

Les diverses définitions de l'énergie

1 Conventions

Pour le physicien l'énergie se mesure simplement en Joules ou en ses multiples : Méga, Giga, Tera (soit mille Giga). Pour l'électricien on utilisera plutôt le Watt-heure ou ses multiples. 1 Watt-heure (Wh) vaut 3600 Joules. Mais tout cela est trop simple pour les économistes ! Ils utilisent généralement comme unité pratique la Tonne Equivalent Pétrole (tep) qui est l'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole. Ce pétrole est d'ailleurs un pétrole théorique qui veut représenter une composition moyenne du pétrole. 1 tep vaut environ 42 Giga Joules (GJ). On obtient alors le tableau de correspondance :

	Giga Joule (GJ)	Giga Watt-heure(GWh)	Tonne équivalent pétrole (tep)
1 GJ vaut	1	$2,77 \cdot 10^{-3}$	0,0238
1 GWh vaut	3600	1	85,7
1 tep vaut	42	0,0117	1

Tableau 1

Equivalences entre les unités d'énergie les plus courantes

Les combustibles fossiles ont différentes valeurs énergétiques mesurées en tep. En général la tonne de pétrole a une valeur énergétique proche d'une tep, mais pas exactement. Par exemple une tonne de pétrole d'Arabie Saoudite vaut 1,016 tep, mais une tonne de pétrole norvégien, 1,026 tep. Une tonne d'essence est équivalente à 1,07 tep et une tonne de diesel à 1,035. Le charbon a un contenu énergétique sensiblement inférieur à celui du pétrole et la tonne équivalent charbon (tec) ne vaut que 0,69 tep.

La complexité ne s'arrête pas là. Les économistes distinguent aussi l'énergie utile, l'énergie finale et l'énergie primaire.

1.1 Un exemple

Pour définir les différentes formes d'énergie utilisées par les économistes il est éclairant de partir d'un exemple concret. Celui, par exemple, une voiture d'une tonne gravissant un col de 1000 mètres de haut. L'énergie utile déployée par cette voiture est $9,81 \cdot 10^6$ Joules soit encore 2,725 kWh ou 233 grammes équivalent pétrole (233 gep ou 0,233 kgep. Elle est indépendante de la vitesse et de la longueur du parcours. Manifestement elle ne tient pas compte de la friction, ni de la résistance l'air, ni du rendement du moteur. Supposons maintenant que la longueur du col soit de 10 km et que la voiture consomme 20 kgep aux cent kilomètres en montée (un peu plus de 20 litres au cent). On voit que l'énergie consommée, celle que paiera l'utilisateur appelée énergie finale vaut presque dix fois plus que l'énergie utile (environ 2 kgep au lieu de 0,233). Supposons que, dans le cas considéré, le rendement du moteur thermique soit de 25%. L'énergie mécanique produite par le moteur vaut donc 0,500 kgep. On voit que, dans ce cas, 0,267 kgep équivalent pétrole sont, en réalité, utilisés pour surmonter friction et résistance de l'air. Si le moteur était un moteur électrique de rendement 70% l'énergie finale est ramenée à 0,7 kgep au lieu de 2 dans le cas du moteur thermique.

Remarquons qu'en terrain plat l'énergie utile ainsi définie est nulle ! On peut certes introduire une vitesse de déplacement, et donc une valeur minimum de l'énergie nécessaire pour le déplacement à vitesse donnée, celle du travail à faire contre la résistance de l'air. Mais la valeur de ce travail dépend du Cx du véhicule et n'a donc pas une valeur définie. Il y a là de la marge pour améliorer l'efficacité énergétique, aussi bien d'ailleurs que sur le rendement du moteur.

Mais l'histoire ne s'arrête pas là. Pour extraire le pétrole, le raffiner, le transporter et le livrer à la pompe il faut une énergie supplémentaire. En l'ajoutant à l'énergie finale on obtient l'énergie primaire. Dans le cas présent l'énergie supplémentaire est de l'ordre de quelques dizaines de pour cent de l'énergie finale. Retenons donc une énergie primaire de 2,2 kgep. Dans le cas du moteur électrique la situation devient vite compliquée. Si l'électricité est produite par un barrage hydroélectrique le rendement peut atteindre 90%, et l'énergie primaire vaut 0,77 kgep. Si l'électricité est produite par une centrale thermique ou une centrale nucléaire de rendement égal à 33% l'énergie primaire vaut alors 2,1 kgep. Mais, en général, on ne sait pas par quelle installation l'électricité est produite. La relation entre énergie finale et primaire est alors définie de manière conventionnelle.

1.2 Energie finale

L'énergie finale est donc celle utilisée par l'utilisateur final (autrement dit celle qui lui est facturée), peu importe l'usage qu'il en fait. Par exemple l'usage final de l'électricité se mesure en kWh qu'il s'agisse du chauffage des locaux ou des aliments ou du fonctionnement d'un ordinateur. Le rendement de cet utilisation n'intervient donc pas explicitement : le kWh utilisé avec des ampoules électriques standard est le même que celui utilisé avec des lampes à faible consommation même si, dans ce dernier cas la quantité de lumière émise est cinq fois plus importante. On peut, bien entendu, traduire les kWh en tep. Ainsi, une installation de chauffage électrique de 1 kW fonctionnant continûment pendant un an conduit à une énergie finale de 8,76 MWh, soit, en utilisant le **Tableau 1**, à 0,75 tep. Il est sous-entendu que l'utilisation d'un chauffage électrique consommant 8,76 MWh donnerait le même niveau de confort que celui d'un chauffage au fuel brûlant 0,75 tep, alors que, bien évidemment, il faudrait tenir compte de l'efficacité du chauffage au fuel, en particulier du rendement de la chaudière, alors que pratiquement toute l'énergie du chauffage électrique sert à chauffer l'air ambiant. On voit que cette pratique défavorise, en général, l'utilisation de l'électricité pour ses utilisations substituables, telles que le chauffage des locaux et les transports. Cette remarque est encore plus pertinente si l'on considère l'énergie primaire.

