

Introduction



Chapitre 1

L'énergie : formes, conversion et stockage

1. LES FORMES DE L'ENERGIE

1.1 Un point d'histoire du développement de l'humanité

L'énergie se manifeste sous diverses formes dans le monde qui nous entoure. Il ne sera plus fait ici de référence à des énergies primaires ou non, ni à ce qui est qualifié parfois de vecteur énergétique. Le point de vue adopté est délibérément différent pour donner une vision plus scientifique et physique à l'étude proposée.

Primitivement c'est l'énergie calorifique (ou *chaleur*, de préférence à *l'énergie thermique*), qui a retenu l'attention de l'humanité : la domestication du feu (*combustion*) a permis dans un premier temps la cuisson des aliments, puis le chauffage. Après seulement est apparue l'énergie mécanique.

1.2 Recensement des formes de l'énergie

a) L'énergie mécanique

L'énergie mécanique est la deuxième forme d'énergie à avoir été maîtrisée par l'homme, surtout dans l'Antiquité (levier, poulie, voile, rame...).

On voit ainsi que l'aspect applicatif (technologie, technique ou expérimental) a précédé l'aspect fondamental (formel, scientifique) ; la mécanique a sans doute été la première science physique à se développer de façon forte, précisément dès l'Antiquité.

L'énergie mécanique elle-même peut prendre diverses formes.

❖ **Energie cinétique, énergie potentielle**

L'énergie cinétique est liée au mouvement du corps considéré. L'énergie potentielle est liée à la position du corps, dans l'espace où il est immergé.

L'énergie potentielle du mécanicien est couramment associée au champ de pesanteur (environnement terrestre) ; L'accélération de la pesanteur prend en moyenne à la surface du globe terrestre la valeur $g=9,81\text{m/s}^2$.

❖ **Energie de rotation, énergie de translation**

Le mouvement général d'un corps solide supposé indéformable est décrit par la superposition de deux mouvements :

Un mouvement de translation du corps dans l'espace où il est immergé.

Ce mouvement se fait identiquement pour tous les points du solide ; il est commode de l'étudier par rapport au centre de masse de celui-ci, se déplaçant dans un repère appelé référentiel (mouvement par rapport au référentiel).

Un mouvement de rotation du corps dans l'espace.

Le mouvement est un mouvement différent pour chaque point du solide ; il est commode de l'étudier dans un repère déduit du référentiel précédent, mais transporté au centre de masse du solide.

b) L'énergie électrique

Dès l'Antiquité, la triboélectricité a permis de mettre en évidence l'attraction de charges de signes contraires (+ et -), ou la répulsion de charges de même signes (+ + et - -).

Il apparaît alors comme pour l'énergie mécanique une énergie électrocinétique ; cette énergie électrique est caractérisée par le mouvement de charges électriques dans un champ électrique.

On rencontre alors les deux formes correspondantes courantes de l'énergie électrique, qui sont les suivantes.

❖ L'énergie électrique de type continu:

Cette forme de l'énergie électrique est le plus souvent de faible intensité et faible tension. Elle est très utilisée dans les dispositifs électroniques grand public, et dans des systèmes embarqués pour les transports, voire l'énergie photovoltaïque.

❖ L'énergie électrique de type alternative

Il s'agit de l'énergie électrique des réseaux centralisés, qui peuvent fonctionner selon les usages sous très forte tension (400 000 Volts) et sous très forte intensité (par exemple pour usages industriels).

L'utilisation courante au Maroc se fait en courant monophasé sous 220V et une intensité de ligne de l'ordre de 10A.

c) Energie magnétique

Cette énergie est intimement liée au champ du même nom. Et il existe un parallèle fort avec l'énergie électrique du point de vue formel.

Pour l'application, le couplage électromagnétique est essentiel.

Selon les matériaux, les manifestations du magnétisme peuvent être variées et différentes ; on notera l'existence de matériaux :

Paramagnétique ;

Ferromagnétique...

