

01 Décembre 1990

 ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE
DE LAUSANNE

*POLY
rama*

*l'homme
la ville
l'image
le nombre
la mémoire
l'énergie
la machine
la lumière
la matière*

*Coopération au
développement urbain*

Sommaire

COOPÉRATION

- Recherche-action de l'Institut de recherche sur l'environnement construit (IREC)
Développement urbain en Amérique latine / Jean-Claude Bolay, Gérard Chevalier, Alain Garnier 3
- EPFL et pays en développement / Georges Nicod 7
- Recherche de «technologie appropriée». Un projet d'Ingénieurs du Monde
Panneaux isolants pour Bariloche / Georges Nicod 11

LEÇONS INAUGURALES

- Bases de données: données de base / Stefano Spaccapietra 15
- Mécanique ou comportement?
Les acteurs de synthèse / Daniel Thalmann 18
- Innovation: aspects techniques, aspects humains / Roger David Hersch 25
- Les statistiques, une forme de mensonge? / Stephan Morgenthaler 31
- Quelques réflexions sur...
Le rôle de l'analyse en simulation numérique / Jacques Rappaz 37
- Vers l'ère photonique? / René P. Salathé 44
- Traitement d'images: passé, présent, avenir / Murat Kunt 50
- Le geste graphique / Gérard Dutry 54
- Ici, les projets eux-mêmes sont souvenirs / Arduino Cantafora 59
- La gestion énergétique face à l'environnement / Daniel Favrat 64
- L'automatique: une démarche au carrefour de disciplines techniques
Dominique Bonvin 70
- Des formules de Bolomey au supercalculateur
Vers une technologie prédictive des matériaux de construction
Christian Huet 75
- Le nouvel âge des céramiques / Terry A. Ring 80

INFORMATION

- Paris, juin 1990 (suite) 83
- Visite de l'INSEAD
Ecole pour managers de haut vol / Véronique Jost 84
- Ecole des Mines de Paris
Plus de deux cents ans d'âge / Jacqueline Juillard 84
- Cité des Sciences et de l'Industrie de la Villette
Le plaisir de comprendre / Claudine Tuscher 85
- Une dernière journée bien remplie...
L'Eurotunnel / Walter Knobel, Alexandre Verrey 87
- Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM) à Neuchâtel
Des chercheurs qui trouvent / Martin Kübel 88



Photo Alain Herzog

Vice-président

Le Conseil fédéral a nommé le professeur Dominique de Werra au poste de vice-président de l'EPFL, où il remplacera le professeur Roland Crottaz, devenu président du Conseil des Ecoles polytechniques. Dominique de Werra, professeur de recherche opérationnelle au Département de mathématiques de l'EPFL, entrera dans sa nouvelle fonction le 1^{er} janvier 1991.

En tant que vice-président de l'EPFL, Dominique de Werra sera responsable des relations internationales de l'Ecole, ce qui inclut entre autres les engagements de la haute école lausannoise sur le plan européen et ses actions de collaboration avec les pays en développement. Il aura aussi la tâche de gérer la formation continue des ingénieurs (cours et cycles postgrades, toujours plus nombreux), ainsi que la formation permanente du personnel de l'EPFL.

Originaire de Saint-Maurice et Sion (Valais), Dominique de Werra est né le 26 novembre 1942. Il obtient son diplôme d'ingénieur physicien de l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne (EPUL) en 1965, puis le titre de docteur ès sciences techniques de cette même haute école en 1969. De 1969 à 1971, il est professeur au Département des sciences du management à l'Université de Waterloo (Canada) et professeur invité dans diverses hautes écoles européennes et américaines. Depuis 1971, il est professeur de recherche opérationnelle à l'EPFL.

La gestion énergétique face à l'environnement

Professeur Daniel Favrat
Institut de thermique
Département de mécanique EPFL

Si, au cours de son évolution, l'homme a su rapidement mettre à profit le feu et sa puissance de chauffage, il lui a fallu attendre jusqu'au XVIII^e siècle pour maîtriser la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique. Les premières contributions des ingénieurs mécaniciens de l'époque, les machines à vapeur, furent d'emblée utilisées pour... permettre l'extraction de nouvelles ressources d'énergie fossiles en se substituant au travail animal pour assurer le pompage de l'eau des mines de charbon. S'ouvrait alors une ère d'abondance énergétique permettant le développement fabuleux des techniques que nous connaissons aujourd'hui. Hormis pendant les périodes de guerre, la gestion énergétique s'articulait essentiellement autour des termes énergie et économie (au sens financier!).

