



# LES TECHNIQUES DE L'ÉNERGIE ET LA RÉGION LYONNAISE

Tome 1 : Rétrospective

Tome 2 : Tendances actuelles

Tome 3 : Prospective

Février 2007

Etude réalisée par Boris Chabanel

## Résumé

L'énergie tient depuis toujours une place essentielle dans le fonctionnement des sociétés. De la préhistoire, et la découverte fondatrice du feu, jusqu'à aujourd'hui, l'homme a su exploiter d'autres sources d'énergie que sa seule force musculaire. Jusqu'au Moyen-Âge, en occident, la combustion du bois et la force animale constituèrent cependant les seules alternatives. Entre le 10<sup>ème</sup> siècle et la révolution industrielle se diffusent en Europe deux nouvelles sources d'énergie renouvelables : l'énergie hydraulique (le moulin à eau), l'énergie éolienne (moulin à vent). Si l'essor de l'industrie s'appuie tout d'abord sur la première, l'hydraulique, il sera marqué par un investissement de grande ampleur dans un nouveau dispositif énergétique mis au point durant le 18<sup>ème</sup> siècle : la machine à vapeur alimentée à la houille (charbon de terre). Le 19<sup>ème</sup> siècle sera celui de la mise au point des couples énergétiques qui domineront le 20<sup>ème</sup> siècle : moteur à explosion et pétrole, moteur électrique et électricité. Au 20<sup>ème</sup> siècle, l'histoire des techniques de l'énergie retiendra essentiellement la mise au point de l'outil le plus puissant au monde pour produire de l'électricité : le réacteur nucléaire.

Dans cette histoire des techniques énergétiques, la région lyonnaise tient une place de premier plan. D'une part, elle a joué un rôle essentiel dans la mise au point et la diffusion des technologies de l'hydroélectricité (turbine, barrage fluvial, réseaux de distribution). D'autre part, elle peut aujourd'hui compter sur des acteurs majeurs sur la scène mondiale pour proposer les solutions technologiques à même de répondre aux défis de l'énergie qui se profilent, avec notamment l'Institut Français du Pétrole et le pôle de compétitivité « Axelera ».

## Sommaire

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCTION .....   | 5  |
| LE CONCEPT D'ÉNERGIE .....   | 7  |
| RETROSPECTIVE DE L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES DE L'ÉNERGIE.....  | 16 |
| LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES EN RÉGION LYONNAISE..   | 64 |
| ANNEXE : PROPOSITION DE HIÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE ..... | 80 |
| SOURCES.....   | 82 |



## Table des matières

|   |           |
|---|-----------|
| INTRODUCTION .....  | 5         |
| LE CONCEPT D'ÉNERGIE .....  | 7         |
| <b>Différentes formes d'énergie</b> .....   | <b>7</b>  |
| 1. L'énergie libre .....  | 7         |
| 2. L'énergie stockée .....  | 7         |
| <b>Les propriétés de l'énergie</b> .....  | <b>8</b>  |
| 1. L'énergie se conserve mais tend à se dissiper.....   | 8         |
| 2. L'énergie libre peut se transformer.....   | 9         |
| 3. L'énergie se mesure .....  | 10        |
| <b>Le système énergétique</b> .....   | <b>11</b> |
| 1. L'énergie primaire .....   | 11        |
| 2. L'énergie secondaire .....   | 11        |
| 3. L'énergie finale .....   | 12        |
| 4. L'énergie utile .....  | 12        |
| <b>Panorama (non exhaustif) du système technique de l'énergie aujourd'hui</b> .....   | <b>14</b> |
| RETROSPECTIVE DE L'ÉVOLUTION DES TECHNIQUES DE L'ÉNERGIE.....   | 16        |
| <b>De la préhistoire au milieu du Moyen-Age : la force musculaire et la combustion du bois comme principales sources d'énergie</b> .....  | <b>16</b> |
| A partir de -3 millions d'années, l'essor des outils de pierre .....  | 16        |
| -500 000 ans : la domestication du feu, une nouvelle source d'énergie essentielle dans l'expansion à venir de l'espèce humaine..  | 17        |
| -20 000 ans : premières utilisations de la géothermie.....  | 17        |
| -10 000 ans : la révolution néolithique de la sédentarisation par l'agriculture et l'élevage.....   | 18        |
| -8 000 ans et -7 000 ans : premières utilisations du feu pour la poterie et la métallurgie .....  | 18        |
| -5 000 ans : première utilisation de la force animale pour le transport et premiers usages du... pétrole .....  | 18        |
| -3 300 ans : invention du premier système d'écriture.....   | 19        |
| - 3 000 ans : premières utilisations du vent pour la propulsion des bateaux .....   | 19        |
| -600 ans : premières expériences portant sur l'électricité et le magnétisme .....   | 20        |
| -450 ans : premières utilisations du gaz naturel .....  | 20        |
| -300 à -100 ans : découverte des principes fondamentaux de l'énergie de la vapeur d'eau.....  | 20        |
| -200 ans : première utilisation du rayonnement solaire.....   | 21        |
| -100 ans à JC : mise au point des premiers moulin à eau.....  | 21        |
| <b>Du 10<sup>ème</sup> au 17<sup>ème</sup> siècle : la diffusion de deux nouvelles sources d'énergies renouvelables</b> .....   | <b>22</b> |
| A partir du 10 <sup>ème</sup> siècle, diffusion du moulin à eau en Europe.....  | 22        |
| A partir du 11 <sup>ème</sup> siècle, premières utilisations du charbon de terre (houille) en Europe .....  | 23        |
| A partir du 12 <sup>ème</sup> siècle, diffusion du moulin à vent et du moulin à marée en Europe .....   | 23        |
| 13 <sup>ème</sup> siècle : Saint-Étienne fait partie des premiers sites d'exploitation du charbon en France.....  | 24        |
| 14 <sup>ème</sup> siècle : invention de la poudre noire .....   | 24        |
| 17 <sup>ème</sup> siècle : nouvelles expériences portant sur l'électricité et le magnétisme .....   | 24        |
| <b>1650-1900 : le charbon et la machine à vapeur, ingrédients de l'émergence de l'économie industrielle</b> .....   | <b>25</b> |
| 1600-1800 : les moulins à eau, premiers moteurs de la révolution industrielle .....   | 26        |
| 1600-1900 : l'essor de l'exploitation du charbon.....   | 26        |
| 1650-1700 : renouveau des recherches sur l'énergie de la vapeur d'eau .....   | 27        |
| 1700-1800 : mise au point et diffusion de l'utilisation de la machine à vapeur pour le dénoyage des mines de charbon .....  | 28        |
| 1800-1900 : perfectionnement et diversification de l'utilisation de la machine à vapeur pour la production industrielle.....  | 29        |
| <b>1800-1900 : l'accélération de la dynamique industrielle ou l'apparition de nouveaux modes de transformation énergétique, de nouvelles énergies finales, de nouveaux dispositifs d'utilisation de l'énergie</b> ..... | <b>30</b> |
| 1790-1900 : mise au point de la distillation du gaz et diffusion de l'éclairage au gaz .....  | 31        |
| 1800-1900 : mise au point de la production d'électricité et invention du moteur électrique .....  | 32        |
| 1800-1900 : la transformation des dispositifs d'exploitation des énergies renouvelables .....   | 36        |
| 1850-1900 : redécouverte des propriétés du pétrole et mise au point du moteur à explosion .....   | 41        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1900-2000 : le développement des techniques de production d'hydrocarbures, répondre à l'essor de l'automobilité.....</b>                                    | <b>43</b> |
| 1920-1973 : l'essor de la consommation de pétrole nécessite le développement de l'industrie pétrolière.....  | 43        |
| 1973-2000 : de la modération au nouvel essor de la consommation de pétrole.....  | 44        |
| 1940-2000 : essor de la production de gaz naturel.....   | 46        |
| <b>1900-2000 : le développement des techniques de production d'électricité, répondre à l'essor de l'électroménager et de l'électronique.....</b>               | <b>46</b> |
| 1900-2000 : le développement de l'hydroélectricité en France.....  | 47        |
| 1900-1946 : les débuts de la distribution d'électricité en France.....   | 49        |
| 1896-1945 : de la découverte de la radioactivité aux premières utilisations de la réaction nucléaire.....  | 50        |
| 1945-1990 : le développement de l'exploitation civile de l'énergie nucléaire.....  | 54        |
| Depuis 1990, l'industrie nucléaire dans un creux de cycle, avant un nouvelle étape de développement ?.....   | 58        |
| 1945-2000 : le développement des centrales thermiques au gaz naturel.....  | 59        |
| <b>1970-2000 : les énergies face aux impératifs de sobriété et de préservation de l'environnement.....</b>   | <b>59</b> |
| 1973-1986 : l'impératif des économies d'énergie.....   | 59        |
| 1980-2000 : la lente diffusion des techniques d'exploitation de l'énergie solaire.....   | 60        |
| 1930-2000 : le développement progressif de l'exploitation de l'énergie éolienne.....   | 60        |
| 1970-2000 : multiplication des carburants « verts ».....   | 61        |
| <b>LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES EN RÉGION LYONNAISE.....</b>   | <b>64</b> |
| <b>Les acteurs lyonnais des technologies d'économie d'énergie.....</b>   | <b>64</b> |
| Les technologies d'économie d'énergie dans le secteurs des transports.....   | 64        |
| Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment.....   | 67        |
| Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur de l'industrie.....  | 70        |
| <b>Les acteurs lyonnais des technologies énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone.....</b>   | <b>70</b> |
| Les technologies énergétiques alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion.....   | 70        |
| Les technologies de production de chaleur à partir des énergies renouvelables.....   | 71        |
| Les technologies de l'énergie nucléaire.....   | 72        |
| Les technologies de production d'électricité à partir des énergies renouvelables.....  | 73        |
| <b>Les acteurs lyonnais des technologies de séquestration du dioxyde de carbone.....</b>   | <b>75</b> |
| Les technologies du captage du dioxyde de carbone.....   | 75        |
| Les technologies du stockage géologique du dioxyde de carbone.....   | 77        |
| <b>ANNEXE : PROPOSITION DE HIÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE.....</b> | <b>80</b> |
| <b>SOURCES.....</b>  | <b>82</b> |

## INTRODUCTION

Depuis l'aube de l'humanité, l'énergie constitue une ressource fondamentale des activités humaines, celle permettant de mettre en valeur les ressources de l'environnement naturel. Progressivement, l'homme a su puiser dans ce même environnement des sources d'énergie prolongeant sa seule force musculaire : l'énergie éolienne, l'énergie solaire... Aujourd'hui, cette quête inlassable d'une énergie toujours plus puissante et abondante rencontre des limites de taille, aux deux bouts de la chaîne énergétique (cf. tome 2) : les ressources énergétiques dominantes que sont aujourd'hui les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) apparaissent pour certaines fortement menacées d'épuisement ; la croissance continue de la consommation de ces énergies fossiles se traduit par un réchauffement de l'atmosphère qui menace dangereusement les grands équilibres gouvernant les processus climatiques.

Parce que la métropole lyonnaise ambitionne de développer les nouvelles technologies énergétiques qui permettront de répondre à ces enjeux, le centre de ressource Millénaire 3 de la direction prospective et stratégie du Grand Lyon a souhaité disposer d'un éclairage historique sur l'évolution des techniques de l'énergie afin d'en cerner les étapes essentielles et notamment les « contributions lyonnaises ». C'est l'objet de ce document qui fait le lien avec les acteurs lyonnais actuels de la recherche en matière de technologie énergétique.

La question de l'énergie s'inscrit dans la grande histoire des techniques. Comme le souligne Jean Baudet (2003), s'il existe des sociétés humaines sans littérature ou sans droit, il n'y en a pas sans technique (ensemble des techniques). La technique serait ainsi au fondement même de l'humanité, puisque c'est en inventant l'outil (le fameux silex) qu'un certain singe, il y a quelques millions d'années, devint un homme, exprimant par là sa nature d'espèce vivante consciente. L'outil humain n'a en effet rien d'inné. Il est non corporel puisque prélevé dans l'environnement. Il est utilisé pour prolonger les capacités humaines, dépasser les limites du corps. Il est perfectible et donc modifiable par l'action humaine pour en faire évoluer la forme et la fonction. Surtout, la technique, dont l'outil est l'expression élémentaire<sup>1</sup>, a vocation à répondre à aux besoins humains (besoin de manger, besoin de se chauffer, besoin de s'éclairer...). La satisfaction d'un besoin correspond à la nature économique du fait technique : la production de la technique est un effort pour économiser des efforts ultérieurs. Au total, la technique, prise dans sa totalité, est l'ensemble des moyens correspondant à l'ensemble des besoins de l'humanité (J.Baudet, 2003).

La réalité de l'environnement dans lequel l'homme vit et développe ses techniques est découpée par la technique à peu près comme elle l'est par la science. Il y les techniques de l'espace : le génie

---

<sup>1</sup> L'évolution des techniques fera apparaître des vecteurs plus complexe que l'outil : le mécanisme, la machine, le système.

civil pour les «ouvrages d'arts», les moyens de transports, l'architecture... Il y a les techniques de la matière : production agro-alimentaire, chimie industrielle, métallurgie... Il y a les techniques de l'énergie : production, transport et distribution de l'énergie. Il y a les techniques de l'information : comptabilité, organisation des entreprises, informatique, télécommunications...

Venant du mot grec *energia* qui signifie « force en action », le terme énergie n'apparaît en français qu'au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle pour désigner un concept scientifique relativement abstrait : l'énergie est la capacité d'un système à modifier l'état d'autres systèmes, avec lesquels il entre en interaction. Grandeur physique, l'énergie n'existe concrètement nulle part car son existence n'existe que par ses effets qui sont autant de « formes d'énergie » : un mouvement, un dégagement de chaleur, une réaction chimique...

Ce premier tome articule trois approches : la première rappelle les grands principes du concept d'énergie ; la seconde propose une rétrospective de l'évolution des techniques du système énergétique, avec le souci de mettre en évidence les contributions de la région lyonnaise à cette histoire ; la dernière met en évidence les principaux acteurs de la région lyonnaise engagés dans des travaux de recherche portant sur les nouvelles technologies de l'énergie.

#### **Avertissement**

Les passages de la partie «Rétrospective de l'évolution des techniques de l'énergie» qui concernent spécifiquement la région lyonnaise sont mis en évidence par l'intermédiaire d'un « surlignage » vertical des paragraphes concernés.

## LE CONCEPT D'ÉNERGIE

### Différentes formes d'énergie

L'énergie se manifeste sous de multiples formes classées en deux grandes catégories : l'énergie stockée, liée à la tension ; l'énergie libre, associée au mouvement.

#### 1. L'énergie libre

L'énergie libre peut se présenter sous quatre formes différentes.

⇒ *L'énergie cinétique*

C'est l'énergie associée au mouvement d'un objet. Elle est proportionnelle à la masse «  $m$  » et au carré de la vitesse «  $v$  » de l'objet. Par exemple, la pomme sur l'arbre se transforme en énergie cinétique lorsqu'elle tombe.

⇒ *L'énergie thermique*

C'est l'énergie associée à la chaleur. À l'échelle atomique, la chaleur se traduit par un mouvement désordonné et plus ou moins rapide des molécules. A notre échelle, elle constitue la forme d'énergie mise en jeu lorsque la température varie ou lorsqu'un matériau change d'état (fusion de la glace, évaporation de l'eau).

⇒ *L'énergie électrique*

Cette énergie correspond au déplacement, dans la matière, de particules chargées électriquement (les électrons). Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravite un cortège d'électrons. Si certains de ces électrons peuvent s'échapper de leur atome d'origine et évoluer librement dans la

matière, il s'agit d'une matière conductrice. Ces électrons libres pourront être canalisés pour créer un courant électrique.

⇒ *L'énergie rayonnante*

Il s'agit du déplacement de particules de masse nulle (les photons), qui sont associées à une onde électromagnétique, visible (lumière) ou invisible (infrarouge, ultraviolet, rayons X...). Le rayonnement contiendra d'autant plus d'énergie que la fréquence de l'onde associée sera élevée. Ainsi le rayonnement ultraviolet est plus énergétique que le rayonnement visible ou infrarouge. Le soleil est une source d'énergie rayonnante, celle-ci nous étant transmise sous forme de lumière visible et de rayons infrarouge.

#### 2. L'énergie stockée

Contrairement à l'énergie libre, l'énergie stockée peut, par définition, se conserver sur de longues durées en gardant ses qualités intrinsèques.

⇒ *L'énergie potentielle*

Il s'agit d'une énergie mécanique stockée dont la forme libre associée est l'énergie cinétique. Par exemple, la pomme sur l'arbre emmagasine une énergie potentielle due à sa hauteur et à son poids, qui se transforme en énergie cinétique lorsqu'elle tombe de l'arbre. De même, l'eau retenue derrière un barrage constitue un stock d'énergie potentielle ; on peut d'ailleurs l'accumuler si l'on fait remonter l'eau de la rivière de l'aval vers l'amont du barrage.

⇒ *L'énergie chimique*

Alors que l'énergie potentielle utilise une force liée à la matière (il s'agit souvent du poids, comme dans l'exemple de la pomme), l'énergie chimique met en jeu des forces qui lient les atomes entre eux dans les molécules (physique de l'atome). La réaction chimique consiste donc à modifier les molécules en agissant sur les forces de liaison entre atomes. Cette réaction chimique s'accompagne d'une transformation de l'énergie chimique des corps en une autre forme d'énergie, le plus souvent en chaleur. Les mines de charbon ou les réservoirs d'hydrocarbures (pétrole ou gaz) constituent ainsi des stocks d'énergie chimique.

⇒ *L'énergie nucléaire*

L'énergie nucléaire est localisée dans les noyaux des atomes. Ces noyaux, 100 000 fois plus petits que les atomes eux-mêmes, sont constitués de particules plus élémentaires – les protons et les neutrons – très fortement liés entre eux. De même que la liaison des atomes en molécules est la source de l'énergie chimique, la liaison des protons et neutrons en noyaux par des forces nucléaires est la source de l'énergie nucléaire. Une réaction nucléaire, en transformant les édifices des noyaux atomiques, s'accompagne d'un dégagement de chaleur. C'est ce mécanisme qui génère au cœur du Soleil la chaleur qui sera ensuite rayonnée. Il faut cependant distinguer la réaction nucléaire solaire de celle produite au sein des centrales nucléaires. La première est la fusion (assemblage) des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. La seconde est la fission (cassure) des noyaux d'uranium, qui les transforme chacun en deux autres noyaux environ deux fois plus petits.

## Les propriétés de l'énergie

### 1. L'énergie se conserve mais tend à se dissiper

La caractéristique la plus remarquable de l'énergie est qu'elle se conserve toujours (1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique). Lorsqu'elle est transférée d'un système à un autre, ou lorsqu'elle change de nature, il n'y a jamais ni création ni destruction d'énergie ; la quantité d'énergie présente dans l'univers est ainsi restée la même depuis l'origine. Si un objet a perdu de l'énergie, la même quantité d'énergie a obligatoirement été gagnée par un autre objet en communication avec le premier. De même, lorsque l'énergie change de forme, le bilan est toujours exactement équilibré. C'est donc par abus de langage que les journaux, les économistes ou les hommes politiques parlent de « production d'énergie », ou de « pertes d'énergie », puisque l'énergie ne peut être ni créée ni perdue.

Dans ce cadre, le système énergétique (cf. infra) mis en place par les civilisations humaines « produit de l'énergie » dans le sens où il rend utilisable pour les besoins finaux les sources d'énergie brutes présentes dans la nature. Or, cette démarche correspond à des transformations successives qui ne permettent pas de convertir l'ensemble de la forme d'énergie primaire dans la forme d'énergie finale recherchée. Par exemple, dans le cycle d'une centrale électrique nucléaire – utilisation de la chaleur dégagée par la fission nucléaire pour chauffer de l'eau dont la vapeur va entraîner un générateur électrique – la consommation de 100 unités d'énergie nucléaire permet finalement d'envoyer sur le réseau seulement 33 unités d'énergie électrique. 67 unités restantes sont des

unités de chaleur qui, si elles ne sont pas récupérées en partie pour chauffer des habitations ou des serres, sont perdues puisque évacuée dans l'environnement par la vapeur d'eau sortant des tours de refroidissement. Ce constat illustre le fait que toute énergie qui prend une forme calorifique ne peut être reconvertie que partiellement : il s'agit du 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique. La chaleur représente en effet une forme dégradée de l'énergie : elle correspond à des mouvements désordonnés des molécules alors que les autres formes d'énergie sont ordonnées à l'échelle microscopique. Autrement dit, chaque fois que nous utilisons l'énergie sous forme thermique, nous contribuons à l'évaporation des ressources énergétiques dans l'univers. Ce phénomène appelé « entropie » est ainsi souvent interprété comme une « perte d'énergie ».

## 2. L'énergie libre peut se transformer

Si l'énergie ne peut être ni créée, ni consommée, ni détruite, lorsqu'elle se présente sous forme libre, elle peut cependant être convertie ou transférée à d'autres formes d'énergie.

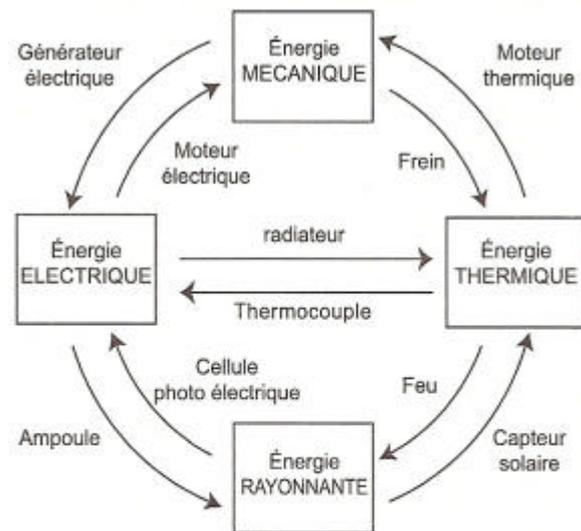
⇒ *La conversion de l'énergie libre en une autre énergie libre*

Les quatre formes d'énergie libre peuvent s'interconvertir grâce à des dispositifs appropriés, appelés convertisseurs d'énergie. Il n'existe cependant pas de procédé industriel convertissant directement le rayonnement en énergie mécanique.

