

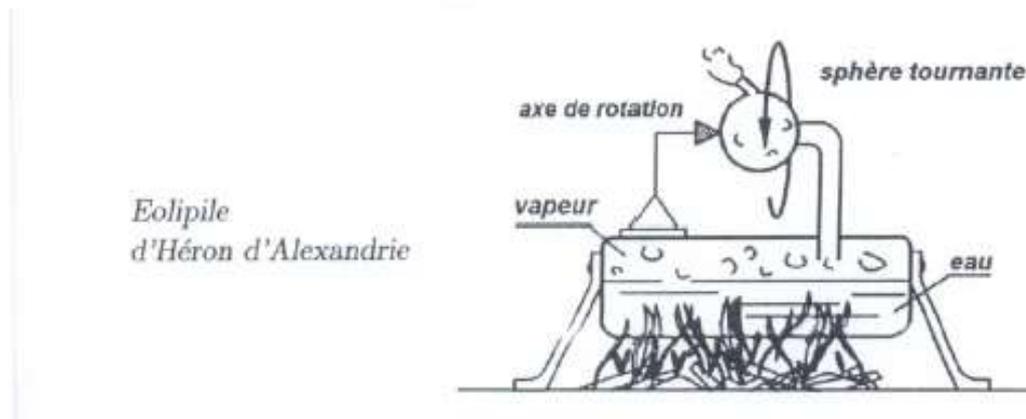
Chapitre II

Préambule énergétique

Depuis l'origine, l'homme a cherché à se libérer des tâches mécaniques pénibles. Il y est arrivé, de nos jours, bien au-delà de ses aspirations légitimes, surtout dans certaines contrées, puisque ce mieux-être tend à nuire maintenant à sa santé.

La domestication d'un certain nombre de forces naturelles a été la première récompense aux efforts déployés pour se procurer de l'énergie mécanique capable de remplacer le moteur humain (ou animal). Ce fut d'abord celle des vents avec l'apparition de la navigation à voile et des machines à vent, puis celle des cascades hydrauliques.

Si l'on n'avait disposé que de ces forces naturelles, d'état de développement mécanique de l'humanité serait aujourd'hui infiniment plus réduit, et ne serait guère supérieur à celui de l'Antiquité ou du Moyen Age.



Nos anciens connaissaient la force contenue dans la vapeur d'eau produite sous pression en utilisant l'énergie thermique fournie par une combustion, mais le début de sa véritable utilisation ne date seulement que des expériences de Denis Papin, en particulier, sur les machines à vapeur (1690) et des nombreux développements qui s'ensuivirent.

Les progrès de la civilisation mécanique se confondirent, dès lors, avec les avancées fulgurantes dans le domaine de l'énergie.

Le développement énergétique du monde a utilisé essentiellement l'énergie thermique récupérée des combustions, avant l'apparition encore récente de l'énergie thermique issue des réactions nucléaires. Les systèmes de production d'énergie mécanique et calorifique correspondants, entraînent une pollution croissante due à une demande en constante augmentation. Ces effets nuisibles, liés aux rejets dans le milieu ambiant, ont naturellement provoqué une réaction de maîtrise accrue des systèmes énergétiques.

Les exemples en sont nombreux et variés, c'est l'introduction de pots catalytiques dans les moteurs d'automobile pour n'en citer qu'un.

Par ailleurs, la prise de conscience universelle des problèmes liés à l'environnement a remis à l'ordre du jour les machines utilisant l'énergie éolienne, en particulier, qui furent jugées trop coûteuses à une certaine époque, et donc abandonnées. Le retour en grâce de l'énergie du vent, sous-produit de l'énergie solaire, va s'accélérer et participer à un certain rééquilibrage du paysage énergétique.

Les principales époques énergétiques marquantes sont celles du développement des turbines à vapeur (vers 1880-1900), des moteurs à combustion interne ensuite, puis celle plus proche des turbines à gaz terrestres aéronautiques.

