

## L'enseignement de la thermodynamique dans les écoles d'ingénieurs :

### Comment présenter le concept de dégradation de l'énergie ? \*

par Pierre Le Goff

(Professeur au Laboratoire des sciences du génie chimique, C.N.R.S.-ENSIC de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Directeur du Centre de Perfectionnement des Industries Chimiques, Nancy).



On montre l'intérêt de présenter la thermodynamique et la mécanique des fluides comme

deux parties d'une même science : l'énergétique des fluides.

On discute des avantages et des inconvénients des concepts d'entropie et d'exergie pour représenter le phénomène de dégradation d'énergie.

On introduit la notion de « valeur » de l'énergie; on établit le bilan général de la valeur, dans une opération industrielle quelconque. En choisissant ensuite divers barèmes de valeur, on peut faire le lien entre les aspects thermodynamiques, économiques et même écologiques d'une même opération, ce qui est particulièrement intéressant du point de vue pédagogique.

## I. Le concept d'énergie est-il basé sur nos muscles ou sur un axiome ?

Qu'est-ce que l'Énergie ?

- Le Larousse répond que l'énergie est : « La capacité à effectuer un travail ».
- Ce même dictionnaire définit le travail comme : « Le produit d'une force par un déplacement ».
- Puis la définition donnée pour la force est : « La cause du mouvement d'un corps ».
- Et le mouvement est défini comme : « Un changement de position du corps ».
- La position est..., etc.

Cet enchaînement de définitions est celui que l'on trouve dans les premières pages de tous les ouvrages classiques d'enseignement de la mécanique rationnelle, sauf toutefois qu'il est présenté en sens inverse :

On commence par y introduire le concept de point matériel, défini par ses trois coordonnées spatiales et une coordonnée temporelle (la date), d'où découle la science de la

cinématique des ensembles de points matériels.

Puis le concept de force est introduit, d'une manière intuitive, en faisant appel à la notion physiologique de contraction musculaire, puis à l'observation d'un ressort qui se déforme. La force est ainsi un concept anthropocentrique, basé sur notre sens de la motricité, c'est-à-dire des informations transmises à notre cerveau sur « l'état » de nos muscles, plus ou moins contractés ou détendus\*.

On apprend ensuite à faire travailler ces forces etc... Puis le concept d'énergie en est dérivé et n'apparaît ainsi qu'au 3<sup>e</sup> ou 4<sup>e</sup> chapitre de l'ouvrage.

Mais ce mode d'introduction « mécanistique » de la notion d'énergie n'est pas le seul possible. On peut aussi bien se passer de la force comme concept primaire et définir directement l'énergie en posant, par exemple a priori, l'axiome suivant :

« Il existe une grandeur, appelée énergie, dont

\* Texte de l'exposé présenté au colloque organisé par le CEFI (Comité d'Études sur les Formations d'Ingénieurs), les 21-22 mars 1979 sur le thème : « Formation des ingénieurs et meilleure gestion de l'énergie et des matières premières ».

\* Comment ce concept serait-il perçu par un être humain qui serait de naissance, paralytique et insensible au toucher ?

les variations sont associées à tous les mouvements d'un objet ». Cette énergie est une propriété de la matière, au même titre que la masse, et que la charge électrique.

La mécanique et la thermodynamique sont alors présentées comme deux parties d'une même science, l'énergétique, celle qui décrit les relations entre cette grandeur énergie et les 4 coordonnées spatio-temporelles de chacun des points matériels qui constituent l'objet étudié, au cours de tous ses mouvements de translation, de rotation, de déformation, etc.

On commence donc par faire des bilans d'énergie et la notion de force est introduite ultérieurement. La force n'est plus un concept primaire mais une notion dérivée quand on est amené à comparer les variations d'énergie aux variations des coordonnées du système. Sa définition est alors plus rigoureuse.

Ce mode de présentation des phénomènes n'est pas plus abstrait que la méthode classique. Il présente en outre de nombreux avantages. Il permet par exemple de traiter en première approximation, tous les bilans

d'énergie dans les systèmes ouverts (machines, échangeurs, réacteurs), en ne faisant appel qu'à des bilans de grandeurs scalaires, comme en thermodynamique, c'est-à-dire sans faire appel aux opérations sur les grandeurs vectorielles. Ces dernières n'interviennent qu'ensuite, pour interpréter les variations d'énergie.

Un bilan de grandeur scalaire, un bilan d'argent dans un porte-monnaie est plus facile à appréhender qu'une loi de composition de vecteurs !

## II. La dégradation de l'énergie

Pour exprimer l'évolution irréversible du monde matériel, divers mots et concepts sont utilisés indifféremment : on parle de dégradation d'énergie, de création d'entropie, de consommation d'exergie... Ce sont diverses facettes d'un principe unique : le second principe de la thermodynamique.

