



Article : 057

Le bilan énergétique

RAMAIN Patrice

oct.-15

Niveau de lecture : Assez difficile

Rubrique : Économie et politique de l'énergie

Déterminer les quantités d'énergie produites, transformées et consommées, au cours d'une année donnée et pour un pays ou un ensemble régional donné, définit le bilan énergétique. Mais le bilan énergétique, pour un pays et une année donnée, ne présente guère d'intérêt en soi, pour ne pas dire aucun. Pour suivre, comprendre, définir une politique énergétique, il faut disposer d'une suite de bilans annuels afin d'en saisir l'évolution. De même, pour apprécier les performances de « son » système énergétique faut-il pouvoir le comparer à celui d'autres pays de niveau économique comparable.

Les énergies qui concourent à l'approvisionnement énergétique d'un pays sont très diverses : charbon, gaz, pétrole, hydraulique, nucléaire, bois, vent, soleil et autres. Le bilan énergétique a pour vocation de les rassembler. Pour permettre ces comparaisons et/ou ces analyses spatio-temporelles, il faut en premier lieu réunir toutes ces énergies à l'intérieur d'un cadre comptable « harmonisé », « structuré », qui pour l'heure va de l'approvisionnement à la consommation finale. Ces deux prérequis - évolution temporelle et comparaison spatiale - conditionnent, en second lieu, la principale convention qui est à la base de la construction du bilan énergétique : le recours à une unité commune de mesure.

1. Le cadre comptable

Idéalement, le bilan énergétique devrait réunir toutes les énergies mises à la disposition d'un territoire et recenser toutes les opérations qui concourent à la destruction finale d'une source d'énergie. Généralement le cadre comptable regroupe en colonne les sources d'énergies (charbon, pétrole, gaz et autres), et en ligne les ressources et emplois de ces énergies, mais la présentation de ce cadre comptable varie d'une institution internationale à l'autre : Organisation pour la Coopération et le Développement Economique (OCDE) et Agence Internationale de l'Energie (AIE)¹, Union Européenne –EUROSTAT², Organisation des Nations Unies (ONU)³.

1.1. Les sources énergies retenues

Certaines sources existent à l'état naturel comme le charbon, d'autres sont le résultat d'une transformation, comme le coke. L'usage prévaut de qualifier les premières d'énergies primaires, les secondes d'énergies dérivées ou secondaires. Cet usage est aussi une convention forte puisque l'électricité hydraulique, voltaïque, ou produite par le vent, les marées et la houle sont réputées énergies primaires. Cette convention, relativement récente, résulte de l'ensemble des réflexions relatives aux coefficients d'équivalence (voir plus loin) ; elle peut se justifier ainsi : en l'espèce, l'électricité est la seule forme sous laquelle les énergies hydraulique, voltaïque, éolienne ou marine sont techniquement et économiquement utilisables.

Le tableau 1 présente, par classe de produits, les différentes sources d'énergies retenues par les agences internationales. Chaque ligne renvoie à une colonne, au nombre de 29 pour EUROSTAT, 11

¹ IEA Statistics. *Energy Balances of OECD Countries*

² EUROSTAT. *Energy balance sheets*

³ United Nations. Statistics Division. *Energy Balances and Electricity Profiles* <http://unstats.un.org/unsd/energy/>

pour l'AIE-OCDE, et 14 pour l'ONU. Il est clair que très souvent - hors le cas, parfois, d'EUROSTAT - le "produit" énergétique retenu est déjà un agrégat : la colonne "Produits pétroliers" de l'AIE-OCDE, par exemple, regroupe tous les produits dérivés du pétrole ; les notes d'ordre méthodologique qui accompagnent ces bilans définissent clairement le contenu de ces agrégats.