1. Situation énergétique mondiale

1.1 Consommation mondiale d'énergie depuis 1850

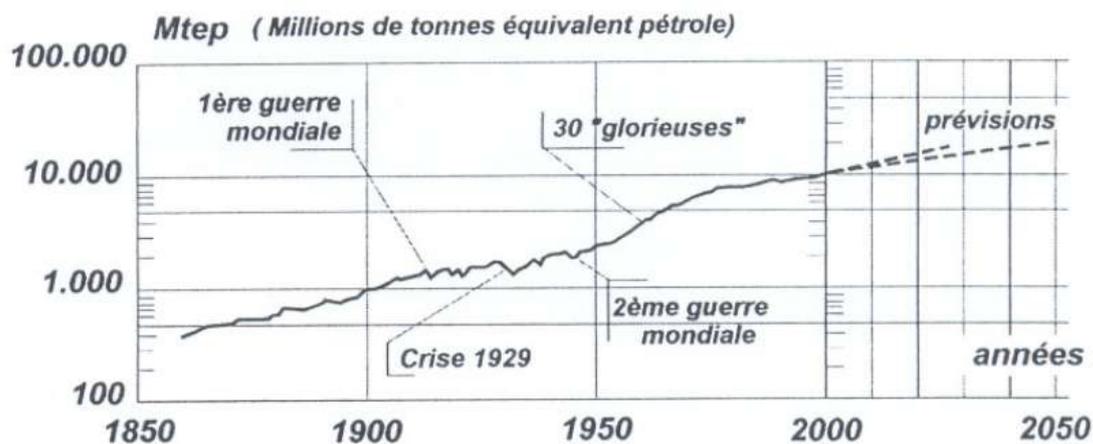


FIG. I-1 - Consommation mondiale d'énergie

L'historique quantitatif de l'évolution de la consommation mondiale d'énergie depuis 1860 est résumé dans le graphique de la figure 1 dont les ordonnées sont logarithmiques. Il montre une croissance qui est dans l'ensemble exponentielle sauf pendant 3 périodes correspondant aux deux guerres mondiales et à la crise économique de 1929-1932.

. La première guerre mondiale, qui n'a guère affecté que l'Europe, a eu un effet de récession profond, car à cette époque la partie de la consommation mondiale dans cette contrée était plus importante qu'actuellement.

- La seconde guerre mondiale, qui a déchiré également la même partie du monde n'a eu au total qu'un effet de stagnation du fait du développement concomitant pris par l'industrie des U.S.A.

- La crise de 1929-1932 qui a secoué profondément les U.S.A a eu un effet de récession supérieur à celui d'une guerre mondiale.
- On note aussi l'augmentation de la consommation énergétique durant les 30 glorieuses.

1.2 Point sur la situation énergétique mondiale

Pour avoir une information aussi exacte que possible sur le stade actuel du monde du point de vue énergétique, on doit se reporter aux statistiques établies sous les auspices de différentes organisations internationales (ONU, Conseil de l'énergie, Commission européenne, etc.).

Le tableau I-1 est un récapitulatif de la consommation en énergie primaire pour le Monde, les USA, la Chine, l'Europe des vingt-cinq, l'Europe des quinze (configuration 2001), et la France.

Tableau I-1- Chiffres-clés de l'énergie 2001, d'après [71][73]

(Mtep)	Monde	USA	Chine	Europe (des 25)	France
Charbon	2337	553	854	294	12,6
Pétrole	3510	966	232	637	94,6
Gaz	2126	576	30	391	33,8
Nucléaire	692	200	3	241	108,6
Renouvelables	1364	134	23	100	18,6
dont biomasse		67			12
dont hydraulique	221	56	22		6,4
dont éolien		2			0
dont géothermie		8			0,1
dont solaire	50	2			1
Total	10029	2429	1142	1666	268
Production d'électricité (TWh)	15476	3864	1472	2946	546
Emissions de CO2(Mt)	23683	5673	3075	3673	385

Population (Millions)	6102,6	285,9	1271,8	454	60,9
Dépendance énergétique (%)	0	28	0,8	48	50

La consommation d'énergie par habitant, issue des données du tableau I-1, fait l'objet du tableau I-2.

Tableau I-2- Consommation annuelle par habitant (Année 2001)

	Monde	USA	Chine	Europe (25)	France
tep	1,64	8,5	0,9	3,67	4,4
kW	2,184	11,32	1,2	4,89	5,86

Les esclaves mécaniques, mis par le progrès à la disposition d'un habitant moyen du monde, correspondent à l'utilisation permanente d'un peu plus de 2kW (3 chevaux- vapeur 1 en fait) ou une quantité plus grande utilisée seulement pendant une fraction du temps.

Le Français moyen, quand à lui, consomme actuellement pour tous ses usages environ 6kW, 24 heures sur 24, pendant toutes l'année.