La structure intime de la matière joue alors un rôle fondamental (la thermodynamique statistique permet des modélisations pertinentes de ces phénomènes).

d) Energie radiative

L'énergie radiative, dont la plus connue est l'énergie lumineuse (visible), est une énergie combinant les deux précédentes d'énergie : c'est une énergie électromagnétique particulière dont la longueur d'onde est visible par l'œil dans le domaine compris entre $0,4\mu\text{m}$ et $1\mu\text{m}$

Toutefois, il existe de nombreuses autres radiations ; en allant du plus énergétique vers le moins puissant, on rencontre les rayons gamma, les rayons ultraviolets (UV), le spectre visible, puis les rayonnements infrarouges (IR) et enfin les rayonnements radiométriques.

L'énergie radiative présente la particularité de ne pas nécessiter de support matériel pour se propager. Les expériences ont montré qu'elle peut se propager de deux façons :

-soit sous forme ondulatoire ;

-soit sous forme corpusculaire (photon) ;

Avec équivalence entre les deux formes, comme l'a montré Louis de Broglie.

e) Energie chimique

L'énergie chimique est une énergie liée à la conformation des cortèges électroniques autour des noyaux des atomes et molécules. Les cortèges tendent vers des configurations de stabilité croissante, correspondants à des minima énergétiques de l'ensemble ayant réagi.

L'exemple le plus simple de réaction chimique est **la combustion**. Cette réaction met en jeu un combustible et un comburant (très souvent de l'air) ; la réaction peut être violente (comme dans un moteur thermique) ou lente (oxydation d'un métal à l'air libre).

Selon le mode de réaction, une certaine énergie calorifique est mise en évidence de façon concomitante :

-**réaction exothermique** (avec libération de chaleur) ;

-**réaction endothermique** (nécessitant un apport de chaleur pour se développer).

f) Energie nucléaire

L'énergie nucléaire est une énergie liée cette fois au noyau de certains atomes et à la façon dont les particules élémentaires qui le constituent sont maintenues dans ce noyau. Certains noyaux sont très stables, d'autres moins et ce d'autant plus que leur masse (le nombre de particules les constituant) est élevée.

On distingue de ce fait deux formes essentielles de l'énergie nucléaire :

La fission nucléaire qui consiste à casser un atome lourd et instable en plusieurs morceaux, généralement sous impact neutronique ; dans ces réactions de fission il apparaît un défaut de masse. A ce défaut de masse libérée, sous forme calorifique dans le milieu ;

La fusion nucléaire, qui utilise à l'opposé des atomes légers qui par confinement et impact peuvent produire des atomes plus lourds. **Le projet ITER** relève de cette filière. Là aussi, sous conditions très spécifiques (à maîtriser : ce qui est un des enjeux de l'expérience), il y a un défaut de masse dans la réaction nucléaire ; ce défaut correspond encore à une énergie libérée globalement selon la relation suivante :

Où c_0 est la vitesse de la lumière dans le vide.

g) Energie calorifique

Evoquée précédemment, on peut noter que la première énergie utilisée par l'humanité apparaît aussi couplée à d'autres formes d'énergie chimique et nucléaire. Il existe plusieurs formes.

L'énergie calorifique joue un rôle très particulier dans l'ensemble des formes d'énergie ; elle apparaît aussi bien à l'échelle macroscopique des systèmes, que dans la structure plus intime de la matière.

❖Energie calorifique-frigorifique

Cette forme d'énergie revêt aujourd'hui une importance toute particulière dans des applications directes :

chauffage énergie calorifique ;

réfrigération énergie frigorifique.

Elle fait apparaître la notion de référence à l'ambiance locale sur laquelle on veut influencer (l'énergie dans un environnement).

Elle est présente aussi dans les systèmes utilisant des énergies dites nobles, dont la mécanique, *par exemple* :

les moteurs électriques sont sujets à des échauffements

les pneumatiques se mettent en température au roulage...(le lecteur pourra rechercher d'autres exemples)

❖ **Chaleur sensible – chaleur latente**

D'un point de vue thermodynamique, il convient de distinguer par ailleurs deux formes d'énergie calorifique :

la chaleur sensible qui est liée à l'évolution de la température de milieu matériel recevant ou cédant de la chaleur ;

la chaleur latente qui a pour originalité d'être échangée dans des conditions de température constante pour les ***changements de phase*** d'un corps pur. Généralement, les quantités de chaleur échangées sont plus grandes que pour les échanges de chaleur sensible, d'où leur importante pratique.

