Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 69 (1978)

Heft: 12

Artikel: L'exergie et le bilan exergétique suisse

Autor: Morf, J.-J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-914911

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 11.07.2025

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

L'exergie et le bilan exergétique suisse

Par J.-J. Morf

620.9(494):697;

On parle de plus en plus d'exergie, de puissance exergétique, de rendement exergétique, de bilan exergétique. Le but de cet article est de définir ces termes dans un cas relativement simple et de montrer l'intérêt réel que présente cette notion pour l'appréciation des problèmes de la Suisse dans son approvisionnement en énergie.

Heizwärme, die nötig ist, um ein Gebäude auf z.B. 20 °C zu halten, ist Energie auf tiefem Niveau. Ihr thermodynamischer Wert wird Exergie genannt. Er beträgt bei 0 °C Aussentemperatur und 20 °C Raumtemperatur nur etwa 7% der z.B. mit Heizöl aufzuwendenden Energie. Es ist deshalb schade, diese hochwertige Energie für den minderwertigen Heizbedarf einzusetzen; besser wäre eine Wärmepumpe. Die Exergie kann auch als die Arbeit einer idealen Wärmepumpe aufgefasst werden, welche die benötigte Heizwärme liefert.

Die Jahresbilanzen der Schweiz für Energie und Exergie werden dargestellt. Während der für Haus- und Industriewärme benötigte Anteil vom Energiestandpunkt aus mit etwa 30% Verlust behaftet ist, lässt die exergetische Betrachtung infolge der Abwertung auf tiefe Gebrauchstemperatur einen Verlust von etwa 90% erkennen.

Eine gebräuchliche Ölheizung hat einen exergetischen Gesamtwirkungsgrad von etwa 4%, eine elektrische Direktheizung (inkl. Zentrale) etwa 2,5%, eine Wärmepumpe (inkl. Zentrale) dagegen etwa 8%. Dieser Wert kann durch tiefere Heizwassertemperatur (z.B. mit den bestehenden Radiatoren bei Verbesserung der Gebäudeisolation) auf etwa 16% gesteigert werden. Noch höhere Werte liefert eine Niedertemperaturfernheizung mit Wärme-Kraft-Kopplung.

P. Suter

1. L'énergie et l'exergie utiles dans le cas du chauffage d'un bâtiment

Soit un bâtiment dont l'isolation est donnée et que l'on désire maintenir à la température utile T_{ut}, la température extérieure étant T_{ext}. Pour cela, il faut injecter dans ce bâtiment une certaine puissance thermique utile ou flux de chaleur $\dot{Q}_{ut}$. On sait, par la pratique, que ce flux de chaleur utile est à peu près proportionnel à la différence de température.

$$\dot{Q}_{ut} \cong \varkappa\,(T_{ut} - T_{ext}) \tag{1}$$

$\varkappa$ (W/K) caractérise ici la déperdition calorifique totale du bâtiment considéré.

La «valeur» de cette puissance utile $\dot{Q}_{ut}$ livrée à la température utile T_{ut} peut être appréciée de deux façons suivant que l'on se limite à l'utilisation du premier principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie) ou si l'on tient compte en plus de la dégradation de l'énergie thermique utilisée à une température relativement basse, c'est-à-dire si l'on se réfère à la limite définie par *Carnot* dans le second principe de la thermodynamique.

1.1 Puissance énergétique utile

Un exemple numérique illustre la question: Pour T_{ext} = 273 K (0 °C), T_{ut} = 293 K (20 °C) et $\varkappa$ = 5 kW/K, on obtient $\dot{Q}_{ut}$ = 100 kW. Selon le premier principe de la thermodynamique on se bornera à dire que la puissance utile est de 100 kW (ou 86000 kcal/h). Elle est nécessaire pour maintenir le local à 20 °C par 0 °C extérieur.

1.2 Pertes et rendement énergétiques (efficacité)

Si le système de chauffage adopté absorbe une puissance P différente de $\dot{Q}_{ut}$ pour satisfaire cette demande de chaleur on définira les

$$\text{Pertes énergétiques} = P - \dot{Q}_{ut} \tag{2}$$

et l'efficacité (ou rendement énergétique)

$$\varepsilon = \dot{Q}_{ut}/P \tag{3}$$

On verra plus loin que les pertes énergétiques définies selon (2) peuvent devenir négatives et que l'efficacité selon (3) peut devenir supérieure à l'unité, notamment dans le cas de l'emploi d'une pompe à chaleur.

