

A – Bases de la maîtrise de l'énergie

CHAPITRE I

ÉNERGIE ET ÉNERGÉTIQUE

L'énergie est présentée dans ses rapports avec la physique au § 1 et dans ses rapports avec la technique dans le §2. Le § 3 introduit l'énergétique –science et technique de la production et consommation de l'énergie.

1 – ÉNERGIE ET PHYSIQUE

1.1 – L'énergie et ses formes

a) L'énergie – définition et propriétés

L'énergie est une notion *fondamentale*. Ses définitions usuelles comme capacité à effectuer un travail – ou plus généralement une action ou une modification, ou plus spécifiquement un déplacement, malgré des forces qui s'opposent à cette action– sont circulaires : les concepts cités sont définis les uns par rapport aux autres.

En physique théorique, l'existence de la grandeur *énergie* avec ses propriétés connues découle comme un cas particulier du 1^{er} théorème d'Emmy Noether, qui prouve dans le cadre de la mécanique Lagrangienne qu'à chaque invariance correspond une grandeur physique conservative. Dans le cas particulier de l'énergie, son existence et la loi de sa conservation découlent de l'invariance des lois physiques par rapport au temps.

En thermodynamique on introduit de manière axiomatique l'énergie –plus exactement, la variation Δu de la partie microscopique de l'énergie, appelée énergie interne et notée u – par le biais du 1^{er} principe de la thermodynamique, à savoir

$$\Delta u = q + w \quad (1)$$

où q et w désignent respectivement la chaleur et le travail reçus par le système.

Il convient de caractériser l'énergie par ses propriétés, au lieu de la définir. Ainsi, l'énergie est une grandeur :

- * quantitative – exprimable de manière numérique. Elle sera notée e par la suite;
- * localisable – attribuable à un système donné. Un système –plus exactement, un système *physique*– est une partie de l'univers physique, choisie de manière arbitraire mais précise et judicieuse, afin d'analyser un certain phénomène ;
- * additive, ce que signifie qu'en fusionnant deux systèmes A et B, l'énergie du nouveau système A+B est la somme des énergies des systèmes de départ:

$$e_{A+B} = e_A + e_B \quad (2)$$

- * scalaire – exprimable par un seul nombre, et non par plusieurs comme les vecteurs ; et
- * continue – exprimable par un nombre *réel*, et non par un nombre rationnel, ni un nombre entier (excepté l'énergie au niveau sous-atomique).

b) Formes de l'énergie

En physique, les énergies se classifient d'abord en énergies liées aux photons (énergie radiante) et en énergies liées à la masse de repos. Ces dernières sont ensuite classables, selon deux critères croisés, soit en

- énergies cinétiques, liées au déplacement d'un corps; et en
- énergies potentielles, liées à la position du corps dans un champ potentiel de forces

soit en

- énergies désordonnées (appelées quelquefois à tort *internes*) – celles des déplacements (ou des positions) à l'échelle microscopique, i.e. des molécules, des atomes, des particules élémentaires ou sous-nucléaires; et en
- énergies ordonnées (le qualificatif *externes* est à éviter, car se prêtant à des ambiguïtés), se rapportant aux déplacements –ou aux positions– macroscopiques.

Les énergies sont aussi classées, selon les phénomènes physiques, en : mécaniques (des solides ou des fluides), élastiques, plastiques, acoustiques, électriques, magnétiques, électromagnétiques (y compris optiques), thermiques, chimiques et nucléaires.

c) Sciences de l'énergie

En physique générale, l'énergie est une notion transversale indispensable à la compréhension de tout phénomène. Pourtant, chaque branche de la physique a sa manière propre de prendre en compte l'énergie, de manière qu'une physique des énergies n'existe pas, à l'exception du domaine hautement spécialisé de la physique des hautes énergies.

Le nom *énergétique* utilisé quelquefois dans ce sens est en fait impropre à désigner une branche à part de la physique, mais reste cantonné au domaine technologique.

Il y a pourtant deux sciences spécifiques s'occupant non seulement des énergies en soi, mais aussi et surtout des *échanges* d'énergie, i.e. des passages de l'énergie d'un système à un autre, et des *transferts* d'énergie, qui sont entendus comme les passages de l'énergie au sein d'un système, d'une phase (solide ou fluide ayant des propriétés distinctes) à l'autre:

- la thermodynamique, qui étudie les propriétés les plus générales –notamment énergétiques– de tout système, en dehors du cadre spatio-temporel des phénomènes ;
- la cinétique des transferts, qui étudie la vitesse de modification des ces propriétés.