Tableau 1 : Comparaison des « produits » énergétiques retenus dans les bilans des organismes internationaux

	EUROSTAT	AIE-OCDE	ONU
Classe de produits	Total tous produits		
Charbons	Houille Coke lignite tourbe Charbon brun, briquettes	Charbon, tourbe	Houille, lignite, tourbe Briquettes, coke
Pétroles	Pétrole brut, LGN (*) Feedstocks	Pétrole brut, LGN, Feedstocks...	Pétrole brut, LGN
Produits pétroliers	Total tous produits pétroliers		
	Gaz de raffinerie, étane Gaz de pétrole liquéfiés (GPL) Essences Kérosène Naphta Gazole Fuel-oil Autres produits pétroliers	Produits pétroliers	Produits pétroliers légers Produits pétroliers lourds Autres produits pétroliers GPL, Gaz de raffinerie
Gaz	Gaz naturel Gaz dérivés	Gaz naturel	Gaz naturel Gaz dérivés
Nucléaire	Nucléaire (chaleur)	Nucléaire (chaleur)	
Energies renouvelables	Total énergies renouvelables		
	Solaire (chaleur) Géothermie (chaleur)	Hydraulique Géothermie, solaire etc...	Energie de biomasse primaire Energie de biomasse dérivée(#)

	Biomasse Energie éolienne Hydraulique Autres combustibles Chaleur dérivée	Biomasse et déchets	Autres sources d'énergie
Electricité	Electricité	Electricité	Electricité (##)
Divers		Chaleur dérivée	
TOTAL	<i>en colonne 1</i>	TOTAL	ENERGIE TOTALE
	(*) Liquides de Gaz Naturel		(#) charbon de bois (##) fait suite à Gaz dérivés

1.2. L'articulation des opérations dans le bilan global.

"Déterminer les quantités d'énergie produites, transformées et consommées" représente strictement la suite logique des opérations que recense tout bilan (global) de l'énergie, mais ces quantités sont plus ou moins globales (agrégées) ou détaillées selon les usages nationaux ou internationaux.

1.2.1. L'approvisionnement

La production primaire couvre toutes les opérations de production sur un territoire donné : extraction de charbon, de pétrole, de gaz ou génération d'électricité hydraulique, nucléaire, éolienne. S'y ajoute le solde net des échanges (importations – exportations de ces mêmes sources d'énergie). Le transport international, tant maritime qu'aérien (soutes), est ou non inclus dans l'approvisionnement d'un pays donné ; les variations de stocks au cours de l'année considérée s'ajoutent ou se retranchent selon le signe qui les précède. A noter le raffinement d'EUROSTAT qui inclut dans l'approvisionnement des produits de récupération résultant de l'exploitation du charbon ou du pétrole, mais retranche divers produits utilisés lors de la production, en général des hydrocarbures. Le total de l'approvisionnement est qualifié de consommation intérieure brute ou de production primaire totale ou de total des besoins énergétiques (tableau 2).

Tableau 2. Opérations relatives à l’approvisionnement énergétique

Classe d'opérations	EUROSTAT	AIE-OCDE	ONU
Approvisionnement	Production primaire	Production	Prod. d'énergie primaire
	Récupération	Importations	Importations
	Importations	Exportations	Exportations
	Variations de stocks	Soutes maritimes internationales.	Soutes
	Exportations	Transports aériens internat.	Variations de stocks
	Soutes maritimes internationales	Variations de stocks	
	Utilisation directe		
	Consommation intérieure brute	Production primaire totale	Total besoins énergétiques

1.2.2. Les transformations

Une part importante de l'approvisionnement est transformée pour donner des énergies dérivées (ou secondaires). Au premier abord la manière de faire d'EUROSTAT diffère radicalement de celles des autres institutions puisque cet organisme distingue les entrées en transformation et les sorties. Sur un plan comptable les entrées sont négatives, au contraire des sorties. Mais à y regarder de plus près la différence est moindre : en effet, en fusionnant "entrées" et "sorties" on retrouve quasiment la suite des transformations retenues dans les cadres comptables de l'AIE-OCDE ou de l'ONU. Par ailleurs, hors les pertes de distribution et l'autoconsommation, toujours négatives, il convient d'être attentif au signe algébrique des rubriques échanges, transferts, retours. In fine l'agrégat résultant mesure la consommation finale (tableau 3).