Par ailleurs, toutes les énergies n'ont pas le même niveau de qualité. Certaines sont en effet plus facilement convertibles en d'autres formes et sont ainsi considérées comme plus nobles. Par exemple, le passage de l'énergie mécanique à l'énergie thermique peut se faire spontanément (sans apport

d'énergie) alors que dans le sens inverse il faut disposer d'un moteur thermique qui apportera une énergie extérieure au système.

### Transformations des énergies libres et exemples de convertisseurs d'énergie



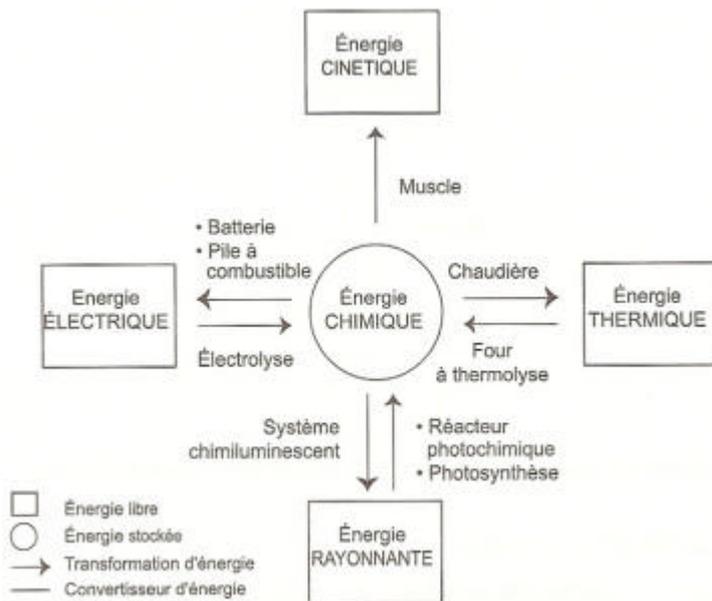
Source : Wiesenfeld B., 2005



⇒ *Le stockage de l'énergie libre en énergie chimique*

Il est également possible de stocker trois des quatre formes d'énergie libre en énergie chimique. La quatrième énergie libre, l'énergie cinétique, ne peut être convertie en énergie chimique, mais l'inverse est possible (par exemple, au moyen d'un muscle chez l'animal).

### Transformations entre énergie chimique et énergies libres et exemples de convertisseurs d'énergie



Source : Wiesenfeld B., 2005

### 3. L'énergie se mesure

⇒ *Une unité de mesure commune à toutes les formes d'énergie : le joule*

C'est la propriété de conservation de l'énergie qui nous permet de mesurer, à l'aide d'une seule et même unité, les diverses formes de l'énergie. Toutes les formes d'énergie, cinétique, thermique... sont la manifestation d'une même grandeur physique qui traduit la capacité d'un système à produire du mouvement. Ainsi, l'énergie, dite cinétique, associée au mouvement d'un objet de masse « m » et de vitesse « v » vaut  $E = 1/2 mv^2$  ; lorsque la masse est exprimée en kilogrammes et la

vitesse en mètres par seconde, cette formule donne l'énergie en joules (J), unité légale dans le système international.

À l'époque où l'on n'avait pas encore reconnu que la chaleur était une forme de l'énergie, l'étude des échanges thermiques avait conduit à introduire une unité de chaleur, la calorie, définie comme la quantité de chaleur à fournir à 1 gramme d'eau pour élever sa température de 1 degré Celsius. L'expérience a montré que les transformations d'énergie mécanique en chaleur, ainsi que les transformations inverses, se faisaient toujours avec le même rapport, à savoir 1 calorie pour 4,18 joules. Il y a donc équivalence entre ces deux formes d'énergie (mécanique et chaleur). Ceci a permis d'abandonner la calorie et de mesurer la chaleur et toutes les autres formes d'énergie, en joules.

Face à la croissance des volumes d'énergies consommées, et avec la place prédominante qu'occupe depuis plusieurs décennies le pétrole, la Tonne-équivalent-pétrole (Tep) est devenue l'« unité » de mesure des énergies primaires du point de vue économique et social. Elle correspond au pouvoir calorifique issu de la combustion d'une tonne de pétrole qui, par définition, vaut 41,868 giga joules (1 giga équivaut à 1 milliard), soit 10 giga calories. Elle sert aux économistes de l'énergie pour comparer entre elles des formes d'énergie différentes. Les équivalences sont calculées en fonction du contenu énergétique ; ce sont des moyennes choisies par convention : 1 tep = 11 628 kWh ; 1 tep = 1 000 m<sup>3</sup> de gaz ; 1 tep = 7,33 barils de pétrole.

⇒ *La mesure de l'énergie dans le temps : la puissance*

Les échanges d'énergie sont caractérisés, non seulement par la quantité d'énergie transférée ou

transformée, mais aussi par la durée du processus. La notion de puissance est ainsi définie comme une quantité d'énergie échangée par unité de temps. L'unité de puissance, le watt, est donc le joule par seconde. Un radiateur électrique de 1 500 W consomme durant chaque seconde une énergie électrique de 1 500 J, et par suite, durant chaque heure (3 600 secondes), une énergie électrique de  $3\,600 \times 1\,500 \text{ J} = 5\,400\,000 \text{ J}$ , transformée en énergie calorifique. Cet exemple montre que le joule est une unité d'énergie trop petite pour nos usages courants. On emploie souvent en pratique le kilowattheure (kWh), quantité d'énergie mise en jeu par un appareil d'une puissance de 1 000 W pendant un délai d'une heure.

### Le système énergétique

En première analyse (J.C. Debeir, J.P. Deleage Jean-Paul, D.Hemery, 1986), l'action de l'homme pour accéder à l'énergie consiste essentiellement à mettre au point des convertisseurs permettant de transformer des ressources naturelles brutes (les énergies primaires) en vue d'une utilisation précise (énergie utile). Ce processus de conversion peut présenter des étapes intermédiaires de transformation, l'énergie devant souvent faire l'objet d'un traitement pour qu'elle soit véritablement utilisable (énergie secondaire) et d'un transport vers les lieux de consommation (énergie finale). Dans une acception réduite, le concept de système énergétique désigne les caractéristiques écologiques et technologiques des filières énergétiques, c'est à dire l'évolution des sources primaires, des convertisseurs et de leur rendement) ; c'est cette approche qui est précisée

ici. Dans une acception élargie, on ajoute à ces considérations écologiques et technologiques les questions de structures sociales d'appropriation et de gestion de ces ressources et convertisseurs.

#### 1. L'énergie primaire

L'énergie primaire correspond à la somme des sources d'énergie disponibles à l'état brut dans la nature. On distingue les énergies primaires non renouvelables et les énergies primaires renouvelables. Les premières rassemblent les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) et les combustibles nucléaires (uranium, thorium). Les secondes sont l'hydraulique (fil de l'eau, marées), l'éolien (vent), le solaire (chaleur et rayonnement), la biomasse (bois, végétaux, déchets fermentescibles d'origine animale, ménagère et industrielle) et la géothermie (chaleur du sol terrestre). Les énergies primaires non renouvelables se présentent sous la forme d'une énergie stockée. Les énergies primaires renouvelables peuvent être de forme libre (éolien, solaire) ou stockée (hydraulique, biomasse, géothermie).

#### 2. L'énergie secondaire

L'utilisation directe des énergies primaires est de plus en plus rare. En effet, dans la plupart des cas, ces énergies brutes doivent être transformées en sources d'énergie secondaires pour être mises en œuvre, c'est-à-dire stockées, transportées et utilisées. Les énergies secondaires sont le résultat de ces transformations :

- les produits pétroliers issus du raffinage du pétrole brut (essence, kérosène, gasoil, fuel domestique) ;

- l'électricité produite dans les centrales thermiques (combustibles fossiles) ou nucléaire (combustible fissile) et dans les installations utilisant une énergie renouvelable ;
- la vapeur, provenant généralement de la conversion d'énergies renouvelables (biomasse, solaire, géothermie) ;
- l'hydrogène, produit à partir de combustibles fossiles, de biomasse ou d'une source d'énergie thermique et de l'eau, pourrait devenir un vecteur énergétique de premier plan à partir de 2050, notamment pour la propulsion des moyens des transports.

### 3. L'énergie finale

L'énergie primaire, une fois convertie en énergie secondaire doit être acheminée jusqu'à l'utilisateur final. Cette opération s'effectue en deux étapes : il s'agit d'abord de transporter massivement l'énergie des centres de production vers les régions consommatrices, puis de redistribuer localement l'énergie vers les utilisateurs. L'énergie finale désigne ainsi l'énergie consommée (achetée) concrètement par les activités humaines ; l'énergie finale est la dernière connue statistiquement dans le processus de conversion énergétique.

Les activités humaines utilisatrices d'énergie sont classés en trois grands secteurs : le domestique (logement et locaux de travail), les transports, l'industrie. Ces différents secteurs peuvent se répartir en fonction des énergies libres suivantes :

- énergie thermique : chauffage, réfrigération (locaux d'habitation et de travail, industries de production de matériaux) ;
- énergie cinétique : transports, industrie (moteurs, pompes...), domestique (appareils ménagers, ascenseurs...) ;

- énergie rayonnante : éclairage, télécommunications, télévision... ;
- énergie électrique : elle est un cas particulier puisque à la fois énergie libre et vecteur énergétique ; on la retrouve dans tous les secteurs d'utilisation de l'énergie.

### 4. L'énergie utile

Les chaînes énergétiques ne s'achèvent pas avec la consommation d'énergie finale. Il convient d'ajouter un dernier niveau après l'énergie finale : l'énergie utile qui correspond à la sortie (output) des dispositifs (chaudière, moteurs, ampoules...) assurant la transformation de l'énergie finale en formes d'énergie répondant à la satisfaction d'un besoin. Pourraient ainsi être mesurés la chaleur cédée par le combustible au circuit d'eau chaude, le travail mécanique fourni réellement par l'arbre du moteur ou la lumière émise par une ampoule électrique.



## Panorama (non exhaustif) du système technique de l'énergie aujourd'hui

| Energies à l'état naturel                       | Energie primaire (extraction)                              | Energie secondaire (1 <sup>ère</sup> transformation)   |   | Energie finale (distribution)   |
|---|--|--|---|---------------------------------|
| Biomasse (bois, déchets d'élevage, ménagers...) | Découpes du bois   | Calibrage  |   | Stères de bois                  |
|   | Stockage des déchets                                       | Production de biogaz par fermentation anaérobie  | Utilisation de la combustion de la biomasse pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau | Electricité                     |
| Force des animaux                               | Sélections des espèces les plus dociles (cheval, bœufs...) | Harnachement   |   | Mouvement                       |
| Force du vent                                   | Moulins à vent   | Mise à disposition du mouvement de rotation de l'axe du moulin pour l'entraînement de différents mécanismes                    |   | Mouvement                       |
|   | Eoliennes  | Utilisation du mouvement de rotation de l'axe de l'éolienne pour l'entraînement d'un générateur électrique                     |   | Electricité                     |
| Force de l'eau                                  | Moulins à eau  | Mise à disposition du mouvement de rotation de l'axe du moulin pour l'entraînement de différents mécanismes                    |   | Mouvement                       |
|   | Barrages   | Utilisation de la force cinétique de l'eau pour l'entraînement d'un générateur électrique                                      |   | Electricité                     |
| Rayonnement du soleil                           | Capteurs   | Utilisation de la chaleur du rayonnement solaire pour réchauffer un fluide caloporteur   |   | Chaleur                         |
|   |  | Utilisation des propriétés électromagnétiques du rayonnement solaire via des cellules photovoltaïques                          |   | Electricité                     |
| Chaleur du sol                                  | Pompes à chaleur   | Utilisation de la géothermie basse température pour réchauffer un fluide caloporteur   |   | Chaleur                         |
|   |  | Utilisation de la géothermie haute température pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau |   | Electricité                     |
| Charbon   | Mines  | Lavage, calibrage...   |   | Charbon                         |
|   |  | Lavage, calibrage  | Utilisation de la combustion du charbon pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau     | Electricité                     |
| Pétrole   | Forages  | Raffinage...   |   | Essence, gasoil, fuel, kérosène |
|   |  | Raffinage...   | Utilisation de la combustion du fuel pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau        | Electricité                     |
| Gaz   | Forages  | Conditionnement  |   | Gaz                             |
|   |  | Conditionnement  | Utilisation de la combustion du gaz pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau         | Electricité                     |
| Minerai d'uranium                               | Mines  | Utilisation de la réaction nucléaire pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau           |   | Electricité                     |



### De la préhistoire au milieu du Moyen-Age : la force musculaire et la combustion du bois comme principales sources d'énergie

De la préhistoire au 10<sup>ème</sup> siècle de notre ère, la force musculaire des hommes et des animaux et le bois constituent les principales ressources naturelles mobilisées par les activités humaines. En revanche, les services énergétiques retirés de ces ressources sont déjà diversifiés : chaleur pour le chauffage et la transformation de la matière, rayonnement pour l'éclairage, mouvement pour le transport, le labour...

L'époque antique produira pourtant des découvertes majeures en ce qui concerne l'utilisation de la vapeur d'eau. Mais ces découvertes ne trouveront pas de prolongements utilitaires. Plusieurs explications sont avancées par les historiens. Dans le cas spécifique de la Grèce antique, les recherches sur la physique se font d'abord dans un état d'esprit contemplatif ; il n'existe pas vraiment de démarche pragmatique visant à mettre en relation un besoin et un moyen technique. D'une manière générale, les historiens expliquent l'absence de mise en valeur de ces découvertes techniques par l'absence de besoin d'une nouvelle forme d'énergie. Les Grecs, comme les Romains, recouraient en effet fortement à l'esclavage, lequel produisait déjà une énergie naturelle, renouvelable et non polluante abondante.

Dès lors, pourquoi chercher à construire des machines motrices ?

Au début du Moyen-Age (500 à 900), le niveau technique est revenu à un niveau très bas. L'empire romain est totalement détruit en Occident et les « barbares » (Wisigoths, Ostrogoths, Francs...) qui ont succédé aux Romains ne savent guère lire. Ils perdent ou, en tout cas, négligent les traités techniques des Grecs et des Romains.

### A partir de -3 millions d'années, l'essor des outils de pierre

Au cours de cette période préhistorique qui s'étend des origines de l'espèce humaine (-3 millions d'années) à l'invention de l'écriture (-3 300 ans avant J.C.), l'invention du 1<sup>er</sup> outil constitue une étape fondatrice du processus d'homínisation, c'est à dire de l'ensemble des évolutions biologiques qui ont conduit à l'apparition de l'espèce humaine.

En Afrique, dans un groupe de singes qui, depuis des générations, a l'habitude de ramasser branches ou cailloux pour attraper un fruit éloigné ou pour écraser un fruit dur, un individu ramasse deux cailloux et les cogne l'un contre l'autre. D'une des pierres, un éclat se détache, et le singe se coupe un doigt ou la paume de la main au contact du tranchant obtenu par le détachement de l'éclat. Le premier objet technique est né, ainsi que la première nuisance technique. Dans le sillage de cette découverte apparaissent les premiers humains « homo habilis » (homme habile) aux alentours de -3 millions ; armés de haches et de

couteaux de pierre rudimentaires ils chassent collectivement les animaux et établissent des camps.

### **-500 000 ans : la domestication du feu, une nouvelle source d'énergie essentielle dans l'expansion à venir de l'espèce humaine**

Vers -1,9 millions d'années, apparaissent les « homo erectus » (homme debout). Poursuivant les troupeaux au Proche-Orient, en Europe, en Chine et en Indonésie, ils sortent d'Afrique et commencent une expansion qui allait conduire ses descendants à occuper l'ensemble de la Terre. Il y a environ - 600 000 ans, la Terre entre dans la première d'une série de périodes glaciaires exigeant de toutes les espèces un effort accru d'adaptation. Pour se protéger l'homo erectus se vêt de fourrures, il se bâtit des huttes et s'installe dans des cavernes. Une invention majeure va cependant lui permettre d'affronter dans de nouvelles conditions la rigueur de son environnement : la domestication du feu vers -500 000 ans. Le feu existe certes depuis toujours, se manifestant par exemple par l'embrassement de la savane à la suite d'un orage lors des saisons sèches, mais il fallait avoir l'idée de le capturer, de l'entretenir, de l'utiliser et de tenter de... le produire. Les premières techniques de production du feu consistent, pour l'une, dans le choc de deux silex qui libère des étincelles, pour l'autre, dans le frottement de morceaux de bois sec dont l'échauffement finit par enflammer de la sciure de bois ou tout autre combustible parfaitement séché. Corrélativement, la biomasse constitue ainsi la plus ancienne source d'énergie primaire de l'homme.

Les conséquences de cette découverte sont considérables. Jusqu'alors, l'homme est resté

exclusivement dans une maîtrise « mécanique » de la nature : il agit sur son environnement par poussée, percussion, arrachement, découpage, perçage, grattage, écrasement... c'est à dire exclusivement par la force musculaire animant ses mains, ses pieds ou un outil. L'invention du feu lui apporte une nouvelle source d'énergie : la chaleur. Celle-ci entraîne subséquemment l'invention de trois nouvelles techniques : le chauffage, l'éclairage et la cuisine. Il ne s'agit pas uniquement d'un nouveau confort mais bien de moyens permettant à l'homme d'étendre son champ de vie et d'action. Par le chauffage, il va pouvoir étendre son territoire, pouvant désormais supporter le climat hostile des régions froides. Par l'éclairage, il se libère des limites du jour et va pouvoir exercer ses activités la nuit comme le jour. La cuisine procure à l'homme préhistorique un aliment inédit : la viande cuite. Plus largement, la préparation d'aliments cuits (végétaux ou animaux) va apporter à l'homme une alimentation plus digestible et plus riche qui va contribuer à l'expansion démographique. Enfin, la maîtrise du feu a contribué à augmenter la sociabilité, en incitant les hommes à se réunir périodiquement autour d'une source de chaleur et de lumière.

### **-20 000 ans : premières utilisations de la géothermie**

Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'homme remontent à près de 20 000 ans. Très tôt, les régions volcaniques ont constitué en effet des pôles d'attraction, du fait de l'existence de fumerolles et de sources chaudes que l'on pouvait utiliser pour se chauffer, cuire des aliments ou tout simplement se baigner. Si la pratique des bains thermaux s'est multipliée tout au long de l'histoire

des civilisations, il faudra cependant attendre le 14<sup>ème</sup> et surtout le 19<sup>ème</sup> siècle pour voir se développer les applications industrielles de la géothermie.

En France, aux confins méridionaux de l'Auvergne, la station thermale de Chaudes-Aigues, possède la source thermominérale la plus chaude d'Europe (82°C) dite « La source du Par ». Dans cette station, dès 1330, les archives font mention d'un réseau qui distribuait l'eau géothermale à quelques maisons et pour lequel le seigneur percevait une rémunération. Toujours à Chaudes-Aigues on signale vers 1400 quelques usages " industriels ", notamment pour le lavage de la laine (dégraissage) et pour la cuisine. A peu près dans la même période, dans la région de Volterra (Toscane, Italie), les « lagoni », petits bassins d'eau chaude saumâtre, sont exploités pour l'extraction de soufre, vitriol et aluns.

### **-10 000 ans : la révolution néolithique de la sédentarisation par l'agriculture et l'élevage**

L'invention de l'agriculture et de l'élevage apparaît au Proche-Orient, région alors considérée comme particulièrement adaptée aux exigences de la vie humaine puisque bénéficiant d'une très grande biodiversité tant végétale qu'animale. Les hommes arrivés dans cette région constatent avec plaisir que, parmi les plantes locales, il y a de nombreuses herbes à fruits comestibles en épis poussant sur de vastes étendues. Particulièrement commodes à récolter et ne s'épuisant pas, ces graminées constituent un véritable réservoir alimentaire. De même, la diversité animale du Proche-Orient se traduit par l'existence des caprinés, bovidés aisément domesticables. Cette domestication facilite l'accès à la viande, à un nouvel aliment, le

lait, ainsi qu'aux peaux, cornes et autres os. Dès lors, pourquoi marcher tout le temps ? Les hommes inventent ainsi la sédentarisation : ils se mettent à vivre au même endroit non pas pour quelques jours ou quelques semaines mais quelques mois et peut-être déjà quelques années. L'échelle des valeurs est bouleversée : découvrant le temps libre, le sédentaire peut s'adonner à de nouvelles activités que celles strictement liées à la survie.

### **-8 000 ans et -7 000 ans : premières utilisations du feu pour la poterie et la métallurgie**

Les hommes vont se rendre compte que le feu ne permet pas seulement de transformer la viande. Après avoir découvert les propriétés plastiques de l'argile, les néolithiques remarquent que le feu accroît considérablement sa dureté. De même, après avoir découvert des minéraux vivement colorés (or, argent, cuivre) et leur capacité à se déformer sous le martelage, les hommes s'aperçoivent que le feu permet de faire fondre ces minerais et de les mouler. Vers -4 000 ans, les mésopotamiens découvrent l'alliage du Bronze (cuivre+étain), métal qui permet de rivaliser avec la pierre.

### **-5 000 ans : première utilisation de la force animale pour le transport et premiers usages du... pétrole**

Le moyen de transport terrestre le plus ancien est sans doute le portage humain. Par la suite l'homme a aussi utilisé les animaux pour l'aider : le bœuf, domestiqué dès le 5<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C., sera utilisé pour tirer des charges. L'âne domestiqué au 4<sup>ème</sup> millénaire av. J.-C., servira à tirer et à porter des charges ou des personnes. Le cheval, animal

de luxe au II<sup>e</sup> millénaire av. J.-C., sera plus couramment utilisé par la suite.