1.3 L'importance des formes d'énergie

Il ressort du catalogue succinct précédent un aspect multiforme de l'énergie. Cette diversité de formes induit de nombreuses possibilités :

de conversion d'une forme d'énergie dans une autre ;

de transfert, sous une forme bien définie d'énergie ;

de transport, sous une forme bien définie d'énergie ;

de stockage, sous certaines formes d'énergie.

C'est ce qui va être examiné dans les paragraphes qui suivent.

2. LA CONVERSION D'ÉNERGIE

2.1. Définition et historique

La conversion d'énergie est un processus qui voit le passage d'une forme d'énergie initiale vers une forme d'énergie finale .

La conversion d'énergie existe dans la nature sous des aspects très variés. Par exemple à l'échelle de l'homme, la maîtrise du feu correspond à la maîtrise d'une combustion, c'est-à-dire d'une réaction d'oxydation dont le processus marque le passage d'une énergie chimique (de réaction) à une énergie calorifique :

Energie chimique (réaction de combustion) énergie calorifique

A l'échelle de l'Univers, le Cosmos est dominé par l'énergie radiative, avec des opérations de conversion complexes au cœur des objets célestes. La compétition entre énergie et matière donne lieu à l'observation de structures allant des amas de galaxie aux galaxies, puis aux étoiles. Les étoiles sont des convertisseurs matière-énergie.

Matière (réaction nucléaire) énergie radiative

Depuis son apparition sur la Terre, l'homme a cherché à comprendre son environnement et les phénomènes naturels, puis à en user. Ce mimétisme de la nature a été amplifié par l'usage de techniques, puis de technologies de plus en plus développées tant en qualité, qu'en quantité. Ainsi à une échelle locale, l'homme a utilisé l'énergie du vent (voiles marines, moulins), l'énergie des chutes d'eau (moulins, centrales), de combustibles solides (charbon, pétroles), enfin l'énergie nucléaire ; autant d'exemples de conversion d'énergie.

Il est important de noter que l'échelle des convertisseurs a évolué dans le temps :
voile ; moulins à vent, à eau

Taille croissante

- chaudières particulières ou industrielles
- centrales nucléaires

2.2. Matrice de conversion des énergies

Ayant identifié les formes principales d'énergie, il est intéressant de construire une matrice des conversions d'énergie correspondante. Le tableau ci-dessous rend compte de cette matrice.

On a fait apparaître dans ce tableau les principaux modes de conversion et les sciences qui leur sont associées. Certaines ne sont pas parfaitement identifiées. Cela ne veut pas dire pour autant que les conversions n'existent pas.

Par exemple, la conversion radiative - mécanique existe bien. Elle se manifeste par une pression de radiation. Celle-ci a donné lieu à des réalisations que l'on peut observer dans les cabinets de physique : **radiomètre de Crookes** (Figure 1.).

La pression de radiation met en mouvement un moulinet. Mais d'autres réalisations plus pratiques sont possibles ou existent : voiles solaires.

Le lecteur pourra continuer à exercer sa sagacité sur d'autres exemples.

Forme D'énergie	Mécanique	Electrique	Magnétique	Radiative	Chimique	Nucléaire	Calorifique
Mécanique		Mécano- électrique					Mécano- thermique
Electrique	Electroméca- nique		Electro- magnétique	Electro- thermie	Electro- chimie	Electro- nucléaire	Electro- thermie
Magnétique	Magnéto- mécanique	Magnéto- électrique					Magnéto- thermie
Radiative		Photo- voltaïque			Photo- synthèse		
Chimique		Electro- chimie					Thermo- chimique
Nucléaire		Electro- nucléaire		Physique- nucléaire			Thermo- nucléaire
Calorifique	Thermo- mécanique	Thermo- électricité	Thermo- magnétique	Thermo- Cinétique; Rayon- nement	Thermo- chimie		

Tableau 1. Matrice des conversions d'énergie (domaines scientifiques et sciences correspondantes)



3 TRANSFERT D'ENERGIE

3.1 Définition et exemple

Comme il a été vu dans le tableau 1 de la matrice de conversion des énergies, la diagonale descendante correspond essentiellement aux opérations de transfert ou de transport d'une même forme d'énergie.