Tableau 3 : Opérations relatives à la transformation

Classe d'opérations	EUROSTAT	AIE-OCDE	ONU
Transformation	Entrées en transformation		Energie convertie
	Centrales therm. publiques	Transferts	Briqueteries
	Centrales therm. auto-producteurs	Ecart statistiques	Cokeries
	Centrales nucléaires	Centrales électriques	Usines à gaz
	Briqueteries	Centrales de cogénération	Hauts-fourneaux
	Cokeries	Centrales chauffage urbain	Raffineries
	Hauts-fourneaux	Hauts-fourneaux	Usines de liquéfaction
	Usines à gaz	Usines à gaz	Centrales électriques
	Raffineries	Cokeries, briqueteries	Centrales thermiques
	Centrales chauffage urbain	Raffineries	Autres transformations
		Pétrochimie	
	Sorties de transformation	Usines de liquéfaction	Transferts nets
	Centrales therm. publiques	Autres transformations	Autoconsommation
	Centrales therm. auto-producteurs	Autoconsommation	Pertes de distribution
	Centrales nucléaires	Pertes (de distribution)	Produits pour la pétrochimie
	Briqueteries		Ecart statistiques
	Cokeries		
	Hauts-fourneaux		
	Usines à gaz		
	Raffineries		
	Centrales chauffage urbain		
	Echanges, transferts, retours		
	Echanges entre produits		
	Produits transférés		
	Restitution de la pétrochimie		
	Autoconsommation		
	Pertes de distribution		
	Disponible pour la consommation finale	Consommation finale totale	

Est-ce à dire que l'approche d'EUROSTAT est plus complète que celle de l'AIE-OCDE ? Sans doute, sous réserve d'un nombre restreint de productions liées, mais EUROSTAT ne permet pas, dans son cadre comptable, de connaître l'origine de l'électricité produite⁴, au contraire de l'AIE-OCDE qui le

⁴ Des données très complètes sont cependant disponibles au format EXCEL. Elles permettent presque

précise hors cadre comptable, mais en bas de page de chaque bilan (tableau 4).

Tableau 4 : Opérations relatives à la production d'électricité

Classe d'opérations	EUROSTAT	AIE-OCDE	ONU
Electricité et Chaleur		Production électrique (TWh)	
		Centrales électrique	
		Cogénération	
		Production de chaleur (PJ)	
		Cogénération	
		Centrales chauffage urbain	

1.2.3. La consommation finale

Sauf spécifications contraires comme dans le cas de l'ONU, la consommation finale distingue la consommation finale non énergétique et la consommation finale énergétique. La première concerne essentiellement des hydrocarbures destinés à la pétrochimie, pour la production de divers produits organiques de synthèse. La consommation finale énergétique se subdivise généralement en industrie, transports, autres secteurs, chacune de ces rubriques étant ventilée à son tour plus ou moins finement (tableau 5).

Tableau 5 : Opérations relatives à la consommation finale

Classe d'opérations	EUROSTAT	AIE-OCDE	ONU
Consommation finale	Cons. finale non énergétique	Industrie	Consommation finale
	Industrie	Sidérurgie	Industries et construction
	dont pétrochimie	Chimie, pétrochimie	Sidérurgie
	Cons. finale énergétique	Métaux non ferreux	Chimie
	Industrie	Produits minéraux non métal.	Autres industries
	Sidérurgie	Equipement de transport	Transports
	Métaux non ferreux	Industries mécaniques	Transports routiers
	Chimie	Mines et carrières	Transports ferroviaires
	Produits minéraux non métal.	Alimentation et tabac	Transports aériens
	Extraction	Papier, pâte, imprimerie	Transports fluviaux, cabotage
	Alimentation, boisson,	Bois et produits du	Autres transports

toujours de repérer les flux entrants et les flux sortants par produit.

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/other_documents

	tabac	bois	
	Textiles, cuir, habillement	Construction	Ménages et autres conso.
	Papier et imprimerie	Textiles et cuir	Ménages
	Equipement de transport	Autres	Agriculture
	Industries mécaniques	Transports	Autres consommateurs
	Bois et produits du bois	Aviation intérieure	
	Construction	Routiers	
	Autres	Ferroviaires	
	Transports	Pipeline	
	Ferroviaires	Navigation intérieure	
	Routiers	Divers	
	Aviation internationale	Autres secteurs	
	Aviation intérieure	Résidentiel	
	Navigation intérieure	Commerces, services publics	
	Autres secteurs	Agriculture et forêts	
	Résidentiel	Pêche	
	Tertiaire	Autres	
	Agriculture et forêts	Usages non énergétiques	
	Pêche	in industrie...	
		dont feedstocks	
		in transport	
		Autres	

