomb et d'oxyde de plomb, acide sulfurique comme électrolyte). **L'accumulateur nickel/cadmium** a gagné en importance pour appareils photo et outils électriques. Les nouveaux accus, dotés d'une capacité plus élevée, sont testés pour les véhicules électriques. L'objectif est de trouver des systèmes ayant la plus grande énergie massique (Wh/kg) et puissance volumique (W par litre d'accumulateur).

Domaine

**Accumulateurs/
piles à combustible**

Piles à combustible pour le chauffage, l'électricité et l'auto

Les médias parlent de plus en plus de la «pile à combustible», à grand renfort de superlatifs. Le principe: on alimente une pile avec de l'air et du combustible, et elle restitue du courant et de la chaleur, avec un rendement de 80 %. Cette merveille conviendrait essentiellement comme centrale à énergie totale équipée (CETE), p.ex. dans des grands ensembles, où elle pourrait remplacer des groupes électrogènes classiques, avec des moteurs à gaz ou diesel.

A l'heure actuelle cependant, on ne trouve **encore que des installations pilotes**. L'Anglais Grove avait déjà compris le mécanisme en 1839, mais celui-ci n'a été utilisé dans des sous-marins et des fusées aux Etats-Unis qu'après 1945. Les coûts étaient astronomiques et les **problèmes techniques subsistaient**: corrosion, drainage du courant, apport continu de combustible et d'oxygène, évacuation des produits de réaction.

A ces difficultés répondent toutefois **les avantages convaincants du principe**, tels que **le rendement élevé du combustible, l'absence de bruit et de vibrations**. C'est surtout **la possibilité d'utiliser du gaz naturel comme combustible** qui a incité l'OFEN, en 1988, à promouvoir la recherche sur les piles à combustible. En effet, le gaz naturel dessert déjà deux tiers de la population suisse, et il est appelé à jouer un rôle prépondérant à l'avenir. De plus, l'industrie suisse est bien placée pour produire des piles à combustible tant pour le marché intérieur que pour l'exportation.

Le programme 1988/95 a donné de bons résultats, sans toutefois apporter de produits susceptibles d'être commercialisés, même dans un avenir lointain (le seul modèle commercialisé est à l'acide phosphorique).

Les problèmes de matériaux ne se résoudront pas du jour au lendemain. Le programme 1996/99 va donc poursuivre les travaux commencés. **Les objectifs** en sont **l'acquisition de savoir-faire** applicable dans une production suisse et **l'abaissement drastique des coûts**. **L'état de la recherche et ses grandes options** – les modèles fonctionnant au gaz naturel, les plus prometteurs dans la perspective de leur utilisation en Suisse – se résument ainsi:

- La **pile à combustible céramique** est prévue essentiellement pour les centrales à énergie totale équipée. Le développement se concentre sur le projet HEXIS de Sulzer Innotec, assez avancé pour que l'on envisage de produire un module de 1 kW de puissance électrique en 1999. Le but à plus long terme est un module de 15 kW utilisable dans la pratique. On vise à réduire les coûts en limitant la température d'exploitation à 820 °C (ce qui permettrait d'utiliser des alliages métalliques bon marché), en augmentant la puissance électrochimique des piles et en réduisant les pertes électriques (ce qui suppose une porosité accrue de l'électrode au gaz naturel).
- La **pile à combustible polymère** est envisagée **pour le véhicule électrique**. Des autobus utilisent déjà ce dispositif à titre expérimental dans plusieurs pays, mais il reste encore plusieurs problèmes spécifiques à résoudre, en particulier celui de l'apprêtage du combustible, c'est-à-dire de la séparation de l'hydrogène nécessaire au fonctionnement de la pile. Cela implique en particulier l'amélioration des membranes polymères.

Le transfert se fera surtout par le biais de **projets P+D**. ATEL, p.ex., teste depuis 1992 à Niedergösgen, une pile à combustible polymère de provenance canadienne; à Genève, les Services industriels recueillent depuis 1993 les expériences faites avec une pile à l'acide phosphorique de provenance américaine. Une pile HEXIS, 100 % suisse, sera testée en conditions réelles les plus tôt possible.



Fabrication simultanée de plusieurs éléments HEXIS de 12 cm de diamètre à l'aide de la projection sous vide au chalumeau à plasma.



Pile HEXIS: anode (verte) et électrolyte (blanc), plaque cannelée pour l'aménage de combustible et l'évacuation des produits de combustion.



Système HEXIS de 7 kW: le cylindre abrite le stack de piles et des accessoires, à droite la commande électronique.

Petit vocabulaire de la pile à combustible

La **pile à combustible** est un générateur électrochimique. Elle se distingue de l'accumulateur par l'apport continu d'énergie chimique sous forme d'un combustible. Deux électrodes planes sont séparées l'une de l'autre par un électrolyte, un matériau qui n'est conducteur que pour des ions (atomes chargés électriquement) d'un certain type. On distingue plusieurs types de piles, selon l'électrolyte et le combustible.

Dans une **pile à combustible céramique**, l'électrolyte est une céramique d'oxyde de zirconium qui ne laisse passer que des ions oxygène: de l'air s'écoule sur une électrode, la cathode. A haute température – jusqu'à 900 °C – et en raison de l'effet catalytique de l'électrode, les atomes d'oxygène de l'air sont ionisés (ils acquièrent deux électrons). Ces ions migrent à travers l'électrolyte vers l'autre électrode, l'anode. Ils restituent leurs deux électrons à l'anode et réagissent chimiquement avec les atomes de combustible. L'anode possède alors un excédent d'électrons alors que ceux-ci sont en déficit à la cathode, ce qui crée une tension électrique d'environ 1 V entre les deux électrodes. Le combustible peut être du gaz naturel.

Les **piles à combustible à acide phosphorique** et **polymères** ont comme électrolyte de l'acide phosphorique ou un polymère. On en connaît d'autres types: **les piles alcalines** et **à sel fondu**.

A l'heure actuelle, les piles sont des plaques de 1 cm d'épaisseur environ, qui peuvent avoir jusqu'à 1 m² de surface; leur puissance surfacique est d'environ 0,3 W/cm². En empilant un grand nombre de ces plaques, on constitue un module («stack»). Tous les modèles ont actuellement un **rendement électrique** de 50 %. Théoriquement, il pourrait être de 70 %, avec un rendement total de 90 % si l'on tirait profit de la chaleur produite.