Par ailleurs, à cette époque, il est attesté que, en Mésopotamie (l'Irak actuel), les hommes connaissaient le pétrole qui suintait naturellement à la surface du sol. Il était utilisé sous sa forme brute et servait alors de mortier pour la construction des remparts ou des palais. Mais c'est pour assurer l'étanchéité qu'il se révélait le plus précieux : dans la construction des citernes, des conduites d'eau, des terrasses et surtout de navires. On l'employait également pour l'allumage des torches. Tout en restant marginale, limitée notamment par le volume des dépôts de surface, l'utilisation du pétrole se poursuit et se diversifie au fil des siècles. Le bitume devient notamment un médicament à tout faire : il est prescrit contre les affections dermatologiques, la cataracte, les maladies pulmonaires... Il devient aussi arme de guerre lorsqu'au 5<sup>ème</sup> siècle avant J.C., les Perses bombardent Athènes de flèches enflammées grâce à un mélange incluant le pétrole. A la Renaissance, dans la région actuelle de l'Alsace, on exploite du pétrole affleurant en vue d'obtenir des lubrifiants et des produits médicaux. La véritable exploitation du pétrole brut ne commencera cependant pas avant le 19<sup>ème</sup> siècle et la révolution industrielle.

### **-3 300 ans : invention du premier système d'écriture**

Inventée par les Sumériens pour les besoins de l'administration, l'écriture, au début, désigne un système très rudimentaire, ne comportant que des chiffres et des idéogrammes, sortes de petits dessins servant à désigner des objets, des êtres animés ou des idées. Cette écriture évolua vers le syllabisme lorsque les Sumériens eurent l'idée

d'utiliser les signes pour leur valeur phonétique. Avec l'invention de l'écriture démarre l'histoire, c'est à dire une nouvelle ère de l'évolution humaine caractérisée par le fait que, dorénavant, les hommes ne vont plus laisser derrière eux seulement des ossements et des objets matériels (ce que les archéologues appellent « monuments ») mais également des textes (appelés « documents »), à condition que le support soit impérissable ou conservé dans des conditions particulières.

### **- 3 000 ans : premières utilisations du vent pour la propulsion des bateaux**

Les premiers navigateurs constatent qu'en déployant une peau de bête ou une toile végétale tressée, tendue au bout d'une perche plus ou moins verticale fixée au fond de l'embarcation, il peuvent utiliser la force de propulsion du vent : la voile est née. Les premiers voiliers ne savent utiliser le vent que lorsqu'il vient de l'arrière, dans les autres cas, la rame reste indispensable. Mais les meilleurs navigateurs apprennent vite à domestiquer ce vent indispensable. Les égyptiens sont la première civilisation à parvenir à une parfaite maîtrise de la construction des voiliers. Ils réalisent vers 600 avant notre ère une première circumnavigation autour de l'Afrique. S'inspirant des techniques égyptiennes, les Phéniciens et les Grecs achèvent progressivement de maîtriser la navigation en mer et explorent puis colonisent toute la méditerranée à bord de leurs navires.

Toutefois, pour le transport au quotidien des hommes et des marchandises sur les fleuves, la voile laissera la place à la force du courant lui-même ou à celle du halage humain ou animal et de la rame.

### **-600 ans : premières expériences portant sur l'électricité et le magnétisme**

C'est au philosophe et savant grec Thalès de Milet que l'on doit les premières expériences rapportées sur l'électricité et le magnétisme. Il s'intéresse à deux pierres : la pierre d'Ambre (résine fossile) ; la pierre d'aimant (magnétite ou minerai naturel d'oxyde de fer  $Fe_3O_4$ , trouvé principalement en Magnésie, province d'Asie Mineure). L'une est de couleur jaune soleil, l'autre est grise et sombre, et bien que dissemblables, elles ont toutes deux une propriété naturelle commune : celle d'attirer, et ce pour des raisons différentes, des corps légers à distance. Le frottement de la pierre d'Ambre, obligatoirement réalisé lors du polissage de bijoux, permettait d'attirer des plumes d'oiseau, des brins de paille ou des petits bouts de tissu. La pierre d'aimant, sans avoir besoin de la frotter, attirait de la limaille ou des morceaux de fer.

En Chine, les propriétés magnétiques sont utilisées par les devins à partir du 2<sup>ème</sup> et du 1<sup>er</sup> siècle avant J.C., pour fabriquer des tables de divinations magiques. De là dérive la première boussole.

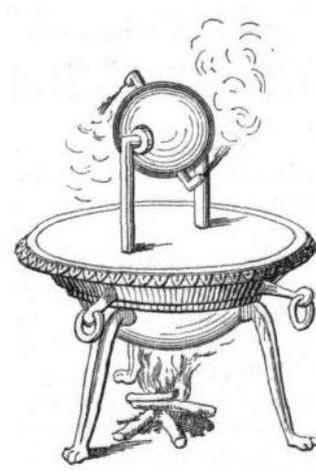
### **-450 ans : premières utilisations du gaz naturel**

Le gaz naturel a été découvert au Moyen-Orient au cours de l'antiquité. L'apparition soudaine de gaz naturel s'enflammant brutalement était assimilée à des sources ardentes. En Perse, en Grèce ou en Inde, les Hommes ont érigé des temples autour de ces feux pour leurs pratiques religieuses. Plus précisément, on date de 450 avant J.C. les premières utilisations du gaz naturel pour la cuisine par les rois de Perse. C'est cependant en Chine que l'on comprit véritablement l'importance de cette ressource, qu'on on chercha à exploiter de façon

plus volontariste : le premier forage fut effectuée en Chine aux alentours de 211 avant J.C.. En Europe, il fallut attendre jusqu'en 1650 pour que l'on découvre le gaz naturel en Grande-Bretagne.

### **-300 à -100 ans : découverte des principes fondamentaux de l'énergie de la vapeur d'eau**

Dans la première moitié du 3<sup>ème</sup> siècle avant J.C., le grec Ctésibios, à Alexandrie, invente le système cylindre-piston : un cylindre construit en métal résistant dans lequel coulisse un deuxième cylindre, ou piston, de manière telle qu'il n'y ait qu'un faible jeu entre les deux pièces. Les expériences qu'effectuera Ctésibios avec ce système le conduiront à l'invention de la première pompe à eau : lorsque le cylindre est partiellement plongé dans un liquide, et que le piston est positionné initialement à la surface de ce liquide, si l'on soulève le piston, on constate que le liquide est entraîné par celui-ci et monte dans le cylindre ; à l'inverse, il est refoulé lorsque l'on actionne le piston dans l'autre sens. A partir de deux cylindres-piston parallèles, Ctésibios réalise ainsi une pompe aspirante et refoulante.



Aux alentours de -100 ans, Héron, également d'Alexandrie, intrigué par les jets de vapeur produits par l'eau chauffée dans un récipient couvert, entreprend de concevoir un

dispositif permettant de faire tourner une sphère à partir de jets de vapeur. Cette machine était une chaudière hermétique remplie en partie d'eau que

l'on plaçait sur un feu. De cette chaudière sortait un tube creux relié à une sphère pouvant tourner autour d'un axe horizontal. De cette sphère deux autres tubes perpendiculaires à l'axe laissaient sortir la vapeur dans deux sens opposés, produisant ainsi une propulsion faisant tourner la sphère. C'est la première fois qu'un dispositif inventé par l'homme permet de transformer la chaleur, par l'intermédiaire de la vaporisation de l'eau, en mouvement. Dès l'antiquité, les Grecs détiennent ainsi les ingrédients fondamentaux de ce que l'on appellera machine à vapeur à l'époque moderne. Ils n'iront pourtant pas plus loin dans la combinaison de ces deux inventions.

#### **-200 ans : première utilisation du rayonnement solaire**

Lorsque Syracuse fut assiégée par la flotte romaine, en 209 avant JC, pendant la deuxième guerre punique, on attribue à Archimède (en 287-212 av JC) l'invention d'un moyen d'incendier les navires ennemis en concentrant sur eux les rayons du soleil grâce à un jeu de miroirs.

#### **-100 ans à JC : mise au point des premiers moulin à eau**

On date l'apparition des premières roues hydrauliques motrices du dernier siècle avant JC, au sein des deux grandes civilisations impériales marquant le début de notre ère : l'empire romain, la Chine des Han. La première véritable description d'un moulin à eau réalisée par l'ingénieur romain Vitruve date de l'an 25 avant J.C. environ. Il s'agit d'une roue hydraulique verticale dont l'axe, horizontal, est placé de façon perpendiculaire par rapport au cours d'eau. Pour utiliser la rotation de son axe, cette roue nécessite plusieurs engrenages

pour transformer la rotation horizontale en une rotation verticale : l'axe horizontal fait tourner un tambour dont les dents entraînent celles d'un autre tambour dont l'axe vertical entraîne directement la rotation des meules. La première description d'une roue à eau en Chine décrit quant à elle une roue hydraulique horizontale dont l'alimentation ne se fait pas directement dans le cours d'eau mais nécessite un canal spécifique. L'axe vertical de cette roue permet de faire fonctionner directement les meules sans passer par un système d'engrenages.

Longtemps, le développement de l'énergie hydraulique dans l'Antiquité a été sous-estimé. Pourtant les textes de l'époque et les découvertes archéologiques montrent que, durant les premiers siècles de notre ère, l'énergie hydraulique se développe rapidement dans les civilisations romaine et chinoise, prenant une place importante dans la vie économique. En Europe, le plus ancien moulin à eau équipé d'une roue verticale connu par l'archéologie se situe en Suisse, près de l'ancienne ville romaine d'Avenches ; il est daté des années 57-58 après JC.

Sur le plan des usages, alors que la plus grande partie des moulins à eau romains sont consacrés à la mouture du grain et l'élévation de l'eau pour l'irrigation des champs, les moulins à eau équipés de roue horizontale de Chine connaissent déjà les premiers usages industriels. Réputée pour la qualité de sa métallurgie, la Chine utilise en effet l'énergie hydraulique pour mouvoir des marteaux pilon et des soufflets de forge. La puissance de martelage et les températures de forge sont ainsi particulièrement élevées en Chine à l'époque. Ces usages industriels de l'énergie hydraulique, déjà variés, nés au début du 1<sup>er</sup> siècle et généralisés par la suite, constituent les premières traces connues de

conversion de mouvements de rotation en mouvements alternatifs de translation.

S'il n'y a pas de vraie rupture technologique et culturelle entre l'Antiquité et le Moyen-Âge dans la civilisation chinoise, tel n'est pas le cas en Europe à au moment de la chute de l'empire romain en 400 après JC. A l'intérieur des anciennes frontières, les aqueducs, sur lesquels sont fréquemment installés les moulins à eau romains, finissent par tomber en ruines faute d'entretien.

### **Du 10<sup>ème</sup> au 17<sup>ème</sup> siècle : la diffusion de deux nouvelles sources d'énergies renouvelables**

Le déclin de l'esclavage dans le monde médiéval conduit à rechercher de nouvelles sources d'énergie pour produire du mouvement. La redécouverte des moulins à eau et la diffusion des moulins à vent vont permettre de répondre à ce besoin en utilisant la force de l'eau et du vent. Elle implique cependant que les populations se localisent à proximité des cours d'eau ou dans les régions aux vents fréquents. Ainsi, de la préhistoire à la fin du 17<sup>ème</sup> siècle, le système énergétique des activités humaines demeure caractérisé par le fait qu'il sollicite exclusivement des ressources naturelles renouvelables, bien qu'il connaisse l'existence de la plupart des énergies primaires potentielles (à l'exception du nucléaire).

#### **A partir du 10<sup>ème</sup> siècle, diffusion du moulin à eau en Europe**

Le principe du moulin à eau hérité des romains est redécouvert et adapté au nouveau contexte. Alors que les moulins situés sur les aqueducs romains se caractérisaient par une alimentation par le dessus

de la roue, les nouveaux moulins construits à partir du 8<sup>ème</sup> siècle s'établissent cette fois-ci sur les rivières et sont donc principalement alimentés par le dessous. Du 10<sup>ème</sup> au 13<sup>ème</sup> siècle, le moulin à eau va connaître un essor important en Europe, au moment où cette dernière connaît un fort accroissement démographique : de la fin du 5<sup>ème</sup> siècle à l'an 800, on compte quelques dizaines de moulin en Europe occidentale ; de l'an 800 à l'an 1000, des centaines ; pendant le 11<sup>ème</sup> siècle, plus de 10 000 pour le seul royaume de France (J.C. Debeir, J.P. Deleage Jean-Paul, D.Hemery, 1986).

Sur le plan technique, on observe une césure entre le Nord et le Sud de la France. Au nord d'une ligne passant par La Rochelle et Lyon, les moulins à eau ont leur roue verticale. Au sud, les moulins ont plutôt leur roue horizontale, comme la majorité des moulins chinois. En montagne, on voit réapparaître la roue hydraulique verticale à alimentation par le dessus ; elle permet d'utiliser des cours d'eau de faible débit, d'autant que sur un site de montagne il est facile d'obtenir une bonne hauteur de chute. Un moulin à eau équipé d'une roue hydraulique verticale alimentée par en dessous pouvait fournir une puissance de deux kW, la roue verticale alimentée par le dessus une puissance de 30 à 40 kW.

Progressivement, ce ne sont plus seulement les petites rivières qui sont équipés de roues hydrauliques. On construit bientôt des barrages sur des cours d'eau plus importants afin d'installer plusieurs moulins sur le même site. En France, le barrage de Bazacle sur la Garonne en sera un bon exemple.

En ce qui concerne les usages de l'énergie hydraulique, si la mouture du grain demeure dominante, on observe cependant le

développement des applications industrielles tout au long du Moyen-âge. Entre le 10<sup>ème</sup> et le 15<sup>ème</sup> siècle, les moulins à papier seront progressivement introduits en Europe, à la suite de la présence de la civilisation arabe, laquelle a obtenu cette technique de la Chine lors du conflit qui l'a opposé à celle-ci pour le contrôle de la route de la soie durant le 8<sup>ème</sup> siècle. L'énergie hydraulique est ici utilisée pour battre les chiffons servant à faire le papier. Les moulins à papier se diffuse de la péninsule ibérique vers l'Europe centrale. A partir du 12<sup>ème</sup> siècle, c'est désormais l'utilisation de l'énergie hydraulique pour animer les marteaux et les soufflets des forges – avec 1000 ans de retard par rapport à la Chine – qui se généralise en Europe. La plus ancienne mention connue est relative à l'Abbaye de Clairvaux dans l'Aube. La diffusion de cet usage s'accélère à partir du 14<sup>ème</sup> siècle qui voit l'apparition du haut-fourneau en Occident, haut-fourneau dont le fonctionnement nécessite des soufflets de plus grande dimension. Bien d'autres usages de l'énergie hydraulique se développent à partir du 12<sup>ème</sup> siècle : tourner les fibres dans les corderies, brasser la bière, aiguiser les armes et couteaux, battre monnaie...

### **A partir du 11<sup>ème</sup> siècle, premières utilisations du charbon de terre (houille) en Europe**

La houille, roche combustible fossile solide provenant de la décomposition d'organismes du carbonifère, commence à être utilisée en Europe au cours du 11<sup>ème</sup> siècle. La première exploitation de charbon se situe en France : on la doit aux moines de Cendras (dans le Gard) qui brûlaient « les pierres noires » pour satisfaire les besoins énergétiques de leur monastère. En brûlant, la houille offre en effet une forte chaleur.

### **A partir du 12<sup>ème</sup> siècle, diffusion du moulin à vent et du moulin à marée en Europe**

Le moulin à vent serait apparu au Moyen-Orient au alentour du 5<sup>ème</sup> siècle. On attribue ainsi aux Arabes sa diffusion en Europe à partir du 12<sup>ème</sup> siècle. Le moulin à vent constitue un convertisseur d'énergie mécanique primaire (le vent) en une énergie mécanique utile moins coûteux à construire que le moulin à eau. Un autre intérêt du moulin à vent est d'offrir de la force mécanique là où il n'y a pas de cours d'eau. Surtout, il constitue un complément indispensable au moulin à eau à un moment où l'équipement des cours d'eau arrive à un certain niveau de saturation (J.C. Debeir, J.P. Deleage Jean-Paul, D.Hemery, 1986). Ainsi, les moulins à vent vont venir palier les insuffisances croissantes de l'énergie hydraulique pour ce qui concerne la mouture du grain ; de plus en plus de moulins à eau étaient en effet détournés de leur usage initial pour alimenter des usages industriels.

Le 12<sup>ème</sup> siècle est marqué également par la multiplication des moulins hydrauliques utilisant l'énergie des marées. L'idée est d'utiliser le reflux de la marée descendante. Le premier moulin à marée, construit en Irlande dans la région de Cork, date du 7<sup>ème</sup> siècle. Au 12<sup>ème</sup> siècle, c'est toute la façade occidentale de l'Europe qui se couvre de moulins à marée : par exemple, Bayonne vers 1120-1125, La Rochelle vers 1139, Dieppe vers 1207... On finira par en compter une centaine en Bretagne.

### **13<sup>ème</sup> siècle : Saint-Étienne fait partie des premiers sites d'exploitation du charbon en France**

L'exploitation d'affleurements est attestée au 13<sup>ème</sup> siècle à Saint-Étienne, au Creusot, à Alès, Graissessac, Carmaux... L'exploitation véritablement industrielle débutera seulement en 1720 dans le Nord à Fresnes-sur-Escaut. Avec la révolution industrielle, elle s'étendit au début du 19<sup>ème</sup> siècle dans d'autres régions (1815 en Lorraine).

### **14<sup>ème</sup> siècle : invention de la poudre noire**

Au tout début du 14<sup>ème</sup> siècle, Marc Le Grec écrit un ouvrage expliquant la composition et les effets d'un nouveau moyen pour lancer des projectiles : la poudre noire. Contenant six parties de salpêtre, une de soufre et deux de charbon, la poudre noire, lorsqu'on l'enferme dans un cylindre de bois ou de métal, a la propriété, dès qu'on l'allume, de projeter violemment le cylindre dans le sens opposé à celui du dégagement de fumée. De plus, si l'on a pris soin de tasser la poudre noire suffisamment, celle-ci explose quand à y met le feu. La poudre noire est donc un explosif. Cette découverte ouvre la voie au développement de l'artillerie pyrotechnique (armes à feu).

Surtout, l'invention de la poudre noire constitue une étape considérable dans l'histoire de l'humanité : c'est la première fois, depuis l'invention de l'outil, que la technique effectue une novation absolue. En effet, l'explosion de la poudre noire est un phénomène qui n'a aucun équivalent dans la nature : il n'y a pas, dans la nature, d'explosion semblable à celle de la poudre. Ce constat est essentiel pour l'histoire de l'énergie en ce qu'il fera naître chez les ingénieurs l'idée que la nature peut

être non seulement imitée, mais dépassée. Serait-il possible de mettre au point de nouvelles énergies, autre que l'énergie musculaire et celle des phénomènes naturels que sont le l'eau et le vent ?

### **17<sup>ème</sup> siècle : nouvelles expériences portant sur l'électricité et le magnétisme**

⇒ *Vers 1600 : la distinction du magnétisme et des phénomènes électriques par William*

*Gilbert de Colchester*

Vers 1600, William Gilbert de Colchester, médecin de la reine Elisabeth d'Angleterre et passionné par l'étude des phénomènes magnétiques et électriques, fut le premier à mettre en évidence les différences entre ces deux domaines. Il découvrit notamment que : d'autres substances similaires à l'ambre – telles que le verre et la résine – possédaient aussi la propriété d'attirer des corps légers après avoir été frottées ; les aimants possèdent toujours deux pôles – dits Nord et Sud – ce qui n'est pas le cas de l'ambre ; qu'un aimant attire seulement le fer, l'ambre attirant tous les corps légers ; qu'un aimant agit à travers un écran tel que le papier, l'ambre pas. Ce fut lui encore qui donna le nom « electrica » – latinisant le terme grec originel « elektron » signifiant ambre jaune – à l'ensemble de ces phénomènes d'attraction. Le mérite de Gilbert a été incontestablement d'ouvrir l'Occident à l'étude du magnétisme et de définir un tout nouveau domaine d'investigations : l'électricité.

⇒ *1663 : invention de la première machine électrostatique par Otto von Guericke*

Participant des nombreux travaux (à la suite de Copernic, Galilée...) portant sur la nature de cette force attractive, mystérieuse et invisible faisant que la Terre tourne autour du Soleil et la Lune autour de la Terre, Otto von Guericke croit à un lien entre la

force de gravitation et les phénomènes électriques et magnétiques. C'est précisément en voulant répondre à cette question fondamentale qu'il inventa la première machine électrostatique. Cherchant à reproduire à échelle réduite le globe terrestre, Otto von Guericke réalisa en 1663 une boule en soufre (croyant que la terre était principalement faite de cette matière) tournant autour d'un axe. Par simple frottement de la main, la boule se chargeait électriquement et permettait d'attirer des objets légers tels qu'une plume. La ressemblance entre une plume en rotation sans contact autour du globe et la Lune en rotation autour de la Terre était évidente et pourtant trompeuse, car aucun lien physique n'existe entre la force électromagnétique et la force gravitationnelle. Cette première machine fut améliorée en 1707 par l'Anglais Francis Hawksbee qui, remplaçant le globe de soufre par un cylindre de verre monté sur un axe tournant à grande vitesse à l'aide de courroies et d'une manivelle, la transforma en un véritable générateur électrostatique. A la suite de ces premières expériences, de nombreuses autres auront lieu durant tout le 18<sup>ème</sup> siècle, permettant de mieux comprendre les diverses manifestations de l'électricité – on parvient à distinguer les corps conducteurs et les corps isolants – et surtout d'offrir un spectacle insolite à la société mondaine de l'époque.

**1650-1900 : le charbon et la machine à vapeur, ingrédients de l'émergence de l'économie industrielle**

Sur la période des 17<sup>ème</sup>, 18<sup>ème</sup> et 19<sup>ème</sup> siècles, l'histoire de l'énergie connaît une rupture majeure

avec la diffusion des principes de production industriels : concentration du capital productif, division du travail... Il s'agit de rassembler un même site un outil de production d'ampleur croissante et une source d'énergie adéquate. Ce seront d'abord les moulins à eau qui seront chargés d'offrir l'énergie nécessaire, par le renforcement des aménagements existants pour obtenir une certaine concentration de puissance. Alors que la pénurie de bois menace, d'abord en Angleterre, l'exploitation des gisements de charbon constituera une autre réponse à l'expansion industrielle. Enfin, la mise au point de la machine à vapeur constituera une étape décisive dans l'accélération et la diffusion du modèle industriel.