On remarquera le statut de l'aviation internationale dans EUROSTAT et dans l'ONU : elle devrait venir en déduction de la consommation primaire car elle s'assimile à une exportation, ce que fait l'AIE-OCDE. Si l'industrie, par ailleurs, est assez bien détaillée et comparable d'une institution à l'autre (hors ONU), elle n'en recèle pas moins des pièges comme le montre particulièrement l'exemple de la sidérurgie.

Cette industrie achète des charbons, dont une fraction va générer des gaz dérivés vendus à d'autres secteurs industriels : il convient donc de soustraire des livraisons à la sidérurgie l'équivalent des gaz cédés à d'autres secteurs, ce que prend en compte le poste transformation pour la production des gaz dérivés. Cet exemple montre l'importance qu'il faut accorder aux notes méthodologiques accompagnant la construction et la publication des bilans énergétiques, pour prévenir toute erreur d'appréciation.

1.3. Quelques indicateurs-clés

Le seul bilan énergétique permet de construire des indicateurs robustes concernant le système énergétique d'un pays. Ainsi le taux d'indépendance énergétique, rapport de la production totale d'énergie sur la consommation primaire. A titre d'exemple, ce taux, pour la France, est passé de 25% en 1973 à 53 % en 2012 alors que dans le même temps il est passé de 51% à 40 % pour l'Allemagne⁵.

⁵ IEA Statistics, *Energy Balances of OECD Countries*, Energy production/TPES

Dans le même esprit on déterminera un taux de dépendance pétrolière d'un pays, la structure de sa consommation finale par produit, son évolution au cours du temps, notamment par comparaison avec d'autres pays.

L'émission de gaz à effet de serre, en particulier le CO₂, sera grandement facilitée si l'on dispose de bilans énergétiques détaillés par produit, tant au niveau des transformations qu'au niveau de la consommation finale.

L'analyse s'enrichit en croisant agrégats énergétiques et grandeurs macro-économiques comme la population ou le PIB. Ce sera l'intensité énergétique (consommation primaire/PIB), dont le niveau élevé révèle, par exemple, la faible efficacité du système énergétique de l'économie (sous réserve évidemment des particularités de sa structure économique). Ce sera la consommation primaire (ou finale) par tête, qui illustre des écarts de développement ou de gaspillage, par comparaison temporelle ou spatiale. Encore faut-il, à propos de ces deux indicateurs, s'assurer de la cohérence dans le temps et dans l'espace de la méthodologie retenue pour agréger entre elles les différentes formes d'énergie.

2. L'unité commune de mesure

Pour l'économiste, tout flux de production, de transformation ou de consommation peut se mesurer en valeur, ce à quoi n'adhère pas le physicien pour qui il y a énergie et énergie : celle qui se transforme avec perte et celle qui se transforme sans perte, ce qui est à l'évidence incompatible avec une mesure en valeur monétaire. Mais il y a aussi et surtout le praticien, ingénieur ou économiste, qui depuis longtemps a retenu comme unité de mesure un équivalent physique "imagé" comme la tonne équivalent charbon (tec) ou la tonne équivalent pétrole (tep) ou la British thermal unit (Btu), unité de compte au pouvoir calorifique parfaitement normé. Il convient d'examiner la pertinence de ces trois points de vue pour légitimer sans ambiguïté celui qui prévaudra.

2.1. L'impossible recours à la valeur monétaire

La comptabilité nationale sait aussi bien quantifier la valeur ajoutée par les industries agro-alimentaires (IAA) que la valeur ajoutée des loyers fictifs que se versent à eux-mêmes les propriétaires occupant leurs propres logements : la monnaie peut tout. Cette homogénéisation rencontre évidemment des obstacles comme l'effet de l'inflation sur la valeur des biens et des services ou ceux des variations des taux de change, mais ils sont adroitement surmontés par le comptable national. Pourquoi alors ne pas recourir à la valeur monétaire dans la comptabilité de l'énergie ?