1.3 Puissance exergétique utile

La «valeur réelle» de cette livraison de 100 kW à 293 K est en réalité plus faible. Elle correspond à la puissance mécanique maximum P_{ex} que l'on pourrait tirer de cette source chaude livrant $\dot{Q}_{ut}$ (100 kW) à T_{ut} (293 K) en présence de la source froide infinie (air extérieur) dont la température est T_{ext} (273 K). Selon le second principe de la thermodynamique, cette limite est bien définie:

$$P_{ex} = \frac{T_{ut} - T_{ext}}{T_{ut}}\,\dot{Q}_{ut} = \theta \cdot \dot{Q}_{ut} \tag{4}$$

P_{ex} est par définition la puissance exergétique utile ou valeur réelle mécanique de la puissance thermique livrée à T_{ut}

$$\theta = (T_{ut} - T_{ext})/T_{ut} \tag{5}$$

est le facteur de Carnot (appelé abusivement rendement de Carnot). $\dot{Q}_{ut}$ est la puissance (énergétique) utile.

Pour les valeurs numériques données sous 1.1, $P_{ex} \cong 7$ kW. On voit que dans l'optique du second principe de la thermodynamique, la prestation réelle est de 7 kW et non de 100kW.

1.4 Réversibilité

En réalité, la machine dite de Carnot qui permettrait d'obtenir ces 7 kW mécaniques en suivant un «cycle de Carnot» ne représente qu'une limite théorique vers laquelle on peut tendre à l'aide de machines de plus en plus perfectionnées. Mais l'important est que cette machine idéale est *parfaitement réversible,* comme l'a postulé *Carnot* dans sa démonstration.

1.5 Machine de Carnot utilisée comme pompe à chaleur; deuxième définition de la puissance exergétique utile

En inversant le «cycle de Carnot», cette machine devient «pompe à chaleur». Cela signifie que l'on peut tendre à la limite vers une machine idéale qui fournirait le flux thermique désiré $\dot{Q}_{ut}$ = 100 kW au bâtiment à T_{ut} = 293 K (source chaude) avec une puissance mécanique P_{ex} = 7 kW et en puisant la différence ($\dot{Q}_{ut} - P_{ex}$) = 93 kW dans l'air extérieur à T_{ext} (source froide).

Ceci conduit à une deuxième définition de la puissance exergétique utile: La puissance exergétique utile nécessaire pour maintenir un local donné à température T_{ut} par une

température extérieure T_{ext} est la puissance mécanique nécessaire à entraîner une pompe à chaleur idéale capable de maintenir ce local à la température désirée T_{ut}.

1.7 Pertes et rendement exergétiques

Comme en réalité le système de chauffage installé est imparfait (p.ex. chauffage direct), la puissance réelle P qu'il faut fournir au système sera plus grande que la prestation obtenue P_{ex} on a par définition

$$\text{Pertes exergétiques} = P - P_{ex} \tag{6}$$

De même on définira le rendement exergétique

$$\eta_{ex} = P_{ex}/P \tag{7}$$

où P_{ex} est la puissance exergétique utile nécessaire à maintenir le local à T_{ut} et P la puissance consommée réellement par le système (combustible, carburant, force motrice, électricité).

En comparant le rendement exergétique η_{ex} défini par (7) à l'efficacité ε définie par (3) on obtient

$$\eta_{ex} = \theta \cdot \varepsilon \tag{8}$$

où θ est le facteur de Carnot défini par (5).

2. L'influence des températures

L'expression (5) définissant le facteur de Carnot montre qu'il dépend de la température désirée T_{ut} *et* de la température de référence extérieure T_{ext}. Le tableau I donne ce facteur, le flux de chaleur et la puissance exergétique utile pour maintenir à 20 °C le bâtiment choisi comme exemple sous 1.1 pour différentes valeurs de la température extérieure. On remarque qu'en passant du chauffage à la climatisation, le flux de chaleur *et* le facteur de Carnot changent simultanément de signe de sorte que la puissance exergétique utile reste positive et représente bien la prestation réelle ou le service rendu, c'est-à-dire la puissance mécanique minimum nécessaire pour maintenir le froid désiré.