Les applications envisagées sont les **petites centrales électriques**, les **centrales à énergie totale équipée** et les **véhicules électriques**.

Domaine

Accumulateurs/
piles à combustible

Economies de carburant dans le trafic routier

Les transports sont à l'origine d'un tiers de la demande finale d'énergie en Suisse. En 1994, ce tiers comprenait notamment le trafic privé (56 %), le trafic-marchandises (17 %) et le trafic aérien (22 %). L'ensemble constitue la plus importante catégorie de consommateurs, avant les ménages (29 %), les arts et métiers et l'agriculture (20 %), puis l'industrie (19 %).

Le trafic individuel motorisé produit plus que sa part de polluants atmosphériques. En effet, les véhicules ne sont encore guère faits pour consommer le moins possible. A cela s'ajoute que le catalyseur, censé remédier à la situation, ne déploie tous ses effets qu'après quelques km de route, alors que 75 % des trajets n'atteignent pas 10 km. Qui plus est, la réduction souhaitée de consommation due aux progrès accomplis dans la construction des moteurs est à peu près compensée par les choix des acheteurs, qui veulent des véhicules toujours plus lourds et plus puissants. Enfin, la mobilité continue d'augmenter, et avec elle, la consommation de carburant.

Les transports, et tout **spécialement les transports routiers, recèlent un énorme potentiel d'économies.** Le programme OFEN «Utilisation rationnelle de l'énergie dans les transports» cherche à réaliser ce potentiel. Certes, la Suisse n'a pas d'industrie de l'automobile; mais c'est un important marché-test, qui **peut influencer le développement des modèles chez les producteurs ainsi que leurs choix**, grâce à sa législation d'avant-garde et à une forte industrie des composants.

Le gros de l'effort porte sur la recherche et le développement de moteurs et de véhicules à haut rendement pour le trafic individuel, où se trouvent les plus importantes possibilités d'économies. A moyen terme, les travaux devraient aboutir à la sortie d'une voiture familiale courante qui consomme moins de 3 l/100 km. Ils progressent par des voies multiples:

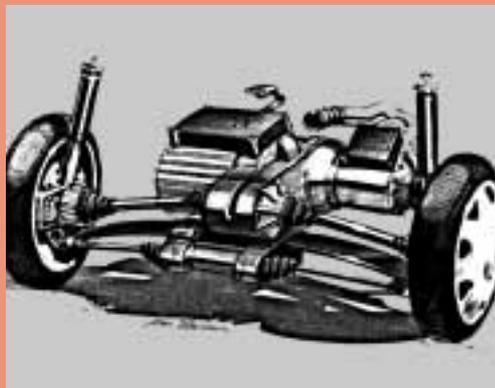
- **Nouveaux systèmes de motorisation**, p.ex. moteurs à essence, diesel ou électriques, moteurs hybrides ou piles à combustible en vue de réduire la consommation d'énergie et les rejets.
- Nouveaux matériaux et structures inédites permettant de **réduire sensiblement le poids des véhicules** (10 kg de moins, c'est une consommation diminuée de 1 %, soit 40 millions de litres de carburant par année dans le pays).
- Condensateurs à haute performance, batteries et autres techniques permettant de **stocker l'énergie cinétique** pour la réutiliser au besoin, par exemple dans les accélérations, au lieu de la dissiper (chaleur des freins).
- **Sécurité passive améliorée des véhicules légers**, en vue de réduire les préjugés à leur égard.

Le deuxième grand axe du programme de soutien est le **trafic-marchandises routier**. L'ampleur et les fréquences de ce trafic en Suisse sont mal connues. Il importe donc d'en **élaborer les bases statistiques pour les composantes tant nationales qu'internationales** («qui transporte quoi, quand et d'où à où?»). Il faut aussi des instruments de décision pour l'introduction d'un **trafic-marchandises combiné** rail/route qui conjugue, mieux qu'aujourd'hui, les avantages des deux systèmes. Autres objectifs à atteindre, des conditionnements modulaires pour les transports ainsi que des systèmes de transbordement de marchandises assistés par ordinateur.

Pièce maîtresse du programme P+D Véhicules électriques légers (VEL), **l'essai à grande échelle** qui se poursuit à Mendrisio avec des véhicules électriques permet d'en faire voir l'utilisation quotidienne à bon escient et d'étudier les comportements en matière de mobilité et d'achat. Le transfert des enseignements recueillis profitera à la diffusion de véhicules d'un rendement supérieur dans toute la Suisse (env. 2500 sont en service à ce jour).



Dans des tests aux conditions proches de la réalité, p.ex. à l'Université et à l'EPF de Zurich, on étudie la sécurité des nouveaux véhicules légers en cas d'accident. Les données recueillies se traduisent rapidement par des améliorations.



Moteur hybride d'une firme zurichoise, particulièrement économe et peu polluant, se composant d'un moteur à explosion et d'un moteur électrique. Croquis pour une éventuelle production en série.

Petit vocabulaire des transports

Les **transports** englobent les déplacements par chemin de fer, par voie aérienne ou navigable et par la route. Le trafic routier est à son tour subdivisé en **trafic privé motorisé** (automobiles, autocars, motocyclettes et cyclomoteurs) et **trafic-marchandises** (essentiellement par camions).

Le **véhicule à moteur ordinaire** n'a pas un très bon rendement énergétique. Son moteur diesel ou à essence est peu performant de ce point de vue, la transmission n'est guère optimisée et le poids du véhicule est généralement élevé.

Le **véhicule léger** se distingue par son poids réduit et par un rendement supérieur.

Le **véhicule électrique** possède, en lieu et place du moteur à explosion (essence, diesel ou gaz), un moteur électrique alimenté à partir d'accumulateurs; à l'avenir, l'alimentation pourrait être assurée par une génératrice embarquée fonctionnant au moyen d'un moteur à explosion, voire d'une pile à combustible. Les accumulateurs disponibles à l'heure actuelle sont très lourds, par rapport à leur capacité de stockage de courant; ils peuvent donc restreindre sérieusement le volume utile, la charge autorisée, les performances et le rayon d'action du véhicule.

Le **véhicule électrique léger (VEL)** est un engin à haut rendement qui se contente d'un assez petit nombre d'accumulateurs.