Le recours à la monnaie se heurte, dans ce cas, à deux difficultés supplémentaires : la rupture des prix relatifs à la suite d'innovations majeures, le mode de formation des prix selon la nature de l'énergie.

Soit à titre d'exemple le gaz de schiste (*shale gas*) aux Etats-Unis⁶. Sa production, quasi-nulle au milieu des années 2000, s'élève à 9 trillions de cubic feet (cf) en 2012, sur un total de 24 trillions de cf de gaz naturel à la même date, versus 18 trillions de cf au milieu des années 2000⁷. Dans le même temps, le prix du gaz naturel, en dollar par million de Btu⁸ est passé de 8-10 \$ à 3-4 \$. On a ainsi une quantité de gaz naturel au milieu des années 2000 de 18 valant 162 à comparer à une quantité de 24 valant 84 en 2012 ! En valeur, la production de gaz naturel a diminué de moitié, alors que la production en volume a augmenté de plus d'un tiers. Que signifie alors une mesure en valeur du gaz naturel aux Etats-Unis ?

Il faut, en second lieu, mentionner les distorsions introduites par des modes de formation des prix selon les sources d'énergie et/ou le statut de l'entreprise productrice. Le prix du pétrole brut dépend, dans le temps et dans l'espace, de conditions géologiques, du pouvoir des offreurs (l'OPEP notamment) et des acheteurs (les compagnies multinationales) ; il fluctue en fonction des marchés où il est négocié : marché au comptant (*spot*), *futures*, contrats à long terme. A un degré moindre, la situation du gaz, voire du charbon est comparable. Que signifierait l'agrégation monétaire des kWh hydrauliques, nucléaires, solaires, produits par des entreprises publiques en situation de monopole d'un côté ou privées et en compétition, de l'autre ?

Le recours à la monnaie pour mesurer la consommation ou la production d'énergie est donc un leurre. Est-ce à dire que le recours à une unité commune en terme physique se conçoit de manière univoque ?

2.2. La tentation de l'exergie

La *tec* hier, la *tep* aujourd'hui, la *Btu* dans les pays anglo-saxons, sont des unités communes de mesure de l'énergie internationalement utilisées. Ce sont des unités physiques normées : 7 000 kcal/kg PCI pour la *tec*, 10 000 kcal/kg PCI pour la *tep*⁹. Si la *tep*, désormais unité la plus usuelle, est une unité de mesure au contenu explicatif parfaitement défini, elle reste une aberration pour le physicien, non sans raison.

Qu'y a-t-il, en effet, de commun entre la *tep* de charbon, la *tep* d'électricité hydraulique ou la *tep* de chaleur géothermique ? Toutes les énergies sont exprimées en multiple de la calorie, mais ces diverses calories ont-elles la capacité de rendre le même service ? Toutes les énergies incorporées au bilan énergétique ont-elles la même efficacité pour chauffer, éclairer, entraîner une machine, mouvoir un véhicule ? La "bonne" énergie, pour le physicien, sera celle qui pourra être transformée (idéalement), sans perte, en n'importe quelle autre énergie. Au cours du temps, et selon les auteurs, ce concept a été dénommé énergie utile, énergie mécanique potentielle, *available work*, et

⁶ Annual Energy Outlook 2014, DOE/EIA avril 2014, pp MT22-MT23 <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>

⁷ trillion = mille milliards dans les pays anglo-saxons, milliard de milliards ailleurs ; CF = cubic foot (pied cube) : unité de volume qui vaut 28,3 litres

⁸ Btu = British thermal unit, unité anglo-saxonne d'énergie, valant environ 252 cal (1 054 Joule)

⁹ kcal = kilo-calories, soit 4,186 kJ ; PCI ou pouvoir calorifique inférieur et PCS ou pouvoir calorifique supérieur précisent les conditions de mesure du contenu calorifique d'une source d'énergie. Le bilan global énergétique retient le PCI de chaque énergie. Pour plus d'informations, voir :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique

aujourd'hui exergie, terme créé par Zoran Rant en 1956¹⁰, sur lequel un consensus s'est formé [article 025].