Cela suppose successivement deux nouvelles formes secondaires d'énergie, si elles existent :

une énergie flux ;

une énergie stock.

Nous nous intéressons principalement à la thermodynamique ; dans ce cours, nous étudierons la forme la plus connue de l'énergie flux qu'est l'énergie calorifique.

La chaleur est sujette à trois modes de transfert :

la conduction de la chaleur, qui nécessite un support matériel souvent supposé indéformable ;

la convection de la chaleur, qui fait intervenir un support fluide en mouvement naturel ou forcé ;

le rayonnement, quand à lui, ne nécessite pas de support matériel.

3.2. Régime dynamique stationnaire

De façon à ne considérer que le transfert d'énergie, nous supposons ici un régime de fonctionnement (ou état du système) dynamique stationnaire, par opposition au régime transitoire ou instationnaire qui fait intervenir un stock (voir paragraphe 4.1).

Un système ou procédé en régime dynamique stationnaire n'est pas en équilibre véritable avec son environnement; on peut dire qu'il est en équilibre dynamique sous l'action de contraintes externes.

On citera comme exemples :

une chute d'eau, de hauteur constante ;

un réseau d'air comprimé, dont la pression d'alimentation est maintenue constante par rapport à la pression atmosphérique ;

la température froide de conservation d'une installation de réfrigération (par exemple un réfrigérateur ménager) réglée par rapport à la température ambiante.

On retiendra que :

Le régime dynamique stationnaire d'un système ou procédé par rapport à une propriété suppose que celle-ci est localement constante et indépendante du temps, mais que cette propriété est une fonction de l'espace (du point).

On conçoit que pour un même système, il peut exister une multiplicité de régimes dynamiques stationnaires. Parmi ceux-ci, l'un d'eux a un rôle fondamental ; il s'agit du régime nominal. Ce régime de fonctionnement est encore appelé plein régime, ou régime de pleine charge. Il répond généralement à un protocole d'essai défini par des normes strictes.

L'exemple le plus connu est sans doute la consommation d'un véhicule automobile en régime stabilisé, le régime nominal correspondant à la vitesse maximale.

Le dimensionnement (la conception d'un système) s'effectue par rapport au régime dynamique particulier qu'est le régime nominal. L'élaboration de modèles conduit dans ce cas à l'optimisation de conception.

Remarque : un régime nominal n'est pas forcément optimal.

3.3 Les modèles de transfert en régime dynamique stationnaire

En généralisant ce qui vient d'être vu dans les paragraphes 3.1 et 3.2, et en appelant X la variable d'intensité locale (pression, température, hauteur d'eau...), on s'aperçoit qu'à une différence d'intensité (un gradient) de X sera associé un flux d'une extensité Y , noté $\frac{dY}{dt}$ (pour dérivée de Y par rapport au temps).

Dans les exemples précédents ;

à un gradient de pression est associé un transfert de masse (gaz) ;

à un gradient de température est associé un transfert de chaleur (flux de chaleur)

De façon formelle, le flux est proportionnel à grad X, mais cela ne constitue qu'une approximation linéaire locale, bien que couramment admise :

$$\dot{Y} = \overrightarrow{grad}X$$

De façon plus globale, il y correspond la notion de conductance de transfert K, ou de résistance de transfert R, telle que $R=1/K$. Ici généralisée, la proportionnalité des flux à l'écart d'intensité devient :

Ces notions sont utiles pour tous réseaux de distribution, y compris l'information.

$$\dot{Y} = K \cdot \Delta X$$

4. STOCKAGE ET TRANSPORT D'ÉNERGIE

4.1. Stockage d'énergie

a) Régime instationnaire ou transitoire

La notion de stockage (ou déstockage) d'énergie est incontournable en régime instationnaire ou transitoire. Ce régime apparaît lorsque l'une des contraintes externes au système est changée (changement de régime ; commande). Ce changement de régime peut prendre des formes très variées.