Bien que sa mise au point et la diversification de son utilisation s'étalent sur trois siècles, la machine à vapeur correspond bien à une rupture technique : elle constitue une avancée radicale dans la maîtrise de la transformation de l'énergie thermique issue de la combustion du bois puis du charbon en une énergie mécanique, puisque la chaleur ne permet plus seulement de modifier l'état physique de la matière (métallurgie) mais également de produire du mouvement. Cette notion de transformation énergétique prend une place nouvelle (par rapport aux moulins à eau et à vent) puisqu'elle offre une puissance mécanique inédite par son intensité et sa concentration. C'est en ce sens que la machine à vapeur va également participer d'une véritable rupture économique. Parce qu'elle surpasse de façon spectaculaire la force musculaire de l'homme ou de l'animal, la machine à vapeur va constituer un ingrédient fondamental des mutations historiques que connaît alors le système économique : le passage d'un modèle multiséculaire de production artisanale – faible

productivité, moyens de production modestes, empirisme, production suivant la demande – vers un nouveau modèle de production dit industriel, fondé sur la recherche d'une productivité toujours plus élevée, dans une configuration du rapport entre l'offre et la demande qui s'inverse, la production anticipant désormais la demande. Enfin, l'introduction de la machine à vapeur constitue une rupture environnementale dans la mesure où, très vite, le combustible alimentant la machine à vapeur ne sera plus le bois – ressource renouvelable non polluante<sup>1</sup> connaissant alors une pénurie – mais le charbon de terre – ressource non renouvelable polluante mais largement disponible. Avec la révolution industrielle s'opère un basculement énergétique : l'exploitation des sources d'énergie non renouvelables tend à prendre le pas sur celle des sources d'énergie renouvelables.

Avec l'essor de la production charbonnière et de la construction de machine à vapeur, l'énergie devient l'affaire des investisseurs, des savants et des ingénieurs. Elle va se constituer en un secteur économique indépendant, dont l'influence sur les autres activités ne cessera de s'affirmer en raison de sa position amont par rapport aux processus productifs.

### **1600-1800 : les moulins à eau, premiers moteurs de la révolution industrielle**

Bien avant et pendant la mise au point et la diffusion de la machine à vapeur, le développement du machinisme et l'avènement de la grande industrie se sont d'abord opérés à partir des convertisseurs énergétiques hérités du Moyen-Âge,

---

<sup>1</sup> On considère que le rejet de carbone induit par la combustion d'un arbre équivaut à la quantité stockée par celui-ci durant sa croissance

et en premier lieu des moulins à eau. Dès le 16<sup>ème</sup> siècle, on observe un mouvement de concentration industrielle et capitalistique autour d'eux. Les entrepreneurs essayent désormais de regrouper sur un même site de grande ampleur – comme les barrages – les différentes étapes de production métallurgique nécessitant de l'énergie hydraulique : broyage du minerai grâce aux marteaux-pilons, fonte de celui-ci à haute température grâce aux soufflets. En France, les sites accueillant trois des principales forges de la révolution industrielle sont : Montbard, en Côte-d'Or ; Paimpon, en Bretagne ; Bazacle sur la Garonne. Ainsi, à la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, l'Europe compte plus de 500 000 moulins, pour une puissance globale d'environ 1,6 millions de kWh.

### **1600-1900 : l'essor de l'exploitation du charbon**

L'utilisation de l'énergie hydraulique à des fins industrielles est stimulée par le contexte de pénurie croissante que subit la ressource forestière face à la sollicitation croissante des hauts-fourneaux de la métallurgie. Mais les moulins à eau ne pourront constituer une pleine alternative au bois dans la mesure où la nécessité d'apporter le minerai et le bois (le charbon de bois était alors un ingrédient incontournable de la métallurgie) sur les sites de production hydraulique suscitait des déplacements tels que la nourriture des bêtes mobilisait des surfaces au moins équivalente à celles des forêts exploitées pour la forge (J.C. Debeir, J.P. Deleage Jean-Paul, D.Hemery, 1986). Par ailleurs, il devenait impossible d'augmenter sans cesse la puissance des moulins au fur et à mesure des nouveaux besoins.

La crise du bois met en évidence les limites du système énergétique médiéval, car tout

accroissement de la production agricole ou de la production industrielle y aboutit. Parce que l'Angleterre est soumise précocement à cette saturation de l'équipement hydraulique des rivières et de l'exploitation forestière, elle sera pionnière dans la mise en valeur d'un « nouveau » combustible : le charbon de terre ou houille. Dès le 17<sup>ème</sup> siècle, on observe un recul de la consommation de bois au profit du charbon dans ce pays. En France, ce basculement ne s'effectuera qu'à partir du 18<sup>ème</sup> siècle, dans la mesure où celle-ci est moins bien dotée en gisements de charbon et où le transport de celui-ci est moins facile car ne pouvant pas s'appuyer de façon aussi massive sur le transport maritime comme en Angleterre. Et c'est bien la mise en place des premiers réseaux de chemins de fer qui provoqueront l'accélération de la production et de la consommation de Charbon en France.

Berceau de l'exploitation du charbon et de l'introduction du chemin de fer en France, la région stéphanoise devient logiquement le premier bassin houiller de France durant le 19<sup>ème</sup> siècle. Si l'exploitation du charbon stéphanois s'adresse à des besoins locaux jusqu'à la fin du 17<sup>ème</sup> siècle, celle-ci alimente dès lors des flux d'exportation vers Orléans, Nantes, Paris (à partir de Saint-Étienne), ainsi que vers Lyon, Toulon et Marseille (à partir de Rive de Gier). Ainsi, en 1802, la production houillère stéphanoise s'élève à 300 000 tonnes. Avec l'installation précoce de lignes de chemin de fer en région stéphanoises (chaque mine possédait un embranchement direct sur les voies ferrées, elles-mêmes reliées à la Loire et au Rhône), l'exploitation des gisements de charbon ne cesse de s'accroître durant le 19<sup>ème</sup> siècle pour atteindre un pic en 1873

avec près de 4 millions de tonnes de charbon extraites cette année-là.

### 1650-1700 : renouveau des recherches sur l'énergie de la vapeur d'eau

Il fallut attendre le 17<sup>ème</sup> siècle pour que l'idée d'utiliser la puissance de la vapeur d'eau réapparaisse, à une période où l'essor de l'exploitation du charbon bute sur la difficulté de pomper l'eau des nappes phréatiques qui inondent les mines. Au début du siècle, en 1615, Salomon de Caus, ingénieur français, réalisa un appareil qui permettait de produire des jets d'eau à partir de la propulsion de la vapeur d'eau.

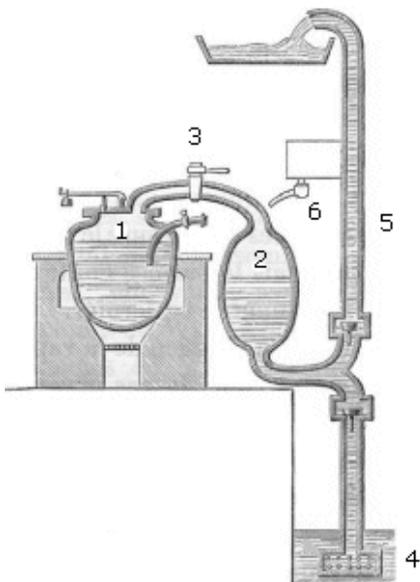
⇒ *Les travaux de Denis Papin (1647 - 1714)*



Mais ce n'est qu'avec Denis Papin, médecin français, que commença réellement la révolution des machines à vapeur. Il s'appuya sur les travaux antérieurs de Christiaan Huygens, physicien néerlandais, qui avait imaginé de produire une explosion grâce à de la poudre à canon pour chasser l'air violemment d'un récipient et faire le vide. Denis Papin voulait perfectionner le système de Christiaan Huygens mais en substituant de la vapeur d'eau à la poudre à canon. Sa première machine à vapeur (1687) était très rudimentaire : un peu d'eau est introduite dans un récipient cylindrique fermé par un piston, lequel est ensuite chauffé ; la vapeur d'eau ainsi produite pousse le piston vers le haut ; en écartant le récipient de la source de chaleur, la vapeur se refroidit, se condense, et le piston revient à son point de départ, poussé vers le bas par la pression atmosphérique.

⇒ *Les travaux de Thomas Savery (1650-1715)*

A la même époque, un anglais, Thomas Savery eu l'idée d'une pompe à eau fonctionnant grâce à la vapeur d'eau. Son dispositif permettait de produire la vapeur dans un vase séparé (1) qui constituait la chaudière et de pousser l'eau directement avec la vapeur contrairement à Denis Papin qui utilisait pour cela un piston. Cette vapeur emplissait le réservoir (2) et la colonne (5), chassant ainsi l'air contenu dans ces deux parties. A ce moment, on fermait le robinet (3) et on refroidissait le réservoir (2) par de l'eau froide provenant du robinet (6). La vapeur se condensait et un vide se créait dans le réservoir (2). L'eau du réservoir 4 était aspirée et remplissait le réservoir (2). Enfin, l'ouverture du robinet (3) laissait la vapeur sous pression, et poussait l'eau contenue dans le réservoir et l'élevait dans la colonne (5).



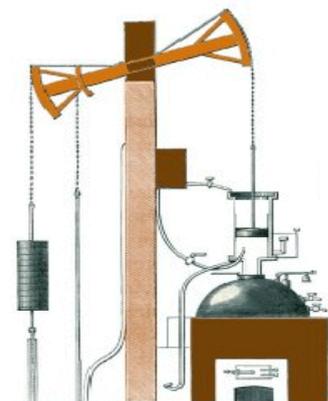
Savery pensait utiliser sa machine dans les mines de charbon où l'évacuation d'eau était un problème. Malheureusement pour élever l'eau d'une hauteur modeste de 65 m, il fallait que la pression dans la chaudière atteigne six fois celle de l'atmosphère.

Les joints ne résistaient pas longtemps à ces conditions difficiles.

### **1700-1800 : mise au point et diffusion de l'utilisation de la machine à vapeur pour le dénoyage des mines de charbon**

⇒ *1700-1750 : la mise au point d'une machine de pompage pour les mines de charbon par Thomas Newcomen et sa diffusion en Angleterre*

Prolongeant les avancées de Papin et de Savery, Thomas Newcomen, forgeron anglais, parvient à mettre au point une machine à vapeur destinée à l'évacuation de l'eau présente dans les mines de charbon qui sera commercialisée à partir de 1712. Reprenant l'idée du système cylindre-piston, il imagine une transmission efficace entre le mouvement moteur du piston et le mouvement récepteur de la pompe à actionner avec un mécanisme de balancier. Comme dans le système de Savery, un jeu de robinet permet d'admettre alternativement de la vapeur d'eau froide dans le cylindre sous le piston. L'arrivée de vapeur pousse le piston vers le haut (et le piston de la pompe descend), puis l'arrivée d'eau fait se condenser la vapeur, et la pression atmosphérique repousse le piston vers le bas (et le piston de la pompe monte).



Plus puissante que les machines précédentes, l'invention de Newcomen fut une réussite technique qui se diffusa en Angleterre : vers 1770, l'Angleterre en avait installé plus de 500. Une machine de Newcomen est installée en France pour la première fois à Fresnes en 1732. La diffusion de cette machine sur le continent se fera cependant avec un retard considérable. En adoptant la première utilisation massive de la machine à vapeur, l'Angleterre prend une avance décisive dans la dynamique de la révolution industrielle. Ce qu'il faut comprendre, c'est que cette diffusion rapide en Angleterre répond à un besoin qui n'est aussi pressant sur le continent. A l'époque, l'essor de l'exploitation du charbon est en effet une nécessité vitale pour l'Angleterre dont les ressources forestières sont alors extrêmement réduites. Parce qu'elle permet de résoudre le problème des nappes phréatiques dans les mines, la machine de Newcomen participera largement à cette objectif. De cette première diffusion de l'utilisation du principe de la vapeur d'eau dépendra à la primauté de l'économie anglaise au 19<sup>ème</sup> siècle. On remarque c'est la mine qui a procuré au nouveau convertisseur d'énergie, la machine à vapeur, à la fois le combustible primaire et le premier lieu d'application.

⇒ 1750-1800 : *Les améliorations décisives apportées à la machine à vapeur par James Watt*

Les machines à vapeur de Savery ou de Newcomen posaient le même problème de rendement et de continuité dans le mouvement. Au bout de quelques cycles de fonctionnement les machines s'arrêtaient. Il fallait les arrêter et les remettre en marche. Afin d'améliorer la puissance et la régularité de sa machine à vapeur, l'écossais

James Watt introduit plusieurs innovations qui vont permettre le passage à une nouvelle étape dans l'utilisation de la machine à vapeur.

En 1765, d'abord, il invente le condenseur. Il voit en effet que l'injection d'eau froide dans le cylindre refroidit celui-ci, et que la vapeur qui vient ensuite dans le cylindre, avant de produire son effet moteur, doit réchauffer l'ensemble cylindre-piston. Il y avait donc perte de chaleur, et donc de charbon. Watt propose alors de construire une chambre de condensation distincte du cylindre par une valve.

Mais c'est en 1781 que James Watt présente son invention capitale. Jusqu'à présent, la vapeur était utilisée pour soulever le piston, et c'est l'atmosphère qui, en le rabaisant, produisait l'action motrice. Watt propose alors que faire en sorte que la vapeur soit introduite alternativement des deux cotés du piston. Pour ce faire, il met au point le système mécanique permettant de créer un mouvement de rotation à partir du mouvement rectiligne du piston, ce qui lui permet ensuite de concevoir le cylindre à double action où la vapeur entraîne le piston, lors de sa montée et de sa descente. La puissance de la machine en est fortement augmentée.

### **1800-1900 : perfectionnement et diversification de l'utilisation de la machine à vapeur pour la production industrielle**

Ce perfectionnement des machines à vapeur, qui se poursuivra tout au long du 19<sup>ème</sup> siècle, allait finalement permettre d'utiliser celles-ci pour tout autre chose que le pompage de l'eau. La machine à vapeur allait ainsi devenir un concurrent très sérieux pour les moulins hydrauliques ou à vent, dans la fonction motrice quelque fut le secteur d'utilisation.

Tout au long du 19<sup>ème</sup> siècle, on multipliera les applications industrielles de la machine à vapeur : l'agriculture (invention de la moissonneuse-batteuse en 1786 par Andrew Meikle), le textile, les machine-outil... sans parler des applications en matière de transports (transports par voies ferrées et locomotives à vapeur, transports maritimes par bateaux à vapeur...). Il faut distinguer deux étapes dans cet essor du machinisme : dans un premier temps, produire de l'énergie se substituant à l'énergie musculaire d'hommes ou d'animaux (motorisation) ; dans un deuxième temps, assurer la réalisation même des opérations de production (mécanisation). En avance sur le mouvement – elle compte déjà 2 500 machines à vapeur environ vers 1800 – l'Angleterre en sera un acteur incontournable, même si la production de machine à vapeur s'intensifie en France, en Allemagne, aux Etats-Unis.

En région lyonnaise, en 1820, le givordain Verpilleux crée à Rive de Gier un atelier de réparation des machines à vapeur, au départ importées d'Angleterre. Puis, Verpilleux construit lui-même ses machines à vapeur en déposant de nombreux brevets (ex : locomotive à roues couplées). Il développe également les applications de la machine à vapeur destinées à l'entraînement de machine-outil.

L'utilisation de la force mécanique de la vapeur d'eau connaîtra une évolution décisive avec la mise au point de la turbine à vapeur à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. L'idée de la turbine à vapeur consiste à concevoir un dispositif permettant d'obtenir un mouvement de rotation à partir de la vapeur. Grâce aux progrès de la thermodynamique et de la mécanique des fluides, la théorie fut bientôt capable de mener à de véritables réalisations techniques.

En 1876, le suédois Carl De Laval créa un premier modèle de turbine utilisant la détente de la vapeur, mais l'ensemble présentait une puissance et un rendement limités. En 1884, l'anglais C.A.Parsons préféra utiliser la détente en plusieurs étages : des aubages fixés au carter (cylindre accueillant l'axe de la turbine) distribuaient la vapeur et alternaient avec des aubages mobiles qui étaient montés sur l'axe. En 1891-1892, le même Parsons construisit la première turbine à condensation qui développait 100 kW. En 1896, après avoir équipé un bateau de son invention (3 turbines pour 3 hélices), il battit le record de vitesse sur mer avec plus de 31 nœuds. C'est grâce à la turbine que le principe de la machine à vapeur allait connaître une deuxième carrière durant le 20<sup>ème</sup> siècle jusque de nos jours. Dès le début du 20<sup>ème</sup> siècle, la plupart des marines équipèrent leurs navires de turbines à vapeur, lesquelles allaient aussi être largement utilisées pour la production d'électricité avec l'entraînement des générateurs électriques. Cette dernière technique est encore au cœur du fonctionnement des centrales thermiques actuelles. Les caractéristiques de puissance, de température et de pression des turbines ne cessèrent d'être améliorés.

**1800-1900 : l'accélération de la dynamique industrielle ou l'apparition de nouveaux modes de transformation énergétique, de nouvelles énergies finales, de nouveaux dispositifs d'utilisation de l'énergie**

Le 19<sup>ème</sup> siècle ne correspond pas seulement à une diffusion de l'usage de la machine à vapeur à de nouveaux secteurs d'activités. Il est le théâtre, en particulier durant son dernier tiers, d'une véritable

accélération du processus d'industrialisation de l'économie, mettant en gestation le modèle de l'industrie de masse qui connaîtra son plein essor durant le 20<sup>ème</sup> siècle. Cette accélération s'exprime essentiellement par l'entrée dans une nouvelle phase de développement du système énergétique (modes de transformation énergétique, énergies finales, dispositifs d'utilisation). Cette évolution du système énergétique est souvent interprétée comme une deuxième révolution industrielle. Pourtant, elle ne modifie pas les principes industriels fondateurs (utilisation d'une puissance énergétique élevée et concentrée, mécanisation, division du travail, anticipation de la demande...) mais se traduit plutôt par le renforcement de leur processus de diffusion ainsi que leur performances. Trois nouvelles énergies finales apparaissent durant le 19<sup>ème</sup> siècle : le gaz, les hydrocarbures et l'électricité. La découverte de ces énergies finales, et leur mise à disposition à grande échelle, seront rendues possibles par l'expérimentation et la mise au point de nouveaux procédés de transformation énergétique : la distillation du charbon de bois et de terre ; le raffinage du pétrole ; la dynamo. Cette dernière invention, la dynamo, va permettre de renouveler l'intérêt des énergies renouvelables lesquelles peuvent produire directement (turbine hydraulique) ou indirectement (production de vapeur d'eau) le mouvement rotatif nécessaire à l'entraînement des générateurs électriques. Ces nouvelles ressources (gaz, hydrocarbures, électricité) trouveront leur débouché – le développement de la consommation finale d'hydrocarbures et d'électricité ne prendra cependant son véritable essor que durant le 20<sup>ème</sup> siècle – par la mise au points de nouveaux

dispositifs d'utilisation : le moteur à explosion, le moteur électrique, l'ampoule à incandescence.

A partir d'ici, les techniques énergétiques quittent le domaine de l'intuition pour exploiter des potentialités non directement disponibles dans les phénomènes naturels : courant électrique, transformation nucléaire...

### **1790-1900 : mise au point de la distillation du gaz et diffusion de l'éclairage au gaz**

C'est en Europe que l'on découvre qu'il est possible d'obtenir du gaz par la distillation du bois et du charbon. Dans les années 1790, on découvre, par l'intermédiaire des travaux de l'écossais William Murdoch et du français Philippe Lebon, que lorsque l'on chauffe la houille ou le bois de façon à éviter leur combustion, il se produit un dégagement gazeux. Or, ce gaz est combustible et il brûle avec une flamme éclairante. Philippe Lebon à Paris et William Murdoch en Angleterre passent alors à des réalisations pratiques d'installations de production de gaz. Ils sont tous les deux considérés comme les créateurs de l'industrie gazière. En 1802 William Murdoch réalise ainsi une première installation d'éclairage au gaz de houille dans des ateliers à Soho. Dès lors, l'éclairage au gaz des rues et des bâtiments publics, ainsi que des maisons des plus nantis, se diffuse progressivement durant le 19<sup>ème</sup> siècle. En 1816, l'éclairage public au gaz est installé à Paris. L'introduction de l'éclairage au gaz allait permettre de prolonger le temps de travail journalier des ouvriers.

La production et la distribution du gaz rencontrèrent des initiatives pionnières à Lyon. La société d'éclairage au gaz de la ville de Lyon est créée en 1834 par Jules Renaux. Le premier site d'exploitation est construit en 1833 sur la presqu'île

de Perrache. En 1836, l'usine à gaz devient Société Anonyme d'Eclairage par le gaz hydrogène pour la ville de Lyon, plus connue sous le nom de gaz de Perrache. Celle-ci développera largement ses activités en France et à l'étranger pour devenir la plus importante compagnie gazière d'Europe au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle.

L'essor de la filière de l'éclairage au gaz est rendu possible par le fait que, jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et l'invention des joints à l'épreuve des fuites, le transport du gaz resta particulièrement délicat sur de longues distances. Ainsi, l'exploitation du gaz naturel ne pouvait véritablement décoller, laissant le champ libre la production gazière par distillation. Cette situation changera à partir du début du 20<sup>ème</sup> siècle. Avec le déclin de la production de gaz par distillation, c'est également l'usage à des fins d'éclairage qui sera en recul. Introduit avec le gaz distillé, le chauffage et la cuisine au gaz formeront le véritable débouché du gaz naturel durant le nouveau siècle.