A la vérité, pour présenter ce phénomène de dégradation d'énergie, diverses procédures, diverses méthodes pédagogiques peuvent être utilisées, comme le résume le tableau 1.

On peut d'abord, bien entendu se baser sur la thermodynamique, avec ses deux variantes,

selon que l'on introduit d'abord le concept d'entropie ou le concept d'exergie.

On peut aussi se baser sur la mécanique, avec les transformations ordre → désordre, les frottements, et notamment l'aspect énergétique de la diffusion et de la turbulence en mécanique des fluides.

On peut enfin adopter un point de vue d'économiste et appliquer à l'énergie l'analyse de la valeur, en partant soit d'une base écologique, soit d'une base économique.

Dans d'autres publications (2, 5, 7) nous avons discuté de l'aspect énergétique de la mécanique des fluides. Nous n'envisagerons ci-après que les aspects thermodynamiques et économiques.

Tableau 1. Comment présenter le phénomène de dégradation d'énergie ?

En se basant sur :

• La thermodynamique	⇒	Variante entropie Variante exergie
• La mécanique	⇒	Ordre → désordre
• L'analyse de la valeur	⇒	Économique Écologique

## III. Aspect thermodynamique : entropie ou exergie ?

Les appareils industriels sont des systèmes ouverts et l'une des premières leçons que chacun d'entre nous donne à ses élèves-ingénieurs consiste sans doute à leur apprendre à écrire des bilans dans de tels systèmes.

### III.1. Les équations de bilans

Considérons à titre d'exemple une chambre de combustion où entrent, en régime permanent, des flux d'hydrocarbure et d'air et d'où sortent des flux de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, etc. (Fig. 1).

On écrit d'abord les bilans-matière, à savoir :

- le bilan massique total : le flux sortant  $\dot{M}_2$  est égal au flux entrant  $\dot{M}_1$  ce qui exprime la conservation de la matière.
- les bilans partiels, par composant, c'est-à-dire par espèce chimique. Pour chacun des  $i$  composants, on écrit que le flux sortant  $\dot{M}_{2,i}$  est égal au flux entrant  $\dot{M}_{1,i}$ , plus le flux créé par la réaction de combustion  $\dot{R}_i$ .  $\dot{R}_i$  est évidemment positif pour CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O et il est négatif pour O<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>.
- On écrit ensuite le bilan de chacune des grandeurs extensives portées par la matière. Et pour chacune, on écrira d'abord le bilan total, puis les bilans partiels, par composant, tenant compte de la « réaction » de transformation de ces composants les uns dans les

autres. Par exemple, pour le bilan de charge électrique dans un réacteur de neutralisation acide/base, ou dans un dépoussiéreur électrostatique, etc... On écrira qu'il y a conservation de la charge totale (bilan global), puis on écrira l'équation de bilan pour chacune des 3 « constituants » :

charges +, charges - et particules neutres avec la réaction d'ionisation ou de recombinaison des charges.

Examinons de plus près le cas de l'extensité énergie en raisonnant sur l'exemple de la chambre de combustion (Figure 1).

- Le bilan d'énergie totale comprend 4 termes : les flux  $\dot{M}_2 E_2$  et  $\dot{M}_1 E_1$  respectivement portés par la matière sortante et la matière entrante, le flux  $\dot{Q}$  d'énergie thermique transféré par l'échangeur, le flux  $\dot{W}$  d'énergie mécanique emporté par l'arbre de la machine tournante. Il y a conservation de l'énergie totale (équation 3 sur la figure 1).

- Pour écrire maintenant les bilans partiels par « composant » il y a de nombreuses possibilités de découpage de l'énergie totale E, d'un kg de fluide, dont l'expression est, rappelons-le :

$$E \equiv \underbrace{U + p/\rho}_{H} + \underbrace{\frac{u^2}{2}}_{P/p} + gZ \quad (I)$$

On pourrait par exemple faire le bilan de l'énergie interne U, ou de l'enthalpie H, ou de la pression totale P, ou de la pression ordinaire p, ou encore des énergies potentielles et de l'énergie cinétique, etc... avec des « réactions » de conversion de ces énergies les unes dans les autres, exactement comme on l'a fait précédemment pour les composants matériels.