Ce n'est guère qu'à la faveur des événements politiques de 1973, puis de 1979, que la limite de nos ressources terrestres commença à être perçue à large échelle. Survint ensuite Tchernobyl pour nous rappeler, s'il en était besoin, que la conversion d'énergie implique des risques. Parallèlement, de nombreux indicateurs tendaient à nous suggérer les limites de capacité d'absorption et de régénération de nos rejets par notre environnement (pluies acides, couche d'ozone, effet de serre, etc.). Énergie, rejets, ressources, économie et risques, tels sont désormais les paramètres principaux à considérer dans le cadre de notre gestion énergétique.

Comme à l'aube de l'ère industrielle, l'ingénieur mécanicien a là encore un rôle primordial à jouer en développant les moyens et les méthodes propres à permettre une gestion énergétique mieux adaptée à notre environnement.

Les besoins

La gestion énergétique passe tout d'abord par une analyse des besoins qui, pour la Suisse, sont résumés à la figure 1. Parmi les catégo-

ries de besoin, la chaleur se taille toujours la part du lion avec plus de 74% de l'énergie utile, suivie par l'énergie mécanique (24,5%), dont l'importance relative est cependant croissante en raison, notamment, du développement des transports. Il est frappant de constater que non seulement les mesures passives d'économie (isolations, etc.) ne réussissent pas à infléchir suffisamment la croissance de la consommation globale d'utilisation est pour le moins stagnante, voire décroissante. L'analyse des besoins n'est cependant complète que si l'on prend

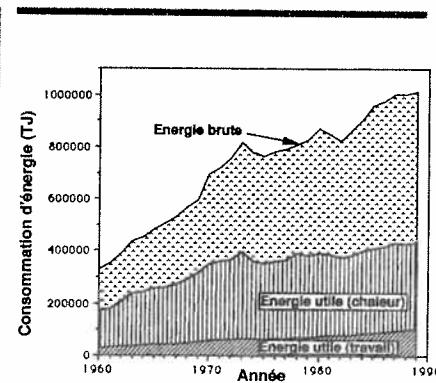


Fig. 1 Consommation d'énergie en Suisse. (Données OFEN)

en compte leur évolution dans le temps par rapport aux ressources disponibles. La figure 2 met en évidence la pointe de consommation électrique saisonnière et son inadéquation, en Suisse, avec les ressources renouvelables (hydraulique et solaire). Cette distribution des besoins met en évidence l'importance du développement de nouvelles technologies de stockage saisonnier, pour l'heure essentiellement limitées au stockage hydro-électrique.

L'énergie et ses niveaux de qualité

Une gestion efficace ne peut être réalisée sans une connaissance aussi précise que possible des caractéristiques et qualités particulières des éléments à administrer. Même si le premier principe de la thermodynamique admet l'équivalence entre les différentes formes d'énergie, l'expérience montre que la potentialité de fournir des prestations de haut niveau varie notablement, par exemple, selon que l'énergie se présente sous forme thermique (chaleur) ou sous forme de travail mécanique. Non seulement il n'est pas possible de convertir intégralement de l'énergie thermique en énergie mécanique, mais il est encore impératif de rejeter de la chaleur vers une deuxième source thermique à un niveau de température inférieur pour permettre cette conversion pourtant partielle. Or, la source privilégiée propre à réceptionner ces rejets thermiques est notre environnement (air, lacs, rivières, etc.).

Une théorie malheureusement encore trop peu utilisée, la théorie de l'exergie, qui regroupe le premier et le deuxième principes de la thermodynamique ainsi que l'état thermodynamique de l'environnement, permet de quantifier la potentialité de conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique notamment. Cette potentialité est d'autant plus grande que le déséquilibre entre les sources considérées est important. La figure 3 donne une représentation des niveaux exergetiques de systèmes quelconques en fonction de la température et de l'entropie. Noblesse oblige, les différentes sources d'énergie primaire, résultant sou-

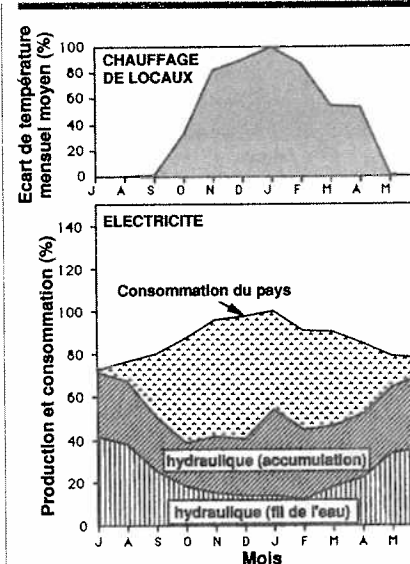


Fig. 2 Evolution des besoins en Suisse en 1989. (Données OFEN)

vent de transformations sur des millénaires, occupent le haut du pavé avec une potentialité maximale. Par suite de réactions chimiques ou nucléaires et de pertes par frottement ou transfert de chaleur, leur potentialité énergétique est cependant progressivement dégradée.