Le **véhicule hybride** (du latin hybrida, métis) est équipé de deux ou plus de moteurs différents. Ce sera par exemple un moteur électrique pour la ville et un moteur à explosion pour la zone extra-urbaine. On peut aussi envisager des accumulateurs spéciaux, des condensateurs à haute performance ou des accumulateurs à haute pression pour fournir l'énergie nécessaire à l'accélération ou en côte.

Domaine
Transport

Entre société, politique, environnement et énergie, quels liens?

Longtemps, l'approvisionnement énergétique a été abandonné aux mécanismes du marché, comme une tâche technique et économique justifiant la construction d'équipements générateurs de profits. Il a fallu la crise du pétrole de 1973 pour révéler les problèmes de la sécurité d'approvisionnement et des coûts en termes d'économie globale, entraînant l'émergence d'une véritable politique de l'énergie. Celle-ci devait bientôt être axée surtout sur la protection de l'environnement et sur le recours aux agents renouvelables.

Ainsi, **aux aspects purement économiques de l'approvisionnement se sont ajoutées des préoccupations politiques, écologiques et de société.** De là est issue l'économie énergétique, nouvelle branche de la science économique. Outre les questions économiques proprement dites, elle pose aussi et surtout les questions

- du **consensus populaire** (reflétant les valeurs et les comportements actuels de la société), par exemple pour les centrales nucléaires,
- de **l'effet des mesures politiques** (p.ex. de la taxe sur l'énergie) et de **leur planification à long terme** (p.ex. pour le remplacement des centrales nucléaires dès l'an 2005),
- **des risques et des coûts de la pollution de l'environnement** imputable à la production et à l'utilisation d'énergie.

Depuis peu, ce nouveau domaine de connaissance a encore gagné du terrain du fait de **l'internationalisation des marchés de l'énergie**, tant au sein de l'UE que par suite de la globalisation des échanges. Quelle doit être l'attitude de la politique et de l'économie énergétiques?

La tâche de la recherche en économie énergétique est de répondre à de telles questions et de **fournir ainsi des bases de décision** dans chacun de ces deux domaines. L'OFEN en assure la coordination. Pour la période 1996/99, les accents en sont les suivants:

- **Recueillir des données**, p.ex. **pour améliorer la connaissance statistique** de l'industrie et des services.
- Analyser l'offre et la demande d'énergie et pour cela, développer les méthodes et les modèles actuels.
- Elaborer des **perspectives** de la demande future d'énergie à partir de **modèles** décrivant p.ex. les lois de la progression de cette demande. Il s'agit de déterminer l'effet des **mesures de politique énergétique** sur l'évolution de la demande et sur la santé de l'économie.
- Analyser les effets de mesures prises (telles que les mesures volontaires, les tarifs, les prescriptions et interdictions) à titre de vérification des résultats obtenus, afin de contribuer à une politique énergétique efficace.
- Concevoir des **stratégies**, dans le domaine des **coûts et de la rentabilité des systèmes énergétiques, pour l'internalisation** des coûts. La difficulté consiste en particulier à chiffrer la valeur monétaire des dégâts que pourrait causer l'aggravation de l'effet de serre en Suisse.
- En économie énergétique, tout est lié ou presque. Il est donc primordial de rattacher étroitement l'approvisionnement énergétique de la Suisse à celui des autres pays.

Les données résultant de la recherche en économie énergétique alimentent non seulement des rapports et des séminaires techniques, elles fournissent souvent aussi les **éléments de réponse à des interventions parlementaires.**

Exemple de projet – Effet des tarifs de l'électricité

Au titre du contrôle de résultats, on a étudié, en 1994/95, les **«Effets qu'aurait sur la demande d'électricité une révision tarifaire axée sur les coûts marginaux»**. (Les coûts marginaux sont les coûts supplémentaires de production de courant à assumer une fois les capacités actuelles de production épuisées, c'est-à-dire avec la construction de nouvelles centrales).

A partir des expériences faites, les chercheurs ont évalué l'élasticité des prix, soit le taux de renchérissement à partir duquel les consommateurs commencent à restreindre volontairement leur demande d'électricité afin de dépenser moins. On a aussi déterminé l'effet de différents autres paramètres sur la demande d'électricité. Les conclusions ont été les suivantes:

- Le renchérissement, tant du tarif haut que du tarif bas, incite bel et bien les consommateurs à économiser l'électricité. C'est donc à juste titre que la politique des prix est qualifiée d'instrument propre à réduire la consommation.
- Le courant vendu à bas prix pendant la nuit encourage les clients à déplacer leur consommation vers cette période, p. ex. en n'enclenchant leur chauffe-eau que de nuit. Les centrales se trouvent ainsi pleinement utilisées, ce qui diminue leurs coûts d'exploitation et par conséquent les coûts de production de l'électricité.
- On peut atténuer la demande croissante d'électricité au tarif haut et la nécessité de construire de nouvelles centrales en relevant ce tarif.

Cet exemple relève du projet «Contrôle de résultats», parce qu'il visait avant tout à vérifier les retombées de certaines mesures, à savoir les renchérissements décidés au titre d'une révision tarifaire. Mais les chercheurs ne se sont pas

cantonnés à ce seul domaine. Ils ont pris en compte également les expériences relatives à d'autres modifications tarifaires et certains modèles de retombées sur la demande d'énergie.

Petit vocabulaire de l'économie énergétique

L'**économie énergétique** assure la couverture des besoins à des prix supportables en produisant, transformant et distribuant l'énergie. Son activité est primordiale pour tous et pour chacun. Par ailleurs, l'obligation de construire les centrales en des emplacements déterminés favorise l'émergence de **monopoles** pour la distribution. Voilà pourquoi l'Etat exerce une forte influence sur l'économie énergétique grâce à son action internationale.

Rechercher la **rentabilité**, c'est choisir une installation énergétique (type, conception) de telle sorte qu'elle produise les bénéfices que l'on peut légitimement en attendre. Cette définition économique se réfère aux **coûts »internes«**, tributaires des coûts d'exploitation de l'entreprise et à partir desquels on calculera le prix de vente de l'énergie. Les **coûts »externes«**, par contre, qui ne sont pas (ou pas intégralement) assumés par l'entreprise, sont négligés; ce sont ceux des dommages infligés à la santé et à l'environnement (p.ex. par la pollution de l'air due au trafic routier) par suite de la production et de l'utilisation d'énergie. Ils sont payés par des tiers ou par la collectivité.