### III.2. La variante exergie

Il est particulièrement avantageux de décomposer l'énergie totale en deux termes (et deux seulement) :

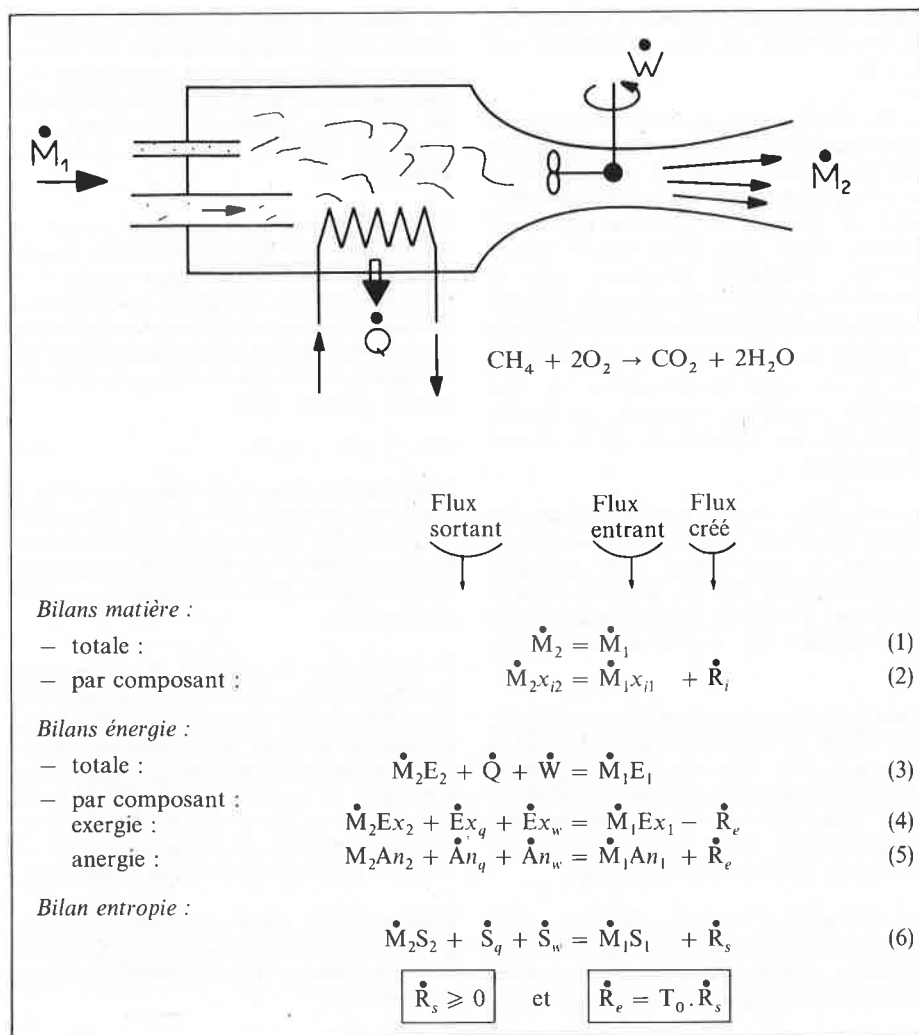
l'exergie (Ex) et l'anergie (An) :

$$E = E_x + A_n$$

Ces deux composants étant choisis de façon telle que les transformations se font uniquement dans le sens :

$$E_x \Rightarrow A_n \quad (II)$$

et jamais en sens inverse. Ceci doit d'ailleurs être considéré comme le postulat de définition de ces deux composants. Par analogie avec la vitesse de réaction chimique, on définit alors une vitesse de « réaction » exergétique  $\dot{R}_e$  (en joules/seconde) traduisant la



**Figure 1. Bilans de matière et d'énergie dans un système ouvert en régime permanent.**

vitesse de transformation de l'exergie en anergie.

Les deux bilans partiels seront alors établis (relations (4) et (5) de la figure 1). Dans ces relations,  $Ex$  et  $An$  désignent l'exergie et l'anergie massiques du fluide, c'est-à-dire portées par un kg de fluide.  $\dot{E}_{x_q}$  désigne le flux d'exergie contenu dans le flux de chaleur  $\dot{Q}$ , et de même  $\dot{E}_{x_w}$  est le flux d'exergie contenu dans le flux d'énergie mécanique  $\dot{W}$ . (En fait, on a :  $\dot{E}_{x_w} \equiv \dot{W}$ ). Dans le bilan d'exergie apparaît le terme ( $-\dot{R}_e$ ) de disparition et dans le bilan d'anergie apparaît le terme ( $+\dot{R}_e$ ) de production avec :

$$\dot{R}_e \geq 0 \quad (III)$$

On conçoit qu'à partir d'un tel postulat, il soit alors possible de bâtir tout un cours de thermodynamique, cohérent, homogène et rigoureux.