### **1800-1900 : mise au point de la production d'électricité et invention du moteur électrique**

⇒ *1800 : invention de la pile par Alessandro Volta*

L'italien Alessandro Volta, professeur de physique déjà réputé pour avoir mis au point un instrument sensible permettant la mesure de faibles charges électriques (l'électromètre), cherche à mettre en évidence l'électricité métallique. Cherchant à augmenter la tension électrique produite par le contact de deux métaux différents, il étudie toutes sortes de combinaisons et c'est en «empilant» alternativement un disque de zinc, un disque d'argent, un disque de carton imbibé d'eau salée, un disque de zinc, et ainsi de suite, qu'il parvient à

ses fins: la découverte et la réalisation de la première « pile électrique ».

Il s'agit d'un nouveau moyen d'obtenir de l'électricité bien plus commode que les machines à frottement du 18<sup>ème</sup> siècle : on disposait enfin d'une source d'énergie électrique avec une durée de vie supérieure à celle d'une étincelle. Toutefois, on se rend progressivement compte que la pile n'a rien de perpétuel car ces réactions chimiques attaquent peu à peu les faces métalliques en les recouvrant d'une couche d'oxyde défavorisant ainsi les nouvelles réactions chimiques ; en d'autres termes, la pile s'use.

⇒ *1805 : découverte de l'arc électrique par Humphry Davy*

Humphry Davy découvre en 1805 que si l'on maintient en contact deux tiges conductrices reliées à une pile suffisamment puissante, on obtient un échauffement de celles-ci et que si on les écarte de quelques millimètres il se forme entre elles un dégagement lumineux extrêmement intense. L'intérêt technique de la découverte est évident. Il y a là une source de lumière d'une intensité bien supérieure à ce que l'on obtenait avec le gaz et les chandelles. Voilà donc, quelques années seulement après l'invention de la pile, une première application de l'électricité : l'éclairage. Il restera cependant à résoudre le problème de l'érosion rapide des tiges conductrices sous la température très élevée de l'arc électrique.

⇒ *1820 : Mise au point de la théorie de l'électromagnétisme par André-Marie Ampère*

Le Danois Hans Christian Oersted avait constaté, en 1819, un phénomène inhabituel : une liaison existe entre électricité et magnétisme. Il s'aperçut en effet qu'un fil conducteur parcouru par un courant électrique influençait l'aiguille aimantée

d'une boussole placée à proximité. L'aiguille dévie et cesse d'indiquer le nord. Cette découverte, contraire aux idées de l'époque, fut reprise par le Français, André-Marie Ampère, né en 1725 à Poleymieux-au-Mont-d'Or près de Lyon. Alors professeur de mathématiques à Polytechnique (Paris), celui-ci répéta l'expérience Oersted, la compléta et développa une théorie mathématique de ce phénomène.

La loi la plus célèbre d'Ampère est la loi de l'électrodynamique. Cette loi décrit les forces que deux conducteurs parallèles parcourus par des courants électriques exercent l'un sur l'autre. Si la direction du courant est la même dans les deux conducteurs, ceux-ci se repoussent ; si le courant se déplace dans des directions opposées, les conducteurs s'attirent. Il décrit également la relation qui existe entre la force du courant et celle du champ magnétique correspondant. Ces expériences sont à l'origine de la définition de l'intensité du courant électrique, dont l'unité est désignée par le mot Ampère à partir des années 1880. Par ailleurs, Ampère interprète le phénomène du magnétisme par la théorie du courant moléculaire, selon laquelle d'innombrables et minuscules particules chargées électriquement seraient en mouvement dans le conducteur. Cette théorie est rejetée par les scientifiques de l'époque, et ne parvient à s'imposer que soixante ans plus tard avec la découverte des électrons.

⇒ 1831 : découverte de l'induction électromagnétique par Michael Faraday

L'expérience d'Oersted donnera lieu à un autre prolongement, exploitant le fait que l'énergie électrique (le courant provenant de la pile) peut être convertie en énergie mécanique (le mouvement de

l'aiguille) : c'est la piste du moteur électrique qui s'amorce.

C'est avec une telle préoccupation que l'anglais Michael Faraday découvre l'induction électromagnétique en 1831. Il constate que, quand il agite un aimant à proximité d'un fil métallique, un courant électrique est induit dans ce fil. C'est exactement l'inverse de l'expérience d'Oersted. Dès lors deux voies d'expérimentation sont envisagées : un moteur électrique qui, recevant du courant électrique, produirait un mouvement ; un générateur électrique qui, recevant un mouvement, produirait du courant électrique.

⇒ 1841 : première théorie de l'électrothermie par James Prescott Joules

Tout passage d'un courant électrique dans un conducteur entraîne des pertes qui se dégradent en chaleur. Cet effet, qui est à l'origine de l'électrothermie (four, lampes à incandescence...), sera analysé par l'anglais James Prescott Joules. Il explicitera les lois de l'échauffement d'un conducteur électrique en 1841, introduisant la notion d'équivalent mécanique de la calorie, appelé plus tard Joules.

⇒ 1869-1873 : invention du moteur électrique par Zénobe Gramme et Hippolyte Fontaine

Quand le Belge Zénobe Gramme commence à s'intéresser à l'électricité, des machines magnéto-électriques existent déjà, utilisées notamment pour l'alimentation des lampes à arc. Mais leur puissance demeure limitée par les aimants. Or, on savait fabriquer des électro-aimants, c'est à dire des pièces de fer autour desquelles on a enroulé un fil métallique. Quand un courant électrique passe dans le fil, le fer devient aimanté ; il était ainsi possible d'obtenir de fortes aimantations. Gramme va alors réussir à remplacer les aimants permanents des

générateurs magnéto-électriques par des électro-aimants, obtenant ainsi un générateur dynamo-électrique. Le mouvement de ce dernier est rotatif avec une partie fixe, le stator, de forme cylindrique, à l'intérieur duquel peut tourner le rotor. Des enroulements de fils électriques judicieusement disposés permettent à l'ensemble de produire un courant intense quand le rotor est mis en rotation (grâce à un moteur à vapeur ou un moteur à gaz).

Indiscutablement importante, l'invention de Gramme n'aurait pas fait son effet véritablement révolutionnaire s'il n'y avait pas eu la réversibilité. C'est Hippolyte Fontaine qui, en 1873, découvre la réversibilité de la dynamo, inventant ainsi le moteur électrique. Si on fait tourner la dynamo, on obtient un courant électrique. Mais si, au contraire, on connecte les bornes de cette dynamo à une source de courant (des piles ou une autre dynamo), la machine se met à tourner et fournit de l'énergie mécanique.

L'intérêt du moteur électrique est considérable : on peut facilement le faire tourner à différentes vitesses, en fonction de l'alimentation électrique ; des moteurs électriques de grande taille peuvent produire des courants électriques d'une intensité énorme ; il est propre puisqu'il ne dégage pas de fumées, pas de cendres, pas d'importants dégagements de chaleur. Ainsi, à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, une concurrence très forte se développera entre le moteur à gaz et le moteur électrique pour la motorisation des ateliers ; le second finira par l'emporter. Le travail dans les usines sera bouleversé par l'arrivée de l'électricité. Celle-ci libère de la manutention du charbon, comme des variations du débit des cours d'eau. L'électricité apporta également une plus grande efficacité dans la production en permettant aussi bien la

concentration maximale de la puissance que son utilisation morcelée : la multiplication des moteurs électriques accouplés directement à l'outil se traduit par la suppression des courroies conduisant auparavant à la machine à vapeur centrale. Ainsi, l'électricité offre la possibilité de faire fonctionner les machines seulement aux moments où elles sont strictement nécessaires (la commande individuelle prenait le pas sur la commande collective).

En 1878, la société française Gramme, créée par Zénobe Gramme et Hippolyte Fontaine, commence la construction industrielle d'alternateurs, c'est à dire de machines transformant une énergie mécanique, issue par exemple d'une machine à vapeur, en une énergie électrique.

⇒ 1878-1879 : invention de la lampe électrique à incandescence par Joseph Swan et Thomas Edison

La disponibilité d'une source électrique plus économique que les piles (qui consomment des produits chers, comme le zinc ou le cuivre), va relancer l'intérêt pour l'éclairage électrique à une période où le gaz et le pétrole constituent désormais les deux énergies les plus usitées pour l'éclairage. Il reste alors à résoudre la principale limite de la lampe à arc électrique : l'érosion rapide des tiges conductrices. Joseph Swan et Thomas Edison apportent les deux éléments de la solution. Le premier eu l'idée en 1878 de relier les deux conducteurs par un filament (un fil de coton trempé dans l'acide sulfurique puis carbonisé), celui-ci étant porté à incandescence par le courant électrique. Mais c'est le second qui apporta les contributions décisives avec, d'une part, l'utilisation d'un matériau plus résistant pour le filament (fibres de bambou carbonisées) et, d'autre part, la protection du filament par une ampoule en verre vide d'air. La

lampe à incandescence connaîtra ensuite des améliorations constantes, avec notamment l'invention du filament de tungstène par l'américain William Coolidge en 1910.

Une entreprise lyonnaise sera présente sur le marché de la production d'ampoule à incandescence durant la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle : la société Visseaux. Né à Lyon en 1872 et diplômé de l'Ecole Supérieure de Commerce de Lyon, Jacques Visseaux décida en 1900 de « vendre de la lumière ». Alors que le gaz constitue encore le mode d'éclairage dominant en Europe, il se lance dans la fabrication de manchons à gaz. D'abord consacrée à l'éclairage au gaz, la petite usine Visseaux, près du quartier St Paul, en bord de Saône, démarra avec une trentaine de personnes. En 1909, l'usine produisait 3 000 manchons par jour; en 1911, 12 000, et en 1913, 20 000. Les produits Visseaux furent bientôt exportés vers toute l'Europe, mais aussi vers le Canada et le Japon. En 1910, Jacques Visseaux reçut pour ses produits une médaille d'or au concours Lépine, deux médailles d'or à l'exposition de Bruxelles et « la plus haute récompense » à l'Exposition de l'Habitation de Paris. La production continua pendant la guerre, bien que ralentie. Elle connut un maximum en 1918, puis la demande chuta fortement. En 1919, Jacques Visseaux créa alors une nouvelle usine pour la fabrication des lampes électriques à filament étiré, technique née avant la guerre. De puissantes sociétés exerçaient déjà leur emprise sur ce marché nouveau, mais c'est l'institution d'un contrôle unitaire des lampes, en cours de fabrication et avant sortie d'usine, qui permit à l'entreprise Visseaux de se démarquer et de faire reconnaître la qualité de ses produits. En 1927, constatant le développement extraordinaire

de la T.S.F., Jacques Visseaux décida d'adjoindre à ses ateliers une usine de lampes de radio. Pari gagné, puisque cette activité connut rapidement un succès encore plus important que celui qu'il connaissait déjà avec les lampes d'éclairage. En 1948, la firme Visseaux lança cette année-là de nouvelles lampes « miniatures », de petites dimensions mais aux performances élevées. Ces lampes remportèrent un grand succès dans l'équipement des appareils de radiodiffusion et du matériel professionnel. Face à une forte concurrence, la société « Claude, Paz et Visseaux » vit le jour en 1956, à la suite du regroupement des activités éclairage de dix sociétés. La société sera plus tard absorbée, successivement, par l'américain ITT puis par le groupe GTE.

⇒ 1882 : mise en route de la première centrale électrique commerciale à New York par Thomas Edison

La commercialisation de ses lampes à incandescence incite Thomas Edison à créer le premier réseau de distribution d'électricité. Il n'est cependant pas le premier à installer des centrales de production d'électricité : à l'époque, des industriels se sont déjà engagés dans la construction de centrales pour répondre à leurs propres besoins. En 1882, sa société, l'Edison Compagny, met en service la centrale à courant continu de Pearl Street, à New-York. Six machines à vapeur actionnent autant de générateurs, chacun étant capable d'alimenter 1 200 lampes. On fournira même gratuitement le courant à certains abonnés afin de mieux les convaincre. En moins d'un an, 8 000 lampes Edison sont alimentées par un système de distribution d'électricité. Dix ans plus tard les systèmes d'électrification Edison sont déjà

présents dans le monde entier. Edison décide alors de vendre sa société qui devient la General Electric. Ces premières centrales électriques vont inaugurer un principe de fonctionnement inchangé jusqu'à aujourd'hui : faire tourner une turbine couplée à un alternateur qui fabrique de l'électricité. Dans le cas présent, il s'agit de centrales thermiques produisant de la vapeur d'eau à partir de la combustion de ressources fossiles (charbon, pétrole). Dans le cas des centrales hydroélectrique, c'est la force de l'eau elle-même qui permet de faire tourner la turbine.

À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et jusqu'à l'essor de la production pétrolière, la France produit son électricité à partir de deux filières strictement réparties sur le territoire métropolitain : des centrales hydroélectriques au sud avec le « réservoir alpin » ; des centrales thermoélectriques au nord, avec les réserves de charbon.

⇒ 1884 : invention du transformateur électrique par Lucien Gaulard

Ingénieur français, Lucien Gaulard met au point le premier transformateur électrique, dispositif permettant d'élever la tension d'un courant électrique – Gaulard montrera qu'il est plus intéressant, sur de longues distances, de transporter du courant électrique à haute tension (moins de pertes) – et de baisser à nouveau celle-ci pour permettre son utilisation finale. Les premières expériences de transport d'électricité seront conduites par un autre ingénieur français, Marcel Deprez, en 1883 entre Vizille et Grenoble.

Ces avancées permirent de rendre possible l'une des promesses de l'électricité : transporter de grandes quantités d'énergie à la vitesse de la lumière, c'est à dire à une vitesse et à un coût sans commune mesure avec les chemins de fer pour le transport du charbon. Au fil des décennies, les

tensions utilisées pour le transport augmentèrent pour assurer des échanges entre régions ou entre pays permirent la constitution d'un véritable système de transport de l'électricité dont la commercialisation impliquera la mise au point de dispositifs de mesure et de tarification de la consommation des usagers. Dès lors que l'on sait la produire et la transporter, l'électricité entame sa diffusion, d'abord aux Etats-Unis. Désormais, les unités de production d'énergie ne sont plus obligées de se localiser à proximité des lieux de consommations (industries notamment). Symétriquement, les industries fortement consommatrices d'énergie ne sont plus liées à la localisation des ressources énergétiques. Autrement dit, la possibilité de construire des centrales électriques un peu partout et l'extension des réseaux permettent une industrialisation plus harmonieuse des territoires. Enfin, la diffusion de l'électricité concerne bientôt la sphère domestique, offrant progressivement à l'ensemble de la population une source d'énergie moderne pour l'éclairage, et pour bien d'autres usages par la suite. Entre le début du 20<sup>ème</sup> siècle et 1940, la production mondiale d'électricité passe ainsi d'environ 100 milliards à 5 000 milliards de kWh.

### **1800-1900 : la transformation des dispositifs d'exploitation des énergies renouvelables**

L'histoire énergétique du 19<sup>ème</sup> siècle concerne également les énergies renouvelables dont les modes d'exploitation connaissent une véritable transformation. Il faut noter d'abord et avant tout la succession d'innovation marquant le domaine de l'énergie hydraulique, faisant de cette dernière un concurrent sérieux à la machine à vapeur ainsi qu'un dispositif attractif pour la production

d'électricité qui naît à la fin du siècle. On assiste ensuite aux premières tentatives d'exploitation de la chaleur du sol (géothermie) pour des usages industriels : pompage, production d'électricité. C'est ensuite la découverte d'une propriété du rayonnement jusqu'alors inconnue : l'énergie photovoltaïque. Connu depuis l'antiquité, le principe de la concentration du rayonnement solaire pour produire des hautes températures fait l'objet de nouvelles applications. Enfin, les dispositifs de conversion de l'énergie éolienne connaîtront des avancées techniques significatives, reléguant le moulin à vent au statut d'antiquité.

⇒ 1827 : invention de la turbine hydraulique par Benoît Fourneyron

Au début du 19<sup>ème</sup> siècle, la machine à vapeur tend à s'imposer dans les manufactures anglaises. Mais en Europe continentale et dans le nouveau monde, l'énergie hydraulique conserve une place importante. Le besoin sans cesse croissant de l'industrie en énergie et la concurrence de la machine à vapeur viennent stimuler l'innovation dans le domaine de l'énergie hydraulique. Si la première voie suivie est celle du perfectionnement des moulins à eau traditionnels – le métal remplaçant désormais le bois dans la construction des roues hydraulique<sup>1</sup> – l'énergie hydraulique entrera véritablement dans une nouvelle étape de son histoire avec la mise au point d'une nouvelle technologie, la turbine, qui ouvrira la voie de l'hydroélectricité.

Deux stéphanois sont à l'origine de l'invention de la turbine hydraulique. Dans les années 1820-1824, un professeur de l'école des mines de Saint-

---

<sup>1</sup> Au tournant du 19<sup>ème</sup> et du 20<sup>ème</sup> siècle, les roues hydrauliques en métal se comptent par dizaines de milliers en Europe

Étienne, Claude Burdin, dessine une machine s'inspirant des travaux théoriques du physicien suisse Leonhard Euler, dans laquelle l'eau entre de façon verticale dans un cylindre lequel débouche sur une autre pièce fixe, le distributeur, munie d'aubes verticales orientées et profilées pour que l'écoulement pénètre tangentiellement dans une troisième partie, le rotor, située à l'extérieur par rapport au distributeur et muni lui aussi d'aubes verticales profilées. Lorsqu'en 1826 la Société d'encouragement à l'industrie nationale, en France, offre un prix de 6000 francs à qui installerait une turbine innovante sur un site industriel, Burdin rédige un mémoire détaillé sur son invention. Mais la machine de Burdin n'est pas encore opérationnelle, et la Société ne lui décerne qu'une médaille, réservant le prix pour une véritable réalisation industrielle. C'est alors un élève de Burdin à l'école des mines, Benoît Fourneyron (natif de Saint-Étienne) qui se charge de la mise au point de la turbine centrifuge. En 1827, il l'expérimente aux forges de Pont-sur-l'Ognon en Franche-Comté, où il travaillait comme ingénieur. Sur une petite chute de 1,4 mètre de hauteur, sa turbine ne développait encore que 4,4 kW. En 1832, Fourneyron installe son premier modèle industriel pour animer le soufflet du haut-fourneau de Dampierre dans le Jura, sur une chute de 3 à 6 mètres de hauteur. Cette turbine développe cette fois-ci 37 kW et les clients concernés sont visiblement convaincus puisqu'ils en achètent une autre dans la foulée. Fourneyron, qui obtient en 1832 un brevet pour son brevet décrivant sa « roue à pression universelle et continue », décroche l'année suivante le prix de la Société d'encouragement. De même, en 1839, il obtient une médaille d'Or à l'exposition universelle. Cette

reconnaissance offre alors à sa turbine un grand succès, celle-ci étant aussitôt adoptée dans toute l'Europe, puis en Amérique ; en 1843 on dénombrait déjà 129 usines dotées de turbines Fourneyron en Europe. En 1837-1838, Fourneyron équipe notamment deux hautes chutes pour les filatures de Saint-Blaise dans la forêt noire ; avec des hauteurs de 108 et 114 mètres, ce sont les premières hautes chutes équipées au monde. Entre 1837 et 1840, pour produire lui-même ses turbines, il fait construire un atelier sur la commune du Chambon-Feugerolles.

De fait, au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, avec ces améliorations incessantes, la filière hydraulique représente encore 2,5 fois la puissance des machines à vapeur en France.

⇒ 1862-1869 : première exploitation au monde de la houille blanche par Aristide Bergès et Jean-Baptiste Neyret

Ce que désigne Aristide Bergès par « houille blanche », c'est la force accrue qu'acquiert l'eau des torrents de montagne avec la pente. Le développement de l'utilisation de cette énergie potentielle est fortement lié à l'essor de l'industrie papetière dans les Alpes française pendant la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle. Parce qu'il fallait entraîner les turbines à eau nécessaire à la motorisation des défibreurs à bois, Aristide Bergès chercha à exploiter la force de l'eau en canalisant sa chute. Il fut ainsi le premier à construire des « conduites forcées » en métal, sur la commune iséroise de Lancey. Sa première réalisation, qui date de 1862, est une « chute » de 200 mètres. Une seconde chute de 500 mètres est opérationnelle en 1882. Par nécessité, A. Bergès devient rapidement l'un des spécialistes dans l'utilisation de l'énergie « stockée dans les montagnes ».

Jean-Baptiste Neyret, industriel stéphanois, sera un autre acteur majeur des débuts de l'exploitation de la houille blanche pour la production papetière. En 1864, il achète à Rioupéroux, dans la vallée de la Romanche (Isère), le site d'un ancien haut-fourneau arrêté depuis 1861. En 1867, pour l'entraînement des défibreurs, il entreprend d'étendre les installations hydrauliques existantes, ce qui le conduit à disposer, dès 1869, d'une conduite forcée de 24 mètres équipée de plusieurs turbines. Agrandi jusqu'en 1881, le site de Rioupéroux restera plusieurs années durant le premier site hydraulique de France avec une puissance de 1 800 kW. Progressivement associé à d'autres industriels français et suisses (Beylier, Piccard, Pictet), la famille Neyret sera à l'origine de la société grenobloise Neyrpic créée en 1948 et devenue un leader mondial de la construction de turbines.

Le mouvement engagé avec Aristide Bergès et Jean-Baptiste Neyret aura une importance considérable sur le développement de la région grenobloise et, plus largement, du sillon alpin. Le retard économique se transforme bientôt en longueur d'avance. Berceau de la papeterie industrielle devenu pôle mondial, la région attire bientôt de nombreuses entreprises de la nouvelle industrie, celle qui s'appuie sur l'électricité (électrochimie, électrometallurgie...).

⇒ 1899 : mise en service de la première usine hydroélectrique de France sur le canal de Jonage à Villeurbanne

L'idée d'utiliser l'énergie hydraulique pour l'entraînement de générateur électrique sera concrétisée avant celle des centrales thermiques. En 1880, à Cragside en Angleterre, Sir William Armstrong installe une turbine sur une rivière et la

relie à un générateur électrique via une courroie. Produisant une puissance de 7kW, le générateur alimente le réseau d'éclairage de Cragside. En France les premières installations de ce type sont mises en service en 1883 et 1884, elles sont localisées à Vizille en Isère et à Bellegarde sur Valserine dans l'Ain (premier barrage hydroélectrique en France).

