

OPTIMISATION ENERGETIQUE DES SYSTEMES INDUSTRIELS: INFLUENCE DE LA VALEUR DE L'ENERGIE

P. Le Goff *

Quaderns
d'enginyeria

3 (1981) 1 p. 47-61

RÉSUMÉ

Toute opération industrielle peut être présentée comme la transformation d'énergie utilisable, en énergie utilisée et en énergie dégradée rejetée dans l'environnement. On établit l'équation générale du *bilan de valeur* dans l'opération, la "valeur" de chaque énergie n'étant pas nécessairement monétaire mais pouvant être donnée par un barème de référence quelconque, d'origine thermodynamique, écologique, etc... On compare notamment sur l'exemple du chauffage d'une enceinte à l'aide d'eaux chaudes résiduaires, les barèmes basés sur le 1er et sur le 2me principe de la thermodynamique. Dans ce dernier cas, le bilan de valeur se confond avec le bilan d'exergie. On compare les consommations d'énergie et d'exergie à l'optimum et on montre l'importance du contenu énergétique des biens d'équipement dans la procédure d'optimisation du système.

SUMMARY

Any industrial operation may be considered as the transformation of usable energy into either useful energy and degraded energy rejected into the environment. The general equation for value balance in an operation is established, with the "value" of each energy being not necessarily a monetary value, but also coming from any possible reference scale of a thermodynamic or ecological origin... Reference scales based on the 1st and 2nd law of thermodynamics are compared and applied to the example of heating a system with warm waste water. In case of the 2nd law, the value balance is identical to the exergy (= availability) balance. Energy and exergy consumptions at optimum are compared. Importance of the energy contents of equipments in optimisation procedure is emphasized.

Pour un ingénieur, toute opération industrielle se présente comme un *système ouvert* destiné à fabriquer des produits "*fonctionnels*" (c'est à dire définis par la fonction à laquelle ils sont destinés) à partir de matières premières, d'énergie et de connaissances. Les produits fonctionnels peuvent avoir une fonction *matérielle* (par exemple: des objets manufacturés), une fonction *énergétique* (par exemple: des aliments, des combustibles), une fonction *informationnelle* (un message), une fonction de *service* (un transport) ou plus généralement un mélange de ces fonctions. Portons notre attention sur l'aspect énergétique de l'opération.

*Laboratoire des Sciences du Génie Chimique CNRS-ENSIC Nancy-FRANCE

1. BILAN D'ENERGIE

Nous nous bornerons à l'étude du cas où le système est une "structure technique" (une usine, une machine, un bien d'équipement...) que l'on achète, installe et met en route à l'instant zéro et qui va ensuite fonctionner, pendant N années, en régime permanent avec des flux annuels constants d'énergie \dot{E}_a , \dot{E}_u , \dot{E}_r (en joules par an) (Fig.1).

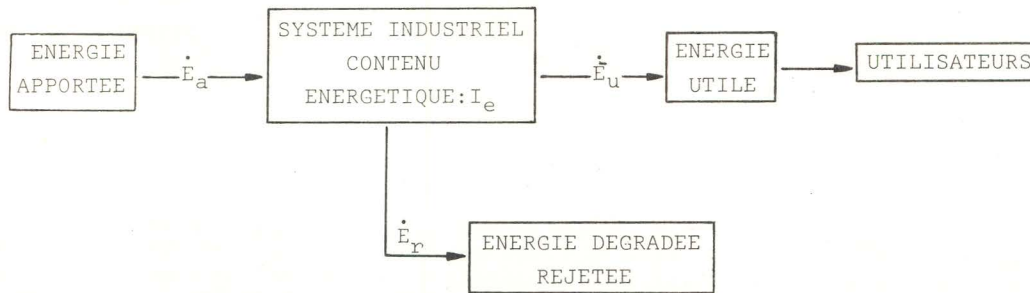


FIGURE 1

\dot{E}_a est le flux d'énergie *apportée* au système, \dot{E}_u est le flux d'énergie *utile* sortant du système : c'est le contenu énergétique des produits fonctionnels. \dot{E}_r est le flux d'énergie dégradée et *rejetée* dans l'environnement (dans l'air, la mer, les dépôts d'ordures).

Le bilan annuel d'énergie s'écrit :

$$\dot{E}_a = \dot{E}_u + \dot{E}_r \quad (1)$$

Posons $r = (\dot{E}_r / \dot{E}_u)$: r est la "consommation spécifique d'énergie", c'est à dire la quantité d'énergie dégradée par joule d'énergie utile.

2. BILAN DE VALEUR

Pour un économiste, cette opération se présente différemment: le système industriel a pour fonction de transformer des biens économiques de faible valeur propre, en biens plus utiles, donc en biens à valeur *ajoutée*. En outre les rejets sont des biens à valeur *diminuée* (ou même à valeur négative dans le cas de nuisances). En outre l'opération nécessite l'apport de grandeurs coûteuses (matières, énergie, information) (cf. Fig.2). Soit F le coût annuel de ces fournitures, et soit B le bénéfice que le responsable tire de l'opération.