Ainsi le kWh d'électricité peut intégralement se transformer en chaleur, mais la chaleur résultante ne peut produire, tant s'en faut, la même quantité de kWh. Soit, à titre d'exemple, un chauffe-eau électrique de 100 litres qui élève la température de 15 à 65 degrés-centigrades (pour faire simple, on néglige les pertes) :

- il faut, pour ce faire, 5000 kcal ($100l * (65-15)$) qui correspondent à 5,8 kWh ($5000/860$, $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$) ; le rendement est de 100%, toute l'électricité est transformée en chaleur, sans question sur l'origine de cette électricité ;

- mais quelle énergie mécanique (mesurée en kWh) peut-on faire avec ces 5000 kcal de chaleur ? Entre en jeu le deuxième principe de Carnot qui définit le rendement du système, à savoir $(T_2 - T_1)/T_2$ ou encore $1 - (T_1/T_2)$, T_2 étant la température absolue (degré Celsius : °C) la plus élevée (ici $273 + 65 = 338$), T_1 la plus basse ($273 + 15 = 288$) ; le rendement de ce système à peine 14,8% : dans une machine idéale, la chaleur emmagasinée par le cumulus électrique ne restitue que 0,86 kWh ou encore 740 kcal.

L'intérêt de cet exemple est de montrer que le recours à l'exergie impliquerait une analyse usage par usage de toutes les consommations d'énergie. Pour illustrer encore davantage ce propos, il suffit de distinguer le gazole utilisé dans une chaudière pour l'eau chaude (et le chauffage) du gazole utilisé dans un véhicule automobile. En reprenant les données du chauffe-eau ci-dessus, il faudrait environ 0,65 litre de gazole pour le même service en eau-chaude (10 000 kcal/kg et densité = 0,84 pour le gazole, rendement 0,9), sachant que la même quantité de gazole permet le déplacement d'une voiture de plus d'une tonne sur 10 km à 120km/h ! La même quantité de gazole rend deux services non comparables entre eux. Faute de connaître tous les usages des différentes énergies le recours à l'exergie est donc exclu.

Est-ce à dire qu'elle est inutile pour l'économiste ? Est-elle vraiment absente du bilan énergétique standard ? En terme micro-économique, l'analyse exergétique est désormais davantage reconnue tant sur un plan formel que pratique, : les deux références citées le montrent bien¹¹. Par ailleurs, si le bilan énergétique prend en compte les pertes de transformations, notamment dans la production d'électricité thermique (au sens large), alors ce type de bilan recourt bien, pour partie, à l'exergie. Tenir compte des pertes de transformation est une évidence, mais selon l'usage ou la définition retenue pour l'unité commune de mesure, cette évidence n'est pas, ou n'a pas été, toujours perçue.

¹⁰ <https://en.wikipedia.org/wiki/Exergy>

¹¹ <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/18/97/01/PDF/Lallemand.pdf>

<http://www.enea-consulting.com/wp-content/uploads/ENEA-Consulting-Lexergie.pdf>

2.3. Le recours au pouvoir calorifique

Comptabiliser toutes les énergie sur la base de leur pouvoir calorifique inférieur est maintenant la règle, mais cette règle souffre parfois une exception concernant la production électrique. Dans son application stricte la règle s'appelle "méthode du contenu énergétique" ou "teneur énergétique physique" ; y déroger pour le décompte de la production électrique renvoie à la "méthode de la substitution partielle". Question subsidiaire : sont-elles toutes deux utilisées, et par qui ?

2.3.1. La méthode du contenu énergétique

Recourir au seul pouvoir calorifique inférieur, sans aucune exception, est en apparence très simple. Cette approche, résout nombre de problèmes, mais requiert quelques précautions pour l'électricité ! Que cette dernière soit d'origine hydraulique, nucléaire, photovoltaïque ou thermique, tout kWh sera comptabilisé sur la base de son pouvoir calorifique (860 kcal/kWh). Mais selon le processus de production de ce kWh, le décompte de l'énergie engendrant ce kWh suit des règles particulières :

- l'électricité produite directement par l'eau (hydraulique), le soleil (photovoltaïque), le vent (éolienne), la mer (marée, houle) se mesure en tant qu'énergie primaire sur la base du pouvoir calorifique du kWh produit ;