Durant les années 1880 et jusqu'au milieu des années 1895, les petites centrales de ce type vont se multiplier dans les Alpes, en particulier sur les sites exploitant déjà la Houille blanche. Dans les années 1890, Bergès et Neyret sont parmi les premiers à coupler les turbines de leurs usines à des générateurs électriques, participant ainsi à la naissance de l'hydro-électricité qui reprend la dénomination « houille blanche ». A un moment où les technologies de transport de l'électricité ne sont pas encore développées, ces usines hydroélectriques se caractérisent par leur faible taille : elles doivent répondre à des besoins très localisés, donc limités (alimentation des usines en électricité, éclairage public des villages alentours...).

A partir du moment où le transport de l'électricité devient fiable, les centrales en question peuvent s'étendre progressivement pour dépasser les stricts besoins locaux. Surtout, s'amorce une nouvelle phase dans le développement de l'hydroélectricité avec la construction de centrales de taille beaucoup plus importante, destinées à desservir des marchés élargis. La première centrale hydroélectrique de grande puissance – supérieur à 10 000 kW – est construite aux Etats-Unis sur le site des chutes du Niagara en 1895. Cette centrale sera équipée de trois turbines Fourneyron (de 3 700 kW chacune) construites par Piccard et Pictet de Genève. En

Europe, la première grande centrale hydroélectrique est celle de Genève, construite sous la forme d'un barrage au fil de l'eau en 1896 sur le Rhône et développant 4 000 kW. En France, la première centrale hydroélectrique de ce type à être mise en service est celle de Cusset, installée sur un canal de dérivation du Rhône (canal de Jonage) au niveau de Villeurbanne. Construite à partir de 1892 à l'initiative du Syndicat des forces motrices du Rhône créé en 1891 et mise en service sept ans plus tard (le seul creusement du canal de dérivation a pris 5 ans), la centrale hydroélectrique de Cusset constitue dès lors la centrale la plus puissante du monde avec 16 turbines de 1 000 kW chacune. Elle produit à elle seule plus que les 136 centrales qui existent alors en France ; modernisée entre 1934 et 1952, Cusset demeure encore dans le premier quart des usines de production hydroélectrique en France. De plus, elle fait partie d'un aménagement global, précurseur de l'ensemble des aménagements du Rhône, comprenant : le canal artificiel de Jonage, le barrage de Jonage et une écluse (qui n'a jamais véritablement servi, la navigation empruntant le canal de Miribel). Sa vocation à l'époque est d'assurer la production d'énergie électrique pour l'industrie de la soie et les tramways de Villeurbanne. Le 20<sup>ème</sup> siècle sera celui de la course à la puissance, les records de puissance des centrales hydroélectrique installées dans le monde étant régulièrement battus.

Bénéficiant de la production d'électricité de la centrale de Cusset et bientôt de celles des centrales alpines, la région lyonnaise connaît un développement précoce de l'industrie de la construction électrique. Quatre grands groupes industriels composent ce secteur à Lyon : les câbles de Lyon, à Gerland ; les ateliers de construction

électrique de Delle, à Villeurbanne ; l'usine Schneider-Westinghouse, sur la route d'Heyrieux ; l'usine Normacem, à La Buire. C'est par l'intermédiaire des « câbles de Lyon » que l'éclairage de la ville de Lyon sera progressivement assuré non plus par les centrales électriques au charbon de la puissante Compagnie du gaz de Lyon, mais par celle de Cusset. Les autres sociétés mentionnées plus haut participeront à l'essor de la construction de moteurs électriques en région lyonnaise entre 1890 et 1910.

⇒ 1818-1904 : les premières formes

*d'exploitation industrielle de la géothermie*

Jusqu'au 19<sup>ème</sup> siècle, l'énergie constituée par la chaleur provenant de la Terre est exclusivement utilisée telle qu'elle arrive en surface, en particulier les sources d'eau chaude. A partir du 19<sup>ème</sup> siècle, les progrès techniques et une meilleure connaissance du sous-sol vont permettre d'atteindre la chaleur en profondeur et de l'exploiter de façon plus efficace.

En Italie, dans la région de Volterra, lieu de nombreuses manifestations géothermiques, François Larderel, ingénieur français né à Vienne, entreprend l'exploitation de l'acide borique déposé par les vapeurs et les eaux chaudes à partir de 1818. Il invente la technique du « lagoni couvert », permettant de capter la vapeur à une température suffisante pour alimenter des machines destinées à pomper les eaux boriques. Cherchant à obtenir une plus grande quantité de vapeur, il construit le premier forage géothermique d'Europe en 1833. À partir de 1904, au même endroit, la même vapeur commence à être utilisée pour l'entraînement de turbines électriques.

En France, le premier forage géothermique est le puits artésien de Grenelle à Paris, réalisé sur huit

années entre 1833 et 1841, pour capter la nappe d'eau à 30 °C située à 548 m de profondeur. Il faut cependant attendre les chocs pétroliers des années 1970 pour voir la production mondiale d'électricité à partir de la géothermie s'accroître significativement.

⇒ 1800-1900 : invention de nouveaux dispositifs de transformation du rayonnement solaire

L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est connue depuis l'antiquité. Il faut attendre le 18<sup>ème</sup> siècle pour que celle-ci fasse l'objet de nouvelles tentatives d'utilisation. En 1746, le français Antoine de Lavoisier, associant des lentilles focales à un miroir parabolique, réussit à fondre du platine par la seule puissance de l'énergie solaire. Une centaine d'années plus tard, vers 1860, Augustin Mouchot fit fonctionner une presse d'imprimerie en chauffant l'eau de la machine à vapeur qui l'entraînait. Pour ce faire, il conçut un miroir concave (bombé) axé sur le Soleil. La puissance était suffisante pour imprimer 500 journaux à l'heure. Cette exploitation de l'énergie solaire ne connut pas le succès escompté et fut noyée par l'avènement des combustibles fossiles dans l'industrialisation naissante. Il faudra attendre le 20<sup>ème</sup> siècle pour voir apparaître des dispositifs exploitant la vapeur d'origine solaire pour l'entraînement de turbine génératrice d'électricité.

Au 19<sup>ème</sup> siècle, on découvrira également que l'énergie lumineuse a non seulement le pouvoir d'échauffer un corps noir, mais aussi celui d'expulser des électrons d'une plaque métallique produisant ainsi de l'électricité. Dès 1839, Antoine Becquerel (le grand-père d'Henri Becquerel qui découvrit la radioactivité) découvre le principe de la réaction photovoltaïque. Celle-ci consiste à utiliser les photons composant le rayonnement solaire pour

libérer les électrons présent dans un matériau semi-conducteur, c'est à dire présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants (aujourd'hui le silicium issu de la fusion de sables) : les photons communiquent leur énergie aux électrons du semi-conducteur, permettant à certains de ces derniers de s'extraire de la plaque. Dans sa forme simple, une cellule photoélectrique est constituée d'une petite ampoule vide d'air contenant deux électrodes. L'une, constituée ou recouverte par un métal photosensible, peut être atteinte par un faisceau lumineux extérieur et est reliée au pôle négatif d'une batterie d'accumulateurs ; c'est donc une électrode négative, la cathode. L'autre électrode est reliée au pôle positif de cette même batterie, c'est l'anode. Quand la cathode reçoit le rayonnement, elle émet des électrons qui sont attiré par l'anode. Le circuit se ferme donc et un courant électrique circule, proportionnel à l'intensité du rayonnement. Becquerel construisit les premières cellules photovoltaïques, mais elles restèrent au stade de prototype. Ce dernier effet appelé effet photovoltaïque a été découvert par le physicien allemand Heinrich Hertz en 1887.

Inventée par le physicien allemand Thomas Seebeck en 1821, la pile thermoélectrique exploite l'effet suivant : lorsqu'on chauffe la jonction de deux conducteurs de métaux différents faisant partie d'un même circuit, un courant électrique prend naissance dans ce dernier (thermocouple).

⇒ 1880-1910 : mise au point des premières éoliennes génératrices d'électricité

En 1888, l'américain Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le danois Paul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Ses travaux rapprochent les moulins de la technologie des éoliennes actuelles, notamment avec l'adoption de pylônes à structure treillis, nettement plus favorables à l'écoulement aérodynamique. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend 72 exemplaires jusqu'en 1908.

### **1850-1900 : redécouverte des propriétés du pétrole et mise au point du moteur à explosion**

⇒ 1850-1860 : mise au point des produits pouvant être obtenus par distillation du pétrole

La révolution industrielle et ses machines à vapeur ainsi qu'une demande grandissante en faveur de l'accès à un éclairage de qualité (les bougies de suif avaient une odeur désagréable et les becs de gaz n'existaient que dans les maisons et appartements modernes des zones urbaines) induisent une forte croissance des besoins en combustibles. C'est ainsi que l'on (re)découvre les propriétés de l'huile (oleum) de roche (pétra), pétrole utilisé pour l'éclairage dès les 5<sup>ème</sup> 6<sup>ème</sup> siècle de notre ère en Chine où l'on construit les premiers forages.

James Young, parmi d'autres en Angleterre, commença à fabriquer différents produits à partir de pétrole brut, mais il s'orienta par la suite vers la distillation du charbon et l'exploitation des schistes bitumeux. Le physicien et géologue canadien Abraham Gessner déposa en 1852 un brevet pour obtenir, à partir du pétrole brut, un combustible pour lampe peu onéreux, brûlant sans résidu, appelé pétrole lampant. En 1855, un chimiste américain, Benjamin Silliman, publia un rapport indiquant la gamme de produits utiles pouvant être obtenus par

distillation du pétrole : un gaz (comme pour le charbon), un liquide volatil (l'essence) et un liquide moins volatil (le kérosène ou pétrole lampant). Le résidu de la distillation est le mazout, ou fuel. On peut soumettre celui-ci à la distillation, laquelle permet d'obtenir le gasoil et un résidu solide, ramollissant au chauffage, l'asphalte.

A partir de 1859 et du fameux 1<sup>er</sup> forage américain de Drake en Pennsylvanie, on assiste à une extension considérable de l'exploitation des gisements de pétrole sur l'ensemble de la planète. L'accélération se produira réellement à partir du 20<sup>ème</sup> siècle lorsque le pétrole deviendra le combustible de référence pour assurer la propulsion des automobiles, dont la production s'industrialise. Jusque là, le pétrole est principalement utilisé à des fins d'éclairage, la lampe à pétrole devenant l'apanage des campagnes et des pays non industrialisés quand le gaz de ville devient celui des agglomérations urbaines.

⇒ 1860-1864 : mise au point du premier moteur à explosion par Etienne Lenoir et Nicolas Otto

Bien que le pétrole tende à être préféré au gaz pour l'éclairage, c'est une autre forme d'utilisation qui va créer sa légende (l'or noir) : le moteur à explosion. Les premiers travaux de thermodynamique – science de tous les phénomènes qui dépendent de la température et de ses changements – durant la première moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, ont démontré que le rendement des machines thermiques, quel qu'en soit le type, dépendait du niveau de la température produite. Mais ces analyses avaient aussi montré que la vapeur pénétrant dans le cylindre ne véhiculait qu'une petite partie de la chaleur produite par la combustion du charbon. Est alors apparue l'idée de placer la source chaude directement dans

le cylindre : il fallait construire des machines à combustion interne et non plus externe.

Le premier moteur à combustion interne fut l'œuvre d'Etienne Lenoir, ingénieur français d'origine Belge. En 1860, il obtient un brevet pour la construction d'un système reprenant l'ensemble cylindre-piston et toute la mécanique des machines à vapeur (notamment pour la transmission), mais dont le fonctionnement est basé sur l'introduction dans le cylindre de l'air qui est ensuite réchauffé par la combustion interne d'une petite quantité de gaz d'éclairage dont l'allumage est obtenu par une étincelle électrique. Il y a en somme deux inventions : celle du moteur à gaz et celle de l'allumage électrique du mélange air-gaz.

Toujours en 1860, un ingénieur italien propose de remplacer le gaz par du pétrole pour alimenter les moteurs à combustion interne. Ce n'est encore qu'une idée, mais elle fera long feu.

En 1862, Alphonse Eugène Beau dit Beau de Rochas décrit l'idée d'un moteur à combustion interne fonctionnant en quatre temps. Le cycle commence à un point mort haut, quand le piston est à son point le plus élevé. Pendant le premier temps le piston descend (admission), un mélange d'air et de carburant est aspiré dans le cylindre via la soupape d'admission. Dans un deuxième temps, la soupape d'admission se ferme, le piston remonte (compression) comprimant le mélange admis. Dans un troisième temps, le mélange air-carburant est enflammé, habituellement par une bougie d'allumage, aux environs du deuxième point mort haut (remontée complète du piston). L'expansion des gaz portés à haute température lors de la combustion force le piston à descendre pour le troisième temps (détente). Ce mouvement est le seul temps moteur (produisant de l'énergie

directement utilisable). Lors du quatrième et dernier temps (l'échappement) les gaz brûlés sont évacués du cylindre, via la soupape d'échappement, par la poussée de la remontée du piston.

En 1864, l'ingénieur allemand Nicolas Otto est le premier à commencer l'industrialisation du moteur à quatre temps décrit par Beau de Rochas. Ses moteurs fonctionnant au gaz commencent à concurrencer la machine à vapeur dans la production industrielle. Leurs avantages sont : la compacité, l'absence de stockage du combustible (une arrivée de gaz suffit), une mise en route instantanée.

### **1900-2000 : le développement des techniques de production d'hydrocarbures, répondre à l'essor de l'automobilité**

Au tournant du 20<sup>ème</sup> siècle, l'histoire de l'énergie est ainsi marquée par une diversification de l'offre, à trois niveaux : diversification des dispositifs de transformation des énergies primaires ; diversification des énergies finales ; diversification des dispositifs d'utilisation des énergies finales. Le siècle qui s'ouvre va cependant conduire à une clarification des filières énergétiques à l'aune de l'évolution de la demande. Le système énergétique de chaque pays anciennement industrialisés, en particulier la France, devra faire face à une double évolution.

D'une part, on va assister à l'essor de l'automobilité, automobilité reposant sur le plébiscite des véhicules équipés de moteurs à explosion. Cette évolution va stimuler de façon extrêmement massive la production pétrolière et l'ensemble des activités de transformation et de distribution connexes. D'autre

part, au principe de l'éclairage électrique s'ajoutera bientôt celui de l'électroménager et plus tard encore celui de l'électronique. Cet enrichissement des services pouvant être rendus par l'électricité va alimenter une demande croissante, dont la satisfaction repose sur des techniques de production abordées dans le point suivant.

### **1920-1973 : l'essor de la consommation de pétrole nécessite le développement de l'industrie pétrolière**

*⇒ La démocratisation de l'automobile à moteur à explosion entraîne une forte croissance de la demande d'hydrocarbure*

Dans le sillage de la reconstruction du pays suite à la seconde guerre mondiale, l'économie française entre dans une phase de croissance soutenue et continue. Les années 1960 voient l'éclosion de la « société de consommation » laquelle se traduit notamment par la forte croissance du marché automobile. Cette dernière entraîne un boom de la demande pétrolière qui coïncide avec la mise en exploitation à bas prix des énormes gisements du Moyen-Orient. Cette période marque l'apogée de la production pétrolière états-unienne.

Ainsi, dans les années 1960, le pétrole devient l'énergie dominante et son marché se mondialise. Sa prépondérance s'appuie non seulement sur l'essor de l'automobile mais également sur sa vive percée dans le chauffage domestique (à la place du bois et du charbon) et la production de chaleur industrielle. Le pétrole entre aussi dans la production d'électricité du fait de ses faibles coûts et des moindres investissements qu'il occasionne : les centrales thermiques sont plus rapides à construire et moins coûteuses que les usines hydroélectriques.

Cette évolution concerne tous les pays de l'OCDE. Leur consommation pétrolière passe de 2,6 Gtep (milliards de tep) en 1965 (sur une consommation énergétique totale de 2,6 Gtep, soit 42%) à 2 Gtep en 1973 (sur une consommation totale de 3,9 Gtep, soit 51%). Ainsi, au début des années 1970, le pétrole assure les 2/3 de l'énergie consommée en France.

⇒ *L'équipement des pays consommateurs en installations de raffinage*

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, alors que les Etats-Unis possèdent déjà une société dominante sur leur marché du pétrole, la Standard Oil Company de John D. Rockefeller, les principaux pays consommateurs de pétrole d'Europe se dotent eux-aussi de leurs compagnies pétrolières : les pays-Bas avec Royal Dutch Compagny (1890), fusionné avec la société anglaise Shell en 1907 ; l'Angleterre avec BP (1909) ; la France avec la Compagnie Française des Pétroles (1924). Celles-ci s'engagent alors dans une vive concurrence pour s'adjuger l'exploitation des champs pétrolifères présents dans les différentes régions du globe.

Au sein des pays consommateurs, se développe l'industrie du raffinage afin de transformer le pétrole brut en provenance des pays producteurs en produits pétroliers destinés aux marchés finaux. Ainsi, en 1929, la Compagnie Française des Pétroles crée la Compagnie Française de Raffinage (CFR). Mais l'installation de raffineries sur le sol français démarre d'abord par l'initiative de compagnies étrangères : mise en service des raffineries de Petit-Couronne en 1929 et de l'Etang de Berre par la Shell. La CFR met en service sa première raffinerie en 1933 à Gonfreville. La capacité de raffinage française s'accroît ainsi de

800 000 tonnes en 1929 à 5,8 millions de tonnes en 1935.

La région lyonnaise sera équipée durant les années 1960 : la raffinerie de Feyzin sera mise en service par ELF en 1964. Elle connaîtra un grave accident dès 1966, l'incendie d'un véhicule situé à proximité du site entraînant l'explosion des sphères de stockage de propane alors même que celles-ci présentaient une importante fuite de gaz non contrôlée. La Raffinerie de Feyzin est aujourd'hui un des établissements industriels de la branche Raffinage-Marketing du Groupe TotalFinaElf. Elle reste la seule raffinerie de la région lyonnaise. Ses installations sont conçues pour assurer à partir de pétrole brut la fabrication des différents hydrocarbures : les bitumes routiers et industriels, les brais et fiouls à usage industriel, le kérosène, le benzène et le toluène, les essences (supercarburant et carburant), le gazole, les fiouls domestiques, les GPL (Gaz de Pétrole Liquéfiés : butane, propane) ainsi que les grands intermédiaires de la chimie (Gaz Liquéfiés : éthylène, propylène, butadiène) destinés aux usines chimiques produisant les matières plastiques, les peintures, les vernis. La raffinerie produit aussi du soufre liquide issu du traitement des composés soufrés contenus dans les dérivés pétroliers.

### **1973-2000 : de la modération au nouvel essor de la consommation de pétrole**

⇒ *1973-1985 : l'époque des chocs pétroliers*

En 1973, la donne énergétique est bouleversé par le premier « choc pétrolier ». Dans le contexte de la guerre du Kippour opposant Israël à l'Egypte et la Syrie, les pays de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) décident brusquement d'augmenter de façon considérable le

prix du pétrole – de 10 dollars en 1971, le prix du baril s'élève à 40 dollars en 1974 – et de limiter leur niveau de production afin de sanctionner les pays occidentaux soutenant Israël (L.Mons, 2005). A cette première rupture succède une seconde en 1979 : à la suite de la révolution iranienne et de la guerre entre l'Iran et l'Iraq, l'offre mondiale de pétrole brut est amputée de 5 millions de barils/jour. Le niveau du prix du baril s'élève une nouvelle fois passant de 40 dollars environ en 1978 à près de 80 dollars en 1979.

Cette élévation des prix va mettre en grande difficulté l'économie des grands pays consommateurs de pétroles dépendants des pays de l'OPEP pour la plus grande partie de leur approvisionnement, principalement les pays de l'Europe de l'Ouest et du Nord. Cette situation va conduire ces derniers à engager des stratégies de maîtrise de leur demande de pétrole par substitution d'autres énergies.

⇒ *Le contre-choc pétrolier de la deuxième moitié des années 1980*

A partir du milieu des années 1980, le prix du pétrole connaît une baisse tout à fait significative puisqu'il revient à son niveau d'avant le premier choc pétrolier. Cette inflexion est liée tout d'abord à l'amélioration de l'offre pétrolière :

- l'innovation technique dans le secteur pétrolier a facilité la mise en exploitation de gisements autrefois inaccessibles et a permis d'améliorer les taux de récupération du pétrole qui sont passés de 25 à 35% en 15 ans ;
- la diversification des zones géographiques d'approvisionnement a privé l'OPEP de sa

capacité de contrôle<sup>1</sup>, tandis que les pays pétroliers qui connaissent de fortes croissances démographiques étaient poussés à dépasser leurs quotas de production alloués (Algérie, Venezuela, Iran).

D'autre part, plusieurs facteurs ont conduit à une stagnation de la demande de pétrole depuis 1973 dans les pays de l'OCDE – ainsi, en 2003 la consommation de pétrole des pays industrialisés est encore inférieure de 9,2% par rapport à son niveau de 1979 :

- les politiques de maîtrise de l'énergie furent en tant que tel un vif succès ;
- la sous-estimation par les autorités publiques des économies d'énergie en train d'être réalisées a conduit à un sur-investissement dans les énergies alternatives ;
- la chute du taux de croissance annuel (de 5 à 2%) induit par les chocs pétroliers a eu pour effet une croissance plus faible que prévu de la consommation d'énergie.

Ainsi, en 1982, les pouvoirs publics font un triple constat : l'abondance de pétrole sur le marché mondial protège de tout retour rapide de tensions ; la surcapacité dispense pour deux décennies de tout gros investissement de production d'électricité ; les efforts d'économie d'énergie ne semblent plus indispensables.

---

<sup>1</sup> L'OPEP, qui assurait 50% des ventes de pétrole en 1973, n'en fournissait plus que 29% au premier trimestre 1985. Lors de la réunion de l'organisation de décembre 1985, les responsables, dépassés par la baisse des cours, prennent alors la décision historique d'abandonner la politique des prix officiels.