Le coût opératoire net annuel est:

$$\dot{C}_O = F - B = \dot{E}_a v_a - (\dot{E}_u v_u + \dot{E}_r v_r) \quad (2)$$

où " v " est la valeur d'une unité d'énergie (d'un joule) exprimée dans un certain barème de valeurs, défini a priori et choisi comme échelle de référence (voir section 5): v_a ,

v_u et v_r sont les valeurs d'un Joule ,respectivement dans l'énergie apportée,l'énergie utile et l'énergie rejetée.

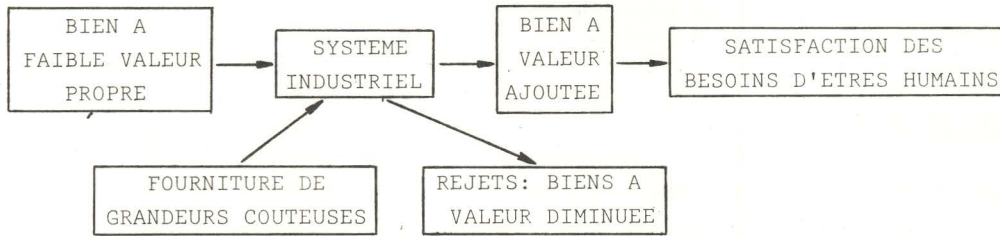


FIGURE 2

Remarque: Dans les opérations commerciales normales, le coût total ainsi défini est évidemment négatif, car le bénéfice B est en principe supérieur au coût des fournitures F. On verra cependant plus loin ,l'intérêt de cette présentation.

En combinant les relations (1) et (2) il vient:

$$\frac{\dot{C}_o}{\dot{E}_u} = r(v_a - v_r) - (v_u - v_a) \quad (3)$$

$(v_a - v_r)$ est la valeur perdue par chaque joule rejeté dans l'environnement,
 $(v_u - v_a)$ est la valeur ajoutée a chaque joule utile, du fait même de l'opération, et
 \dot{C}_o / \dot{E}_u est le coût opératoire net par joule d'énergie utile.

3. CONTENU ENERGETIQUE DES EQUIPEMENTS

Soit I_e le contenu énergétique du système, c'est à dire la quantité d'énergie qui a servi à construire et à installer les machines et équipements divers qui le composent. I_e est exprimé en joules. Soit v_i sa valeur initiale (par joule) et v_f sa valeur finale au bout des N années. v_f sera nulle si cet équipement est finalement mis au rebut et non réutilisé.

Le cout intégral C_i de l'opération sur les N années, est alors:

$$C_i = N \dot{C}_o + I_e (v_i - v_f) \quad (4)$$

soit, en tenant compte de (3):

$$\frac{C_i}{N \dot{E}_u} = r(v_a - v_r) - (v_u - v_a) + \frac{I_e}{N \dot{E}_u} (v_i - v_f) \quad (5)$$

que nous énoncerons :

$$\left[\begin{array}{c} \text{COUT INTEGRAL} \\ \text{PAR UNITE D'ENERGIE} \\ \text{UTILE} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{PERTE DE VALEUR} \\ \text{DANS LES} \\ \text{REJETS} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{GAIN DE VALEUR} \\ \text{DANS LES} \\ \text{PRODUITS} \\ \text{FONCTIONNELS} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{UNITE} \\ \text{D'AMORTISSEMENT} \\ \text{DES EQUIPEMENTS} \\ \text{NON RE-UTILISES} \end{array} \right]$$

Nous appellerons i_e "taux d'énergie dans l'investissement". C'est le rapport:

$$i_e = \frac{I_e}{N\dot{E}_u} = \frac{\left[\begin{array}{c} \text{Contenu énergétique} \\ \text{des équipements} \end{array} \right]}{\left[\begin{array}{c} \text{Quantité totale d'énergie} \\ \text{utile produite en} \\ \text{N années} \end{array} \right]} \quad (6)$$

4. LES PRECEPTES D'OPTIMISATION

L'objectif, sans doute universel, de tout décideur technique, doit être de minimiser le coût total unitaire, $C_i / N\dot{E}_u$, défini ci-dessus. La relation (5) comportant 9 variables, on en déduit aisément l'inventaire des voies de recherche à explorer pour tendre vers ce minimum. Ce sont les 9 préceptes d'optimisation suivants:

1. *Minimiser la consommation spécifique d'énergie r (= maximiser le rendement des machines)*
2. *Maximiser la valeur v_r de l'énergie rejetée*, notamment en l'adaptant aux besoins des autres utilisateurs éventuels. Par exemple produire des eaux résiduaires aussi chaudes que possible (> 60 °C) et non polluées.
3. *Minimiser la valeur v_a de l'énergie d'alimentation*: Chercher à atteindre l'objectif fixé en utilisant de l'énergie de valeur plus faible, par exemple de la chaleur bas niveau.
4. *Maximiser la durée de vie N des équipements*, les rendre plus résistants à l'usure mécanique, à la corrosion.
5. *Minimiser le contenu énergétique I_e des équipements*: concevoir une machine qui continue à assurer la même fonction, tout en étant plus légère, faite de matériaux moins nobles, etc.
6. *Minimiser la valeur v_i de l'énergie utilisée dans cette fabrication*, par exemple de l'électricité en heures creuses.
7. *Maximiser la valeur résiduelle v_f des équipements*, en les concevant de manière telle qu'ils soient ensuite ré-utilisables, au moins en partie, dans d'autres systèmes.