On notera d'une part la grande diversité actuelle entre les contrées et, d'autre part, l'énorme fossé qui nous sépare de l'époque encore récente (disons 1800) où l'homme ne disposait au maximum que d'un cheval quelques heures par jour.

D'autres commentaires sur ces chiffres, un peu froids et lourds de conséquences, sortiraient du cadre imparti, et risqueraient d'emballer notre propos que l'on souhaite serein.

Cette consommation d'énergie mécanique représente la totalité de l'énergie employée pour la vie d'un habitant, c'est-à-dire comprend la part incluse :

- dans les produits de l'agriculture et de l'industrie qu'il consomme,
- à l'usage des transports,
- aux utilisations domestiques directes.

La proposition entre ces différentes activités, pour l'Europe et pour la France, fait l'objet du tableau I-3.

Tableau I-3- Energie finale par secteurs (Année 2001)

(Mtep)	Europe (des 25)	France
Industrie	312	36
Résidentiel	282	39
Tertiaire	156	25
Transport	340	52
dont routier	279	43
dont rail	9	1
dont aérien	46	7
Total	1090	152

1.3. Prévisions de consommation mondiale d'énergie

La répartition d'énergie primaire consommée, sous les différentes formes disponibles, fait l'objet de la figure I-2.

L'extrapolation des courbes des figures I-1 et I-2 est évidemment extrêmement délicate en raison des perturbations aléatoires qu'elle comporte. Néanmoins en écartant le probabilité de nouveaux accidents, on peut en étudier les développements prévisibles selon chaque grande branche d'énergie primaire.

On a prolongé (en pointillés ou ombrés) les figure I-1 et I-2 en tenant compte des prédictions statistiques nombreuses et variées, basées sur divers paramètre dont les principaux sont : démographiques, écologiques et économiques.

Sur ces figures extrapolées, sont reportées, les prédictions.

- du WEC (World Energy Council) établies jusqu'en 2100.

Des divers cas considérés par le Conseil Mondial de l'énergie, on retiendra ici, en se limitant à 2050, le scénario BAU (Business As Usual) qui suppose une croissance économique raisonnable et une certaine amélioration technologique.

- de l'EIA (Energy Information Administration).

Des trois cas étudiés, on retient ici le cas de référence établi jusqu'en 2025 [73].

- de la Commission européenne.

Le modèle POLES produit des information sur le long terme (2030) [71] .

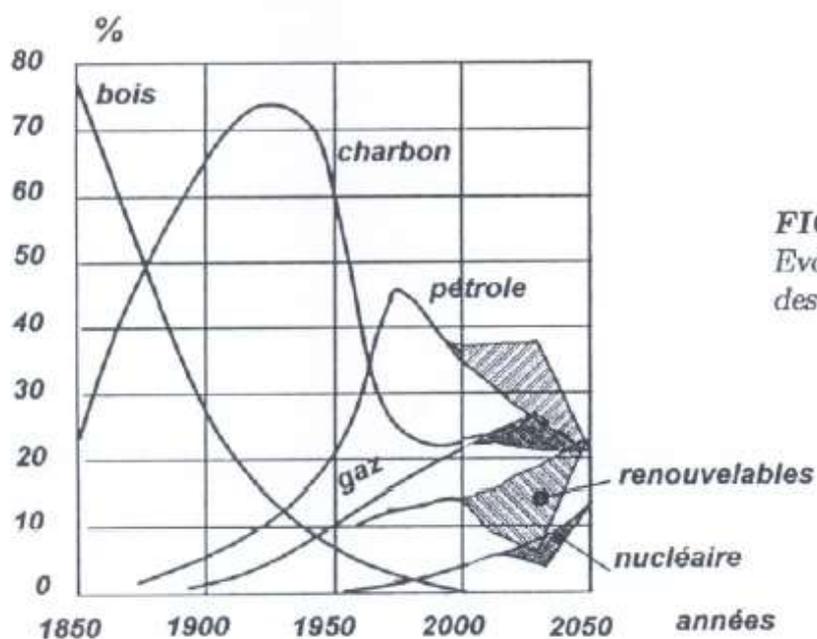


FIG. I-2
Evolution comparée
des énergies primaires

On rappelle, par exemple, dans le tableau I-4 la prévision de l'EIA [73].