### **1940-2000 : essor de la production de gaz naturel**

L'Europe ne découvre le gaz naturel qu'en 1650. Cette année là, P. Shirley présente à la Société Royale de Londres, un rapport sur la découverte d'une source de gaz inflammable près de Wigan, dans le Lancashire. Mais son utilisation demeurera inexistante jusqu'au 20<sup>ème</sup> siècle. Durant tout le 19<sup>ème</sup> siècle, l'éclairage au gaz s'effectue grâce au gaz issu de la distillation du bois ou du charbon, dans la mesure où les dispositifs de transport du gaz n'étaient pas suffisamment au point pour permettre l'exploitation des gisements de gaz naturel.

C'est aux Etats-Unis que démarre l'exploitation de gisements de gaz naturel en Occident : William Hart creuse le premier forage américain en 1821. La substitution du gaz naturel au gaz de distillation s'effectue dès les premières décennies du 20<sup>ème</sup> siècle. En Europe, le gaz naturel prit le relais du gaz manufacturé au sortir de la seconde guerre mondiale. En France, au moment de la création de Gaz de France en 1946, l'industrie gazière comptait 546 usines, tandis qu'elle n'en subsistait plus que 14 en 1963. A cette époque deux gisements de gaz naturel furent mis en exploitation en France : Saint-Marcet dès 1939 ; Lacq à partir de 1951.

### **1900-2000 : le développement des techniques de production d'électricité, répondre à l'essor de l'électroménager et de l'électronique**

Le 20<sup>ème</sup> siècle saura reconnaître les multiples avantages de l'énergie électrique dans la sphère domestique, d'abord pour l'éclairage et ensuite pour l'alimentation des multiples appareils

électroménagers et électroniques qui vont intégrer les foyers à partir de l'après-guerre : invention de l'aspirateur électrique en 1901, du réfrigérateur en 1915, ...

Pour répondre à une demande croissante d'électricité, la production reposera d'abord essentiellement sur l'hydroélectricité dont le développement sera très important dans les pays anciennement industrialisés. Surtout, la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle sera la période pendant laquelle l'humanité va découvrir une source d'énergie dont la puissance va surpasser tout ce que l'histoire a connu jusqu'ici : l'énergie nucléaire. Brusquement, le rapport du système énergétique à la matière subit un changement fondamental dans la mesure où le processus de production d'énergie nucléaire s'accomplit par une action directe sur les structures constitutives de la matière, sur le noyau atomique. Le rapport quantité d'énergie produite/quantité de combustible mis en œuvre est bouleversé puisque le très petite produit l'infiniment grand : 1 gramme d'uranium libère une énergie thermique équivalente à celle de deux tonnes de pétrole ou de trois tonnes de charbon. Les échelles de temps sont elles aussi ébranlées. Avec le nucléaire, l'humanité s'engage dans une production dont la portée historique n'est plus à l'échelle de la civilisation mais à celle des temps géologiques : la période du plutonium correspond à 24 000 ans, soit beaucoup plus que toute la durée de l'histoire de l'humanité depuis les débuts du néolithique. Sur le plan méthodologique, pour la première fois, le travail industriel des producteurs d'énergie tend à se confondre avec le travail scientifique ; le personnel oeuvrant au sein de la filière nucléaire est ainsi marqué par le sceau de l'élitisme.

Ainsi, après s'être élevée à 5 200 milliards de KWh au début de la décennie 1970, la production d'électricité dans le monde atteint plus de 17 000 milliards de KWh (CES, 2006).

### **1900-2000 : le développement de l'hydroélectricité en France**

Le 20<sup>ème</sup> siècle sera celui de la course à la puissance en matière d'hydroélectricité, les records de puissance des centrales hydroélectriques installées dans le monde étant régulièrement battus. Toutefois, l'essor de la production pétrolière mondiale tend à réduire peu à peu la part du potentiel hydroélectrique exploitable de façon rentable ; les centrales thermiques fonctionnant au pétrole se multiplient.

⇒ *1900-1970 : l'évolution des techniques de construction des centrales hydroélectriques*

Au tournant du 19<sup>ème</sup> et du 20<sup>ème</sup> siècle, l'évolution technologique des ouvrages hydroélectriques s'oriente vers une réduction du nombre et une augmentation de la puissance unitaire des turbines. Surtout, une attention nouvelle est apportée à l'optimisation de l'utilisation de ces équipements très coûteux. Face au constat que le besoin en électricité varie au cours de la journée – il est beaucoup plus faible la nuit – et que la ressource en eau n'est pas constante tout au long de l'année, on va chercher à stocker l'énergie dans des réservoirs situés en hauteur. Très tôt, des lacs d'altitude ont été aménagés comme réserves permettant de régulariser le débit disponible et même de le faire varier en fonction des besoins. Introduite par Aristide Bergès avec le Lac Crozet, la technique la plus utilisée consiste à « percer » le fond du lac par un tunnel à une certaine profondeur sous la surface ; le volume représenté par la tranche d'eau comprise

entre cette profondeur et la surface normale du lac est ainsi disponible. Ce volume peut même être augmenté si l'on élève le niveau normal du lac grâce à la construction d'un barrage. A cette stratégie de réserve peut s'ajouter celle consistant à pomper l'eau de la rivière durant les heures creuses pour la remonter en amont vers des réservoirs qui seront utilisés lors des périodes de pointes. En France, c'est en 1926 que l'on met en service la première usine de pompage, au lac de la Girotte (Savoie). Cette gestion coordonnée des usines hydroélectriques sera de plus en plus poussée à mesure que les réseaux électriques français seront reliés entre eux, interconnexion qui se développera durant l'entre-deux guerre en France.

Jusqu'aux années 1930, la majorité des usines hydroélectriques sont des usines fluviales au fil de l'eau ou des usines de haute chute, les premières fonctionnant en permanence tandis que les secondes sont utilisées uniquement aux heures de pointes de consommation. A partir de là, se multiplie la construction de grands barrages fluviaux. Ceux-ci se traduisent par la constitution de lacs dans la vallée même du fleuve. L'usine hydroélectrique peut être accolée à la face aval du barrage ; dans ce cas, c'est la hauteur du barrage qui conditionne la hauteur de la chute. Mais l'usine hydroélectrique peut aussi se trouver plus loin, plus bas, et disposer d'une hauteur de chute encore plus grande grâce à des conduites forcées. Jusqu'aux années 1960, les barrages seront construits selon la technique du barrage-poids, selon laquelle c'est le poids du barrage qui permet de retenir l'eau. A partir des années 1950, les ingénieurs français André Coyne et Albert Caquot participent à la diffusion du principe de barrage en voûte, dans lequel la poussée de l'eau est reportée

sur les flancs de la vallée au moyen d'un mur de béton arqué horizontalement, et parfois verticalement.

⇒ *1945-1980 : l'aménagement systématique des grands fleuves français*

Au sortir de la deuxième guerre mondiale, l'étendu du chantier de la reconstruction conduit les autorités du pays à faire de la réduction de la facture énergétique un enjeu essentiel : il s'agit d'alléger les importants besoins en charbon importé que connaît jusqu'ici la France. Pour ce faire la mise en valeur systématique du potentiel hydroélectrique du territoire national apparaît comme la voie la plus pertinente. Mais celle-ci implique des investissements considérables, que les acteurs privés du secteur de l'énergie ne peuvent à l'époque assumer. Ainsi, est créée l'entreprise nationale «Electricité de France» en 1946 dont l'une des principales missions sera de réaliser l'équipement hydraulique du pays. Ainsi, en 1948, onze aménagements sont livrés à l'exploitation, sept en 1949, dix en 1950, huit en 1951 et 1952 ; une quinzaine d'ouvrages sont mis en service jusqu'en 1957 date à laquelle s'achève le premier programme d'aménagement hydraulique de l'après-guerre. Quelques très grands projets seront encore réalisés par la suite. Grâce à ce processus, la part de l'hydraulique dans la production d'électricité d'EDF est passée à 50%, proportion qui demeurera jusqu'en 1961 pour ensuite décroître avec le développement de la production thermique au fuel – à partir de 1965-1966, le fuel assure la très grande majorité de l'accroissement de la production électrique – puis de la production nucléaire.

L'un des projets lancés à partir des années 1960 présente un intérêt particulier sur le plan technique : l'usine marémotrice de La Rance. L'idée d'utiliser

les marées pour produire de l'électricité hydraulique date en France de 1918. Créée cette année-là, la commission de la houille bleue remet en 1921 un rapport préconisant l'aménagement de l'estuaire de la Rance, près de Saint-Malo. De nouvelles études sont menées en 1941, et surtout après la libération par EDF. Celles-ci montrent notamment que la baie du Mont-Saint-Michel bénéficie d'un fort marnage<sup>1</sup>. Pour autant, ce site ne fera finalement pas l'objet d'aménagement. En revanche, les travaux sur l'estuaire de la Rance démarrent en 1961 et s'achèvent en 1966. La centrale est équipée de 24 turbines de puissance unitaire de 10 000 kW fabriquées par la société grenobloise Neyrpic ; elles ont la particularité de pouvoir fonctionner avec des différences de niveaux faibles et dans les deux sens du flux. La centrale marémotrice de la Rance est inaugurée en novembre 1966. Elle demeure la seule centrale hydroélectrique de ce type dans le monde. Pendant ses trente premières années d'existence, elle a produit 16 milliards de KWh. Elle fait actuellement l'objet d'un vaste programme de rénovation.

En région lyonnaise, cette volonté d'aménagement hydraulique est à la fois plus ancienne et à plus long terme. Édouard Herriot (maire de Lyon de 1905 à 1956) et Léon Perrier (sénateur de l'Isère) sont à l'origine de la loi d'aménagement du Rhône du 27 mai 1921. Cette loi décide un programme de travaux et d'aménagement du Rhône selon trois priorités : l'énergie, la navigation, l'irrigation et autres utilisations agricoles. Le 27 mai 1933, la Compagnie Nationale du Rhône, société

---

<sup>1</sup> Le marnage est la différence de niveau de l'eau entre la marée haute et la marée basse.

d'économie mixte<sup>1</sup>, voit le jour pour mettre le fleuve en valeur grâce aux ressources financières tirées de l'hydroélectricité. En 1934, elle reçoit de l'État la concession du Rhône comprenant les travaux d'aménagement jusqu'en 2023. A la différence des autres compagnies privées de production et de distribution d'électricité, la CNR ne fera pas l'objet de la procédure de nationalisation engagée en 1946 mais elle sera contrainte de limiter son action en matière d'hydroélectricité à la construction d'ouvrages ensuite exploités par EDF. La seule grande réalisation de la CNR durant l'entre-deux guerres sera la construction du port Edouard Herriot. Le début du second conflit mondial repoussera en effet l'aménagement hydraulique du fleuve. La première centrale hydroélectrique construite par la CNR est celle de Génissiat, près de Bellegarde-sur-Valserine (Ain). Entrée en service en 1948, elle se compose d'un barrage-poids haut de 104 mètres et de quatre turbines de 65 000 kW chacune ; la puissance installée finira par atteindre 400 000 kW. De 1951 à 1986, la CNR réalisera 17 autres aménagements sur le Rhône. Depuis septembre 2005, le suivi et le pilotage de ces ouvrages hydroélectriques sont effectués en temps réel depuis Lyon. Aujourd'hui, la Compagnie Nationale du Rhône est le 2<sup>ème</sup> producteur français d'électricité.

Les actions d'aménagement d'EDF et de la CNR ont fait de la région Rhône-Alpes la première région hydroélectrique de France avec une puissance installée s'élevant à 10 millions de kW

---

<sup>1</sup> Son capital se décompose de la façon suivante : un quart à la Ville de Paris, un quart pour les collectivités locales rhodaniennes, un quart pour les sociétés privées d'électricité et un dernier quart pour la Compagnie de transports ferroviaires PLM.

## **1900-1946 : les débuts de la distribution d'électricité en France**

Jusqu'à la création d'EDF, la production et la distribution de l'électricité sont très largement le fait d'entreprises privées qui se disputent les 20 000 concessions électriques que compte le pays ; il existent certes 250 régies municipales mais elles fournissent moins de 5% de la population. Le secteur de l'énergie électrique compte alors près de 200 entreprises pour la production, une centaine pour le transport, 1 150 pour la distribution. Certaines d'entre elles vont cependant connaître une expansion plus importante, dont « l'Energie industrielle ».

⇒ 1906-1946 : l'essor de la société lyonnaise « l'Energie industrielle »

Le Lyonnais Pierre-Marie Durand va jouer un rôle prépondérant dans ce processus de développement de la distribution de l'énergie électrique en France. Tout commence avec la création de la société « Energie industrielle » en 1906. Pierre-Marie Durand présente au départ plusieurs handicaps pour se lancer dans la distribution d'électricité : il n'est ni ingénieur, ni industriel ; il manque d'expérience en matière de gestion et de capitaux suffisants pour réussir dans un secteur fortement capitalistique. De plus, il s'attaque à un secteur déjà bien structuré, la plupart des grandes villes étant desservies par quelques grandes compagnies de travaux publics, de gaz ou de tramways. Implantées initialement dans trois départements, le Rhône, l'Isère et le Puy de Dôme, l'Energie industrielle va s'orienter dès 1907 vers une stratégie de croissance horizontale externe, c'est à dire la recherche d'un monopole local par le biais d'acquisitions financées par l'emprunt, le marché fonctionnant par un système de concessions

supprimant de fait la concurrence. Lançant des offensives dans de multiples régions – Bourgogne, Bretagne, bassin parisien, littoral méditerranéen – Durand ne s'attaquent qu'aux petites compagnies locales. L'Energie industrielle opte délibérément pour la seule distribution, la production se révélant bien trop coûteuse. Aussi une attention particulière est donnée à la recherche de clients.

Cette démarche conduit Durand à s'attaquer aux marchés étrangers : il implante sa société aux sein même de compagnies espagnoles, grecques, turques ou encore roumaines. Répondant à une logique financière plus qu'industrielle, Durand opte toujours pour les choix les plus rentables. En quarante ans, l'Energie industrielle, la société mère, absorbera quelque soixante et une compagnies. Pour autant, Durant sait maintenir une structure très décentralisée. Il aurait peut-être été plus simple de fondre toutes les compagnies en une seule, géante, mais la distribution électrique requiert un fort ancrage local. Doù l'option du groupe, bien plus souple et donc plus efficace. Devenu puissante, l'Energie industrielle peut s'attaquer à l'acquisition de sociétés plus importantes comme la vénérable Compagnie du gaz de Lyon en 1928 puis la Société lyonnaise des forces motrices du Rhône en région lyonnaise.

Dans les années 1930, Durand décide de se lancer dans la production. C'est que le contexte a changé. Les débouchés sont désormais assurés, personne ne songerait à se passer de l'électricité. Dès lors, mieux vaut tenter de développer la consommation par la promotion du tout électrique. De plus, l'Etat, dont l'intérêt pour l'électricité ne cesse de croître, réglemente de plus en plus ce secteur, notamment en matière de tarifs. Les économies d'échelle deviennent indispensables, et assurer sa propre

production peut être un moyen d'en réaliser. C'est ainsi que l'Energie industrielle se lance dans des projets de constructions d'unités de production, dont certains sont particulièrement ambitieux (le barrage de Tignes) et participe largement à la mise en place du réseau national d'interconnexion et de transport. Le groupe Durand disparaît en 1946, du fait de la nationalisation. Il constitue un apport fondamental dans la construction d'Electricité de France. En quarante ans, Durand a bâti un géant industriel de l'électricité, implanté dans 38 département, aux colonies et à l'étranger, alimentant 6,3 millions de personnes dans 7000 commune et produisant 2 milliards de kWh. L'influence de l'organisation du Groupe Durand dans la constitution d'EDF s'exprimera par la création au sein de l'entreprise publique d'une direction de l'Equipement destinée à la prise en charge des projets hydraulique, à l'instar du rôle qu'occupait la filiale « l'Entreprise industrielle » au sein du groupe privé.

### **1896-1945 : de la découverte de la radioactivité aux premières utilisations de la réaction nucléaire**

⇒ *1897-1932 : découvertes de la structure de l'atome et des principes de la radioactivité*

A la charnière entre le 19<sup>ème</sup> et le 20<sup>ème</sup> siècle, la découverte de la radioactivité est concomitante de celle de la structure de l'atome. Si l'hypothèse de la structure atomique est posée dès l'Antiquité – vers 450 avant J.C., Leucippe développe une théorie selon laquelle la matière n'est pas indéfiniment divisible et prononce le mot « atomos » pour désigner « ce qui ne peut être coupé » – il faut attendre 1803 pour qu'elle soit à nouveau formulée (John Dalton) et la toute fin du 19<sup>ème</sup> siècle et le début du siècle suivant pour que soient découvertes

les caractéristiques précises de l'atome, démontrant que ce dernier est lui-même composé de particules plus petites.

Les grandes dates de la découverte de la structure de l'atome sont les suivantes :

- En 1897, l'anglais John Thomson découvre l'un des composants de l'atome : l'électron. Il imagine alors que les atomes sont des sphères remplies d'une substance électriquement positive et fourrée d'électrons chargés négativement.
- En 1911, au cours de ses expériences, l'anglais Ernest Rutherford constate que lorsque les rayons radioactifs alpha traversent une mince feuille de métal, certaines particules sont déviées ou rejetées en arrière. Pour expliquer ce phénomène, il formalise l'hypothèse de la structure nucléaire des atomes formant la matière : toute la masse et toute la charge positive de l'atome sont concentrées dans un petit noyau central qui crée un champ d'attraction immense dans lequel les électrons tournent.
- En 1913, Rutherford découvre un premier ensemble de composants du noyau : les protons.
- En 1932, Chadwick découvre un deuxième ensemble : les neutrons.

Au début des années 1930, les principales données concernant la structure de l'atome sont établies : un noyau central qui est un assemblage de protons et de neutrons, lesquels constituent les nucléons ; un nuage périphérique composé d'un cortège d'électrons qui tournent à des vitesses prodigieuses autour du noyau.

Les grandes dates de la découverte des principes de la radioactivité sont les suivantes :

- En 1896, Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle. Cherchant à savoir si les rayons qu'émettaient les sels fluorescents d'uranium étaient les mêmes que les rayons X découverts en 1895 par le physicien allemand Wilhelm Roentgen, il disposa, par hasard, une plaque photographique au dessus de sels d'uranium. Il constate alors que la plaque est impressionnée par un rayonnement inconnu.
- En 1898, Pierre et Marie Curie, poursuivant les travaux de Becquerel, isolent les éléments radioactifs du minerai d'uranium : le polonium et le radium. Un troisième élément radioactif sera découvert peu après : le thorium. Les Curie mesurent également l'effet calorifique résultant de la radioactivité et trouvent qu'un gramme de radium fournit environ 100 calories par heure, sans arrêt. Il ne fallut pas longtemps pour que l'on parle dans la presse générale de l'époque d'une fabuleuse source d'énergie.
- En 1899, Ernest Rutherford constate que les rayons uraniques sont en fait constitués de deux sortes de rayons, différant par leur pouvoir pénétrant. Les rayons alpha sont arrêtés par une simple feuille de papier, alors que les rayons bêta sont capables de traverser une épaisse couche de papier ou même une feuille d'aluminium.
- En 1900, le physicien né à Lyon Paul Villard découvre que le radium émet une troisième sorte de rayons bien plus pénétrants que les rayons bêta, puisque capables de traverser une épaisse plaque de métal, qu'il appelle les rayons gamma.
- En 1903, une première théorie de la radioactivité est établie par Ernest Rutherford. Il

décrit la radioactivité comme la transmutation spontanée d'un atome.

- En 1905, les travaux d'Albert Einstein aboutissent à la fameuse équation  $E=mc^2$ . Celle-ci détermine l'équivalent énergétique de la masse, dont la valeur est égale au carré de la vitesse de la lumière. Étant donné que « c » a une valeur très élevée, on constate alors que la quantité d'énergie qui serait développée lors de la disparition d'une masse même minime serait considérable. En d'autres termes, Einstein a découverte théoriquement une nouvelle source d'énergie : l'énergie atomique. Les physiciens comprirent vite que la formule d'Einstein leur donnait la solution de la radioactivité. Lors de l'émission d'un rayonnement (alpha, bêta ou gamma), l'atome radioactif perd une infime partie de sa masse, qui se transforme en énergie radiante. On comprend alors pourquoi l'énergie en jeu dans la radioactivité apparaît si considérable. Sans être éternelle, la radioactivité génère des émissions énergétiques si considérables (à l'échelle atomique) que l'observateur a l'impression d'un phénomène inépuisable.

- En 1913, Ernest Rutherford et Hans Geiger inventent le compteur Geiger. Ils parviennent en effet à quantifier de manière précise le nombre de particules Alpha émises, chaque seconde, par un gramme de radium : 34 milliards. A partir de là, il devient possible de mesurer les phénomènes radioactifs. Cette découverte se révélera essentielle lorsque l'on prendra conscience des dangers de la radioactivité pour la santé humaine à partir des années 1920 : exposé au pouvoir pénétrant et énergétique des rayons radioactifs, un

organisme vivant est en fait criblé par des milliers de projectiles qui peuvent provoquer des actions pathogènes voire mortelles.

En quelques années, on se rend donc compte qu'il existe dans la nature des noyaux d'atomes instables. Ces noyaux instables se transforment spontanément en d'autres noyaux d'atomes, radioactifs ou non. Irréversible, cette dégradation s'accompagne d'une émission de différents types de rayonnement. On saura plus tard que cette instabilité est due à un excès soit de protons, soit de neutrons, soit des deux.

⇒ 1919-1940 : la découverte de la réaction nucléaire

Les expérimentations conduites par Ernest Rutherford pour approfondir la connaissance de la radioactivité consistent à bombarder toutes sortes de cibles à l'aide de rayons alpha. En 1919, dans une de ses expériences, où la cible est constituée d'azote, il parvient à transformer une (très petite) partie de celui-ci en oxygène. Ernest Rutherford vient, pour la première fois, de réaliser une transmutation artificielle.

Le même type d'expériences est réalisé en 1933 par Irène et Frédéric Joliot Curie qui, en bombardant de l'aluminium par des rayons alpha, parviennent à créer un nouveau nucléide. L'italien Enrico Fermi parvient au même constat en bombardant de l'uranium à l'aide de neutrons.