### III.3. La variante entropie

Mais nous savons bien qu'il existe une autre méthode, plus classique, de présenter ces mêmes phénomènes d'évolution. Elle consis-

te à postuler que, parallèlement à la masse et à l'énergie, il existe une troisième grandeur extensive fondamentale pour caractériser les propriétés de la matière : l'entropie, cette grandeur étant définie par le fait qu'elle ne peut que croître, globalement. Autrement dit, il existe dans toute transformation matérielle, un terme de vitesse de « réaction entropique »  $\dot{R}_s$  qui est toujours positif :

$$\dot{R}_s \geq 0 \quad (IV)$$

Le bilan d'entropie dans un système ouvert, en régime permanent, s'écrit alors, par la relation (6) de la figure 1. On y trouve les flux  $\dot{M}_1 S_1$  et  $\dot{M}_2 S_2$  d'entropie portés par les flux de matière entrant et sortant du système ; le flux  $\dot{S}_q$  d'entropie contenu dans le flux de chaleur  $\dot{Q}$  et le flux d'entropie  $\dot{S}_w$  contenu dans le flux d'énergie mécanique  $\dot{W}$ .

Il n'est pas question de refaire ici un cours de thermodynamique, mais le lecteur concevra aisément que l'étape suivante consistera à montrer que ces deux présentations du même phénomène d'évolution sont équivalentes. Le flux de création d'anergie est, à une constante près, égal au flux de création d'entropie. Le coefficient de proportionnalité

est une température de référence  $T_0$ , choisie suivant une règle que l'on aura à définir... et qui conduira à définir l'échelle des températures :

$$\dot{R}_e = T_0 \cdot \dot{R}_s \quad (V)$$

### III.4. L'aspect subjectif de l'énergie

Avant de comparer les avantages et inconvénients des concepts d'entropie et d'exergie, il est intéressant de noter que l'énergie n'est pas une grandeur rigoureuse et objective. Sa définition comporte une part subjective, arbitraire :

- Dans l'expression de l'énergie de pesanteur  $gZ$ , la longueur  $Z$  n'est pas la distance au centre de la terre, mais l'altitude au-dessus d'un plan horizontal arbitraire (le niveau de la mer, en général).
- De même, l'énergie cinétique  $u^2/2$  est mesurée, non pas par rapport à un repère intersidéral absolu, mais par rapport à un trièdre de référence porté par la surface de la terre.
- De même encore, l'énergie électrique est évaluée par rapport à la terre, prise au potentiel zéro par convention.
- Par contre, les énergies thermique et mécanique peuvent être définies en valeur absolue, puisque l'on sait définir une température nulle (en K) et une masse volumique nulle, donc une pression nulle (espace intersidéral). Remarquons toutefois que, dans la pratique industrielle, on ne prend souvent en considération que la fraction de ces énergies qui est en excès par rapport à l'énergie contenue dans l'environnement, c'est-à-dire celle correspondant à la pression atmosphérique et à la température ambiante.

Le concept d'énergie « utilisable » s'introduit donc naturellement, dans toutes les activités humaines.

- Enfin pour l'énergie chimique, la part d'arbitraire est encore plus grande : on sait que des conventions internationales définissent, pour chaque élément chimique, l'état cristallin et les conditions de pression et température d'un « état standard », par rapport auquel l'énergie de cet élément est mesurée.

En fait, on choisit souvent des conditions un peu différentes : pour les éléments  $O_2$  et  $N_2$  on prend l'air TPN dans sa composition normale ; pour les éléments  $H_2$  et  $C$  on prend la composition des gaz de combustion  $CO_2$  et  $H_2O$  (encore qu'il faille choisir si on prend l'eau à l'état liquide ou vapeur à la température considérée, etc...).

Pour les autres éléments, notamment ceux de grande importance industrielle (Fe, Cl, Ca, Na, etc...) on prend « l'état naturel le plus courant de l'élément dans son gîte géologique » !

En conclusion, on voit que l'expression donnée ci-dessus de l'énergie totale d'un kilogramme de matière, dépend nécessairement de la valeur arbitraire choisie pour le

potentiel de chacune des formes d'énergie suivantes :

- Les 3 premières formes : gravitationnelle, cinétique, électrique.
- Le potentiel chimique de chacun des éléments contenus dans ce kg de matière.

En outre l'expression de l'énergie totale dépend pratiquement de deux potentiels supplémentaires : la pression et la température de « l'environnement » du système industriel, c'est-à-dire la pression atmosphérique et la température de l'eau ou de l'air qui sert de source froide dans le procédé.

### III.5. Quels sont les avantages et inconvénients de chaque variante : entropie ou exergie ?

1. La présentation entropique a le grand avantage d'être absolument générale. Elle s'applique à tous les systèmes sans exception, alors que la présentation exergetique implique l'hypothèse d'un « milieu extérieur » à une température de référence  $T_0$ , pris comme puits thermique de capacité infiniment grande.  $T_0$  n'est donc pas une constante et ceci peut créer des difficultés, notamment dans l'étude des énergies thermiques de bas niveau. Par exemple le contenu exergetique d'une eau résiduaire à 20 °C sera nul dans un environnement à  $T_0 = 20$  °C mais il ne sera plus pour  $T_0 = 10$  °C.