Tableau I-4- Prévision mondiale EIA (Cas de référence)

Mtep	2005	2010	2015	2020	2025
Charbon	2392	2646	2891	3148	3475
Pétrole	3692	4084	4498	4926	5408
Gaz	2354	2682	3131	3614	4141
Nucléaire	728	762	795	784	751
Renouvelables	1593	1757	1885	2004	2118
Total	10759	11931	13200	14476	15893
Emission CO2 (MtCO2)	25084	27906	30909	34032	37623
Population (Millions)	6487	6874	7259	7633	7994

2. Prévisions énergétiques pour la France

Les conclusions du débat national sur les énergies (2003), sont riches d'enseignements. Les données chiffrées concernant la France sont publiées chaque année, en particulier sous l'égide

du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie. Elles sont ensuite compilées, nation par nation, par les Services de la Commission européenne.

Le scénario pour la France fait l'objet du tableau I-5 [71].

Tableau I-5- Consommation brute en France et scénario pour 2030

en (Mtep)	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Charbon	15,18	14,72	14,29	14,13	19,32	18,66
Pétrole	88,37	96,66	96,06	97,49	98,36	97,12
Gaz naturel	35,14	41,46	48,22	51,75	55,17	56,30
Nucléaire	107,1	117,9	119,7	125,7	125,6	129,1
Renouvelables	17,12	18,51	20,15	20,60	21,24	21,54
Dont	5,80	5,81	6,24	6,20	6,23	5,88
Hydraulique	11,15	12,5	13,12	13,57	13,64	13,97
Biomasse	0,01	0,04	0,63	0,66	1,18	1,39
Eolien	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,13
Solaire	0,12	0,13	0,14	0,14	0,17	0,16
Géothermie						
Total	262,9	289,2	298,5	309,7	319,7	322,7

3. Réserves mondiales d'énergie

Les estimations des réserves mondiales d'énergie dont l'objet du tableau I-6 .

On suppose dans ce tableau, basé sur la consommation en 2001, que cette consommation en 2001, que cette consommation mondiale augmentera de la même manière que les découvertes de nouveaux gisements.

Pour les énergies dites renouvelables, les durées sont théoriquement énormes, mais elles risquent de se heurter à des limites.

Elles n'ont donc pas, a priori, à figurer dans le tableau I-6.

Tableau I-6- Réserves mondiales d'énergie

	Réserves	Consommation	Durée (ans)
Pétrole	165 Gtep	3510 Mtep	50
Gaz	140 Gtep	2126 Mtep	65
Charbon	508 Gtep	2337 Mtep	260
Uranium	Au moins 2500 kt	45 kt	50

Ces estimations varient en fonction de l'évolution des techniques et des situations économiques qui rendent plus ou moins rentable l'exploitation des gisements.

Les ressources en combustibles fossiles que l'on connaît ou que l'on peut estimer découvrir semblent assez limitées. Les ressources en gaz naturel et en pétrole peuvent peut-être se révéler relativement plus importantes qu'on ne le croît, mais elles sont elles-mêmes naturellement limités.

La consommation d'uranium des 59 centrales nucléaires françaises est de l'ordre de 7500 tonnes/an. Il existe environ 450 réacteurs en service dans le monde dont la consommation est variable la technique utilisée.

4. Génération de puissance par turbomachines

Les turbomachines fournissent de l'énergie mécanique directement utilisable à des fins quelconques. Elles produisent aussi, couplées aux alternateurs, de l'énergie électrique en très grande quantité. Cette dernière forme est plus aisément comptabilisable (tableau I-7).

4.1 Capacité de production d'électricité

Afin de pouvoir comparer plus directement les situations Europe –USA, on a porté sur le tableau I-7 les capacités de génération électrique en 2001 et les projections pour 2025. Les perspectives européennes obtenues par le modèle PRIMES de la CE, sont établies jusqu'en 2030 [71].