Ces 7 premiers préceptes sont de nature technique; ce sont eux qui doivent guider les choix de l'ingénieur qui a pour objectif de réaliser un nouveau système énergétique, devant fournir une puissance \dot{E}_u donnée, dont la valeur v_u est également donnée (par les utilisateurs).

Pour le décideur technique, \dot{E}_u et v_u sont des données, alors que ce sont des variables pour un décideur socio-politique. Par exemple le fait, pour le français moyen de faire 10.000 km par an dans sa voiture personnelle est une donnée pour l'ingénieur de conception d'automobile. Pour le sociologue, c'est seulement l'une des composantes du bien-être matériel du français moyen, que l'on peut remettre en cause.

On sait que, plus généralement, la puissance de l'ensemble des "esclaves mécaniques" mis à la disposition de chaque français est: $\dot{E}_u \approx 4$ kW, alors qu'elle est de 12 kW pour l'étatsunien et de 2 kW seulement pour l'ensemble des êtres humains: le bien-être de chacun

est-il lié à sa consommation d'énergie?

L'énoncé des 2 derniers préceptes d'optimisation est donc:

8. *Minimiser l'énergie* \dot{E}_u nécessaire pour atteindre un certain taux de satisfaction, individuel ou collectif.

9. *Minimiser la valeur* v_{ij} attribuée à l'énergie utilisée: autrement dit, répondre aux humains à attacher moins de valeur aux biens matériels, à savoir se contenter de peu !

Nous ne nous occuperons ci-après que du problème technique posé par les 7 premiers préceptes.

A la vérité, les 7 variables technico-économiques énumérées plus haut sont rarement indépendantes. Elles sont liées par un certain nombre de contraintes (cf. réf. 1) : par exemple, la consommation spécifique d'énergie r est d'autant plus faible que la machine est plus performante, donc généralement plus onéreuse (I_e et v_i sont grands). Cette contrainte, sans doute la plus importante, sera étudiée plus loin sur un exemple numérique.

5. LES BAREMES DE VALEUR DE L'ENERGIE

La valeur d'un bien économique est, on le sait, une grandeur essentiellement subjective. C'est le jugement porté sur ce bien par son futur utilisateur. Les économistes définissent d'ailleurs de nombreuses échelles de valeur pour un même bien: valeur d'échange, valeur d'usage, valeur fonctionnelle, valeur d'estime....

Sur quels critères doit-on se baser pour définir un barème de valeur des sources d'énergie? Certes, chacun de nous a bien la sensation directe de la valeur de l'énergie thermique: une calorie à 100 °C nous est plus utile qu'une calorie à 30 °C; sa valeur est donc plus grande. Mais comment pouvons-nous juger si un kilowattheure investi dans la fabrication d'une automobile a plus ou moins de "valeur" que celui investi dans tout autre bien d'équipement? Plus généralement, comment apprécier la valeur du contenu énergétique des divers biens d'équipement, des biens de consommations et des services?

Abandonnant le domaine des économistes, il est possible de concevoir des échelles de valeur de l'énergie, à priori très variées, basées sur des concepts thermodynamiques, écologiques, physiologiques.... n'ayant plus guère de rapport avec l'échelle monétaire. Nous ne présenterons ici et sommairement que quelques barèmes, leur discussion complète étant donnée ailleurs (réf. 1.).

6. BAREMES DE VALEUR A BASE ENTHALPIQUE

6.1. Un premier barème, le plus simple, consiste à postuler que toutes les énergies ont rigoureusement la même valeur: ainsi une calorie "vaut" toujours une calorie quelle que

soit sa température. C'est le premier principe de la thermodynamique et sa célèbre équivalence travail = chaleur. Il vient alors:

$$v_a = v_u = v_r = v_i = v_f$$

Dans ce cas, le bilan de valeur devient indiscernable du bilan d'énergie. Les coûts, donnés par (3) et (5) sont nuls. L'opération ne "coûte" rien en énergie, puisque cette dernière se conserve.

6.2. Un second barème, un peu plus compliqué, consiste à postuler que les chaleurs résiduelles, rejetées dans l'environnement, ont une valeur nulle: $v_r = 0$.

De plus les appareillages seront jetés au rebut, en fin d'opération, sans autre ré-utilisation. Leur valeur finale sera nulle: $v_f = 0$.