1.2 – Échanges

a) Échanges impliquant un système

Du point de vue d'un système donné, les *échanges d'énergie* (ou de toute autre grandeur qui se conserve) sont les phénomènes de passage d'énergie –dans un sens et/ou dans l'autre– dus aux interactions entre ce système et un autre système, ou entre ce système et l'ensemble– nommé *univers*– de tous les autres systèmes concevables.

Dans un système *isolé* (qui n'interagit pas avec l'univers), l'énergie –ainsi que la masse de chaque type d'atome (élément chimique), la quantité de mouvement et la charge électrique– se conservent, tout en pouvant se redistribuer à l'intérieur du système.

Le système intéressant la technique est surtout le système *non isolé* –le système qui peut changer avec l'extérieur au moins une de ces quatre quantités citées: énergie, masse, charge et quantité de mouvement.

Les quatre types d'échanges apparaissent parfois couplés, selon les règles suivantes :

- tout échange de masse ou de charge électrique est accompagné d'un échange d'énergie, quelque fois aussi d'un échange de quantité de mouvement ou –plus rarement– de charge électrique.
- Un système est qualifié de *fermé* s'il ne peut pas changer de masse avec l'univers, et de *ouvert* si il change de masse avec l'univers. Bien sur, un système ouvert est toujours non isolé, et un système isolé est toujours fermé.
- Tout échange de charge électrique est accompagné par un échange d'énergie, tandis que les changements de quantité de mouvement et de masse qui l'accompagnent sont d'habitude négligeables. Le système est qualifié d'*électriquement isolé* s'il ne peut pas changer de charge électrique avec l'univers.
- Les échanges de quantité de mouvement n'apparaissent jamais seules, mais seulement en accompagnement des trois autres échanges.

D'un autre point de vue –celui de la portion de l'univers impliqué dans les échanges avec un système considéré– on distingue :

- les échanges *proximaux* entre le système et son ambiance (définie comme la partie de l'univers immédiatement voisine au système), échanges localisés aux surfaces-frontières du système ; et
- les échanges *distales* ou à distance, quand le système reçoit et cède de l'énergie par rayonnement. De tels échanges agissent même à travers un espace vide et ont comme agent les photons, et non les particules matérielles (i.e. les particules à masse propre de repos).

Ni la masse, ni la charge électrique ne s'échangent pas à distance : les photons n'interviennent que dans l'échange d'énergie et dans celui de quantité de mouvement (phénomène de *pression de la lumière*, négligeable dans la plupart des cas pratiques).

b) Échanges d'énergie

Les échanges d'énergie –autres que ceux qui ont lieu lors du déplacement du système entier dans un champ (gravifique, électrique, capillaire etc.) et qui impliquent donc les énergies potentielles – se classifient en :

- 1) échange distal de *photons*
- 2) échange proximal de *masse*
- 3) échange proximal de *charge électrique*
- 4) échange proximal d'*énergie pure*, échange qui peut avoir lieu aux frontières d'un système même s'il est fermé (sans échange de masse) et électriquement isolé (sans échange de charge électrique).

Dans chacun des cas, l'énergie échangée peut être sous forme ordonnée, sous forme désordonnée ou sous les deux formes, en proportions variables.

À l'échange d'énergie pure, on nomme *travail* l'énergie reçue ou cédée sous une forme ordonnée et *chaleur*–celle reçue ou cédée sous une forme désordonnée.

Tout échange d'énergie est équivalent du point de vue de l'énergie totale. Ainsi, la quantité d'énergie reçue (ou cédée) par le système est toujours égale à l'énergie cédée (respectivement reçue) par l'univers.

Par contre, ni l'énergie désordonnée ni l'énergie ordonnée ne sont pas conservées pendant un échange, quoique leur somme –l'énergie totale– se conserve.

Ainsi, à chaque échange d'énergie pure, une partie de l'énergie ordonnée (i.e. une partie du travail) cédée par un des systèmes participants à l'échange se transforme dans une quantité équivalente supplémentaire d'énergie désordonnée (chaleur) reçue par l'autre des systèmes impliqués dans l'échange d'énergie pure.