Le régime transitoire s'étend dans le temps de l'instant initial de la perturbation, jusqu'à l'instant où le système atteint un nouvel état d'équilibre dynamique stationnaire, si cela est possible.

Des exemples de telles évolutions sont :

- ❑ des adaptations au chauffage ou au refroidissement d'habitats ou de locaux ;
- ❑ des accélérations ou décélérations de véhicules ;
- ❑ des mises en régime (ou arrêt) de machine.

On retiendra que :

Le régime transitoire d'un système ou d'un procédé par rapport à une propriété suppose que celle-ci observée localement, va varier dans le temps, jusqu'à rejoindre un nouvel état d'équilibre dynamique (voire d'équilibre avec l'environnement).

b) **Notion de constante de temps**

Les phénomènes transitoires peuvent être lents ou rapides. Dans le domaine de l'énergie, les transitoires thermiques sont plutôt lents, les transitoires mécaniques sont plutôt rapides, les transitoires chimiques sont très rapides (combustion).

Il apparaît alors des constantes de temps ou des temps caractéristiques des phénomènes qui représentent les échelles de temps des phénomènes étudiés.

Un cas particulier est la relaxation d'un système vers l'ambiance. On parle alors de temps de relaxation : celui-ci mesure la durée mise par le système pour passer de l'état initial à l'état d'équilibre avec l'ambiance, pour la propriété relaxée.

L'équilibre correspondant est un équilibre qui peut être partiel. L'équilibre thermodynamique par rapport à l'ambiance suppose la relaxation de toutes les propriétés par rapport à cette ambiance.

c) Notion de capacité

Par opposition à une énergie flux (l'électricité est l'exemple le plus courant), l'énergie stock suppose des réservoirs, notamment :

- ❖ réservoir de liquide (combustibles pour les transports, château d'eau, lac de retenue, réservoir d'énergie potentielle gravifique) ;
- ❖ réservoir de gaz (stockage sous pression) ;
- ❖ stockage solide (énergie fossiles : charbon, lignite, minerais radioactifs ;
- ❖ énergie biomasse : bois, matières végétales dont pailles ; énergie chimique : piles sèches) ;
- ❖ réservoir de chaleur (chauffe-eau à accumulation).

Il apparaît alors la notion de capacité, massique chimique, thermique, électrique : la capacité représente alors un réservoir pour une extensité donnée.

Toute forme d'énergie peut donner lieu dans le principe à accumulation. Toutefois, les capacités mises en œuvre restent finies, et en conséquence, leurs réserves énergétiques épuisables, d'où la nécessité d'une bonne évaluation et gestion des stocks pour une valorisation optimale de l'énergie.

4.2 Le transport d'énergie

Le transport d'énergie est une opération intimement liée à la possibilité de stockage de l'énergie correspondante.

Le transport en réservoir est une opération bien connue pour de nombreux combustibles fluides. Le transport en phase gazeuse nécessite quant à lui, pour des raisons d'encombrement, des conditions très différentes de l'ambiante (pressions plus élevées).

C'est en particulier un des problèmes actuels du vecteur énergétique émergent, l'hydrogène, ce qui induit des difficultés de mise en œuvre.

5. RETOUR SUR LES USAGES DE L'ENERGIE

Selon les perspectives énergétiques (voir chapitre 2) il y a trois grands postes d'utilisation de l'énergie :

- habitat ;
- transport ;
- industrie.

Ces trois postes font apparaître la nécessité d'une adéquation de la production à la demande énergétique, conformément au schéma commun présenté dans la figure 2.