Autre exemple : pour expliquer que l'on peut produire du travail à partir du rayonnement de la terre vers l'espace intersidéral, il faudra expliquer que, dans ce cas, la terre à 20 °C est

une source d'exergie et que la température  $T_0$  de référence est celle de l'espace soit  $\approx 3$  K.

2. Par contre l'entropie a l'inconvénient de varier dans le mauvais sens : la « valeur » de l'énergie diminue quand elle se dégrade et il est très commode que la grandeur qui représente ce phénomène, diminue également dans ce même sens. C'est bien le cas de l'exergie. Rappelons d'ailleurs, que ce concept d'exergie a été introduit dès 1889 par un français, Gouy (1) sous le nom d'énergie utilisable (nous avons rappelé toutefois (4 et 5) que cette dénomination est trop générale et prête à confusion ; on devrait plutôt dire que l'exergie est de la *chaleur mécanisable*).

Au niveau des ouvriers, mais aussi à celui des ingénieurs, il sera plus facile de présenter la « chasse au gaspi »-llage d'une grandeur précieuse comme l'exergie, qui se consomme, plutôt que la « chasse aux augmentations » d'une grandeur qui se crée, comme l'entropie.

L'exergie est donc bien la grandeur adéquate pour porter, à Monsieur Tout le Monde, le message sur la recherche des « économies d'énergie » et pour lui expliquer simplement mais rigoureusement comment la dégradation de l'énergie (qui ne se détruit pas) est en réalité une consommation d'exergie.

3. L'entropie a l'avantage d'être une grandeur couramment utilisée par les thermodynamiciens depuis plus d'un siècle. Encore qu'elle ne le soit guère par les ingénieurs. Elle

est devenue la base d'un édifice de connaissances, solide et bien construit. On trouve dans tous les manuels et formulaires des méthodes de calcul des entropies pour toutes les substances, pures et en mélange. Les tables de données entropiques sont bien classiques.

Il n'existe rien d'analogue pour l'exergie. Il n'existe pas de diagramme analogue à celui de Mollier, où l'exergie serait portée, à la place de l'entropie. A la vérité, ce n'est qu'une difficulté mineure, car la variation d'exergie d'un système se déduira immédiatement des variations d'enthalpie et d'entropie calculées ou lues dans les tables :

$$\Delta Ex = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (VI)$$

Un tel petit calcul à effectuer pour chaque opération est cependant un frein important, et l'emploi de l'exergie ne se généralisera que le jour où l'utilisateur pourra en lire directement les valeurs dans des tableaux ou sur des diagrammes.

En conclusion, il apparaît que le concept d'exergie est plus concret, plus accessible à l'intuition directe et qu'il conviendra bien à un enseignement de thermodynamique élémentaire destiné à faire sentir aux praticiens, comment on mesure la dégradation de l'énergie. Par contre le concept d'entropie est absolu et rigoureux, c'est le seul qui convienne aux théoriciens de la thermodynamique.

Dans une école d'ingénieurs, il est certainement nécessaire d'enseigner simultanément les deux concepts et de montrer leurs interdépendances.

## IV. Aspects économiques et écologiques : la « valeur » de l'énergie

Abordons maintenant un autre aspect des opérations énergétiques industrielles, en y introduisant le concept de « valeur » de l'énergie.

Rappelons d'abord qu'une opération industrielle quelconque peut être présentée comme une « boîte noire » (Figure 2a) où entrent des flux de matières premières, d'énergie et d'information (des connaissances et du savoir-faire) et d'où sortent des produits « fonctionnels », c'est-à-dire des produits qui sont définis par la fonction à laquelle ils sont destinés, au service des utilisateurs. Il en sort aussi des sous-produits dont une partie est rejetée dans l'environnement.

Ainsi chaque produit fonctionnel contient une certaine quantité de matière, d'énergie et d'information. Attachons-nous ici à l'aspect énergétique de l'opération, supposée en régime stationnaire.

Vue par un énergéticien, cette opération n'est qu'une transformation d'une forme d'énergie dans une autre, comme le montre la figure 2b, dont le bilan s'écrit :

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

où  $\dot{E}_a$  est l'énergie apportée au système (en joules/an),  $\dot{E}_u$  est l'énergie utile, c'est-à-dire celle qui est contenue dans les produits fonctionnels et  $\dot{E}_r$  est celle rejetée dans l'environnement (l'eau chaude dans la rivière, les fumées dans l'atmosphère, les déchets rejetés à la décharge, avec leur contenu énergétique).