De la même façon, une partie de l'énergie cinétique ordonnée (proportionnelle au carré de la vitesse de déplacement du flux de masse entrant dans un système, ou à l'énergie du rayonnement absorbé par le système) peut être convertie dans une énergie microscopique des mouvements moléculaires.

2 – ÉNERGIE ET TECHNIQUE

2.1 – Énergie de l'ingénieur

a) Sens différents de l'énergie en physique et en technique

Il y a deux sens propres quelque peu différents de la notion d'énergie :

- l'énergie comme grandeur *physique* et
- l'énergie comme grandeur *technologique et économique*.

Ces deux grandeurs se distinguent d'abord en raison de différences *quantitatives*:

- L'énergie physique peut être négative, l'énergie technologique ou économique – non.
- La position du zéro de l'énergie physique est conventionnelle et ad-hoc, tandis que le zéro de l'énergie technologique est unique et présente un sens bien défini; par conséquent
- le rapport des deux énergies technologiques a une signification bien définie, celui des deux énergies physiques est un non sens.
- l'énergie en physique se réfère à un *instant* donné (l'énergie physique est une fonction du temps) tandis que l'énergie technologique se rapporte à une *période* de temps donnée.

Les énergies du physicien et de l'ingénieur diffèrent aussi du point de vue *qualitatif*:

- L'énergie en physique se conserve toujours, tandis qu'en technologie (et en économie) l'énergie se conserve seulement quelquefois, et jamais parfaitement, mais peut éventuellement être stockée, économisée, épargnée, dépensée, récupérée etc.
- Les pertes, fuites, rejets et dissipations d'énergie dont on s'occupe en technique sont des notions sans équivalent en physique : ces pertes sont inévitables au cours de la *conversion* d'une forme d'énergie à l'autre, l'ingénieur s'efforçant à les minimiser. Dans la *transformation* de l'énergie qui est envisagée par le physicien, les pertes n'ont aucun sens.
- L'énergie pour un physicien ne peut être ni créée ni détruite, tandis que l'énergie de l'ingénieur est produite ou consommée et utilisée, selon le cas
- Les formes d'énergie en physique sont parfaitement équivalentes, tandis que les différentes formes d'énergie en technologie ont des valeurs différentes, valeurs qui dépendent d'ailleurs aussi de la conjoncture ou de la taille du système.

Les différences proviennent d'un glissement sémantique : le mot *énergie* du technicien ou économiste correspond à la notion physique d'*échange d'énergie* entre deux systèmes, et non à l'énergie proprement dite d'un système physique. Leur confusion est fréquente.

b) L'énergie dans la technique

Les points de vue technique et physique sur l'énergie diffèrent sur plusieurs aspects :

- L'ingénieur est plus concerné par la quantité d'énergie *échangée* par un système que par la quantité d'énergie *propre* à ce système. Le travail et la chaleur sont des *énergies* pour le technicien, mais seulement des formes d'échange d'énergie pour le physicien.
- L'activité technique s'inscrivant dans le temps, la puissance –rapport de l'énergie échangée et de la durée de l'échange– est plus importante que l'*énergie* échangée. L'échelle des puissances mises en jeu en technique est relativement importante, dépassant 1 MW de puissance moyenne et 10 MW de puissance maximale. Par comparaison, l'activité propre d'une personne se traduit par un échange avec l'environnement d'une puissance moyenne de 80 W et maximale de 400 W.

2.2 – Utilité de l'énergie

En technique, les formes d'énergie ne sont pas équivalentes sur le plan de leur utilité. L'utilité des énergies est quantifiée par une valeur, que l'on peut imaginer le plus simplement comme une valeur *monétaire* – le coût de l'énergie.

La valeur attribuée à une énergie donnée dépend d'abord de la facilité de manipulation des formes d'énergie, dans les différentes étapes de sa manipulation, décrites par la suite : extraction, conditionnement, collecte, conversion, transport, stockage et distribution.

Les opérations techniques sur l'énergie sont schématisées dans la figure 1.