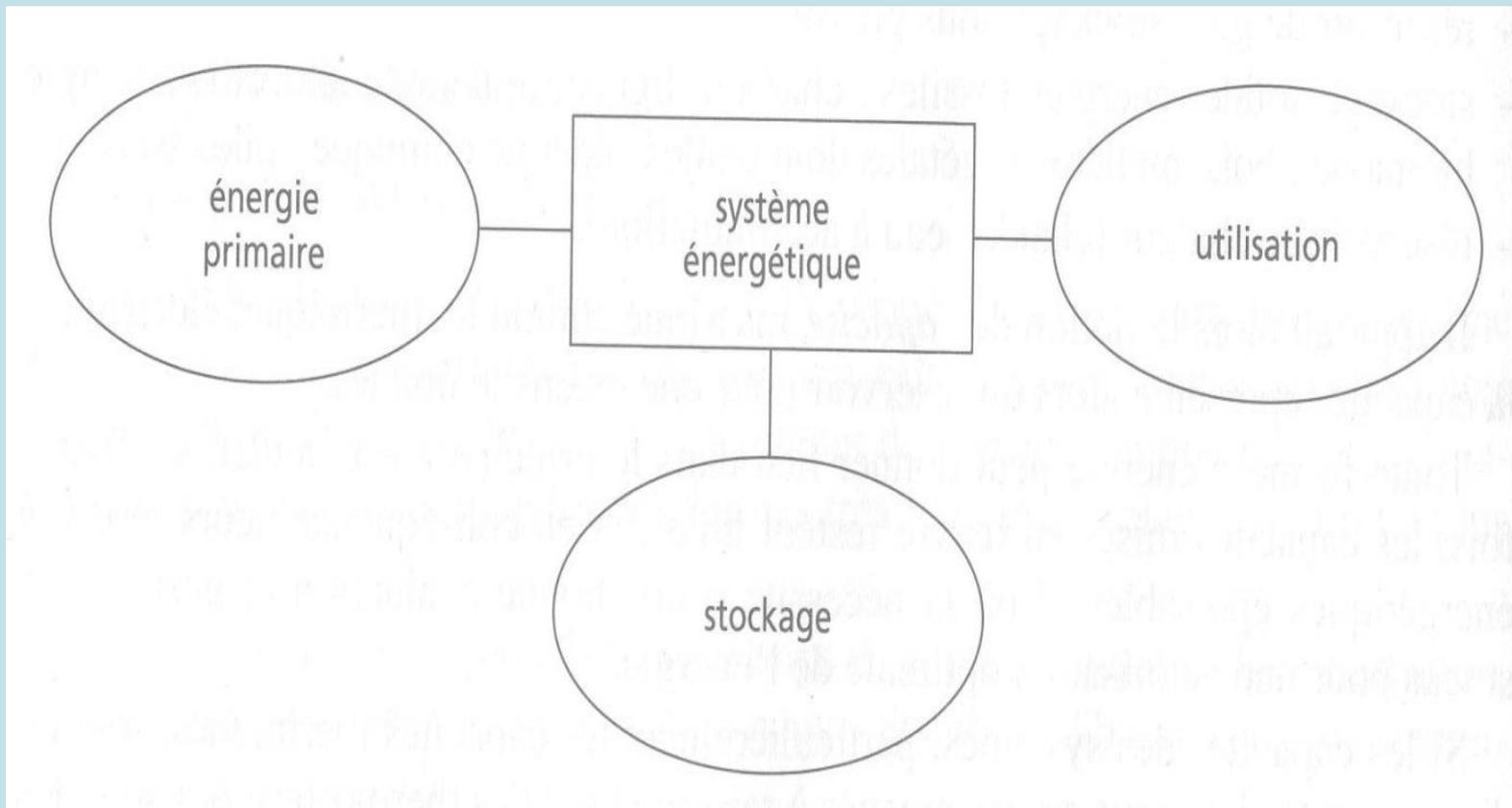


Figure 2 : Produit et usage de l'énergie : motif élémentaire

Le schéma de la figure 2 représente une production décentralisée d'énergie qui a pour but de minimiser les opérations de transfert et de transport, mais il ignore le problème de distribution associé aux systèmes de production centralisée.

La production décentralisée (ou de proximité) est une approche locale, basée souvent sur un micro (ou nano) système, dont on cherchera une forte efficacité de conversion à la conception et au fonctionnement, sachant que l'efficacité de distribution est favorable.