1.3 Energie primaire

L'énergie primaire est, en principe, l'énergie nécessaire pour produire l'énergie finale. A titre d'exemple considérons la production d'électricité à l'aide d'une centrale au fuel. Reprenons le cas ci-dessus d'une installation de chauffage électrique consommant une énergie finale $E_F = 8,76$ MWh, soit 0,75 tep par an. Le courant est produit par une centrale qui a un rendement R . Des pertes P sont inévitables pendant le transport depuis la centrale jusqu'au lieu d'utilisation. Il s'ensuit que l'énergie primaire qu'il faut dépenser pour fournir E_F est :

$E_R = \frac{E_F}{R(1-P)}$. Par exemple, l'AIE¹ choisit $R(1-P) = 0,33$. Il s'ensuit que dans le cas de notre

exemple, l'énergie primaire consommée sera 2,25 tep par an. Au contraire dans le cas de l'utilisation d'une chaudière au fuel on fait l'hypothèse qu'énergie finale et primaire sont identiques, en tenant compte toutefois des consommations liées au transport et au raffinage. On voit donc que, pour toutes les applications substituables, l'évaluation, à service équivalent, des performances énergétiques est systématiquement défavorable à l'électricité, en ce sens que l'utilisation de l'électricité apparaît comme la plus gaspilleuse d'énergie primaire.

Pour l'AIE, toutefois, ceci n'est pas toujours vrai et dépend de la technique utilisée pour produire l'électricité. Si le facteur $R(1-P)$ est pris égal à 0,33 pour les combustibles fossiles et

¹ Agence Internationale de l'Energie

nucléaire, il est pris égal à l'unité pour l'hydroélectricité, l'éolien et le photovoltaïque. Pour le géothermique le désavantage est encore plus grand que pour les combustibles fossiles et le nucléaire puisque l'AIE choisit une valeur de $R(1-P)$ de 0,1.

L'IIASA² n'utilise pas les mêmes conventions que l'AIE puisqu'elle retient des valeurs de $R(1-P)$ variant entre 0,3 et 0,4. En effet l'IIASA estime que pour une comparaison valable entre les diverses méthodes de production d'électricité, il est préférable de déterminer la quantité de combustible fossile, le pétrole par exemple, qui serait nécessaire pour produire la même quantité d'électricité. C'est ainsi que pour le nucléaire et l'hydroélectrique elle retient la valeur de 0,4 et plutôt de 0,3 pour le charbon. Ces différentes valeurs de $R(1-P)$ reflètent essentiellement les dépenses énergétiques de production du combustible, nulles pour l'hydroélectricité et maximum pour le charbon (essentiellement à cause du transport du charbon).

En France les facteurs de conversion entre énergies finales et primaires sont définis par la Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières (DGEMP) du ministère de l'industrie. Pour l'électricité, jusqu'en 2001, la France appliquait strictement, depuis les premiers bilans énergétiques, la méthode de « l'équivalent primaire à la production » : quelle que soit l'origine de l'énergie électrique considérée, quel que soit son usage, un coefficient de substitution unique était utilisé. Ce coefficient était fixé à 0,222 tep depuis 1972 (auparavant, il était égal à 0,4 tec/MWh, soit 0,27 tep/MWh). Autrement dit, l'électricité était comptabilisée dans les bilans de l'Observatoire de l'énergie, à tous les niveaux (production, échanges avec l'étranger, consommation), avec l'équivalence 0,222 tep/MWh. L'électricité était ainsi comptabilisée comme la quantité de pétrole qui serait nécessaire pour produire cette énergie électrique dans une centrale thermique classique théorique de rendement égal à $0,086/0,222 = 38,7\%$ (contre 31,9% avant 1972). La pratique française était donc très proche de celle de l'IIASA.

En session du 14 février 2002, le Conseil d'orientation de l'Observatoire de l'Énergie a résolu d'adopter, dès la publication du bilan énergétique de 2001, la méthode commune à l'AIE, Eurostat et le CME concernant le coefficient de l'électricité. Pour l'électricité, il convient en conséquence de distinguer trois cas :

- 1 l'électricité produite par une centrale nucléaire est comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production, avec un rendement théorique de conversion des installations égal à 33% le coefficient de substitution est donc $0,086/0,33 = 0,2606$ tep/MWh ;
- 2 l'électricité produite par une centrale géothermique est comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production, avec un rendement théorique de conversion des installations égal à 10%, soit un rendement de substitution de 0,86 tep/MWh
- 3 toutes les autres formes d'électricité (production par une centrale thermique classique, hydraulique, éolienne, marémotrice, photovoltaïque, etc., échanges avec l'étranger, consommation finale) sont comptabilisées selon la méthode du contenu énergétique, avec le coefficient 0,086 tep/MWh.

on peut constater qu'avec ces conventions le remplacement de toutes les centrales nucléaires, produisant environ 400 TWh, par des centrales au fuel de même rendement se traduirait par une diminution de la consommation d'énergie de 104 Mtep à 34 Mtep ! C'est, en sens inverse, le miracle de la multiplication des pains ! Une piste à approfondir pour les tenants d'une réduction de notre consommation d'énergie. Il est vrai qu'il faut comptabiliser les rejets de

² International Institute for Advanced Systems Analysis. Institut largement utilisé pour la fabrication de scénarios énergétiques pour le Conseil Mondial de l'Energie et le GIECC

chaleur des centrales thermiques dans les bilans énergétiques.