Pour les besoins de la protection de l'environnement et de l'égalité de traitement de toutes les énergies, il convient d'**»internaliser«** les coûts externes, c'est-à-dire d'en faire des coûts internes. Cela peut se faire au moyen de prescriptions à caractère écologique en vue d'éviter les dommages à l'environnement (p.ex. le catalyseur obligatoire sur les automobiles) ainsi que par des taxes de compensation des pollutions qui lui sont infligées (p.ex. la surtaxe sur les carburants). Mais la relation de cause à effet n'est pas toujours évidente et par ailleurs, il n'est pas facile de déterminer exactement les coûts externes, de les **»monnayer«**. L'égalité des chances entre Etats commande une démarche concertée; en outre, l'internalisation devrait s'appliquer au plus grand nombre possible de biens et de services.

Domaine
Bases de l'économie énergétique

La collaboration internationale – un »must« et une tradition

La Suisse ne saurait mener sa politique et sa recherche énergétiques dans l'isolement, pas plus qu'elle ne peut à elle seule développer son économie ou assurer à l'environnement une protection suffisante. La collaboration internationale s'impose.

Une action commune à plusieurs pays peut profiter à tous les participants, à condition de reposer sur un véritable partenariat. Elle engendre alors des synergies, aide à éviter les recouvrements et améliore l'efficacité de la recherche. Elle peut aussi renforcer l'industrie nationale. Enfin, une telle collaboration favorise l'harmonisation des systèmes normatifs et des lois.

Il est pourtant des situations où la collaboration internationale n'est pas souhaitée. Très généralement, les projets de recherche qui permettent d'espérer à brève échéance des résultats brevetables ne s'y prêtent pas très bien pour un petit pays comme la Suisse, qui dépend de ses exportations. En effet, seul un brevet national entre normalement en ligne de compte. Voilà pourquoi on évalue soigneusement, dans chaque cas, les avantages et les inconvénients d'une insertion au plan international des projets de recherche énergétique.

Dans la recherche énergétique suisse, les projets internationaux sont une tradition. L'OFEN informe à ce sujet.

La collaboration avec **l'Agence Internationale de l'Energie (AIE)**, qui date de 1977, est bien rodée. Actuellement, la Suisse participe à plus de la moitié des projets de l'AIE. Elle dispose d'un droit d'intervention réel dans la conception des projets et dans leur conduite.

Comme l'Union Européenne (UE) est elle aussi partie prenante dans ces projets, **la Suisse connaît bien les projets de recherche énergétique de l'UE.** Il existe d'ailleurs toute **une série d'accords de participation aux programmes de l'UE** tels que COST, EUREKA et EURATOM. Quant aux **programmes-cadres de recherche de l'UE** dans le domaine de l'énergie, plusieurs institutions suisses de recherche y participent. Leur accès est toutefois encore malaisé et les possibilités d'intervenir dans leur conception et dans le choix des projets sont très restreintes.

Dans son »Plan directeur de la recherche énergétique«, **le Conseil fédéral préconise la collaboration avec des Etats de l'Est et avec des pays du Tiers-Monde.** La préférence sera donnée à des projets de brève durée. Pour l'heure, une coopération efficace n'est possible que par des contacts et des financements directs. Des projets communs bien ciblés permettront de consolider certains groupes de chercheurs dans ces pays et de les stabiliser. Il convient aussi d'étudier la possibilité de mener sur le terrain, dans les pays de l'Est, des recherches dont les résultats pourraient être aisément transférés à la Suisse.

A long terme et **spécialement dans le contexte énergie/environnement**, il semble bien qu'une collaboration planétaire et une **engagement renforcé dans les pays du Tiers-Monde** s'imposent.

Petit vocabulaire »international«

L'Agence Internationale de l'Energie (AIE), qui a son siège à Paris, a été créée par l'Organisation pour la Coopération et le Développement Economique (OCDE) en 1974, celle-ci ayant considéré que la crise du pétrole de 1973 avait mis en péril l'approvisionnement énergétique (l'OCDE harmonise la politique économique des pays industrialisés ainsi que leur aide au développement). L'AIE a notamment pour objectif de réduire la part du pétrole dans l'approvisionnement énergétique de ces pays et d'y développer le recours aux agents de substitution. Elle offre un cadre à la réalisation de certains projets de recherche, financés par les Etats qui y participent.

EURATOM veut dire Communauté européenne pour l'énergie atomique. Cette organisation repose sur un accord conclu en 1957 entre les Etats membres de l'UE en vue de créer et de développer dans ces Etats des industries du nucléaire. La Suisse y collabore depuis 1979 dans le domaine de la fusion nucléaire.

EUREKA est une initiative née en 1985 dans les Etats d'Europe de l'Ouest pour soutenir la coopération transfrontières des entreprises et instituts travaillant sur des recherches proches de la commercialisation.

COST désigne la Coopération européenne dans le domaine de la recherche Scientifique et Technique, instituée dès 1971. Elle a pour objectif d'accroître l'efficacité de la recherche.

Le **Programme-cadre de recherche de l'UE** veut renforcer la compétitivité de l'industrie, en particulier dans le domaine de l'énergie (Joule/Thermie). Il consiste à soutenir des activités de recherche nationale tributaires d'un effort particulier.



Collaboration internationale dans le domaine de la fusion nucléaire: développés en Suisse, des revêtements intérieurs du Tokamak à base de carbure de bore (ici le JET) maintiennent le plasma quasiment à l'abri des impuretés.



Collaboration internationale dans la photovoltaïque: à l'EPFL de Lausanne, un projet de l'AIE a permis d'installer côte à côte plusieurs équipements PV pour en faire voir l'intégration au bâtiment.

Intégration
internationale

Les résultats de la recherche doivent donner des produits

En règle générale, le chercheur n'est pas commerçant. Il poursuit des travaux pour satisfaire sa curiosité scientifique ou technique. Lorsqu'un projet est terminé, il se tourne vers le suivant. Quant au sort des résultats obtenus, bien souvent il ne s'y intéresse guère. Cette attitude est plus répandue dans la recherche fondamentale que dans la recherche appliquée, et elle est plus fréquente dans la recherche publique que dans celle des institutions privées. Dans tous les cas, si les résultats obtenus sont de nature à améliorer un produit ou une méthode et qu'ils ne sont pas utilisés du tout ou ne le sont pas dans toute la mesure possible, ou si leur application tarde trop, la recherche représente alors des efforts inutiles et de l'argent gaspillé.