Les expressions (3) et (5) des coûts se réduisent alors à :

$$\frac{C_o}{\dot{E}_u} = r \quad \text{et} \quad \frac{C_i}{N\dot{E}_u} = r + i_e \quad (6)$$

Le rapport $C_i/N\dot{E}_u$ est la "consommation intégrale spécifique d'énergie", c'est à dire le nombre de joules qu'il faut accepter de perdre, par joule utile. La relation (6) rappelle que pour calculer la consommation intégrale, il faut compter, non seulement les chaleurs résiduelles rejetées dans l'air ou dans la rivière, mais aussi le contenu énergétique de l'équipement jeté à la décharge en fin d'opération.

On observe que, pour les systèmes électroniques complexes (un récepteur de télévision, une calculette de poche...) le terme d'investissement i_e est largement supérieur au terme d'exploitation r . Au contraire pour les systèmes rustiques (fours, machines agricoles), c'est le terme d'exploitation qui est prépondérant.

Pour une automobile de 1.500 kg qui parcourt 10.000 km par an, avec une consommation de 10 litres/100 km, soit 28.000 mégajoules par an, avec un contenu énergétique de 100 mégajoules/kg, mis au rebut au bout de 10 ans, on déduit l'annuité d'amortissement de cet équipement, soit 15.000 mégajoules par an. Il apparaît que dans ce cas particulier, les deux termes r et i_e sont du même ordre de grandeur.

6.3. Une application: le chauffage d'une enceinte. Soit une enceinte qui est à maintenir à température constante T_u , au milieu d'un environnement à T_o , par chauffage à partir d'une source thermique à la température T_a , par exemple une habitation à maintenir à 20°C, dans un environnement à 10°C, avec des eaux résiduelles à une température qui peut varier entre 30 et 100 °C. Si l'isolation thermique est fixée, le flux de chaleur \dot{E}_u à apporter à l'enceinte est fixé (Fig.3). On recherche la surface optimale de l'échangeur.

On sait (réf.1) que le contenu énergétique des échangeurs thermiques, de tous types, en acier ordinaire, est de l'ordre de $3.000 \pm 1.000 \text{ kWh/m}^2$.

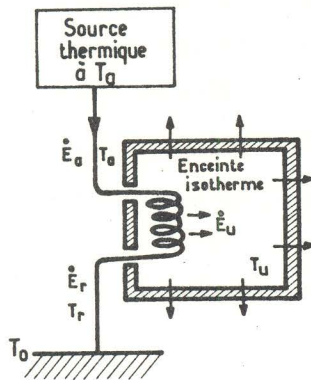


FIGURE 3

Le calcul montre que l'échangeur optimal a un rendement supérieur à 99,5% et que le terme d'investissement i_e ne représente que 5 à 7 % du total, à l'optimum quelle que soit la température d'alimentation T_a .

7. BAREMES DE VALEUR A BASE ENTROPIQUE

On sait que la thermodynamique distingue deux sortes d'énergie :

- d'une part les énergies nobles, entièrement convertibles les unes dans les autres, du moins théoriquement, par des opérations réversibles.

- d'autre part, l'énergie thermique dont le taux de conversion a une limite maximale théorique, donnée par le facteur de CARNOT.

7.1. Le troisième barème consiste à donner à tout joule d'énergie noble la valeur $v = 1$ et à tout joule d'énergie thermique, quelle que soit sa température, une valeur v_t plus faible correspondant au rendement même de fabrication industrielle (et de livraison à l'utilisateur) d'énergie noble, à partir d'énergie thermique.

Par exemple, le rendement habituellement admis (réf.3) de :

$$2,88 \text{ thermie} \implies 1 \text{ kilowattheure électrique}$$

est équivalent à :

$$1 \text{ joule thermique} \implies 0,30 \text{ joule électrique}$$

Par ailleurs, plus cette surface est grande, plus l'échangeur est efficace, et donc moins il y a de rejet inutilisé. i_e est donc une fonction décroissante de r . En application de (6) la consommation intégrale spécifique d'énergie passe donc par un minimum (Fig.4). Nous avons montré par ailleurs (réf.1) qu'avec les valeurs usuelles des coefficients de transfert et en supposant l'échangeur en écoulement piston, la valeur optimale r_{opt} n'est que de 1% supérieure à la valeur minimale donnée par :

$$r_{min} = \frac{T_u - T_0}{T_a - T_0}$$

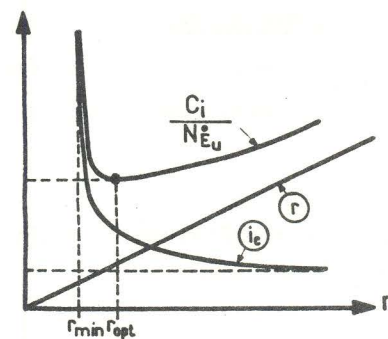


FIGURE 4

Nous poserons donc : $v_t = 0,30$.