Cette dégradation est d'autant plus importante que le niveau exergetique final est proche de celui de l'environnement. Par analogie à une bille qui lâchée d'un endroit quelconque sur les flancs d'une cuvette finit en équilibre stable en son creux, l'exergie de tout système tend vers un équilibre stable au creux de la cuvette exergetique, qui correspond à l'état de l'atmosphère.

Fig. 3 Représentation des niveaux exergetiques d'un système. (Dessin A. Bölcs)

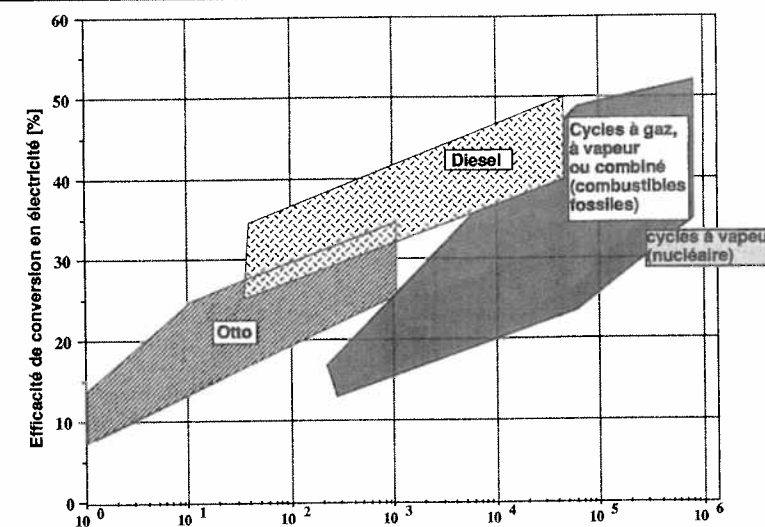
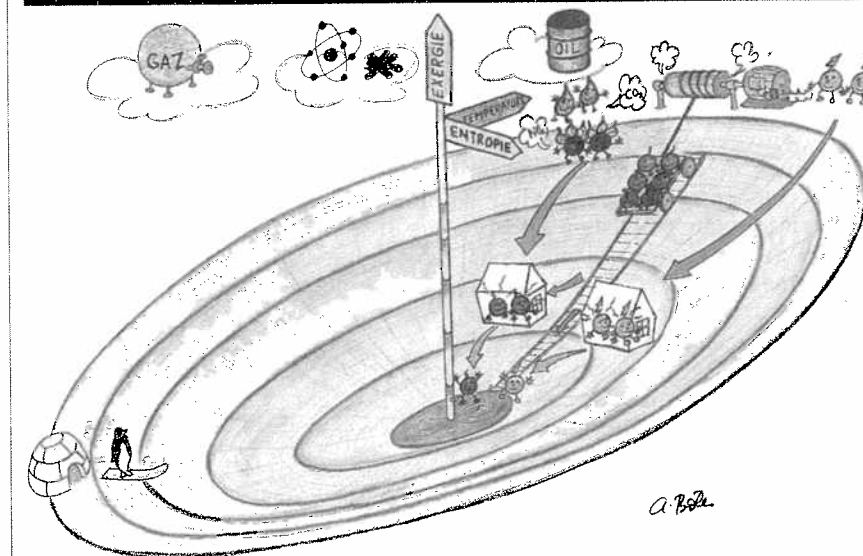


Fig. 4 Plages d'efficacité de conversion des principaux systèmes thermiques.

re. Cette chute exergetique est généralement accompagnée d'émissions de rejets divers plus ou moins nocifs pour l'environnement. Notre défi est d'exploiter au mieux cette chute en en retirant le maximum de prestations utiles et en minimisant ainsi nos rejets. Or, nous l'avons vu, la plus grande partie de nos besoins sont d'ordre thermique et principalement situés sur les flancs inférieurs de notre cuvette en raison de l'importance du seul chauffage des locaux et de la température relativement basse requise.

Les moyens techniques

La figure 4 résume les plages actuelles d'efficacité de conversion de l'énergie de combustibles en électricité par l'intermédiaire de cycles thermiques principalement. Des progrès considérables ont été accomplis ces dernières années dans le domaine des cycles combinés gaz-vapeur (fig. 5) et des cycles Diesel «turbocompound» avec des efficacités mécaniques atteignant 53%. Une approche particulièrement rationnelle consiste à utiliser la part de puissance qui n'est pas directement convertible en travail ou en électricité pour satisfaire des besoins de chauffage domestiques ou industriels.

