

# Chapitre I

## Préambule énergétique

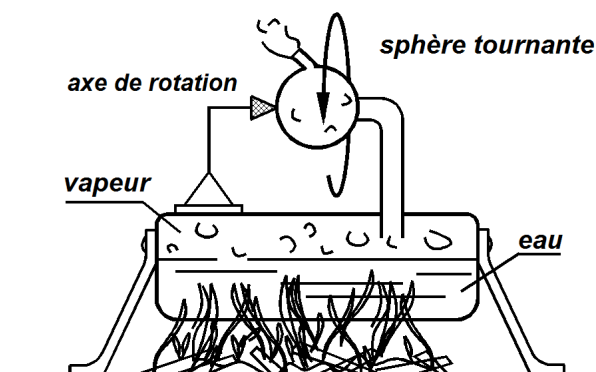
Depuis l'origine, l'homme a cherché à se libérer des tâches mécaniques pénibles.

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, l'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.

*Eolipile  
d'Héron d'Alexandrie*



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, comme on le verra.

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 et aéronautiques.

## 1 Situation énergétique mondiale

### 1.1 Consommation mondiale d'énergie depuis 1850

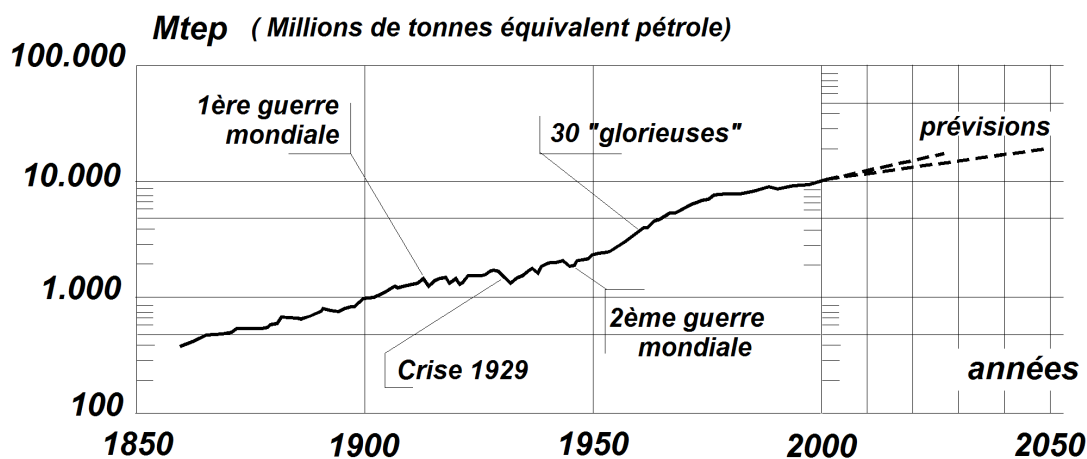


FIG. I-1 - Consommation mondiale d'énergie

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 concomittant 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 mondial 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)	Europe (des 15)	France
Charbon	2337	553	854	294	217	12,6
Pétrole	3510	966	232	637	599	94,6
Gaz	2126	576	30	391	344	33,8
Nucléaire	692	200	3	241	230	108,6
Renouvelables	1364	134	23	100	92	18,6
<i>dont biomasse</i>		67			57	12
<i>dont hydraulique</i>	221	56	22		29	6,4
<i>dont éolien</i>		2			2	0
<i>dont géothermie</i>		8			3	0,1
<i>dont solaire</i>	50	2			0	0
Total	10029	2429	1142	1666	1481	268
Production d'électricité (TWh)	15476	3864	1472	2946	2671	546
Emissions de CO <sub>2</sub> (Mt)	23683	5673	3075	3673	3174	385
Population (Millions)	6102,6	285,9	1271,8	454	380	60,9
Dépendance énergétique (%)	0	28	0,2	48	50	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 par habitant (Référence : Année 2001)**

	Monde	USA	Chine	Europe (25)	Europe (15)	France
<b>tep</b>	1,64	8,5	0,9	3,67	3,9	4,4
<b>kW</b>	2,184	11,32	1,2	4,89	5,2	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 2 kW (3 chevaux-vapeur<sup>1</sup> en fait) ou une quantité plus grande utilisée seulement pendant une fraction du temps.

Le *Français moyen*, quant à lui, consomme pour tous ses usages environ 6 kW.

<sup>1</sup>Une mesure de puissance encore utilisée parfois est la force de cheval. C'est le cheval-vapeur (ch) en France et le horse power (HP) aux USA.

Cette unité correspond à 75 kgm/s, soit environ 736 watts

Insistons, il s'agit de 6 kW, 24 heures sur 24, pendant toute 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 proportion 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)	Europe (des 15)	France
Industrie	312	271	36
Résidentiel	282	247	39
Tertiaire	156	134	25
Transport	340	315	52
<i>dont routier</i>	279	258	43
<i>dont rail</i>	9	8	1
<i>dont aérien</i>	46	44	7
Total	1090	967	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 la 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 figures I-1 et I-2 en tenant compte des prédictions statistiques nombreuses et variées, basées sur divers paramètres 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.