Appliquons ceci à l'exemple étudié ci-dessus : le contenu énergétique de l'échangeur se calcule, sachant qu'il est composé, à environ 20%, par l'énergie utilisée dans les opérations métallurgiques de fabrication de la tôle d'acier, et à 80% dans les opérations d'usinage, de construction et d'installation de l'échangeur. Le contenu énergétique est donc formé pour environ 90% d'énergie noble et pour 10% d'énergie thermique.

Le barème de valeurs qui s'en déduit pour le calcul de l'échangeur est:

$$v_i = 0,9 \quad ; \quad v_a = v_u = 0,3 \quad ; \quad v_r = v_f = 0$$

L'équation (6) donnant la consommation intégrale est alors remplacée par:

$$\frac{C_i}{NE_u} = 0,3 r + 0,9 i_e \quad (8)$$

Nous avons étudié par ailleurs en détail (réf.1), l'influence de ce changement de valeur sur la solution optimale. On y constate notamment que la part du total due au terme d'investissement n'augmente pas dans un rapport de 1 à 3 comme on aurait pu le penser, mais seulement dans un rapport de 1 à 2,2 - 2,3.

7.2. Le quatrième barème traduit le fait que la chaleur a d'autant plus de valeur qu'elle est disponible à plus haute température. La "valeur" d'une quantité de chaleur Q est alors donnée par le coefficient de CARNOT :

$$v_t = 1 - \frac{T_c}{T} \quad (9)$$

ou T_c est une température de référence (par exemple T_o ou T_u). Rappelons que l'EXERGIE est définie par :

$$Ex = Q \left(1 - \frac{T_c}{T} \right) \quad (10)$$

Il en résulte que le bilan de valeur devient ici identique au bilan d'exergie. Les énergies nobles seront considérées comme de l'exergie pure avec la valeur $v = 1$.

En substituant cette valeur (9) dans l'expression générale (5) on obtient l'expression de la *consommation intégrale spécifique d'exergie*, (en prenant comme référence $T_c = T_u$), soit:

$$\frac{C_i}{NE_u} = r \left(\frac{T_u}{T_r} - \frac{T_u}{T_a} \right) + \left(\frac{T_u}{T_a} - 1 \right) + 0,9 i_e \quad (11)$$

Pour chaque valeur de la température d'alimentation T_a , il est alors possible de tracer un diagramme de consommation d'exergie analogue à celui de la consommation d'enthalpie de la figure (4). Le calcul montre que le nouveau minimum se situe toujours à droite (c'est à dire pour une plus grande valeur de r). Ceci est tout à fait logique: puisque les investissements ont une plus grande valeur exergétique que les eaux tièdes, il est normal que le nouvel optimum consiste à consommer plus d'eau chaude, avec un échangeur plus petit.

La figure (5) permet de comparer les ordonnées des 2 minimums, c'est à dire les valeurs minimales des consommations spécifiques d'enthalpie et d'exergie. On constate qu'elles sont

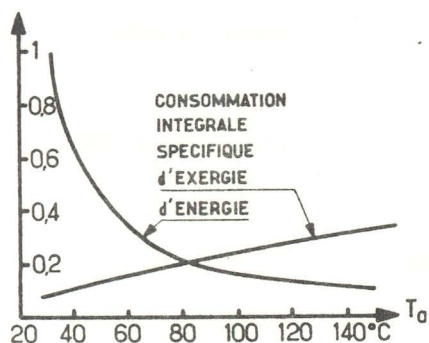


FIGURE 5

nettement différentes et surtout qu'elles varient en sens inverse en fonction de T_a .
 Il en résulte que l'échangeur optimal que l'on décidera de construire sera très différent, selon que l'optimisation sera basée sur le 1er ou sur le 2me principe de la thermodynamique.
 L'exemple donné ci-dessus permet de rappeler la signification de l'exergie: le coefficient de Carnot exprime la fraction de l'énergie thermique transformable en énergie mécanique. L'exergie thermique devrait être qualifiée de "chaleur mécanisable". Le fait d'avoir donné à cette grandeur le qualificatif plus général d' "énergie utilisable" (cf.GOUY en 1889) semble une survivance des traditions du XIXe siècle. A cette époque, utiliser la puissance du feu pour faire marcher les machines qui remplaçaient le travail musculaire de l'homme ou du cheval, fut considéré comme l'étape la plus décisive du progrès technique. Cette référence au travail pour chiffrer la valeur de l'énergie thermique est loin d'être d'application générale .

Elle ne convient guère aux opérations purement thermiques. D'autres barèmes de valeur , mieux adaptés a ces dernières opérations sont développés ailleurs (réf.1).

8. UN EXEMPLE DE BAREME A BASE ECONOMIQUE: barème basé sur les coûts de production.

Ce domaine étant classique et bien connu, nous présenterons ici seulement un concept nouveau lié au fait que les investissements sont fonction soit croissante soit décroissante de l'énergie consommée.