Tableau I-7- Capacité de génération d'électricité (en GW)

		USA		Europe (des 15)	
Année		2001	2025	2001	2025
Nucléaire		98,2	102,6	120,56	101,1
Hydraulique		98,0	99,0	90,6	103
Solaire		0,35	0,93		
Eolien		4,15	15,99	15,72	113,7
Thermique	Cycles conventionnels	450,8	528,9	274,8	114,4
	Cycles supercritiques			0,0	83,3
	Cycles combinés	65,5	235,2	55,0	313,9
	Petites TAG	102	180,4	21,5	52
	Piles à combustible	0,0	0,1	0,0	0,0
	Géothermie	2,88	6,84	1,0	1,3
	Sous-total	621,1	951,4	352,4	564,9
	Dont cogénération	33,8	44,8	79,6	138,3
Total		821,9	1169,9	589,2	882,8

4.1.1 Capacité de production d'électricité en Europe

De 2000 à 2030, la puissance totale installée devrait augmenter de 373 GW dans l'Europe des 15 (elle croîtrait de 296 GW de 2001 à 2025, d'après le tableau I-7). Mais, en plus, 508 GW de nouvelles capacités devront être envisagées pour remplacer les centrales existantes à démanteler. Au total 881 GW de nouvelles centrales sont à construire, qui se répartissent comme suit (tableau I-8).

Tableau I-8- Projets européens de nouvelles centrales (2030)

Centrales à gaz	402 GW	Dont 350 GW de cycles combinés
Renouvelables	206 GW	Dont 177 GW d'éolien
Charbon (amélioré)	119 GW	
Thermique conventionnel	69 GW	
Nucléaire	89 GW	
Total	881 GW	

On voit le développement considérable prévu pour les centrales à cycles combinés. Ces centrales sont, en raison de leur puissance, presque toujours à turbines, quel que soit le combustible employé.

Le développement imposant des éoliennes est également à noter

4.1.2 Capacité de production d'électricité en France

Bien que le champ d'investigation en énergétique soit désormais l'Europe, on rappelle sur le tableau I-9 les prévisions pour la France [71].

Tableau I-9-France-Capacité de génération d'électricité (en GW)

France	Année	2000	2010	2020	2030
Nucléaire		65,68	65,68	62,95	77,21
Hydraulique		21,27	21,42	21,58	21,58
Solaire		00,08	02,42	06,32	21,58
Eolien					
Thermique	Cycles conventionnels	25,68	21,78	23,92	24,17
	Cycles supercritiques	00,00	00,37	14,84	18,31
	Cycles combinés	00,26	08,26	12,08	16,32
	Petites TAG	01,99	05,13	05,59	04,25
	Piles à combustible	00,00	00,00	00,00	00,00
	Géothermie	00,00	00,00	00,01	00,01
	Sous-total	27,92	35,54	56,43	63,06
	Dont cogénération	02,86	11, 21	13,60	18,75
Total		114,95	125,51	147,28	171,94

4.2 Types de machines génératrices de puissance mécanique

4.2.1 Eolien, Hydraulique, Solaire, Géométrie

Ces différentes formes d'énergie renouvelables, l'éolien surtout, joueront un rôle important dans la production de puissance mécanique dans le futur proche.

L'énergie récupérable des turbines hydrauliques aurait tendance à se stabiliser.

L'énergie solaire photovoltaïque ne démarrerait réellement que vers 2020-2030.

4.2.2 Cycles à vapeur d'eau, conventionnels, supercritiques et nucléaire.

Les centrales supercritiques (capable d'utiliser le charbon, les lignites, la biomasse, etc.) émergeront dans les années 2015-2030 et joueront un rôle prédominant pour suppléer au déclassement de certaines centrales nucléaires.

On note, cependant, qu'avec les hypothèses du modèle prédictif Primes [71], les technologies les plus propres :

- IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)
- PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion)

n'apparaîtront guère avant 2030.

Les turbines à vapeur utilisées dans les cycles thermiques nucléaires, font l'objet d'une partie du chapitre V.

4.2.3 Cycles combinés (ou Cycles mixtes)

Les cycles combinés GTCC : (Gas Turbine Combined Cycle) turbine à gaz – turbine à vapeur. Le développement important de ces technologies vers des installations de puissance modérée, favorise leur décentralisation.

4.2.4 Cogénération

Les cycles cogénérés fournissent de la puissance mécanique et de la chaleur avec un rendement global remarquable. Ces cycles sont notés CHP : (Combined Heat and Power)

Petites turbines à gaz

Les petites turbines à gaz sont des turbines à combustion interne utilisant le gaz naturel ou le gasoil. Leur puissance unitaire maximum est de 1000 kW.

On distingue parfois :

- Les microturbines, dont la puissance est inférieure à 150 kW
- Les miniturbines, dont la puissance s'échelonne de 150 kW à 1000kW.

Analogues dans leurs principes aux autres turbines à gaz plus puissantes.