Dans la recherche énergétique, la mise en oeuvre des résultats est particulièrement importante, parce qu'elle contribue à assurer l'approvisionnement énergétique. Autre avantage direct pour le monde économique, la compétitivité de l'industrie est renforcée par des produits innovatifs. Voilà pourquoi on s'efforce un peu partout dans le monde d'améliorer le transfert, après avoir quelque peu négligé cette étape par le passé.

Il n'existe pourtant pas de démarche standard pour le transfert des résultats de la recherche. Il s'agit en effet de concilier les intérêts souvent divergents des chercheurs, de l'industrie, de l'administration, des milieux économiques et des consommateurs; l'opération exige une stratégie très variable selon le cas. S'y ajoute le fait que l'industrie s'intéresse de plus en plus aux résultats commercialisables à brève échéance, tandis que la recherche publique se doit de viser aussi des objectifs éloignés. Bref, **le transfert doit passer par des voies diverses.**

En 1992/93, une commission internationale d'experts a jeté un regard critique sur la **recherche énergétique suisse**. Elle a **attribué une bonne note au transfert des résultats obtenus**. Quelles mesures avait prises l'OFEN?

- Création d'**ENET**, centre d'information et de transfert, grâce auquel toutes les publications importantes sont accessibles au public. L'OFEN en assure aussi l'introduction dans une banque de données internationale (ETDE).
- Exigence de **rapports annuels circonstanciés** sur les projets soutenus, **rendus accessibles au public et en particulier aux milieux compétents de l'industrie.**
- Organisation de réunions d'information** à l'intention des entreprises et associations qui ne sont pas directement impliquées dans la recherche énergétique.
- Possibilité, pour la Confédération (OFEN) et les cantons, de **soutenir des projets P+D**. Il s'agit là d'un des principaux moyens de transfert des résultats de la recherche énergétique en Suisse.
- Obligation faite aux responsables de domaine d'ajouter, à leur programme de travail détaillé, un **plan de transfert.**

Une très intéressante voie de transfert a été ouverte par les **nombreux universitaires passés dans l'industrie sans changer de spécialité**. Alors, les enseignements de la recherche, qu'ils apportent avec eux, se combinent fort heureusement avec l'obligation de maîtriser le quotidien pratique.

Bien que le transfert des résultats ait été jugé bon dans notre pays, certaines faiblesses sont apparues vers le milieu des années 1990. **L'OFEN a alors procédé en 1996 à un changement de structure**, supprimant la séparation entre la recherche, d'une part, et la commercialisation, de l'autre.

Petit vocabulaire du transfert

Le **transfert** est le passage des résultats de la recherche à leur application pratique. Un exemple: un projet de recherche a montré qu'en période de chauffage, une isolation thermique transparente (ITT) posée sur la façade sud apporte au bâtiment 100 kWh de chaleur par m². La construction de quelques installations pilotes et de démonstration (P+D) permet d'observer l'exactitude de ce résultat. Plusieurs entreprises suisses se mettent alors à produire des matériaux ITT; les commandes sont d'abord sporadiques, puis de plus en plus nombreuses. Le transfert a réussi.

Les **installations P+D** sont une étape importante du transfert. **L'installation pilote** est une première réalisation hors laboratoire, à une échelle permettant de vérifier le fonctionnement.

On passe ensuite à **l'installation de démonstration** en vraie grandeur; alors on peut faire une appréciation sévère des qualités techniques, économiques et écologiques de l'installation et en évaluer les chances sur le marché.

Les installations pilotes et surtout de démonstration servent également à attirer l'attention des utilisateurs potentiels sur une technique innovante ou sur un produit nouveau.

Exemple de transfert: la Carte d'ensoleillement de la Suisse

Dès la fin des années 1970, les spécialistes reconnaissent que pour rendre populaire le recours à l'énergie solaire, il faut connaître la durée et l'intensité de l'ensoleillement en chaque endroit de la Suisse. Cela est nécessaire pour déterminer à l'avance la production d'une installation solaire et calculer correctement les dimensions des capteurs et du réservoir d'eau chaude. Il existe certes quelques stations météorologiques qui mesurent ces données, mais le nombre des communes est proche de 3000. Bref, il est urgent de disposer d'une carte qui informe sur l'ensoleillement de chaque point du territoire national. Le projet METEONORM a réuni des météorologues et des utilisateurs; le NEFF et l'OFEN en ont assumé ensemble le financement.

1982 à 1985: les données déjà disponibles sont de peu d'utilité pour la planification solaire, parce que recueillies sur des périodes insuffisamment longues ou de manière trop imprécise. On s'est donc attelé à mettre à jour les données fournies depuis des années par 69 stations météorologiques, et on a analysé des photos-satellite pour évaluer la répartition nuageuse. Il

en est sorti une série de brochures »METEONORM pour le concepteur solaire« présentant ces données sous une forme nouvelle, avant tout **pour la préparation d'eau sanitaire et le chauffage d'appoint.**

1986 à 1988: le projet se poursuit, avec des mesurages et des analyses, qui permettent de compléter METEONORM par des données destinées **aux installations photovoltaïques.**

1989 à 1990: encore des mesurages et des analyses, qui permettent de compléter METEONORM par des données pour les installations éoliennes.

1991 à 1995: mesurages et méthodes informatiques les plus modernes. Un **manuel paraît, avec des programmes PC** pour le calcul exact de l'ensoleillement en un endroit quelconque en vue du recours à l'énergie solaire active, passive ou à la photovoltaïque.

Le transfert des résultats a eu lieu par la vente de plus de 12'000 exemplaires des éditions 1985/88/90 (dont 10 % à l'étranger). Désormais, METEONORM fait partie du matériel de base des concepteurs solaires en Suisse.

La recherche est toujours une démarche en terrain inconnu: on n'est jamais sûr d'atteindre le but fixé. Bien des projets ne conduisent pas au succès, malgré tous les efforts de préparation et de vérification.

Ci-dessus et en page 23, on trouve esquissés quelques projets ayant atteint le but ou qui sont en voie de le faire, les uns aisément, les autres en surmontant toutes sortes d'obstacles.