- s'il s'agit d'une production résultant d'un cycle thermique non conventionnel, soit actuellement le nucléaire, le solaire ou la géothermie, cette production électrique est réputée également énergie primaire ; elle est prise en compte non sur la base du contenu calorifique du kWh, mais sous la forme d'une quantité de chaleur définie à l'aide d'un rendement forfaitaire par filière : 33% pour le nucléaire et le solaire, 10% pour la géothermie ; par voie de conséquence, les pertes de transformations seront bien inscrites dans le bilan ;

- pour tout autre transformation d'énergie fossile (fuel-oil, gaz naturel, charbon) ou renouvelable (biomasse, biogaz) en électricité, énergie entrante et sortante (électricité) sont comptabilisées selon leur pouvoir calorifique strict (PCI).

A noter qu'une approche analogue est appliquée par l'OCDE ou EUROSTAT à la chaleur géothermique ou solaire à usage thermique, pour laquelle un rendement forfaitaire de 50% (géothermie) ou 100 % (solaire) est appliqué, avec les mêmes conséquences au niveau des transformations, sauf spécifications contraires d'un Etat membre.

2.3.2. La méthode de la substitution partielle¹²

Avec la méthode du contenu énergétique, une tonne de pétrole brut équivaut à 1,43 tonne de charbon environ, ou encore à 11,63 MWh. Mais peut-on parler d'une parfaite substitution entre ces différentes énergies ? De même, peut-on vraiment additionner un MWh d'origine hydraulique (0,086 tep) avec un MWh d'origine thermique conventionnel dont la production requiert environ 0,222 tep (rendement de 38,5%) ? Le kWh hydraulique ne permet-il pas une économie substantielle d'énergie fossile, comparée au kWh thermique conventionnel ? La tentation est alors grande de mesurer toute l'électricité produite sur la base de la quantité d'énergie fossile nécessaire à sa production, à l'aide d'un rendement défini par ailleurs.

Cette méthode a prévalu pour l'énergie électrique primaire jusqu'au début des années 1990 dans les grandes institutions telles que l'AIE-OCDE et EUROSTAT dont les annuaires de statistiques énergétiques sont des références. Elle a été aussi appliquée strictement en France jusqu'en 2001, tant au niveau de la production primaire qu'au niveau de la consommation finale¹³. Conséquence immédiate la plus visible : une surestimation de la part de l'électricité dans la consommation finale. A titre d'exemple, en l'an 2000 pour la France, la seule électricité d'origine nucléaire représentait 38,2 % de la consommation finale avec la substitution partielle, pourcentage ramené à 19,6 % avec l'équivalence stricte (1 kWh = 860 cal).

On peut citer également d'autres incohérences ou difficultés liées à cette méthode :

- l'impossible prise en compte des pertes de transformation pour l'électricité d'origine hydraulique puisqu'il n'y pas de pertes ;
- une quantité d'énergie sortante supérieure à la quantité d'énergie entrante dans le cas d'une production combinée chaleur-force : à lui seul le décompte de l'électricité est égal à l'énergie entrante par définition, que faire alors de la chaleur soutirée ?
- en toute logique, enfin, il faudrait définir chaque année le rendement moyen des centrales conventionnelles, pays par pays, tâche complexe pour un surcroît de précision aléatoire.

2.3.3. Quelle méthode retenir ?

D'autres pays ont sans doute, comme la France, utilisé cette méthode. Au siècle passé, de grandes institutions internationales y recouraient, mais qu'en est-il aujourd'hui ?