Vue par un économiste, cette même opération se présente différemment (Fig. 2c). C'est une transformation de biens à faible valeur propre, en biens à valeur ajoutée (les produits utiles) et en biens à valeur diminuée (les rejets) et même à valeur négative (dans le cas de nuisances polluantes). De plus la transformation coûte à l'opérateur : ce dernier doit apporter au système des richesses, des connaissances, du patrimoine...

En nous basant encore sur l'aspect énergétique, attribuons la valeur  $v$  à un joule porté par chacun de ces biens. Ainsi :  $v_a$  est la valeur d'un joule de l'énergie apportée (sous forme de fuel, d'électricité, etc...),  $v_r$  est la valeur d'un joule porté par les rejets, par exemple dans l'eau chaude rejetée à la rivière,  $v_u$  est la valeur d'un joule contenu dans le produit utile.

### IV.1. Bilans de valeur

Le bilan de valeur dans l'opération s'écrit :

$$\dot{E}_a v_a - \dot{C}_o = \dot{E}_u v_u + \dot{E}_r v_r \quad (VIII)$$

où  $(-\dot{C}_o)$  est l'apport de valeur nécessaire pour boucler le bilan. Du point de vue de l'opérateur,  $\dot{C}_o$  est donc le coût de l'opération, exprimé en Nombre d'Unités de Valeur par an.

En combinant cette équation (VIII) avec celle (VII) du bilan d'énergie, on obtient l'expression de  $\dot{C}_o$  que nous appellerons le coût opératoire annuel net :

$$\dot{C}_o = \dot{E}_r(v_r - v_a) - \dot{E}_u(v_u - v_a) \quad (IX)$$

Poursuivant cette analyse énergétique, nous devons en outre noter que la machine qui sert à faire cette transformation a dû elle-même être fabriquée et que cela a demandé une certaine quantité d'énergie. Il faut donc tenir compte du contenu énergétique des équipements de production. C'est l'investissement énergétique  $I_e$  (en joules).

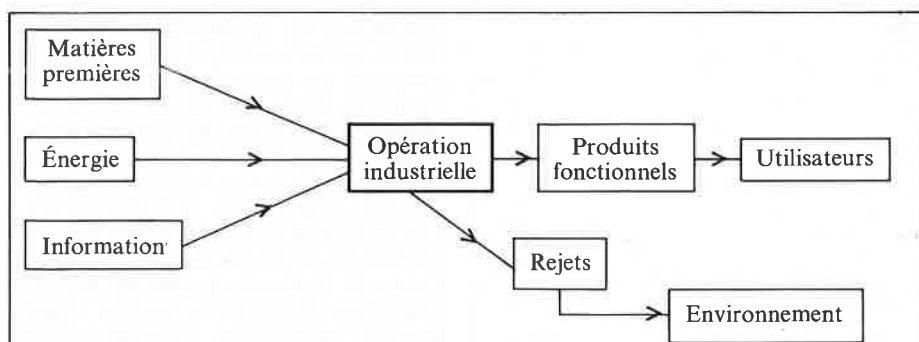


Figure 2a

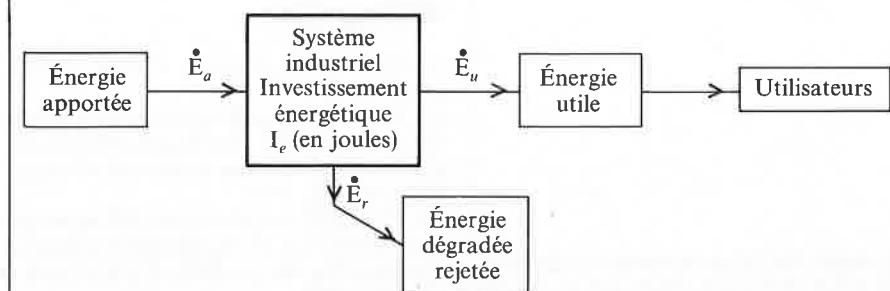


Figure 2b

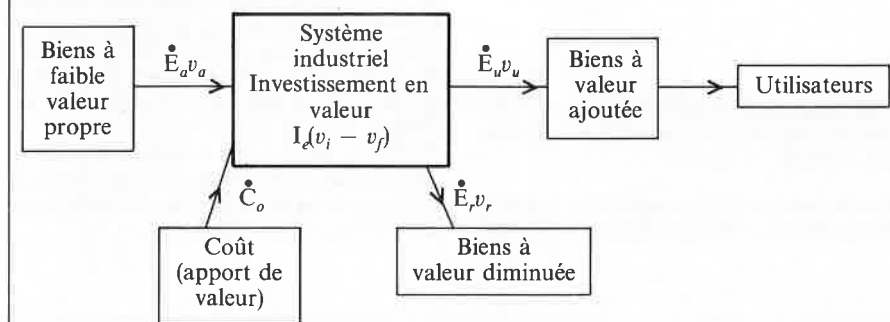


Figure 2c

Figure 2.