Cette technique, dite de couplage chaleur-force ou cogénération, permet souvent d'utiliser à des fins énergétiquement optimales jusqu'à 85 à 90% de l'énergie primaire consommée. Malgré la simultanéité des besoins en période hivernale, illustrée à la figure 2, et la compétitivité des techniques mentionnées plus haut, la cogénération reste encore marginale en Suisse avec, pour les centrales existantes, une part de production électrique souvent inférieure à 15%. Une des raisons est liée à la température excessivement élevée de nos réseaux de distribution.

Parmi les combustibles permettant de limiter les émissions de CO₂, le gaz naturel avec son haut rapport hydrogène/carbone et l'abondance des ressources prouvées est particulièrement bien placé. Ses rejets de CO₂ par unité énergétique sont de quelque 20% inférieurs à ceux du mazout. Une réduction des rejets de CO₂ est aussi

envisageable par l'intégration de chaudières solaires à des cycles à combustibles fossiles assurant ainsi une meilleure rentabilisation des investissements que dans les centrales uniquement solaires. De façon générale, le développement d'unités moteurs commutables «dual fuel» pourrait s'étendre tant pour les unités stationnaires que pour les applications liées au transport.

Une autre technique extrêmement puissante consiste en une revalorisation du niveau exergetique d'énergie thermique par l'intermédiaire de pompes à chaleur (thermopompes). Les pompes à chaleur les plus performantes actuellement font appel à des cycles à compression de réfrigérants et permettent, moyennant la dégradation d'une fraction d'énergie noble (électricité, combustible), d'obtenir une part d'énergie d'autant plus importante que la différence entre les niveaux de température de l'énergie revalorisée est faible. Le coefficient de performance, à savoir le rapport entre l'énergie de chauffage et l'énergie noble fournie, peut varier de 300% en moyenne domestique à des pointes de 700% pour certaines thermopompes industrielles à cycle ouvert.

A un niveau national et compte tenu de la fraction très importante des besoins de chauffage (fig. 2), c'est cependant l'intégration énergétique de ces deux modes qui semble la plus judicieuse, tant du point de vue de l'environnement que de celui de la préservation des ressources. Des centrales chaleur-force performantes pourraient alimenter des réseaux de chauffage de leurs rejets thermiques tout en produisant de l'électricité pour alimenter des pompes à chaleur géographiquement décentralisées. Comme indiqué à la figure 6, une telle intégration pourrait déjà actuellement conduire à des diminutions de consommation de l'ordre de 40 à 100% par rapport à la simple combustion dans des chaudières, ceci avec une réduction du même ordre de tous les rejets. Même si les nouvelles normes de l'OPAIR ont stimulé le développement de brûleurs à remarquablement faible teneur en oxyde d'azote, ceux-ci n'apportent qu'une réponse limitée, sans contribuer à l'épineux problème des émissions de CO₂. La combustion à seule fin de chauffage domestique ou industriel à faible température, au même titre d'ailleurs que le chauffage électrique direct, nous conduit à une impasse, que seules