Le tableau II donne les valeurs du facteur de Carnot pour diverses prestations en fonction de la température utile pour une température extérieure moyenne de 10 °C. Plus la température désirée est élevée, plus le facteur de Carnot se rapproche de l'unité. A très haute température il n'y a plus de différence entre énergie et exergie (chaleur). Il en est de même lorsque la température extérieure se rapproche du zéro absolu (satellites).

Tableau I

	T_{ut} K	T_{ext} K	$\dot{Q}_{ut}$ kW	θ	P_{ex} kW
Chauffage	293	273	+100	0,068	6,8
	293	283	+ 50	0,034	1,7
	293	293	0	0	0
Climatisation	293	303	− 50	−0,034	+1,7

Tableau II

Utilisation	T_{ut} K	T_{ext} K	θ
Eau sanitaire 50 °C	323	283	0,124
Cuisson 100 °C	373	283	0,241
Procédé à 500 °C	773	283	0,634
Procédé à 1000 °C	1273	283	0,778
A la limite	∞	283	1

3. Les deux bilans énergétiques et exergétiques

Il y a donc deux façons complémentaires de jauger une fourniture d'énergie utile pour rendre un service donné suivant que l'on mesure le «service rendu» selon le premier ou selon le premier et le second principe de la thermodynamique (critère de Carnot).

Selon le premier principe on parlera de chaleur utile, d'énergie utile, de puissance utile, de flux de chaleur utile *sans* se *préoccuper des températures*. On en déduira des bilans énergétiques, des pertes énergétiques et des efficacités (rendements énergétiques).

En tenant compte en plus du second principe, on parlera d'exergie utile, de puissance exergétique utile. Ces notions *tiennent correctement compte des températures*. On en déduira des bilans exergétiques, des pertes exergétiques et des rendements exergétiques.

3.1 Avantages et inconvénients des bilans énergétiques

Les bilans énergétiques sont relativement faciles à établir [1; 2][1]), mais ils donnent en fait une image incomplète de la réalité. Dans un tel bilan, une machine frigorifique ne peut pas être correctement représentée; une pompe à chaleur fait apparaître des «pertes négatives» qui correspondent à une partie de l'apport de chaleur tirée du milieu ambiant et un rendement énergétique supérieur à l'unité auquel on donne subitement le nom de coefficient de performance (COP) ou encore d'efficacité ε. Ce bilan ne donne pas l'image complète des perfectionnements que l'on peut encore apporter par une technologie améliorée ou mieux adaptée, car il ne fait apparaître qu'une partie des pertes précédant l'utilisation finale.

3.2 Inconvénients et avantages des bilans exergétiques

Les bilans exergétiques sont plus difficiles à établir puisqu'il faut dans chaque cas tenir compte de la température utile *et* de la température extérieure qui varie suivant l'heure et le lieu. De plus, les données pour calculer l'exergie utile pour certains procédés chimiques manquent. Cependant les principales utilisations peuvent être correctement chiffrées et donnent une image cohérente des procédés de transformation d'énergie où les pertes sont les plus fortes et où les améliorations sont encore possibles.

4. Application au cas de la Suisse

4.1 Bilan énergétique

La fig. 1 donne le bilan énergétique de la Suisse en 1974. La façon dont ce bilan a été établi est expliquée en détail dans [1]. On notera la très forte consommation d'énergie primaire et plus spécialement de produits pétroliers

$$P \simeq 10 \text{ GW} = 315 \cdot 10^{15} \text{ J/an} = 315 \text{ PJ/an}$$

pour satisfaire nos demandes de chaleur à partir du mazout, soit:

$$\dot{Q}_{ut} \simeq 7 \text{ GW } (220 \text{ PJ/an})$$

Les pertes énergétiques du chauffage au mazout de 3 GW (95 PJ/an) admises correspondent à une efficacité moyenne de $\varepsilon = 7/10 = 0{,}7$.

Ce bilan ne fait pas apparaître la possibilité qu'il y aurait d'obtenir exactement la même prestation avec des pompes à chaleur qui ont une efficacité supérieure à l'unité. Les pertes

[1]) Voir la bibliographie à la fin de l'article.