8.1. Equipements pro- et anti-énergétiques. L'inventaire des appareillages et biens d'équipement variés qui constituent un grand système industriel (par exemple: une usine) montre qu'on peut les répartir en trois groupes :

- les équipements anti-énergétiques sont tous ceux dont le coût monétaire est fonction décroissante de l'énergie qui y est dégradée. Ce sont les canalisations ou de l'énergie mécanique est dégradée en frottements ainsi que les systèmes à pertes thermiques comme l'échangeur ci-dessus.
- les équipements pro-énergétiques sont tous ceux qui fournissent de l'énergie au système et dont le cout monétaire est fonction croissante de leur puissance nominale et donc aussi du flux d'énergie dégradée. Ce sont les moto-pompes, compresseurs, fours, chaudières, etc...

- les équipements indépendants de l'énergie dégradée.

La Figure 6 montre que la somme de ces coûts (c'est l'investissement total I_t) passe par un minimum en fonction de \dot{E}_r .

Si on ajoute à I_t le coût opératoire NC_0 pendant N années, on obtient le coût intégral C_i qui présente également un minimum.

Nous avons montré (réf.2) que ces deux minimums ont des coordonnées très différentes et nous avons donné une expression générale du sur-investissement qui permet d'économiser de l'énergie, en passant du 1er minimum au second. Mais nous avons uniquement raisonné en termes de valeurs monétaires ordinaires, notamment en francs français.

En quoi les conclusions seraient-elles modifiées si on leur substituait des valeurs à base exergetique, ou enthalpique, etc...?

Divers auteurs et notamment KRENZ (réf. 4) ont évalué les contenus énergétiques

de très nombreux biens d'équipement. Krenz a montré que ce contenu était souvent compris entre 8 et 16 kWh par US dollar de valeur ajoutée, soit environ 0,1 à 0,2 tep par 1000 francs français. Cette valeur est en bon accord avec celle donnée au cours d'un récent colloque (réf.3) soit: 0,14 tep/1000 francs de valeur ajoutée.

Si donc ce contenu énergétique était rigoureusement constant et uniforme, l'optimisation en valeur monétaire ne serait pas différente d'une optimisation en valeur énergétique. Mais l'étude plus détaillée montre qu'il n'en est rien. Les contenus énergétiques présentent une très grande dispersion autour de la valeur moyenne donnée ci-dessus. Les optimums obtenus sont donc très différents selon le barème choisi.

9. BAREMES A BASE ECOLOGIQUE: LE SYSTEME SEMI-FERME TERRE + SOLEIL

L'ensemble (terre + soleil) est un système *semi-fermé*, en ce sens qu'il ne reçoit pratiquement aucune énergie de l'extérieur, alors qu'il perd en permanence de l'énergie par rayonnement vers l'espace intersidéral. Il y a donc à la fois perte absolue d'énergie par le système et perte d'exergie au sein du système (par uniformisation).

Il convient donc de définir un barème de valeur qui traduise la meilleure utilisation po-

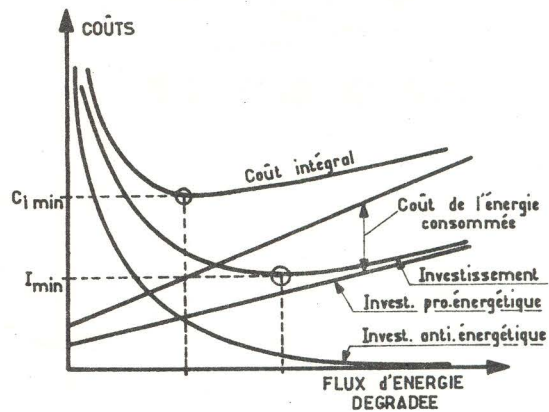


FIGURE 6

ssible de cette *quantité limitée d'énergie*, pour satisfaire le maximum de besoins de l'humanité. Un problème analogue se pose pour des systèmes plus petits, par exemple pour une île déserte, un navire, un satellite, un chalet de haute montagne... Nous parlerons d'*éco-systèmes énergétiques*.

Le barème de valeur des diverses sources d'énergie, par rapport à un éco-système d'utilisateurs, devrait dans chaque cas, tenir compte des facteurs suivants:

- la "disponibilité" de chaque source
- son "utilisabilité" par le système
- la durée de vie des convertisseurs d'énergie.

9.1. Disponibilité d'une source d'énergie. Il est classique de distinguer les énergies *renouvelables* et les énergies *non renouvelables*.

** -Un barème à 2 valeurs: 0 = renouvelable; 1 = non-renouvelable.

Un modèle mathématique très simple et sans doute trop simple consiste à donner la valeur *zéro* aux énergies renouvelables ainsi qu'à celles des isotopes fusibles (deutérium) qui existent en quantité quasi-infinie et la valeur *un* à toutes les autres énergies, non-renouvelables.

Ce barème simpliste est souvent plus ou moins inconsciemment adopté par Monsieur Tout le Monde, quand il proclame que l'énergie solaire "ne coûte rien" et qu' "il n'y a qu'à" l'utiliser à la place du fuel ou de l'électricité ...!