- La **collecte** d'énergie –B dans la fig. 1– est située au début du parcours de l'énergie : c'est son départ de plusieurs petits systèmes qui sont disponibles naturellement pour aboutir à un seul système de grande taille, souvent après les phases préliminaires de mise à la disposition, qui sont l'*extraction* (marquée A dans la figure) et/ ou le *conditionnement*.
- La **distribution** (de l'énergie) est la dernière étape de ce chemin – le passage de l'énergie d'un seul système de grande taille à une multitude de petits systèmes, s'agissant ici donc d'un changement d'échelle dans le sens inverse à celui de la collecte d'énergie.
La distribution (ainsi que le transport, qui va suivre) est très facile pour l'électricité, facile pour les combustibles chimiques ou fissiles et difficile pour les énergies mécaniques.
- Le **transport** (d'énergie), défini comme déplacement de l'énergie dans l'*espace*.
- Le **stockage** (d'énergie) est le pendant du transport – le déplacement dans le *temps* de l'énergie disponible. Il est très facile pour l'énergie chimique et l'énergie gravitationnelle potentielle (hydro-énergie), facile pour l'énergie ordonnée cinétique (emmagasinée dans des volants), un peu plus difficile pour l'énergie thermique et quasiment impossible pour l'électricité : le coût d'utilisation des piles électriques est aujourd'hui encore prohibitif.

- La **conversion** (de l'énergie) est la transformation d'une forme d'énergie en une autre. Sa facilité de réalisation dépend des formes d'énergie de départ et d'arrivée. Ainsi :
 - * La conversion est rapide et totale dans les deux sens entre énergies mécaniques (cinétiques et potentielles) et électrique. Les énergies chimique, nucléaire et électrique sont facilement et intégralement convertibles en *chaleur* (nom utilisé improprement ici, pour l'énergie interne des corps).
 - * La conversion des énergies thermique ou électrique et surtout de l'énergie mécanique (nommée souvent- improprement- *travail*) en énergie chimique est beaucoup plus difficile et incomplète. C'est aussi assez difficile de convertir l'énergie chimique en énergie mécanique ou électrique, ou l'énergie radiante en électricité.
 - * Les *échanges* d'énergie sous forme de chaleur et de travail peuvent être assez facilement inter-convertibles (dans les machines thermiques), mais le degré de conversion est limité dans le sens chaleur→travail.