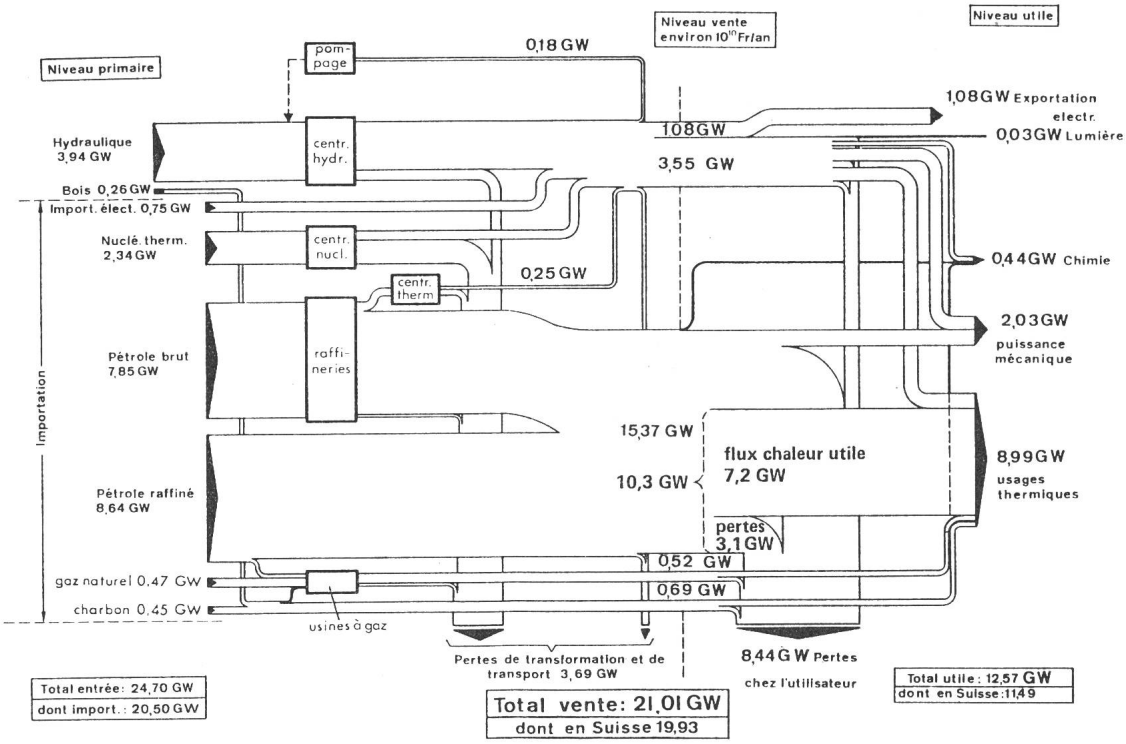

Fig. 1
Bilan énergétique suisse en puissance moyenne 1974
Les pertes de 8,44 GW chez les utilisateurs proviennent essentiellement du mauvais rendement énergétique des moteurs à combustion interne estimé à 20 % et du mauvais rendement énergétique des chaudières à mazout estimé à 70 %.

par les cheminées et par imbrûlés apparaissent ici avec 3 GW et laissent à première vue une faible marge pour les améliorations.

4.2 Bilan exergétique

La fig. 2 donne le bilan exergétique de la Suisse pour la même année. Les détails des calculs ont été faits dans le cadre du Projet d'Ecole «Energie» à l'EPFL. On peut relever que la *même prestation* de production de chaleur de 7 GW en provenance du mazout pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la cuisson et les procédés thermiques est ici représentée par sa valeur exergétiques réelle, soit $P_{ex} \simeq 1$ GW.

La différence $P - P_{ex} = 9$ GW (soit 284 PJ/an ou encore 79 TWh/an) représente le domaine où des améliorations techniques permettront de substancielles réductions, notamment par un développement généralisé du chauffage urbain à basse température en provenance de centrales mixtes (chaleur + électricité) et par l'emploi systématique de pompes à chaleur améliorées.

Dans les calculs on a admis que les pouvoirs exergétiques des combustibles et de l'uranium sont confondus avec leurs pouvoirs calorifiques de sorte que, pour la production d'électricité, les pertes exergétiques sont égales aux pertes énergétiques.