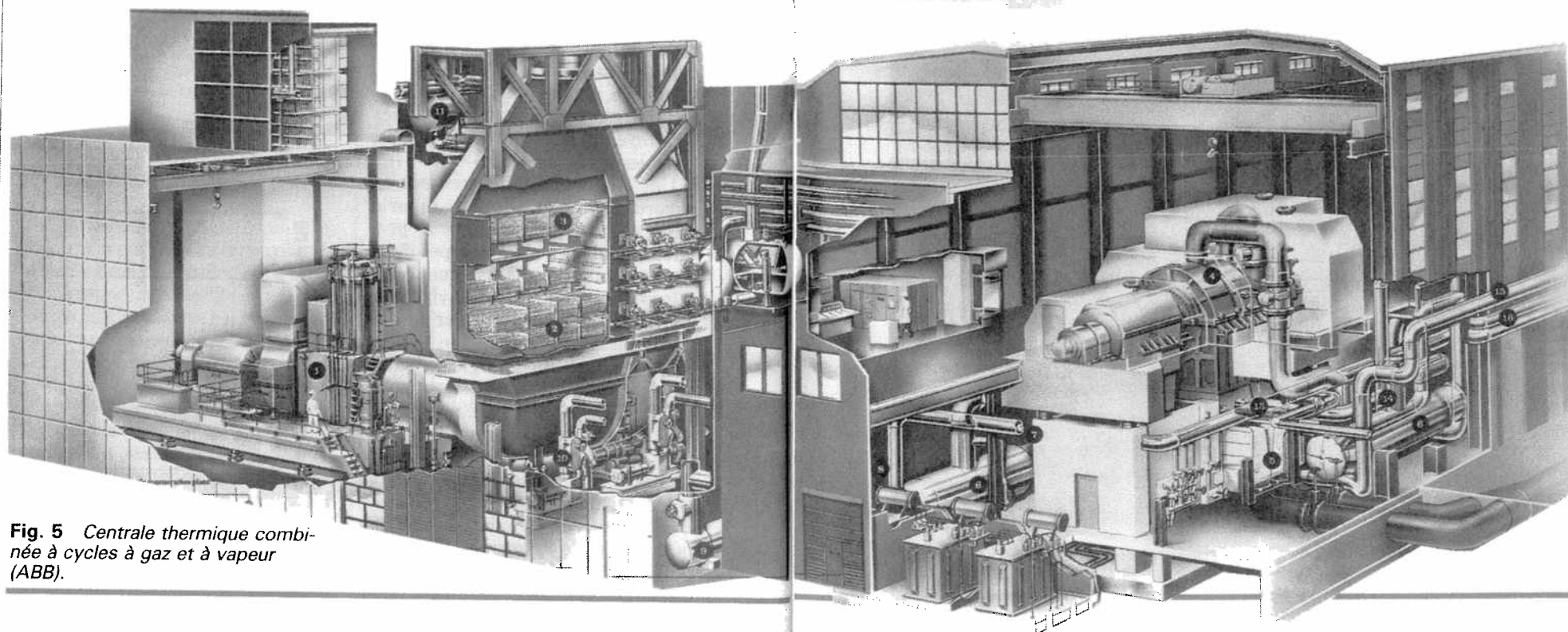


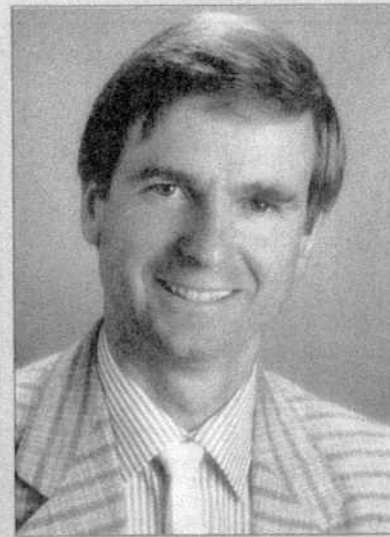
Fig. 5 Centrale thermique combinée à cycles à gaz et à vapeur (ABB).

Daniel Favrat

Originaire d'Epalinges et de Lausanne (VD), Daniel Favrat est né le 13 février 1948. Il obtient son diplôme d'ingénieur mécanicien à l'EPFL en 1972, puis le titre de docteur ès sciences techniques en 1976, couronnant ses travaux de recherche dans le cadre de l'Institut de thermique appliquée de la même école.

Il poursuit sa vie professionnelle en occupant des postes de recherche dans l'industrie privée. En Amérique du Nord tout d'abord, où il occupe pendant deux ans le poste d'ingénieur de recherche dans le cadre du groupe Esso Production Research au Canada, traitant de techniques avancées d'exploration et de production pétrolière.

De retour en Suisse, il travaille neuf ans au centre de recherche européen d'Atlas Copco à Ecublens (VD), où, dès 1984, il assume la responsabilité de chef du département de mécanique des fluides. Il a alors la responsabilité de trois secteurs : thermodynamique et systèmes énergétiques (pompes à chaleur,



conversion d'énergie géothermique et solaire), mécanique des fluides (compresseurs volumétriques et centrifuges, turbines de récupération d'énergie) et conditionnement des gaz (séchage, séparation). A ce titre, il participe notamment à l'optimisation de composants de pompes à chaleur pour réseaux de chauffage urbain parmi les plus puissantes au monde.

En automne 1988, il est nommé professeur extraordinaire au Département de mécanique de

l'EPFL, où il prend la direction du Laboratoire d'énergétique industrielle. Son enseignement porte principalement sur la thermodynamique et l'énergétique, réparti sur les deux cycles d'études en mécanique, ainsi que dans le cadre du cycle postgrade international sur l'énergie.

Ses activités de recherche portent sur les méthodes d'analyse de systèmes thermiques, l'intégration énergétique des procédés industriels et les dispositifs de valorisation de l'énergie (pompes à chaleur, centrales chaleur-force). Il est l'auteur de plusieurs publications, dans le domaine des pompes à chaleur notamment.

Sa jeunesse, son enthousiasme, alliés à ses remarquables aptitudes de communicateur, contribueront, nous n'en doutons pas, à rendre l'enseignement du professeur Favrat particulièrement attrayant. Sa contribution est précieuse et bienvenue au moment où notre marge de manœuvre en matière énergétique devient de plus en plus étroite.