Bien que présentant des bilans d'une architecture légèrement différente, l'AIE-OCDE et EUROSTAT ont réuni leur savoir-faire et ont harmonisé leurs méthodes en 2005 dans un document commun¹⁴. Par ailleurs, l'AIE-OCDE, dans la note méthodologique qui accompagne la publication annuelle d'*Energy Balances of OECD Countries*, rappelle sans ambiguïté : la méthode de la substitution partielle a été abandonnée au profit de la méthode du contenu énergétique. Toujours

¹² appelée parfois "équivalence en énergie primaire"

¹³ Les équivalences énergétiques et la nouvelle méthodologie d'établissement des bilans énergétiques de la France. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/shared/pdf/Les_equivalences_energetiques_et_la_nouvelle_methodologie_d_etablissement_des_bilans_energetiques_de_la_France_cle79f5f1.pdf

¹⁴ *Manuel sur les statistiques de l'énergie* ("*Energy Statistics Manuel*"), disponible en ligne : https://www.iea.org/stats/docs/statistics_manual_french.pdf

dans le même chapitre, le choix méthodologique de l'Agence ne souffre d'aucune ambiguïté : "The principle adopted by the IEA is that the primary energy form should be the first energy form downstream in the production process for which multiple energy uses are practical" Ce principe définit clairement ce qu'il faut entendre par énergie primaire, et comment la mesurer¹⁵.

Les Nations-Unis (Statistics Division, Energy Statistics) s'appuient sur les mêmes principes¹⁶, même si le cadre comptable¹⁷ et l'unité de mesure (le TeraJoule) diffèrent.

Est-ce à dire que la méthode du contenu énergétique a complètement supplanté la méthode de la substitution partielle ? A la réflexion, la prise en compte d'un rendement forfaitaire pour l'électricité nucléaire ou géothermique ne renvoie-t-elle pas à la seconde méthode ? Aux Etats-Unis, l'Energy Information Administration¹⁸ évalue à 0,532 quadrillion de Btu les 55,855 TWh produits par la France en 2012, soit 13,4 millions de tep : ici la conversion s'effectue sur la base du rendement moyen des centrales thermiques de l'année en cours, c'est à dire selon la méthode de la substitution partielle. A noter que cet organisme met à disposition en libre accès des données énergétiques par pays, région et continent.

3. En conclusion

D'apparence simple, construit selon une architecture logique au premier abord, agrégeant les différentes énergies selon des principes bien définis, le bilan énergétique demeure une construction conventionnelle. Par là même, la connaissance de ces conventions est absolument nécessaire pour éviter des erreurs d'interprétation : pour lire correctement un bilan énergétique il faut se plonger dans les notes en bas de pages, ou dans ce qui en tient lieu, comme les développements ci-dessus, à titre introductif. La méthode du contenu énergétique se généralise, mais la méthode de la substitution partielle n'a pas complètement disparu : il suffit de se pencher sur les présupposés du diagnostic de performance énergétique (DPE) en France, et sans doute dans d'autres pays.

La législation française stipule que "les facteurs de conversion de l'énergie finale (exprimée en PCI) en énergie primaire sont les suivants : 2,58 pour l'électricité ; 1 pour les autres énergies"¹⁹. Le législateur recourt à l'équivalence à l'énergie primaire (= méthode de la substitution partielle), principe sur lequel le lecteur averti ne manquera pas de s'interroger. En effet, à une question écrite du député Jean-David Ciot sur le pourquoi de cette équivalence, le ministère de l'Écologie, développement durable et énergie fait savoir que "la méthode retenue en France est celle de substitution thermique à la source, développée par l'Agence internationale de l'énergie (AIE)"²⁰. Ignorance, ou contre-vérité ? Il suffit de remonter aux sources méthodologiques c.à.d. aux documents de l'AIE-OCDE pour avoir une réponse.

¹⁵ IEA Statistics, *Energy Balances of OECD Countries*, Part I Methodology. Ce principe était déjà clairement énoncé dès les années 1970 : P. Romain, *Réflexions critiques sur les bilans énergétiques*, Edition du CNRS, 1977, p. 93

¹⁶ https://unstats.un.org/unsd/energy/yearbook/2010/2010_xxx.pdf

¹⁷ voir par exemple le Brésil dans https://unstats.un.org/unsd/energy/yearbook/2010/2010_xxx.pdf

¹⁸ <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=6&pid=33&aid=12&cid=FR,&syid=2008&eyid=2012&unit=QBTU>

¹⁹ Arrêté du 8 février 2012 modifiant l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine (annexe 3, §3)

²⁰ Question et réponse publiées au Journal Officiel le 13 août 2013, page 8587 <http://questions.assemblee-nationale.fr/q14/14-35712QE.htm>