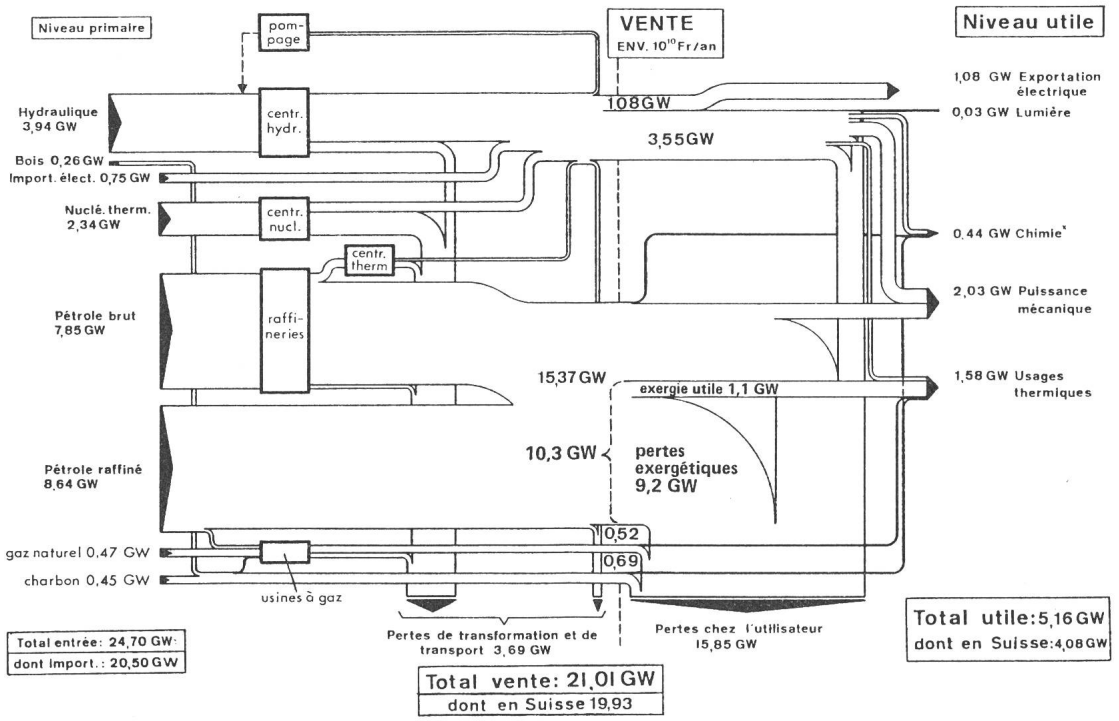

Fig. 2
Bilan exergétique suisse en puissance moyenne 1974
Les pertes de 15,85 GW chez les utilisateurs proviennent essentiellement du mauvais rendement exergétique des moteurs à combustion interne estimé à 20 % et du mauvais rendement exergétique lié au choix des technologies de production de chaleur à basse température. Les pertes de transformation et de transport restent les mêmes que pour le bilan énergétique.

5. Domaines où les améliorations sont les plus efficaces

Avant de trop s'enthousiasmer, il convient de rappeler que les améliorations techniques qu'on peut envisager pour réduire la consommation d'énergie primaire sont en général coûteuses. Il n'est toutefois pas exclu qu'elles apparaissent un jour économiquement justifiées si le prix des sources primaires d'énergie croît d'un ou de deux ordres de grandeur en raison de leur raréfaction.

5.1 Améliorations par radiateurs à grandes surfaces et à basse température

Si par 0 °C extérieur on doit porter les radiateurs à 80 °C pour chauffer un local à 20 °C, le rendement exergétique des radiateurs est le quotient des facteurs de Carnot correspondant à 293 K et 353 K soit:

$$\frac{20}{293} \cdot \frac{353}{80} = 0{,}3$$

En effet, la puissance exergétique nécessaire pour livrer 100 kW à 80 °C est (100 kW) · 80/353 alors qu'avec des radiateurs idéals à 20 °C sur les six faces du local il suffit de (100 kW) · 20/293.

En quadruplant la surface des radiateurs, il suffira de les chauffer à 35 °C, et leur rendement exergétique passera à 0,6. Cette opération n'a d'intérêt qu'en combinaison avec une pompe à chaleur correctement adaptée ou pour le chauffage à distance utilisant les rejets thermiques. Elle serait inutile avec un chauffage direct (chaudière à mazout, corps de chauffe électrique, etc.) car les pertes exergétiques des radiateurs seraient simplement reportées à la chaudière.