La production centralisée, au contraire, bénéficie d'un effet d'échelle (mégasystème) favorable à une forte efficacité de conversion, au détriment d'une efficacité de distribution moindre (pertes par transfert et / ou transport), vu la nécessité d'un réseau de distribution vers les utilisateurs. Il apparaît de plus l'importance cruciale de la gestion des flux en temps réel, ce qui reste plus complexe pour un système en réseau, et confirme l'intérêt des capacités du stockage quand il est possible.

On notera qu'en production décentralisée, l'adaptation de la production à la demande peut éviter le recours au stock en mutualisant les systèmes et les usages par le concept de réseau local.

Autres définitions et appellations

Définition 1 : Différentes formes d'énergie

Energie primaire

C'est l'énergie n'ayant subi aucune conversion.

La production primaire d'énergie correspond :

- ❖ à l'extraction d'énergie puisée dans la nature (charbon, gaz, pétrole) ;
- ❖ par extension, à la production de certaines énergies dérivées.

➤ L'importation de minerai d'uranium ne représente que 5% du coût du kWh produit,

➤ La valeur ajoutée de la production d'électricité d'origine nucléaire est donc nationale, elle est comptabilisée dans les énergies primaires.

➤ L'électricité dite primaire provient de centrales nucléaires ou hydrauliques, et aussi d'origine photovoltaïque, éolienne, géothermique.

❖ Aux Energies Renouvelables Thermiques (EnReTh), c'est-à-dire aux énergies dites renouvelables autres que l'hydraulique, l'éolien et le photovoltaïque.

Il s'agit principalement du bois de chauffage, des déchets urbains et industriels, de la géothermie valorisée sous forme de chaleur, du solaire thermique, des résidus de bois et de récoltes, du biogaz et des biocarburants.

L'électricité d'origine hydraulique, éolienne, solaire photovoltaïque et géothermiques, bien que renouvelable est classée dans électricité.

Energie secondaire

C'est une énergie obtenue par la transformation d'une énergie primaire au moyen d'un système de conversion .

Par exemple, une centrale thermique produit de l'électricité (énergie secondaire) à partir de pétrole ou de charbon (énergie primaire).

Energie finale

C'est l'énergie délivrée aux consommateurs pour être convertie en énergie utile (électricité, essence, gaz, gazole, fioul domestique, etc.)

Energie utile

C'est l'énergie dont dispose le consommateur, après la dernière conversion, à partir de ses propres équipements (traction automobile par exemple).

Méthodologie de compatibilité énergétique

On utilise, selon la règle commune aux organisations internationales, le **Joule ou la tonne équivalent pétrole (tep)** pour comparer des formes d'énergie différentes. Il est plutôt de coutume d'annoncer les quantités d'énergies en tep et ses multiples.

Les coefficients d'équivalence tiennent compte des pouvoirs calorifiques inférieurs (PCI) des différentes formes d'énergie.

Pour l'électricité, on distingue trois cas :

L'énergie produite par une centrale nucléaire est comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production.

Le rendement théorique de conversion des installations est pris égal à 33%. Il s'agit de l'énergie disponible à la source chaude.

Détermination du coefficient d'équivalence

On sait par ailleurs que $1\text{MWh} = 3,6 \text{ GJ}$

□ Le pouvoir calorifique du pétrole brut est pris égal à **42 GJ/t**.

Selon la méthode du contenu énergétique, le coefficient d'équivalence est égal à **$3,6/42=0,086 \text{ tep} / \text{MWh}$** .

□ Le mégawatt-heure d'électricité nucléaire est donc, selon les règles de la comptabilité internationale, équivalent à :

$0,086 / 0,33 = 0,2606 \text{ tep} / \text{MWh}$.

□ L'énergie produite par une centrale à géothermie est comptabilisée de la même manière que précédemment, mais avec un rendement théorique de conversion de 10%, soit le coefficient de substitution de $0,086 / 0,10 = 0,86$ tep / MWh.

□ Toutes les autres formes d'électricité (production par une centrale thermique classique, hydraulique, éolienne, photovoltaïque, etc.) sont comptabilisées selon la méthode du contenu énergétique, avec le coefficient $0,086$ tep / MWh .

fin du chapitre