Au total, le bilan intégral de valeur sur les N années de fonctionnement du système s'écrit comme suit :

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

Le coût total  $C_t$  (c'est-à-dire la dépense totale en valeur) est la somme de N fois le coût

opérateur annuel et de la perte de valeur de l'investissement. En effet  $v_i$  est la valeur initiale d'un joule investi et  $v_f$  est sa valeur finale. Notons que  $v_f$  est nulle si la machine est rejetée à la décharge, au bout de la N-ième année (voir Figure 2c).

Finalement, le coût total, par unité d'énergie utile s'écrit :

$$\frac{C_t}{N\dot{E}_u} = \frac{\dot{E}_r}{\dot{E}_u}(v_a - v_r) - (v_u - v_d) + \frac{I_e}{N\dot{E}_u}(v_i - v_f) \quad (XI)$$

ce qui s'énonce ainsi :

Coût total par unité d'énergie utile	=	Perte de valeur dans les rejets	=	Gain de valeur dans les produits utiles	+	Unité d'amortissement des équipements usés
--------------------------------------	---	---------------------------------	---	---	---	--

Telle est la relation fondamentale à partir de laquelle on peut développer toutes sortes d'applications (3, 4 et 6) notamment pour l'optimisation technico-économique des procédés, pour l'évaluation du coût des surinvestissements destinés à économiser l'énergie, etc.

## IV.2. Barèmes de valeur

Il est important de noter que le bilan de valeur a été établi, sans que le concept même de « valeur » de l'énergie ait été défini. Et c'est là précisément l'avantage de cette présentation. L'équation du bilan de valeur (X) est valable, quelle que soit la définition de la « valeur ». L'intérêt du point de vue pédagogique est qu'une telle présentation permet de faire un lien entre l'énergétique et l'économie et même l'écologie. On peut en effet choisir toute une diversité de barèmes de valeurs, et ainsi les comparer entre eux.

Le tableau 2 en donne quelques exemples.

- Un premier barème, le plus simple, consiste à donner la même valeur à toutes les formes d'énergie... Alors le bilan de valeur se réduit au simple énoncé du premier principe de la thermodynamique.
- Un second barème consiste à donner une valeur nulle à l'énergie rejetée dans l'environnement, sous quelque forme que ce soit (eaux résiduelles, fumées...). Beaucoup de calculs industriels sont basés sur ce simple barème.
- Un troisième barème consiste à ramener toutes les formes d'énergie à deux formes de base : la chaleur et l'électricité. En partant d'un rendement expérimental de conversion de l'une dans l'autre (par exemple 2,5 thermies pour fabriquer un kWh électrique). On est conduit à énoncer qu'un joule thermique ne vaut que les 34/100 d'un joule électrique, d'où le barème de valeurs :

$$v_t = 0,34 \quad \text{et} \quad v_e = 1$$

Allant plus loin dans cette voie, le 4<sup>e</sup> barème considère qu'un joule de chaleur a d'autant plus de valeur qu'il est disponible à une plus haute température. Pour exprimer cette loi, il est commode de donner à la valeur de l'énergie thermique, la forme du coefficient de Carnot, soit :

$$v_t = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (XII)$$

On retrouve ainsi le concept d'exergie :  $Ex = Q[1 - (T_0/T)]$ . L'exergie est donc de l'énergie dont la « valeur » est donnée par le coefficient de Carnot.

Le tableau 2 présente divers autres barèmes de valeurs, à base technico-économique, écologique ou socio-politique, que nous avons discutés plus en détail dans d'autres publications (2 et 4).

Du point de vue pédagogique, cette présentation a l'avantage de bien montrer à nos élèves-ingénieurs, la différence entre les diverses optimisations de procédés destinées à minimiser soit le coût en francs français, soit le coût en devises étrangères, soit encore le « coût » en exergie, etc...

**Tableau 2. Barèmes de valeur de l'énergie**

<p>1. <i>Barèmes à base enthalpique</i> (application du premier principe)</p> <p>11. Barème « à toutes valeurs égales » <math>v_a = v_u = v_r = v_i = v_f = 1</math>          12. Barème « à rejets de valeur nulle » <math>v_a = v_u = v_i = 1; v_r = v_f = 0</math></p> <p>2. <i>Barèmes à base entropique</i> (application du second principe)</p> <p>21. Barème « à deux valeurs » : <math>\frac{2,5 \text{ thermies} \rightarrow 1 \text{ kWh}}</math>  <math>v_i = 0,34 \quad v_e = 1</math></p> <p>22. Barème « à valeur de Carnot »  <math>Ex = Q \left[ 1 - \frac{T_0}{T} \right] \rightarrow v_i = 1 - \frac{T_0}{T}</math></p> <p>3. <i>Barèmes à base technico-économique</i></p> <p>31. Valeur = coût de production          32. Valeur = prix sur le marché français          33. Valeur = prix sur le marché international</p> <p>4. <i>Barème à base écologique ou socio-politique</i></p> <p>41. Valeur d'utilisabilité : par référence à un écosystème d'utilisateurs urbano-industriels          42. Valeur de disponibilité : par référence à la dimension et à la facilité d'accès aux ressources          43. Valeur environnementale : par référence aux nuisances qu'elle entraîne.          44. Valeur politique : définie par un objectif extérieur, par exemple :          • désir d'indépendance nationale          • décision de développer le nucléaire, etc...</p>
---