Prof. Albin Bölcs
Chef du Dépt de mécanique EPFL

les pompes à chaleur nous permettront de dépasser. Une fois encore les Japonais l'ont bien compris en lançant leur ambitieux projet de super pompe à chaleur à accumulation doté de plus de 100 millions de francs sur dix ans. Au Japon, même les plus grandes compagnies électriques se muent en compagnie d'énergie au sens large, en stimulant directement la réalisation de réseaux urbains de chauffage et de climatisation, gage d'une vision globale et intégrée de la gestion énergétique.

Nous ne devons certes pas ignorer le fait que certains réfrigérants utilisés dans les pompes à chaleur ont des effets secondaires négatifs sur notre écosystème (couche d'ozone, effet de serre). Leur substitution fait cependant l'objet d'un gigantesque effort de recherche international et pluridisciplinaire dans lequel les ingénieurs méca-

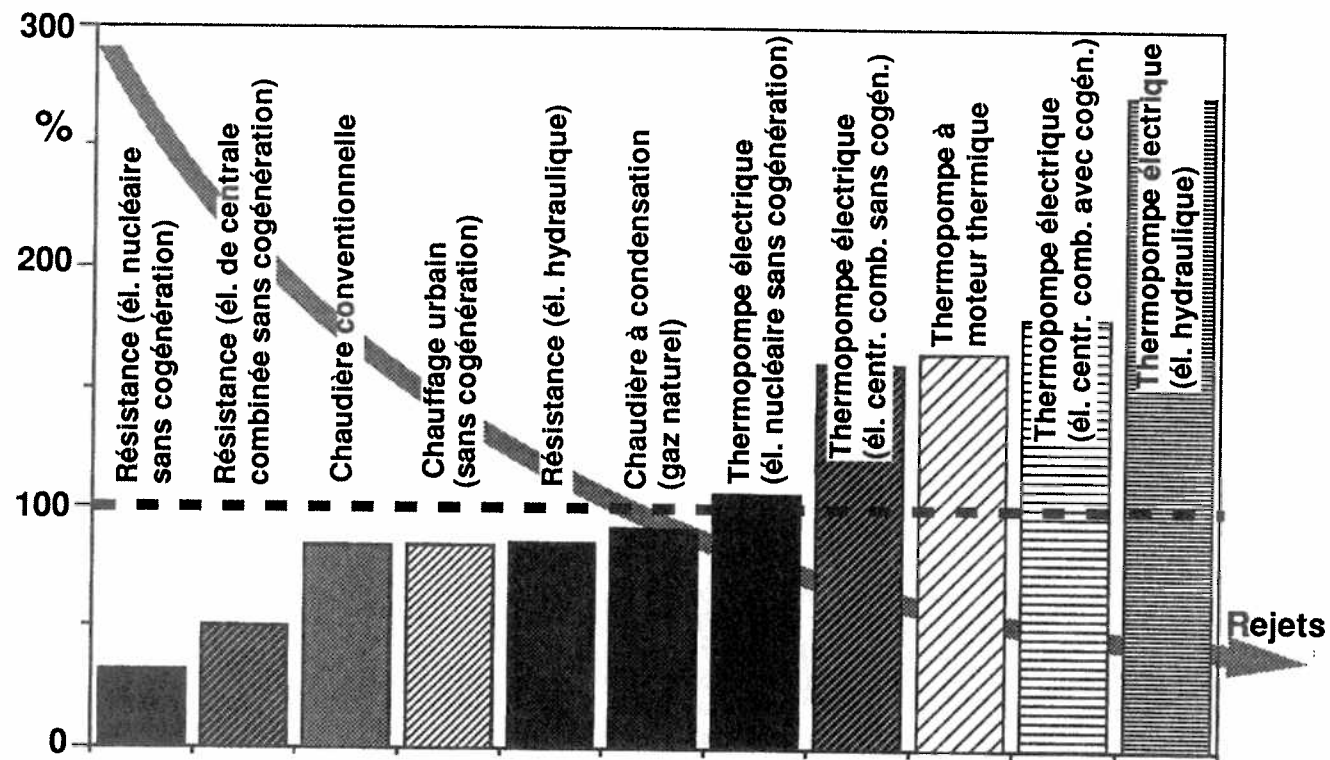


Fig. 6 Rapport « énergie de chauffage/énergie brute ».