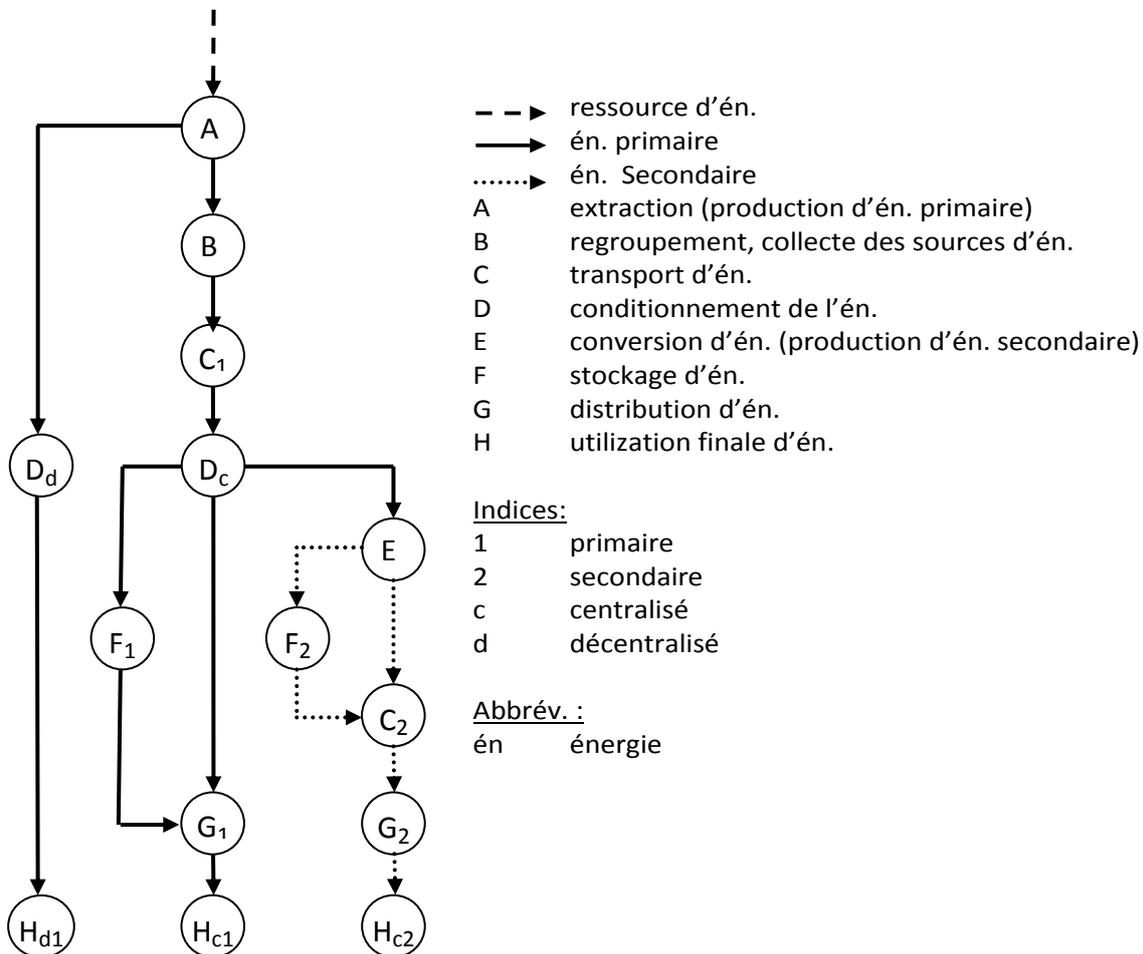


FIG. 1. Circulation dans un système énergétique

La valeur de l'énergie dépend aussi de son usage final, En effet, chaque type d'activité technique ou généralement humaine –alimentation, transport, chauffage des espaces habitables, commerciales et de services, industries de transformation, labourage, entretien des systèmes informatiques etc.– nécessite une forme spécifique d'énergie.

3 – ÉNERGÉTIQUE

3.1 – Activités humaines et énergétique

a) Définitions de l'énergétique

L'énergétique est l'étude de tout objet ou phénomène sous l'aspect de la transformation et du transfert d'énergie. On distingue couramment :

- * une énergétique physique : thermodynamique, cinétique et science des transferts ;
- * une énergétique technique, centrée sur le fonctionnement de l'entreprise ou d'un outillage, et dont l'utilisation rationnelle de l'énergie fait partie ; et enfin
- * une énergétique économique, caractérisée, d'un part par
 - la prise en compte simultanée des problèmes techniques, économiques, politiques, stratégiques, écologiques ; et d'autre part par
 - l'échelle plus grande de son objet –branche d'activité, système énergétique, monde– ce qui justifierait qu'elle soit également appelée macro-énergétique.

b) Classement énergétique des activités

Le classement pratique des entreprises est basé, du point de vue énergétique, d'abord sur la proportion relative de la *valeur* de l'énergie dans l'ensemble des flux (échangés avec l'extérieur), d'une part parmi les entrées, d'autre part parmi les sorties. Évidemment, les *quantités* (en J) d'énergie en entrée et en sortie sont strictement égales (au moins à terme).

On note par ε le poids énergétique – rapport de la valeur v_{en} de l'énergie échangée et de la valeur totale v_{to} des biens échangés par le système (ici l'entreprise) :

$$\varepsilon = v_{en} / v_{to} \quad (3)$$

En affectant au poids énergétique l'indice *in* (de input) en entrée et *out* (de output) en sortie, le classement énergétique discerne les quatre types d'entreprises de la fig. 2:

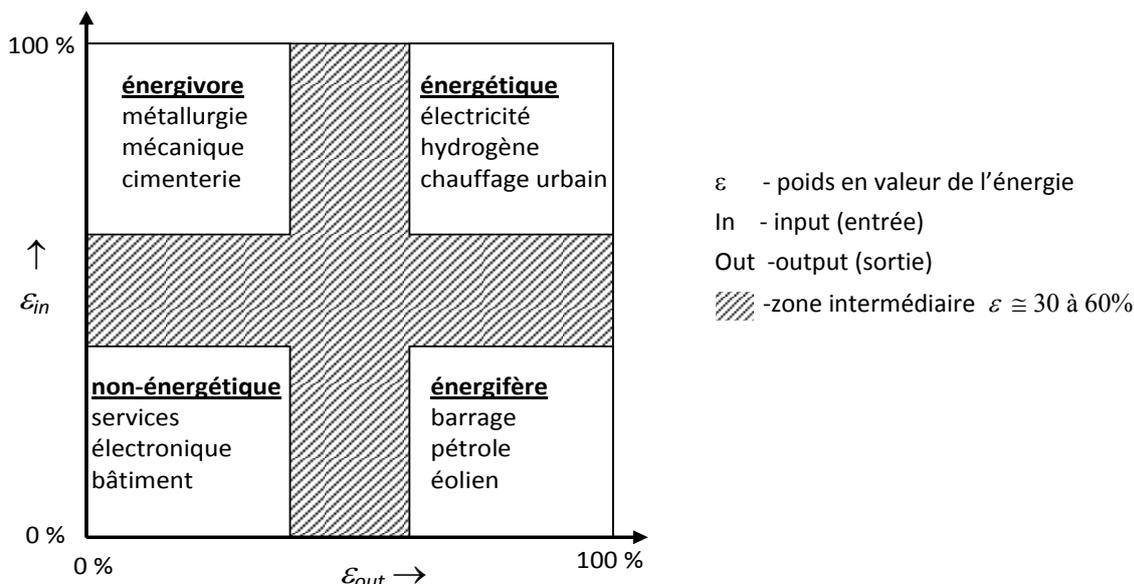


FIG. 2. Classement des secteurs industriels et d'activité selon le poids en valeur de l'énergie, dans les entrées et sorties

1) Entreprises énergétiques

Dans ces entreprises, aussi bien ε_{in} que ε_{out} de la fig. 2 sont grandes.

Leur ensemble constitue l'industrie énergétique, dont les branches principales sont

- * la thermo-énergétique, i.e. la production d'électricité en centrales thermiques – classiques ou nucléaires
- * l'hydro-énergétique – la production de l'électricité dans les centrales hydrauliques, et
- * l'électro-énergétique, qui regroupe le transport et distribution de l'électricité.

L'énergie totale sortie des entreprises énergétiques représente la production d'énergie *secondaire*. La forme d'énergie de la production secondaire est surtout l'électricité – plus exactement l'énergie électrique du courant alternatif – mais un rôle croissant est prévisible pour d'autres *vecteurs* (i.e. agents porteurs) de l'énergie secondaire,

Ces vecteurs sont obtenus soit dans des entreprises électro-énergétiques – le courant électrique continu, les ondes électromagnétiques de haute fréquence – soit dans des entreprises classées dans d'autres branches industrielles.

Ainsi sont : le hydrogène comprimé (produit de l'industrie chimique), l'éthanol (obtenu dans l'industrie fermentative), le thorium (sous-produit dans les centrales nucléaires classiques alimentées en uranium, le thorium sert à son tour de combustible nucléaire dans les centrales nucléaires de 2^{ème} génération) et enfin l'eau chaude des entreprises de chauffage urbain.

2) Entreprises énergifères

Il s'agit d'entreprises où ε_{in} est relativement faible mais ε_{out} est important, comme l'extraction de charbon, d'uranium, de pétrole ou de gaz, ainsi que les éoliennes, le photovoltaïque ou la construction des barrages.

Les types d'énergie qui entrent dans les entreprises énergifères sont appelées *ressources d'énergie* (combustibles, vent, énergie solaire, chute d'eau) et les types d'énergie qui en sortent sont appelées sources d'énergie.

Les supports matériels de ces énergies sont désignés comme *agents énergétiques*.

La quantité totale d'énergie sortie des entreprises énergifères dans une période donnée (ou quelquefois la puissance moyenne) s'appelle *production d'énergie primaire*.

3) Entreprises énergivores

Dans, ces entreprises, contrairement à celles énergifères, ε_{in} est relativement fort, tandis que ε_{out} est peu important. C'est le cas de beaucoup d'industries de transformation – chimie, cimenterie, métallurgie – mais aussi de la plupart des industries mécaniques et des activités de transport (sauf certes de transport ... des combustibles).

4) Entreprises non-énergétiques

Il s'agit d'entreprises dont ε_{in} et ε_{out} sont faibles toutes les deux: l'ensemble du secteur tertiaire, i.e. tous les services (commerce, banque, éducation, santé, loisirs, administration), mais aussi l'industrie électronique, la mécanique fine, le bâtiment, l'agriculture et l'élevage etc.

La quantité totale d'énergie entrée dans les entreprises énergivores et non-énergétiques est nommée *énergie utilisée finale*, envisageable aussi bien comme énergie moyenne pendant la période de référence choisie, qu'en termes de puissance – moyenne ainsi que maximale.