** -Un barème progressif: valeur inverse de la quantité en réserve.

Depuis 1973, de nombreux ouvrages ont publié des estimations des réserves mondiales de combustibles. En donnant la valeur de référence 1 au pétrole connu (cette unité valant 12×10^{14} kWh) ces réserves seraient les suivantes (d'après réf. 5 et 6) :

Pétrole connu	R= 1
Pétrole probable	R= 3,25
Gaz naturel	R= 0,65
Schistes	R= 5
Charbons	R= 55
Uranium (neutrons lents)	R= 1 a 10
Uranium (neutrons rapides)	R= 30 a 3000.

Dans une optique de préservation des ressources, on pourrait donc décider que la valeur d'un combustible, serait *inversement proportionnelle* à la quantité en réserve R.

Mais en plus de la capacité du réservoir, la puissance maximale que l'on peut tirer d'une source d'énergie est une grandeur importante.

La "disponibilité" D d'une source d'énergie, par rapport à un système d'utilisateurs donné

pourrait, en première approximation, être représentée par le rapport :

$$D = \frac{P_{\max}}{R} \quad (15)$$

où P_{\max} est la puissance maximale disponible.

Mais ceci n'est qu'une approche très grossière, seulement destinée à présenter le concept de "disponibilité".

9.2. L'utilisabilité U de chaque source d'énergie par les êtres humains.

On peut concevoir de nombreuses échelles de référence pour définir l'utilisabilité de l'énergie par l'homme. En voici deux :

1. Valeur thermo-écologique. Un premier barème consiste à prendre comme un éco-système urbano-industriel, par exemple une agglomération urbaine avec toutes les usines qui lui sont associées. Supposons que cet ensemble vivait jusqu'à présent en régime énergétique stationnaire, par exemple en important des combustibles fossiles qu'il brûlait dans ses propres centrales thermiques et ses foyers domestiques.

Supposons que l'on ait dressé l'inventaire de tous les postes d'utilisation d'énergie thermique de ce grand système urbano-industriel, c'est à dire l'ensemble de tous les sous-systèmes (fours de cuisson, séchoirs, radiateurs, ...) avec pour chacun, le flux d'alimentation q_a en énergie thermique, et le niveau de température correspondant T_a .

L'état des besoins thermiques de ce système sera alors donnée par une distribution telle que $dQ(\theta) = q'(\theta) \cdot d\theta$ est le flux de chaleur alimentant les sous-systèmes entre les températures θ et $\theta + d\theta$. L'expérience montre que cette distribution présente généralement un maximum entre 100 et 300 °C.

Supposons qu'au sein de cette agglomération on puisse brusquement disposer d'une nouvelle source d'énergie, par exemple une *source géothermale* d'eau à la température T_g avec un débit maximal disponible Q_g . Cette nouvelle source pourra éventuellement remplacer une quantité d'énergie chimique importée (fuel, charbon) :

$$Q_a(T_g) = \int_{T_0}^{T_g} q'(\theta) d\theta$$

Le rapport \dot{Q}_a / \dot{Q}_g est le taux maximal d'utilisation de cette source, dans le cas où elle alimenterait tous les sous-systèmes à $T \leq T_g$. Ce rapport caractérise donc bien l'utilisabilité de la source par l'éco-système considéré. On peut dire que c'est sa *valeur d'utilisabilité thermique par le système*.

$$U = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{Q}_g} \quad (16)$$

2. Valeur exergetique. D'autre part la quantité maximale d'énergie mécanique que ce système peut tirer de cette même source thermique est donnée par l'exergie correspondante. On en déduit sa valeur d'utilisabilité mécanique par le système, soit :

$$U = 1 - \frac{T_0}{T_g} \quad (17)$$

Les deux utilisabilités mécanique et thermique sont généralement très différentes, comme nous l'avons d'ailleurs déjà montré au paragraphe (7).

9.3. Durée de vie des convertisseurs d'énergie. Plaçons-nous dans le cas particulier où le système industriel représenté sur les figures (1) et (2) est un convertisseur d'énergie : le "bien à faible valeur propre" est une matière énergétique naturelle (par exemple de l'uranium) et le "bien à valeur ajoutée" est de l'énergie utilisable (par exemple de l'électricité). Soit \dot{E}_u ce flux d'énergie utilisable produite.

Le convertisseur d'énergie aura lui-même été fabriqué avec de l'énergie utilisable. Soit I_e son contenu énergétique.

Posons :

$$T_e = \frac{I_e}{\dot{E}_u} \quad (18)$$

Dans une publication précédente (réf.2) nous avons proposé d'appeler cette grandeur T_e , le *temps d'équivalence de l'investissement* (défini dans un barème de valeurs monétaires).