Désormais, un domaine technique réunit aussi bien des programmes de recherche avec installations P+D qu'une mise sur le marché. Ainsi, la coordination à l'intérieur des 15 domaines devrait sensiblement s'améliorer, au profit du transfert des résultats. La liaison entre R+D énergétique et les activités orientées vers le marché du «Programme ÉNERGIE 2000» s'en trouve également mieux assurée.

D'autres mesures dans le même sens ont encore été proposées lors de la 5e Conférence suisse sur la recherche énergétique, en novembre 1995 à Yverdon. L'OFEN avait placé cette rencontre sous le thème du «Transfert des résultats». Il s'en est suivi une série d'opérations ayant pour objectif essentiel une **collaboration plus étroite entre la recherche publique et les travaux qui se poursuivent dans l'industrie**:

- Il convient d'**inviter les milieux industriels à s'associer le plus tôt possible à un projet de recherche**, afin que celui-ci corresponde bien à leurs besoins.
- Les groupes d'accompagnement des différents domaines de recherche accueilleront désormais un **plus grand nombre de représentants de l'industrie** ayant l'expérience du transfert. Ces groupes analysent les projets proposés et en évaluent les perspectives de transfert.

La présente brochure souligne l'importance du transfert en résumant et illustrant, à la fin de la description de chaque domaine de la recherche énergétique, les principales mesures prises à ce titre dans le programme en question.

Exemple de transfert:

éléments photovoltaïques pour toits plats

Il s'agit de réduire les coûts de l'électricité solaire en s'épargnant des dépenses pour le terrain. On place donc des modules PV (p. 9) contre des façades et sur des toits, les intégrant ainsi au bâtiment en leur assignant une nouvelle fonction (p.ex. la couverture du toit ou de la façade); ces modules remplacent donc un élément traditionnel. Les nombreux toits plats inutilisés sur des bâtiments commerciaux ou industriels représentent un énorme potentiel PV.

Une communauté de chercheurs réunissant un bureau d'ingénieurs et un institut de Haute Ecole, tous deux spécialisés en PV, ainsi qu'un futur utilisateur, a proposé un système de fixation plus simple et plus léger, donc moins cher que le système habituel. L'OFEN a soutenu ce projet dès 1992.

- 1992 et 1993: projets et tests de structures porteuses en béton, acier, composite alu et éternit pour montage en dents de scie. Câblage intégré. Ecobilan et prix font préférer le béton.
- 1994 et 1995: cinq installations P+D sur les toits d'écoles et d'usines. Structures porteuses encore améliorées et moins chères (moins de 50 % d'un support usuel, avec pour la première fois du courant solaire pouvant coûter nettement moins de 1 fr/kWh). Les éléments résistent à tous les vents sans nécessiter d'ancrages spéciaux. Les modules solaires sont «agrafés» au moyen d'une bride métallique.

La production du système complet de supports de modules PV standard a commencé en 1996. La première grande installation – 102 kW de puissance de crête avec 1200 modules standard sur 2400 socles de béton – prend forme sur le toit d'un nouvel immeuble bancaire à Lugano.



Exemple de transfert Eléments PV pour toits plats: chaque module PV (120 cm x 52 cm) repose sur deux socles de béton. Le poids des socles assure une assise suffisante quelle que soit la force du vent.

Chauffage au bois: fourneaux et cuisinières à bois modernes, combinent design et excellente technique de combustion, et suffisent pour alimenter seuls une maison basse énergie.

Exemple de transfert:
Chauffage au bois

Dès les années 1980 et jusqu'au début des années 1990, on a soutenu de **nombreux projets de chauffage économe et peu polluant** (cf. p. 10). Aujourd'hui, on trouve sur le marché des modèles de haut rendement et peu polluants pour tous les types d'affectation, du fourneau à bois pour maison basse énergie jusqu'à la centrale à énergie totale équipée, alimentée au bois, en passant par la centrale de chauffage pour l'alimentation d'un réseau local.

Exemple de transfert:
Corrosion de la chaudière à mazout

Au cours des années 1980, nombre de **chaudières à mazout de haut rendement** (chaudières à condensation) en service depuis peu d'années **souffraient de corrosion**. La recherche a identifié la cause du dommage: le soufre contenu dans le mazout produit de l'acide sulfurique qui se condensait sur la paroi extérieure de la chaudière. Un autre projet a permis de démontrer qu'un enduit de résines synthétiques durcissant à la chaleur constituait une protection efficace.

Exemple de transfert:
Accumulateur pour véhicule électrique

Le développement **d'accumulateurs au nickel/hydrure métallique** améliorés (cf. p. 17) aboutit au milieu des années 1990 à un prototype pour véhicule électrique qui passe pour être compétitif sur le marché international. Toutefois, l'avenir commercial incertain de ce type de véhicules fait que la production en séries de tels accumulateurs d'assez grande taille comporte un risque trop élevé.

**Transfert
des résultats
de la
recherche**

Philosophie de l'aide à la recherche

Il est évident que la recherche énergétique pratiquée par les institutions de recherche de la Confédération et des Cantons, comme les EPF, les Universités, les Ecoles Techniques Supérieures ou l'Institut Paul-Scherrer (PSI), est soutenue par des fonds publics. En revanche, on s'est longtemps demandé si les collectivités devaient aussi soutenir financièrement les recherches énergétiques qui se poursuivent dans le secteur privé – projets des entreprises industrielles, des bureaux d'ingénieurs ou de particuliers. Encore assez récemment, l'industrie et surtout les plus grandes entreprises rejetaient un tel soutien, non sans raison: **quiconque dépense des deniers de la collectivité doit rendre publics les résultats de ses travaux** – au risque de voir la concurrence en profiter.

Dans l'intervalle, on a développé des modèles qui accordent aux entreprises une **protection temporaire pour les résultats «sensibles»**. Mais plus encore que cette concession faite aux intérêts des producteurs, **la récession a fait se multiplier rapidement, au début des années 1990, les demandes d'aide à la recherche émanant du secteur privé** (à cela s'ajoute la pression de la concurrence de l'étranger, où la recherche industrielle bénéficie généralement d'un fort soutien de l'Etat). Manifestement, les contributions financières des collectivités publiques à la recherche sont aujourd'hui très prisées, tandis que la récession fait s'amenuiser les fonds propres qui y sont consacrés.

Il reste que l'industrie préfère poursuivre à huis clos, c'est-à-dire sans l'aide de la collectivité publique, certains développements jugés importants. Un soutien financier sera plutôt demandé pour traiter des problèmes marginaux ou pour accomplir des travaux préliminaires qui représentent un risque financier élevé et n'aboutissent pas directement à des produits.