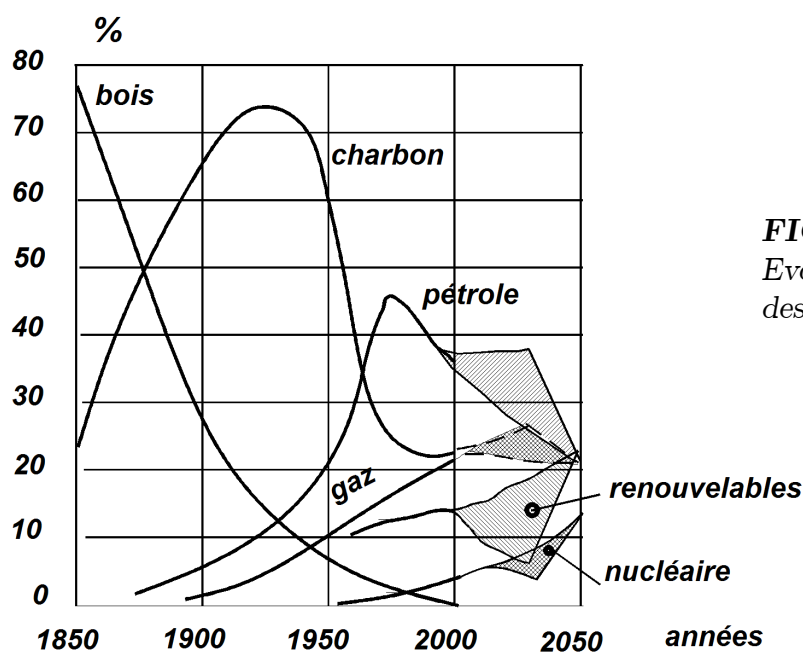
Des divers cas considérés par le Conseil Mondial de l'énergie, on retiendra ici, en se limitant à 2050, le scénario BAU (Business As Usual) qui suppose une croissance économique raisonnable et une certaine amélioration technologique.

- 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 informations sur le long terme (2030) [71].



**FIG. I-2**  
Evolution comparée  
des énergies primaires

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

**Tableau I-4 - Prévisions mondiales 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 CO <sub>2</sub> (Mt CO <sub>2</sub> )	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
<i>dont Hydraulique</i>	<i>5,80</i>	<i>5,81</i>	<i>6,24</i>	<i>6,20</i>	<i>6,23</i>	<i>5,88</i>
<i>Biomasse</i>	<i>11,15</i>	<i>12,5</i>	<i>13,12</i>	<i>13,57</i>	<i>13,64</i>	<i>13,97</i>
<i>Eolien</i>	<i>0,01</i>	<i>0,04</i>	<i>0,63</i>	<i>0,66</i>	<i>1,18</i>	<i>1,39</i>
<i>Solaire</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,13</i>
<i>Géothermie</i>	<i>0,12</i>	<i>0,13</i>	<i>0,14</i>	<i>0,14</i>	<i>0,17</i>	<i>0,16</i>
<b>Total</b>	<b>262,9</b>	<b>289,2</b>	<b>298,5</b>	<b>309,7</b>	<b>319,7</b>	<b>322,7</b>

### 3 Réserves mondiales d'énergie

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

On suppose dans ce tableau, basé sur la 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 2001	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 limitées.

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 selon 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)**

Année		USA		Europe (des 15)	
		2001	2025	2001	2025
Nucléaire		98,2	102,6	130,56	101,1
Hydraulique		98,0	99,0	90,6	103
Solaire		0,35	0,93	15,72	113,7
Eolien		4,15	15,99		
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
	<b>Sous-total</b>	621,1	951,4	352,4	564,9
<i>dont cogénération</i>		33,8	44,8	79,6	138,3
<b>Total</b>		<b>821,9</b>	<b>1169,9</b>	<b>589,2</b>	<b>882,8</b>

#### 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 294 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 dont 177 GW d'éolien
Renouvelables	206 GW	
Charbon (amélioré)	119 GW	
Thermique conventionnel	69 GW	
Nucléaire	89 GW	
<b>Total</b>	<b>881 GW</b>	

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						
Eolien			00,08	02,87	06,32	10,08
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
	<b>Sous-total</b>		27,92	35,54	56,43	63,06
	<i>dont cogénération</i>		02,86	11,21	13,60	18,75
Total			<b>114,95</b>	<b>125,51</b>	<b>147,28</b>	<b>171,94</b>

## 4.2 Types de machines génératrices de puissance mécanique

### 4.2.1 Eolien, Hydraulique, Solaire, Géothermie

Les éoliennes, les turbines hydrauliques et les autres machines produisant de l'électricité ou de l'énergie mécanique, à partir des énergies dites renouvelables, font l'objet du chapitre II consacré aux turbomachines de récupération d'énergie.

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 nucléaires

Les cycles thermiques conventionnels et les cycles thermiques supercritiques font l'objet du chapitre principal V. Les centrales thermiques classiques devraient disparaître assez rapidement au profit des centrales à cycle combiné gaz-vapeur (chapitre VIII).

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.