T_e est le temps au bout duquel la machine a produit une quantité d'énergie égale à celle qui a servi à la fabriquer. Nous avons montré que, cette grandeur T_e reste à peu près constante pour toutes les machines d'un même type et de puissances variées. Par exemple T_e reste de l'ordre de 1.000 à 3.000 heures pour tous les moteurs électriques. T_e est de l'ordre de 20.000 à 40.000 heures pour les ensembles classiques de production d'électricité, à chaudière à fuel + turbine à condensation, etc...

Or toute machine s'use et n'a qu'une durée de vie limitée; soit N cette durée de vie (en années).

Du point de vue de l'éco-système énergétique Terre, un convertisseur d'énergie n'a évidemment d'intérêt que si son *temps d'équivalence T_e est inférieur à sa durée de vie N* . Sinon son bilan énergétique global serait déficitaire!

La valeur d'un convertisseur d'énergie ne sera positive que si le rapport T_e/N est inférieur à l'unité.

Or nous avons déjà utilisé plus haut ce rapport (voir relation 8) et nous l'avons appelé "taux d'énergie dans l'investissement", i_e , soit :

$$i_e = \frac{T_e}{N} = \frac{I_e}{NE_u} \quad (19)$$

Ainsi, nous sommes amenés à poser que la valeur de ce convertisseur est fonction croissante de la différence $(1-i_e)$, soit en première approximation la fonction la plus simple:

$$U = 1 - i_e \quad (20)$$

Par exemple, pour une *cellule solaire photovoltaïque*, la quantité totale d'électricité produite pendant toute sa durée de vie devra être supérieure à son contenu énergétique (notamment à l'énergie consommée pour fabriquer le silicium pur qu'elle contient). On sait que ces cellules ont maintenant atteint un état de développement tel que leur valeur ainsi définie, est nettement positive.

De même, pour l'*énergie géothermale*, le contenu énergétique total du forage, et de toute l'installation de pompes, d'échangeurs et de distribution (et éventuellement de pompes à chaleur !) devrait être inférieur à l'énergie contenue dans cette eau tiède. Il est à craindre que la valeur de cette opération ne soit négative dans de nombreux cas!

Pour la chaîne *électro-nucléaire*, comprenant la fabrication du combustible et une centrale de type PWR de 900 à 1.100 MWe, conçues pour durer 20 ans, un récent article (réf.7) a montré que le temps d'équivalence de l'investissement total est de l'ordre de un an.

Si on y ajoute le coût des renouvellements annuels de la charge de combustible, on obtient un temps d'équivalence qui est de l'ordre de 2,3 ans (estimation américaine) ou 2,7 an (estimation syndicat CFDT) donc toujours très largement inférieur à la durée de vie. La "valeur" serait donc largement positive (de l'ordre de 0,83 à 0,88).

9.4. Synthèse : la valeur écologique planétaire. Ainsi, un gouvernement mondial qui aurait pour seul objectif de maximiser le bien-être du maximum d'êtres humains, devrait sans doute choisir ses décisions optimales et notamment décider la substitution de certaines énergies rares, à l'aide d'un concept de valeur globale de l'énergie dans l'éco-système semi-fermé que constitue notre planète. Cette valeur écologique de l'énergie serait une fonction des trois facteurs définis ci-dessus: disponibilité et utilisabilité des sources, durée de vie des convertisseurs d'énergie :

$$v = f(D, U, i_e)$$

Par exemple, la fonction la plus simple serait :

$$v = \frac{P_{\max} U (1-i_e)}{R} \quad (21)$$

Mais ceci n'est certainement qu'une approche très grossière du problème. De nombreuses

autres variables devront être prises en compte dans l'expression de la valeur écologique planétaire ou dans celle de la valeur par rapport à un éco-système quelconque d'utilisateurs.

Nous voulions seulement attirer ici l'attention sur le fait que l'on peut définir la valeur écologique d'une source d'énergie, avant même de prendre en considération tout critère de réalisation technique ou de rentabilité économique.

REFERENCES

- (1) Le Goff, P. (1979). Energétique industrielle. Tome I, Ed. Lavoisier. Paris. (Tome II a paraître, 1980).
- (2) Le Goff, P. (1978). Optimisation énergétique des procédés industriels. 1ère partie: investissements et coûts d'exploitation. Rev. Gen. Therm. Fr., 193, 11-26; et 2ème partie: Actualisation, Inflation et Enchérissement de l'Energie. Rev. Gen. Therm. Fr., 194, 89-103.
- (3) Le Goff, P. (1977). Organisateur "Influence du coût de l'énergie sur les procédés industriels". Comptes rendus du Colloque, Nancy, 20-21 avril 1977. Ed. Lavoisier, Paris.
- (4) Krenz, (1977). Energy, 2, 115-130.
- (5) Joly, A. (1977). "Coût des grandes énergies primaires". Communication au Colloque réf. 3.
- (6) Felden, M. (1976). "Energie: le défi nucléaire". Ed. A. Leson, Paris.
- (7) Bertrand, J. P. (1978). Bilan énergétique du programme nucléaire français. Rev. Gen. Nucléaire, n° 3, 134-198.