Pour **plus d'un bureau d'ingénieurs, la recherche sous mandat est l'occasion de se spécialiser** et de renforcer ainsi leur compétitivité.

Le gros de l'aide financière va à la recherche énergétique appliquée. Ce sont des travaux dont les résultats apparaissent sous la forme d'un produit (p.ex. un ordinateur peu gourmand d'énergie), d'une installation de conversion d'énergie (p.ex. une pile à combustible), dans l'amélioration apportée à une mesure déjà prise (p.ex. une gestion du trafic propre à réduire les congestions) ou dans des procédés (p.ex. un système de refroidissement d'air qui consomme peu d'énergie).

Les installations pilotes et de démonstration accélèrent le transfert des résultats de la recherche dans la pratique. L'aide leur est donc accordée également, à condition que l'entreprise ou l'exploitant assume la majeure partie des coûts: cela oblige l'intéressé à examiner le projet d'un oeil critique, avec des chances accrues de mise en oeuvre indépendante.

Une aide ciblée directe à des projets de recherche énergétique **peut provenir non seulement de l'OFEN** (cf. colonne de droite), mais aussi des fonds de recherche de l'économie énergétique.

Plusieurs Cantons versent des contributions aux installations pilotes et de démonstration dans le domaine de la technique énergétique; les services cantonaux de l'énergie informent sur les possibilités qui s'offrent et sur les modalités de requête.

Le cadre juridique de l'action promotionnelle

L'aide directe de la Confédération à la recherche énergétique s'appuie sur les dispositions ci-après:

Loi du 23 décembre 59 sur l'énergie atomique (art. 2)

Loi du 7 octobre 1983 sur la recherche

Arrêté fédéral du 14 déc. 1990 sur l'énergie (art. 10).

En outre, nombre d'attributions matérielles ancrées dans la Constitution ou dans la loi autorisent la Confédération à encourager la recherche énergétique (cf. la législation sur la protection de l'environnement).

La Confédération accorde une partie de son aide indirectement en soutenant le Fonds national de la recherche scientifique, des programmes de recherche de l'UE ainsi qu'en finançant les EPF et leurs instituts de recherche. Quant à l'aide ciblée et directe, elle passe nécessairement par l'OFEN.

L'article constitutionnel sur l'énergie (art. 24octies), adop-

té en 1990, autorise la Confédération notamment à soutenir les installations pilotes et de démonstration, avant tout pour les économies d'énergie et pour le recours aux agents renouvelables.

L'arrêté sur l'énergie, en vigueur depuis 1991, constitue une base juridique pour l'aide aux installations P+D. Il doit céder la place en 1998 à une loi sur l'énergie ayant la même teneur.

Quelques Cantons ont inscrit dans la loi la possibilité de soutenir les installations P+D, d'autres ne le font que pour leurs propres installations.

Par le biais des travaux accomplis dans les Universités cantonales ainsi que dans les Ecoles Techniques Supérieures et dans les Hautes Ecoles Spécialisées, les Cantons apportent aussi leur contribution à la recherche énergétique.

De la requête et de son traitement

De l'institut de Haute Ecole au simple particulier en passant par la firme et le bureau d'ingénieurs, chacun est libre de demander à l'OFEN de soutenir un projet d'aide à la recherche énergétique.

Le but du projet doit être conforme au Plan-directeur de la recherche énergétique de la Confédération. Le requérant s'en assure en consultant l'édition en vigueur et surtout le plan d'exécution applicable dans le domaine en question (Plan-directeur et plans d'exécution s'obtiennent à l'OFEN).

La requête adressée à l'OFEN a la forme d'une esquisse de projet ou d'une offre détaillée de recherche (demander les formulaires spéciaux).

Il arrive que l'OFEN mette en soumission certains projets de recherche en publiant les conditions dans des revues spécialisées et dans «ENET News». Les requêtes y relatives sont traitées comme les autres.

Dans le délai d'un mois, l'OFEN communique au requérant si sa requête est prise en considération. La décision définitive tombe généralement dans les trois mois à compter de la présentation de la requête, après qu'un groupe d'experts a examiné le projet.

L'OFEN fixe le montant de l'aide après avoir consulté les experts et les responsables du domaine et du programme concernés. La somme accordée peut se situer entre quelques dizaines de milliers et un million de francs, voire plus. Les projets durent en moyenne trois ans.

Adresses utiles: voir page suivante.

Promotion
de la
recherche
énergétique

Adresse de contact
pour toute question
relative à la recherche énergétique:

OFEN
Section Coordination de la recherche et domaines spéciaux
3003 Berne
tel. 031 – 322 56 58, fax 031 – 382 44 03