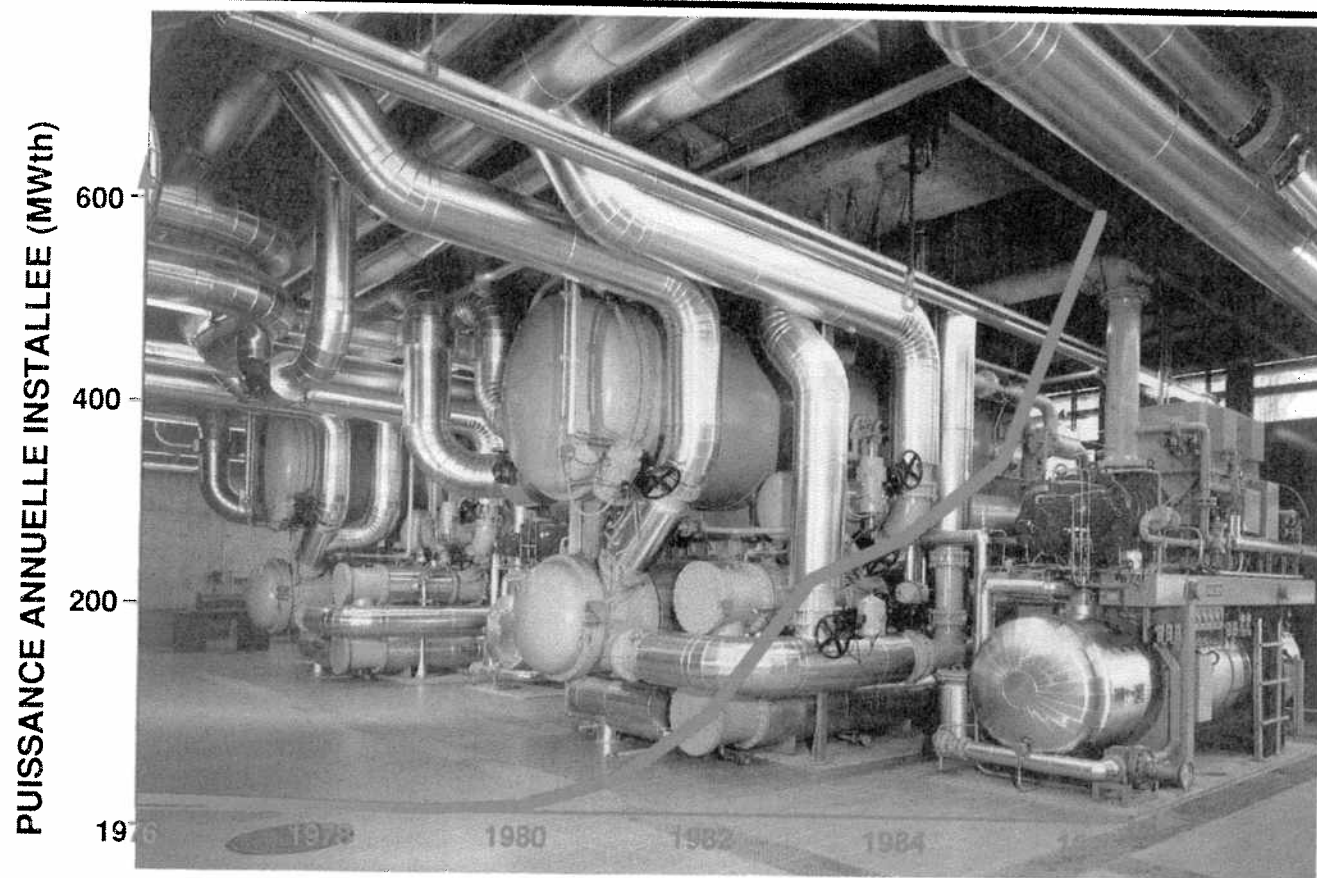


Fig. 7 Pompe à chaleur de réseau de chauffage à distance (installation de l'EPFL). En surimpression, évolution du marché mondial de ce type d'installations.