5.2 Amélioration par réduction des pertes thermiques du local

Si au lieu de quadrupler la surface des radiateurs on réduit par 4 le coefficient de déperdition défini par (1), on obtient deux effets: réduction par 4 du flux de chaleur nécessaire et passage du rendement exergétique des radiateurs de 0,3 à 0,6; ainsi la puissance mécanique nécessaire pour entraîner la pompe à chaleur sera 8 fois plus faible. Actuellement, le prix du mazout ainsi économisé ne permet pas encore de rentabiliser une telle dépense.

5.3 Amélioration par l'installation de pompes à chaleur

Les pompes à chaleur actuelles ont des rendements exergétiques de l'ordre de 0,1 à 0,5, et les installations complètes compte tenu du faible rendement exergétique des échangeurs extérieurs et intérieurs dépassent rarement un rendement exergétique de 0,2. C'est déjà mieux que le chauffage direct à mazout dont le rendement exergétique oscille entre 0,03 et 0,05 ou que le chauffage électrique par résistance dont le rendement exergétique est égal au coefficient de Carnot (0,07 dans l'exemple) lequel doit encore être multiplié par le rendement de la centrale électrique de l'ordre de 0,4. Il y a là de grandes améliorations possibles. Mais elles sont pour le moment encore trop coûteuses, même si plusieurs millions de tonnes de mazout pourraient être économisés par année [3; 4; 5].

5.4 Amélioration par chauffage urbain

Le chauffage à distance à basse température (env. 50 °C) provenant d'une centrale «chaleur-force» serait bon du point de vue économie d'énergie, mais coûteux en raison des gros diamètres nécessaires pour les conduites et du surdimensionnement des radiateurs.

C'est ainsi qu'en utilisant les rejets thermiques de la centrale nucléaire de Gösgen, on peut concevoir un chauffage à distance à basse température (aller à 36 °C, retour à 22 °C) capable de fournir 2 GW de puissance thermique pendant environ 5000 heures par année sans réduire la production d'énergie électrique ni augmenter la consommation de combustible nucléaire. Ce réseau couvrirait les besoins de chauffage d'un demi million d'habitants et économiserait près d'un million de tonnes de mazout par année. Les techniques nécessaires sont connues: remplacement des radiateurs par des parois chauffantes à basse température, réseaux de distribution d'eau tiède, conduites de grand diamètre à grandes distances. Seul le coût des installations et des aménagements nécessaires rend pour le moment un tel système irréalisable.

6. Conclusion

La notion d'exergie, facile à définir dans le cas des applications thermiques de l'énergie, permet de faire ressortir clairement où sont situées les plus grandes pertes dans le bilan exergétique de la Suisse. Il s'agit essentiellement de nos systèmes de chauffage à mazout dont le rendement exergétique oscille actuellement entre 3 % et 5 %. C'est dire que par rapport à un système idéal utilisant systématiquement le chauffage à distance à basse température et des pompes à chaleur de plus en plus perfectionnées, 95 à 97 % du mazout consommé actuellement pour le chauffage représente des pertes qui pourraient être *sinon supprimées au moins fortement réduites sans changer la quantité de chaleur utile, donc sans réduire le confort.* Mais de telles installations demandent des investissements élevés. Elles pourront être économiquement justifiées lorsque, par pénurie, le prix du pétrole et des autres combustibles sera d'un ordre de grandeur plus élevé, ce qui pourrait se présenter à la génération montante.

Cette étude a été faite dans le cadre du «Projet d'Ecole Energie» de l'EPFL.

Bibliographie

[1] *J.-J. Morf* et *M. Roux:* Situation énergétique de la Suisse. Bull. ASE/UCS 67(1976)21a, p. 1199...1203.
[2] Statistique globale suisse de l'énergie. Bull. ASE/UCS 68(1977)23, p. 1210...1248.
[3] *J. Grivat:* Perspectives du chauffage combiné mazout/pompe à chaleur air-eau dans l'habitat. Bull. ASE/UCS 69(1978)7, p. 299...302.
[4] *A. E. Haseler:* District Heating and Telethermics. Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers, Vol. 42, February and March 1975, p. 257... 272 & 273...285.
[5] *L. Borel* et *G. Yanni:* Remplacement du chauffage individuel par d'autres modes de chauffage. EPFL – Projet d'école énergie. Lausanne, décembre 1977.

Adresse de l'auteur

J.-J. Morf, Professeur à l'EPFL, Chaire d'Installations Electriques,
16, chemin de Bellerive, CH-1007 Lausanne.