Adresses utiles – Le chefs de domaines et de programmes

	Domaine Sous-domaine	Responsable à l'OFEN	Recherche	Chef de programme	P+D
Section Utilisation rationnelle	SYSTÈMES ET ENVELOPPE DU BÂTIMENT	Hans-Peter Nützi 031 - 322 56 49	Markus Zimmermann , EMPA-KWH, 8600 Dübendorf tel. 01 - 823 41 78, fax 01 - 821 62 44 E-mail: mark.zimmermann@empa.ch		
	INSTALLATIONS CVC DU BÂTIMENT	Martin Stettler 031 - 322 55 53			
	ARCHITECTURE SOLAIRE et ÉCLAIRAGE NATUREL	Walter Luginbühl 031 - 322 56 41	Robert Hastings , ETH-Hönggerberg, 8093 Zurich tel. 01 - 633 29 88, fax 01 - 633 10 75 E-mail: hastings@orl.arch.ethz.ch		
	ÉLECTRICITÉ, APPAREILS	Rolf Schmitz 031 - 322 54 61	Roland Brüniger , Isenbergstr. 30, 8913 Ottenbach tel. 01 - 760 00 66, fax 01 - 760 00 68 E-mail: roland.brueiniger@r-brueiniger-ag.ch		
Section Énergie renouvelable	CHALEUR AMBIANTE, COUPLAGE CHALEUR-FORCE	Fabrice Rognon 031 - 322 47 56	Martin Zogg , Kirchstutz 3, 3414 Oberburg tel. 034 - 422 07 85, fax 034 - 422 69 10 E-mail: martin.zogg@bluewin.ch	Fabrice Rognon	
	UTILISATION ACTIVE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE Chaleur solaire	Urs Wolfer 031 - 322 56 39	J.-Chr. Hadorn , ch. des Fleurettes 5, 1007 Lausanne tel. 021 - 616 28 31, fax 021 - 616 28 31 E-mail: jchadorn@swissonline.ch	Pierre Renaud , PLANAJR, Crêt 108 A, 2314 La Sagne, tel. 032 - 931 88 28, fax 032 - 931 18 68 E-mail: info@planair.ch	
	UTILISATION ACTIVE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE Photovoltaïque		Stefan Nowak , Waldweg 8, 1717 St. Ursanne tel. 026 - 494 00 30, fax 026 - 494 00 34 E-mail: stefan.nowak.net@bluewin.ch		
	BOIS	Daniel Binggeli 031 - 322 68 23	Daniel Binggeli	Chr.-W. Rutschmann , VHE, Falkenstr. 26, 8008 Zurich, tel. 01 - 252 30 70, fax 01 - 251 41 26 E-mail: lignum@access.ch	
	AUTRES BIOMASSES	Martin Hinderling 031 - 322 56 42	Martin Hinderling		
	AUTRES ÉNERGIES RENOUVELABLES Géothermie	Martin Brunner 031 - 322 56 10	Harald L. Gorhan , EWI, Bellerivestr. 36, 8034 Zurich tel. 01 - 385 27 33, fax 01 - 385 26 54 E-mail: harald.gorhan@ewi.ch		
	AUTRES ÉNERGIES RENOUVELABLES Petits aménagements hydrauliques		Martin Brunner	H.P. Leutwiler , ITECO, Postfach, 8910 Affoltern a. A., tel. 01 - 762 18 33, fax 01 - 761 18 15 E-mail: iteco@iteco.ch	
	AUTRES ÉNERGIES RENOUVELABLES Vent		Martin Brunner	Robert Horbaty , ENCO, Oristalstr. 85, 4410 Liestal, tel. 061 - 922 08 04, fax 061 - 922 08 31 E-mail: 101322.3361@compuserve.com	
REJETS DE CHALEUR	Martin Zogg , Kirchstutz 3, 3414 Oberburg tel. 034 - 422 07 85, fax 034 - 422 69 10 E-mail: martin.zogg@bluewin.ch		Martin Brunner		
Section Domaines spéciaux	AGENTS ÉNERGÉTIQUES CHIMIQUES ET FOSSILES Chimie solaire et hydrogène	Alphons Hintermann 031 - 322 56 54	Armin Reller , Schlachthofstr. 1, 88406 Winterthur tel. 052 - 209 09 90, fax 052 - 209 09 91 E-mail: btwag@diel.eunet.ch		
	AGENTS ÉNERGÉTIQUES CHIMIQUES ET FOSSILES Combustion et carburation		Alphons Hintermann		
	AGENTS ÉNERGÉTIQUES CHIMIQUES ET FOSSILES Stockage de chaleur		Jean-Christophe Hadorn , ch. des Fleurettes 5, 1007 Lausanne tel. 021 - 616 28 31, fax 021 - 616 28 31 E-mail: jchadorn@swissonline.ch		
	ÉNERGIE NUCLÉAIRE Technique et sûreté nucléaire	Christophe de Reyff 031 - 322 56 66	Wolfgang Kröger , PSI, 5232 Villigen tel. 056 - 310 27 42, fax 056 - 310 44 11 E-mail: kroeger@psi.ch		
	ÉNERGIE NUCLÉAIRE Recherche réglementaire sur la sûreté		Sabyasachi Chakraborty , HSK, 5232 Villigen tel. 056 - 310 39 36, fax 056 - 310 39 95 E-mail: chakraborty@hsk.psi.ch		
	ÉNERGIE NUCLÉAIRE Fusion nucléaire		Stéphane Berthet , BBW, 3003 Berne tel. 031 - 322 99 67, fax 031 - 322 78 54 E-mail: stephane.berthet@bbw.admin.ch		
	ACCUMULATEURS / PILES À COMBUSTIBLE	Léo Dubal 031 - 322 56 44	Léo Dubal		
	TRANSPORTS Transports en général	Martin Pulfer 031 - 322 49 06	Martin Pulfer		
TRANSPORTS Véhicules légers	Martin Pulfer		Urs Muntwyler , Postfach 512, 3052 Zollikofen tel. 031 - 911 50 63, Fax 031 - 911 51 27		
BASES DE L'ÉCONOMIE ÉNERGÉTIQUE	Stefan Hammer 031 - 322 56 24	Ruedi Meier , Bolligenstr. 14, 3006 Berne tel. 031 - 633 36 22, Fax 031 - 333 24 69			

tous: OFEN, 3003 Berne
fax 031 - 382 44 03
E-mail: prénom.nom@
bew.admin.ch

Sommaire

Pourquoi cette brochure?

- 1 La recherche énergétique – une tâche également politique*
- 2 Stratégie de la recherche énergétique pour le proche avenir*
- 3 Le cadre: domaines, programmes, projets et experts*
- 4 Le bâtiment, une entité énergétique*
- 6 Installations et appareils électriques à basse énergie*
- 7 Chaleur ambiante et rejets de chaleur*
- 8 Capteurs solaires pour l'eau chaude et le chauffage*
- 9 Du courant produit sur les toits et les façades*
- 10 Pour l'énergie du bois et de la biomasse*
- 11 De l'énergie thermique (et électrique?) tirée des profondeurs*
- 12 Du courant produit par le vent ... et par l'eau*
- 13 Stockage: chimie solaire, ... réservoirs d'eau et sol*
- 14 Une combustion propre grâce au laser et à l'ordinateur*
- 15 Recherche sur la sûreté des centrales nucléaires*
- 16 A petits pas vers un objectif ambitieux: la fusion nucléaire*
- 17 Accumulateurs pour le ménage, la voiture et l'industrie*
- 18 Piles à combustible pour le chauffage, l'électricité et l'auto*
- 19 Economies de carburant dans le trafic routier*
- 20 Entre société, politique, environnement et énergie, quels liens?*
- 21 La collaboration internationale – un »must« et une tradition*
- 22 Les résultats de la recherche doivent donner des produits*
- 24 Philosophie de l'aide à la recherche*

Adresses utiles – Les chefs de domaines et de programmes