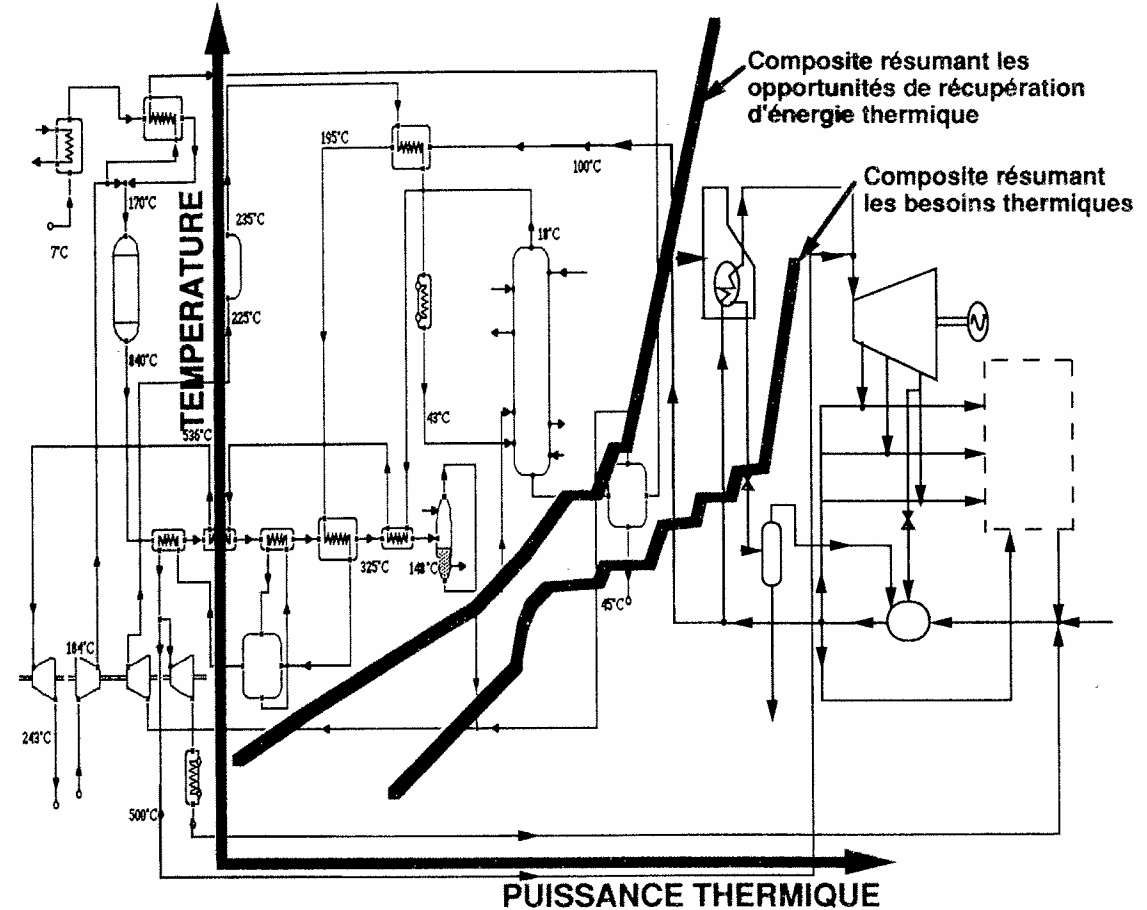


Fig. 8 Schéma d'un site industriel et graphique résumant la méthode du « pincement optimal global ».

ciens ont également un rôle important à jouer. Des solutions très satisfaisantes existent déjà, notamment au niveau des pompes à chaleur de chauffage urbain comme les pompes à chaleur à compression d'ammoniac alimentant l'EPFL (fig. 7).

Méthodes et formation

Si la mise au point de composants techniques de plus en plus performants est une des tâches importantes des ingénieurs mécaniciens, leur incorporation judicieuse dans des systèmes complexes, tout en optimisant le temps d'étude requis, n'en est pas moins primordiale. Au niveau industriel, l'intégration énergétique, entre les procédés notamment, offre des possibilités substantielles d'économie d'énergie et de réduction des émissions. Le développement de nouvelles méthodes de synthèse, comme la méthode du pincement optimal global (fig. 8), permettent à l'ingénieur

énergéticien d'optimiser à la fois économiquement et thermodynamiquement les possibilités d'intégration et de récupération énergétique de sites industriels complexes. Plus générale, la théorie de l'exergie est également en passe d'être étendue à la prise en compte non seulement des pertes de fonctionnement mais également de l'exergie de fabrication des composants (exergie grise) et des facteurs de pollution et de recyclage. La gestion optimale de sites à multicomposants et objectifs différenciés implique également un recours accru aux méthodes mathématiques de recherche opérationnelle. La formation des ingénieurs à ces outils est primordiale si l'on veut assurer une gestion à long terme avec une approche systématique des défis énergétiques et environnementaux auxquels nous devons faire face.

Sans avoir à attendre bêatement une hypothétique solution miraculeuse, les perspectives offertes par les techniques d'utilisation rationnelle de l'énergie partiellement ex-

posées ci-dessus ne peuvent que nous rendre optimiste face à l'avenir. Cependant, la motivation de jeunes ingénieurs talentueux aptes à poursuivre la recherche et le développement de ces techniques et méthodes passe par une politique énergétique cohérente, avec à la clé une bonne implantation sur le marché. Peut-être faudra-t-il aussi se rendre à l'évidence que payer moins de 10 francs l'équivalent en mazout du travail physique que peut fournir un homme pendant toute une année tient d'une logique que l'évolution de notre écosystème pourrait bouleverser. D'autant plus que l'appétit d'énergie n'est pas l'apanage des seuls pays industrialisés.

Notre défi, dans le cadre des écoles polytechniques, est d'assurer une transition vers une utilisation rationnelle de l'énergie, qui passe par une formation aussi large que possible en intégrant les plus récents progrès des sciences de l'ingénieur dans un esprit pluridisciplinaire.