## V. Conclusion et bibliographie

Tous les responsables de la formation des ingénieurs sont d'accord sur la nécessité de donner aux élèves-ingénieurs des enseignements à caractère aussi pluri-disciplinaire que possible. A la limite, il n'existe qu'une seule « science de l'ingénieur », c'est la

« Science des Systèmes Industriels », synthèse des aspects matériel, énergétique, informatique, humains et sociaux.

Dans ce cadre, il était souhaitable d'établir des liens entre les enseignements de thermo-

dynamique, de mécanique des fluides et d'économie industrielle. Nous avons cherché à montrer que ceci était possible en insistant sur le concept de « valeur » de l'énergie et en donnant à ce vocable diverses significations à base thermodynamique, économique ou écologique. Cette recherche pédagogique est en cours, à la fois, en formation initiale à l'École Nationale Supérieure des Industries Chimiques et en formation continue, au Centre de Perfectionnement des Industries Chimiques. Nous serions heureux d'échanger des informations avec des collègues procédant à des expériences similaires dans ce même domaine.

## Bibliographie

- (1) M. Gouy, *J. Physique*, 2<sup>e</sup> série, 1889, **8**, 501.
- (2) P. Le Goff (coordonnateur), *Énergétique industrielle*, Vol. I : Analyse thermodynamique et mécanique des économies d'énergie. Éd. Lavoisier, 1979.
- (3) P. le Goff (coordonnateur), *Énergétique industrielle*, Vol. II : Analyse économique et optimisation des procédés. Éd. Lavoisier, à paraître, 1980.
- (4) P. Le Goff, « La valeur de l'énergie a-t-elle une base économique, écologique ou technique » ? *Revue d'Économie Industrielle*, 2<sup>e</sup> trimestre, 1979, 68.
- (5) P. Le Goff, « Les rendements d'utilisation de l'énergie par et pour les êtres humains », *Rev. Gén. Therm.*, 1977, **181**, 11.
- (6) P. Le Goff, « Optimisation énergétique des procédés industriels », *Rev. Gén. Therm.*, 1978, n° 193, 11 et n° 194, 89.
- (7) P. Le Goff, « Le concept d'unité de dégradation d'énergie et ses applications en mécanique des fluides », *The Chemical Engineering Journal* (à paraître).

# Utilisation de techniques audio-visuelles et informatiques pour un enseignement autotutoriel de la distillation. Une expérience pédagogique

par Daniel Cabrol, Stefka Pastour, Robert Luft et Jean-Pierre Rabine

(Groupe de recherche pédagogique en chimie, Institut Polytechnique Méditerranéen, Université de Nice, Parc Valrose, F 06034 Nice Cedex).

Bien que la distillation soit une opération pratiquée quotidiennement au laboratoire de chimie organique, l'enseignement de ses fondements et de sa pratique ne rentre que très rarement dans les programmes de la maîtrise de chimie.

Pour combler cette lacune nous avons cherché à mettre au point des documents de travail qui puissent servir aussi bien dans le cadre d'une formation initiale que dans celui d'une formation professionnelle continue. Plutôt que des compléments d'un enseigne-

ment classique, qui ne laisse aucune initiative à l'étudiant, de tels documents, comprenant des textes écrits, des montages audiovisuels et des séquences d'Enseignement Assisté par Ordinateur (E.A.O.), constituent dans notre esprit la trame d'un enseignement actif.

La pédagogie qui sous-tend un tel enseignement peut être qualifiée d'autotutorielle, si elle satisfait aux conditions suivantes :

- l'étudiant accède à une certaine maîtrise du plan et de l'organisation de son enseignement,

- l'étudiant peut travailler à son rythme propre, ce qui facilite l'insertion d'étudiants salariés.

Dans la méthode autotutorielle l'initiative ainsi restituée à l'étudiant appelle en retour un développement de ses motivations et de son sens des responsabilités, par le fait même qu'on lui a rendu la liberté de sa démarche intellectuelle dans l'acte d'assimilation de techniques de raisonnement et de connaissances. On aboutit ainsi, par opposition au mode d'enseignement traditionnel, à une