Les réacteurs aéronautiques, bases des turbines à gaz dites sont appelés aérodérivatives.

4.2.5 Piles à combustible

Les turbomachines associées aux installations basées sur les piles à combustibles, se développeront peu, a priori, dans les trois prochaines décennies.

5. Aspects économiques et environnementaux

Outre la production d'énergie mécanique à l'aide de turbomachines, qui nous intéresse plus particulièrement dans cet ouvrage, les deux autres impératifs d'une production énergétique moderne sont : de fournir cette énergie à moindre coût, et de respecter avec scrupule l'environnement.

Le débat national sur les énergies, tenu en France en 2003, donne pour les différentes filières de production d'énergie électrique, les coûts par kWh fourni [69]. Sur le tableau I-10, les fourchettes correspondent à la diversité des coûts de production selon les choix technologiques, la puissance des installations, et les sites d'installation.

Tableau I-10- Coûts comparés des diverses filières

Coût Hors Taxes en centimes d'Euros / kWh		
Thermique	Charbon	3,7 > 4
Classique	Cycles combinés	3,3 > 4,3
Nucléaire		3,2 > 3,5
Hydraulique		2 > 10
Eolien		5 > 13
Solaire photovoltaïque		25 > 125
Biomasse		5 > 15

Toute production d'énergie produit des nuisances touchant la santé physique et morale des êtres humains, des animaux et aussi des plantes (bruits, vibrations, dégradation de la qualité de l'air, etc.)

Il est difficile, à l'heure actuelle, de classer correctement ces divers facteurs pour obtenir une comparaison objective. Par exemple, une éolienne émet du bruit mais aucune pollution de l'air alors qu'une centrale conventionnelle à charbon est assez bien insonorisée mais dégrade la qualité de l'air. Dans le même temps, des améliorations de toutes sortes diminuent ces effets néfastes, dans les éoliennes comme dans les centrales thermiques. On se limitera donc ici à une rapide comparaison des procédés de fourniture d'énergie par les cycles thermodynamique utilisant la combustion.

5.1. Emissions de polluant selon les filières

L'étude de la réduction des émissions de polluants sort du cadre de cet ouvrage prétend se consacrer au seul fonctionnement des diverses turbomachines intimement lié aux installations énergétiques.

Ces techniques de réduction sont traitées avantageusement dans des ouvrages spécialisés de combustion et de chimie industrielle.

On montre (tableau I-11) que les cycles combinés et la cogénération sont, du point de vue des émissions de polluants, les solutions les plus performantes (d'après l'officie canadien de l'environnement www.ec.gc.ca).

Tableau I-11- Emissions de polluants selon les filières

Emissions (kg/MWh)	CO ₂	NO _x	SO ₂
Charbon	1000	2	2,5
Pétrole	800	1,5	2
Gaz	550	1	0
Cycles combinés (GTCC)	350	0,4	0
Cogénération (CHP)	250	0,2	0
Biomasse	0	0,6	0,2
Charbon gazéifié (IGCC)	760	0,5	0,2

5.2. Réduction des émissions de CO2

Le gaz carbonique n'est pas un polluant, au sens normal du terme ; c'est l'augmentation progressive de sa teneur dans l'atmosphère qui pose problème.

La réduction des émissions de CO₂ impose :

D'augmentation le rendement global des centrales,

- D'utiliser des combustibles à basse teneur en carbone comme le gaz nature, ou de décarboniser le combustible avant combustion,
- de favoriser les technologies à émissions faibles (cogénération, nucléaires et énergies renouvelables).
- D'envisager de capturer un maximum de CO₂ dans les fumées (LEPP : Low Emission Power Plant) ou mieux de mettre en œuvre de nouveaux concepts (ZEPP : Zero Emission Power Plant)

Définitions et appellations

Définition 1 : Différentes formes d'énergie

E1) 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 l'électricité.

E2) 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).

E3) Energie finale

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

E4) Energie utile

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

E5) 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 [70] 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.

E6) 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 $3,6/42=0,086\text{ tep / MWh}$.

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

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

- 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 .

Références citées :

[69] *Débat national sur les énergies, France, 2003*

[70] *L'énergie en France, repères, chiffres clés, Ministère de l'économie, des finances et de l'Industrie, Edition 2003*

[71] *European energy and transport-trends to 2030*

[73] *Key word energy statistics, International Energy Agency (IEA) (2003).*