En 1938, les physiciens allemands Hahn et Strassmann découvrent que les nouveaux nucléides issus du bombardement de l'uranium par des neutrons sont en fait les fragments du noyau d'uranium initial : le noyau d'uranium peut se briser, sous l'action d'un neutron, en deux noyaux. C'est la découverte de la fission nucléaire. Lise Meiner, autre physicienne allemande, se basant sur la

théorie de la relativité, calcule que la fission de l'uranium, qui correspond à une perte de masse, libère une quantité d'énergie considérable : de l'ordre de 100 000 fois plus grande que celle dégagée, par exemple, par la combustion du carbone ou de l'hydrogène.

En 1939, le physicien français Frédéric Joliot Curie, assisté de Lew Kowarski et de Hans Von Halban démontre que la fission de l'uranium, du fait de la libération de neutrons, peut donner lieu à une réaction en chaîne : chaque neutron produit une fission pouvant provoquer à son tour une fission libérant de nouveaux neutrons... Joliot Curie calcule que, si la réaction en chaîne se poursuit, la libération d'énergie peut être explosive. Les chercheurs découvrent également le rôle modérateur de l'eau lourde (eau densifiée par le remplacement de l'hydrogène par le deutérium) quant à l'ampleur du processus de fission : éjectés à grande vitesse, les neutrons issus d'une fission peuvent être ralentis en incorporant dans le système des noyaux (ceux de l'eau lourde) sur lesquels ces neutrons vont rebondir et perdre une partie de leur énergie. Toujours en 1939, Niels Bohr et J.A.Wheeler, à Copenhague, découvrent que parmi les deux isotopes naturels de l'uranium (235 et 238), le plus légers et le plus rare, l'U 235, est le plus facilement fissile par des neutrons lents.

Ces découvertes successives, aboutissant au principe de la réaction en chaîne, constituent les préalables fondamentaux à la mise au point d'un procédé d'exploitation de l'énergie nucléaire. Autrement dit, une nouvelle source d'énergie, l'énergie nucléaire, vient d'être découverte.

⇒ 1940-1945 : mise au point de la première forme d'utilisation de l'énergie nucléaire, la bombe

Les travaux de physique nucléaire connaissent un tour nouveau avec le déclenchement de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. Quelques personnalités américaines (dont l'illustre physicien Albert Einstein, vivant alors aux Etats-Unis) se rendent compte que de l'énergie nucléaire peut émerger un nouveau type de bombe, et que celle-ci ferait figure d'arme absolue. Face à la menace de l'hypothèse d'une mise au point de la bombe par les allemands, le gouvernement américain lance un programme de recherche (qui sera baptisé Manhattan) réunissant, dans le plus grand secret et avec des moyens financiers immenses, des mathématiciens, des physiciens, des chimistes, des ingénieurs avec pour mission de construire la bombe atomique.

La première étape consiste à produire suffisamment de matériaux fissiles. Pour ce faire, deux voies de recherche sont étudiées : la séparation de l'uranium pour obtenir des matières fissiles très pures et la production d'un corps fissile nouveau, le plutonium, obtenu en bombardant de l'uranium naturel par des neutrons générés par une source d'uranium. A partir du moment où l'on dispose de matières fissiles en quantité suffisante, se pose la question de la masse critique. Il s'agit de déterminer le volume de matières fissiles permettant à la réaction nucléaire en chaîne de s'auto-entretenir, c'est à dire le stade les neutrons qui produisent des fissions sont remplacés en nombre tel qu'il y ait situation stationnaire ; on observe en effet une perte de neutrons lors des fissions du fait de leur éjection hors du volume dans lequel se déroulent ses fissions.

Une fois cette étape accomplie, il suffit alors d'une très petite augmentation du volume pour que le système « diverge », c'est à dire pour que la population de neutrons croisse de façon

exponentielle<sup>1</sup>, entraînant un nombre également croissant de fissions et donc une libération rapidement explosive d'énergie. Cette étape de la détermination de la masse critique est atteinte en 1942 : sous les gradins du stade désaffecté de Stagg Field à l'Université de Chicago, une équipe menée par Enrico Fermi initia la première réaction nucléaire en chaîne auto-entretenu, dans un réacteur composé d'uranium pour le combustible et de graphite pour le modérateur. Dès lors, le processus passe en phase industrielle avec la fabrication concrète de la bombe. Les explosions atomiques d'Hiroshima (uranium) et de Nagasaki (plutonium) au Japon marquent « l'aboutissement » du projet Manhattan et la fin de la guerre.

### **1945-1990 : le développement de l'exploitation civile de l'énergie nucléaire**

⇒ *1945-1973 : mise au point et diffusion de la première génération de réacteurs nucléaires destinés à la production d'électricité.*

En 1945, la puissance absolue de l'énergie nucléaire apparaît à la face du monde. Son utilisation militaire acquiert désormais un caractère dissuasif. Mais les réacteurs mis au point dans le cadre du projet Manhattan ont démontré la possibilité de construire des centrales électriques fonctionnant à l'énergie nucléaire. Il faut pour cela utiliser la chaleur dégagée par la réaction nucléaire pour produire la vapeur d'eau nécessaire à l'entraînement d'une turbine couplée à un alternateur générant de l'électricité.

Ainsi, en 1945, le général de Gaulle, par ordonnance, crée le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Premier organisme nucléaire civil

au monde à être investi du monopole des questions atomiques, le CEA est chargé de donner à la France la maîtrise de l'atome dans les secteurs de la santé, de l'énergie, de l'industrie, de la sûreté et de la défense. Si la vocation générale du CEA est la recherche, la question des choix d'application donne d'emblée la priorité à la fabrication de la bombe atomique selon les vœux du général de Gaulle. En 1948, le premier réacteur nucléaire français est mis en service au fort de Châtillon. Ce n'est encore qu'un assemblage critique expérimental, non producteur d'énergie.

En 1954, l'URSS met en service le premier réacteur nucléaire civil au monde à Obninsk. D'une puissance de 5 000 kW, ce réacteur utilisait de l'uranium enrichi à 5% comme combustible et le graphite comme modérateur. En 1956, le CEA met en service la centrale nucléaire de Marcoule (Gard). Il utilise du graphite comme modérateur et du CO<sub>2</sub> comme fluide caloporteur. Il n'est cependant pas destiné à la production d'énergie mais à la fabrication de plutonium dans un but militaire, la France voulant alors se doter elle aussi de la bombe nucléaire. Cette même année, le premier réacteur nucléaire à vocation électrique d'Europe entre en service à Calder Hall en Angleterre.

Il faudra attendre le rapprochement entre le CEA et Electricité de France (EDF), entreprise publique créée en 1946, pour que la première exploitation commerciale d'un réacteur nucléaire soit lancée en France : en 1962 la Boule d'EDF à Chinon est mise en service ; elle est aujourd'hui transformée en musée de l'énergie nucléaire. Si le contexte lui est encore peu favorable – l'équipement hydroélectrique du pays demeure la priorité tandis que l'attrait du pétrole se fait croissant – la filière électronucléaire fait l'objet en France d'une ambition

---

<sup>1</sup> Fonction mathématique dont la croissance est de plus en plus rapide et continue

à la hauteur de son potentiel énergétique. Considéré dans la continuité de l'histoire, le projet nucléaire français sera une tentative lucide et rationnelle de donner au pays une assise énergétique sans précédent, cette avancée historique devant assurer un nouveau développement de l'industrialisation : « la France, qui n'a pu gagner ni la bataille du charbon au 19<sup>ème</sup> siècle, ni celle du pétrole dans la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle, entend aborder l'ère atomique avec la certitude du succès... » lit-on dans l'exposé des motifs de la loi de 1957 qui institue le 2<sup>ème</sup> plan quinquennal atomique.

Au total neuf réacteurs seront construits durant les années 1960, fonctionnant à l'uranium naturel – la technique de l'enrichissement de l'uranium étant jalousement gardée par les Etats-Unis – avec du gaz comme fluide caloporteur et du graphite comme modérateur : cette filière technologique est dite UNGG (uranium naturel graphite gaz). L'un de ces premiers prototypes fut construit en région lyonnaise, sur la commune de Saint-Vulbas (Ain), sous l'égide du CEA. En 1965, on comptait seulement 64 réacteurs dans le monde pour une puissance totale de 5,8 millions de kW. Le faible prix du baril de pétrole offrait en effet aux centrales thermiques fonctionnant au fuel une compétitivité sans égale.

Dès le lancement de cette première génération de réacteurs nucléaires, la France s'est préoccupée de la question du cycle du combustible, tant sous l'aspect de l'utilisation rationnelle des ressources naturelles que sous celui de la gestion des déchets. Cette attention s'est traduite par le développement des procédés et installations de l'aval du cycle du combustible : traitement des combustibles usés, recyclage du plutonium pour les usages militaires et

en vue de l'alimentation de réacteurs futurs fonctionnant suivant le concept de surgénération. Cette démarche a permis, dès le départ, de réduire la quantité et la nocivité à long terme des déchets ultimes. La première usine de retraitement des combustibles a été mise en service en 1958 à Marcoule (Gard), suivie de l'usine de La Hague (Manche) en 1966.

En 1963, les Etats-Unis mettent en service le premier réacteur nucléaire surgénérateur au monde. Il s'agissait d'un tout nouveau concept de réacteur puisque fonctionnant avec des neutrons rapides, c'est à dire sans modérateur. Il est ainsi appelé « surgénérateur » dans la mesure où il produit plus de matériau fissile qu'il n'en consomme.

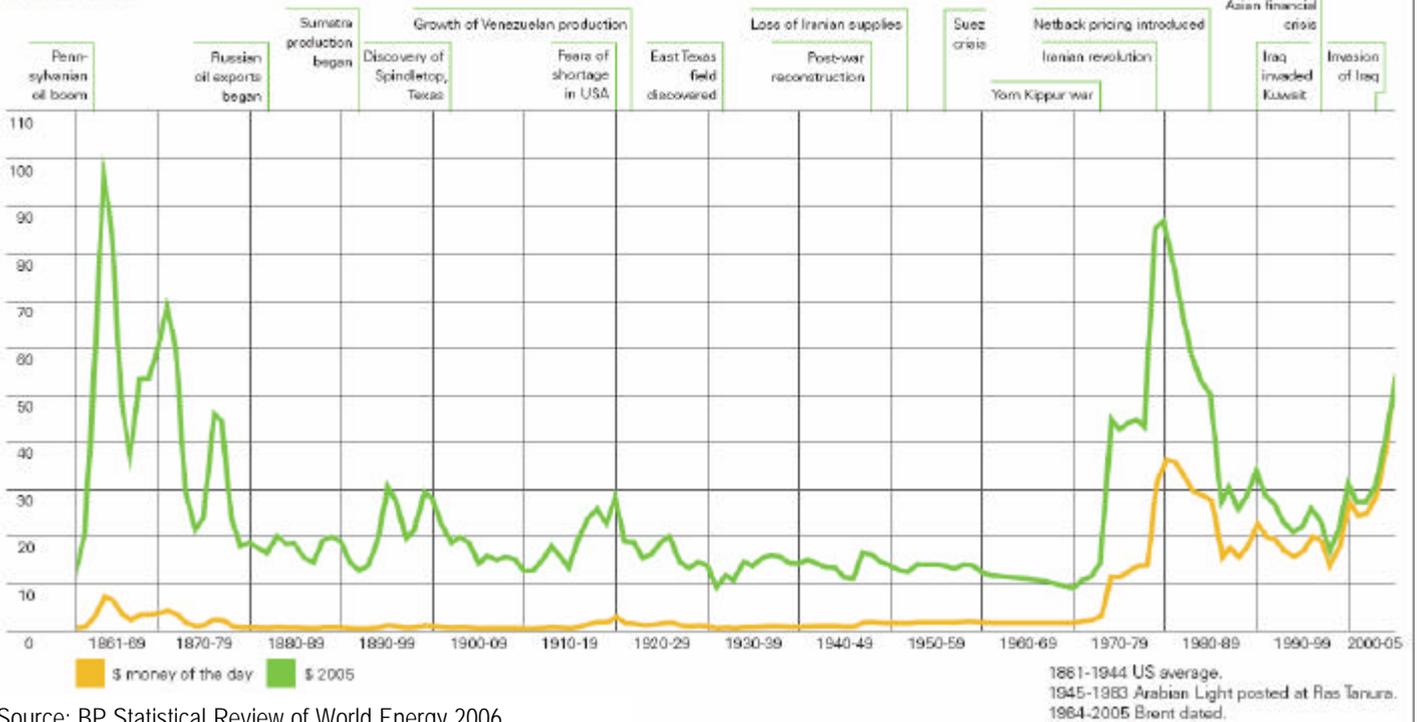
⇒ 1973-1990 : le nucléaire face à la dépendance énergétique

En 1973, la donne énergétique est bouleversée par le premier « choc pétrolier ». Dans le contexte de la guerre du Kippour opposant Israël à l'Égypte et la Syrie, les pays de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) décident brusquement d'augmenter de façon considérable le prix du pétrole – de 10 dollars en 1971, le prix du baril s'élève à 40 dollars en 1974 – et de limiter leur niveau de production afin de sanctionner les pays occidentaux soutenant Israël (L.Mons, 2005). A cette première rupture succède une seconde en 1979 : à la suite de la révolution iranienne et de la guerre entre l'Iran et l'Iraq, l'offre mondiale de pétrole brut est amputée de 5 millions de barils/jour. Le niveau du prix du baril s'élève une nouvelle fois passant de 40 dollars environ en 1978 à près de 80 dollars en 1979.

## Crude oil prices since 1861

US dollars per barrel

World events



Source: BP Statistical Review of World Energy 2006

Cette élévation des prix va mettre en grande difficulté l'économie des grands pays consommateurs de pétrole dépendants des pays de l'OPEP pour la plus grande partie de leur approvisionnement, principalement les pays de l'Europe de l'Ouest et du Nord. Une première stratégie d'adaptation à ce nouveau contexte consiste à intensifier la prospection et à mettre en exploitation des gisements désormais rentables (mer du Nord, golfe du Mexique...). Ne possédant pas de réserves pétrolières et dépendant en 1973 à 75% de l'étranger pour son approvisionnement en énergie<sup>1</sup>, la France choisit quant à elle, par l'intermédiaire du gouvernement Messmer, de lancer un programme d'équipement électronucléaire d'envergure afin d'atteindre un taux d'indépendance énergétique de 50% en 1990 et de couvrir les  $\frac{3}{4}$  de la production nationale par le nucléaire. Les années 1970 seront également celles de l'amorce de la transformation du modèle économique occidental

<sup>1</sup> En 1975, 40% de la production française d'électricité est le fait de centrales au fuel.

dans son ensemble de l'industrie de masse vers le service de masse. Dans cette perspective, le développement du programme électronucléaire français sera également présenté comme un facteur favorable à la prise en charge de ces mutations des processus productifs, l'accès à une énergie bon marché devant permettre de financer les adaptations nécessaires (automatisation...). Ainsi, la période 1975-1990 a été la période la plus fastueuse de l'industrie nucléaire en France<sup>2</sup> et dans le monde. Des dizaines de réacteurs sont mis en chantiers dans les pays occidentaux comme dans le bloc communiste, ce qui permet de bénéficier d'économie d'échelle et donc d'améliorer la compétitivité de l'électricité produite.

<sup>2</sup> Jusqu'en 1972, le développement de l'électronucléaire français a été lent et prudent: 150 000 kW engagés en moyenne chaque année au cours du 3<sup>ème</sup> plan (1957-1961), 200 000 kW au cours du 4<sup>ème</sup> (1962-1965), 500 000 kW au cours du 5<sup>ème</sup> (1966-1970). A la suite de la stratégie affichée par le gouvernement Messmer, ce sont 16 tranches de 925 000 kW qui sont commandées en 1974, 18 nouvelles tranches (8 de 925 000 kW et 10 de 1 300 000 kW) à la fin 1975, et 14 autres en 1979-1980. Au total, ce programme d'investissements correspond à l'époque à 177 milliards de francs.

Sur le plan strictement technologique, les années 1970 et 1980 voient la diffusion en France d'une nouvelle génération de réacteurs nucléaires : les réacteur à eau sous pression (REP) développés par la firme américaine Westinghouse. Ceux-ci apparaissent plus fiables et plus puissants que ceux de la filière française. En région lyonnaise, le site de Saint-Alban (Isère) comprend deux réacteurs de type REP mis en service au milieu des années 1980. De même, quatre REP ont été mis en service en 1979 et 1980 sur le site de Saint-Vulbas (Ain).

En 1979, l'amont de la filière française du nucléaire est renforcé par la mise en service de l'usine de production d'uranium enrichi « Eurodif » à Pierrelatte. Elle est le fruit d'un partenariat européen réunissant la France, la Belgique, l'Italie, l'Espagne et la Suède pour développer un outil européen d'enrichissement de l'uranium. L'uranium enrichi produit par Eurodif sera utilisé comme combustible par les centrales nucléaires françaises et de nombreuses centrales étrangères. Aujourd'hui, Eurodif produit à lui seul 25% de la consommation mondiale d'uranium enrichi.

Dans ce nouveau contexte où les réacteurs à eau légère surclassent complètement la filière UNGC et où l'objectif d'indépendance énergétique semblait pouvoir se heurter au caractère limité des ressources mondiales d'uranium se fait toujours plus pressant, la France décide de reprendre un terrain d'avance sur le plan technologique. Elle engage à son tour la mise au point de d'un réacteur nucléaire surgénérateur – réacteur nucléaire capable de produire autant ou plus de matériaux fissiles qu'il n'en consomme – par l'intermédiaire du

CEA<sup>1</sup>. Il faut remarquer que cette évolution a été anticipée dès les années 1960 en France : le nucléaire était présenté comme une filière énergétique à deux étages, décomposable en deux générations successives de réacteurs, dont la seconde, celle des surgénérateurs, utiliserait après retraitement les produits de la fission réalisée dans les réacteurs de la première. Un premier réacteur surgénérateur expérimental est mis en service en 1975 à Marcoule (Gard) : Phénix. Il sera exploité conjointement par le CEA et EDF. Dès l'année suivant la mise en service de Phénix, un deuxième projet de réacteur surgénérateur, bien plus ambitieux puisqu'il s'agit de construire le plus puissant au monde, voit le jour : Superphénix. Il ne se concrétisera qu'au milieu des années 1980 sur le site de Creys-Malville en Isère. Il devait être le premier exemplaire d'une série de quatre réacteurs surgénérateurs. Fruit d'une collaboration internationale entre EDF (51%), la société italienne ENEL (33%) et la société allemande SBK (16%), Superphénix connaîtra une carrière tumultueuse en raison de l'extraordinaire complexité et du coût exorbitant de la mise au point de la surgénération. Décision essentiellement politique prise en 1997, l'arrêt de Superphénix n'est apparu techniquement justifié qu'en raison de ses difficultés de fonctionnement et de sa relative inadéquation aux besoins de test et d'expérimentation pour lesquels cette machine avait été reconvertie (Parlement, 2003).

Au total, le développement de la filière électronucléaire en France peut être observé comme la transformation d'une faiblesse structurelle

---

<sup>1</sup> La surgénération et la gestion du cycle du combustible deviennent les priorités de recherches du CEA à partir des années 1970.

en un atout maître dans la bataille industrielle mondiale. En effet, le nucléaire constitue clairement une activité à très haute valeur ajoutée. Aujourd'hui leader mondial du secteur, AREVA est le seul groupe industriel au monde maîtrisant et exploitant la totalité des activités dans le domaine nucléaire : étapes du cycle du combustible, réacteurs, instrumentation, contrôle et mesures, ingénierie... Cette position est le fruit de la fusion des différents acteurs qui se sont progressivement constitués durant les quarante dernières années, Cogema et Framatome notamment. La création de la Compagnie Générale des Matières Nucléaires (Cogema) en 1976 est liée à la réorientation de l'organisation du CEA à partir des années 1970. Celui-ci est appelé à se concentrer sur ces activités de recherche tout en nouant des partenariats étroits avec les acteurs privés de la filière nucléaire. Ainsi, la Cogéma devient en quelque sorte une filiale du CEA, prenant en charge l'essentiel des activités de la direction des productions : exploitation minière, enrichissement de l'uranium et traitement des combustibles usés. Créée à l'initiative conjointe du groupe américain Westinghouse et du groupe français Schneider SA, Framatome avait vocation à exploiter une licence de commercialisation des réacteurs REP développés par la société américaine. En 1976, la participation de Westinghouse au capital de Framatome est progressivement réduite pour disparaître à l'expiration de la durée d'exploitation de la licence en 1981, date à partir de laquelle le CEA entre dans le capital.

Dans l'histoire de la filière électronucléaire française, Rhône-alpes se distingue par l'accueil d'un acteur essentiel tel que le CEA à Grenoble et de nombreuses installations de production. En tête

de la production électronucléaire (13,4 millions de kW de puissance installée) et de la production hydroélectrique (10 millions de kW de puissance installée) en France, Rhône-Alpes s'affirme comme la première région productrice d'électricité d'Europe.

### **Depuis 1990, l'industrie nucléaire dans un creux de cycle, avant un nouvelle étape de développement ?**

En revanche, depuis le début des années 1990, l'industrie nucléaire mondiale est dans un creux de cycle. L'accident de Tchernobyl en 1986 et le contre-choc pétrolier de la fin des années 1980 ont modifié la donne. D'une part, les populations de plusieurs pays sont alors devenues réticentes à l'utilisation de l'énergie nucléaire ; plusieurs pays ont signé des moratoires (Belgique et Suède) alors que d'autres y ont renoncé (Italie et Allemagne plus récemment). D'autre part, la perte de rentabilité de la filière nucléaire a entraîné de grandes difficultés financières pour ses acteurs en raison de coûts d'investissements générant un endettement excessif : Framatome sera sauvé grâce à sa nationalisation ; le développement de l'industrie nucléaire américaine est brisé net.

Toutefois, la forte remontée des cours du pétrole et les impératifs de réductions des gaz à effet de serre sont en train de relancer la filière nucléaire. Début 2004, la Finlande a retenu le constructeur français Framatome pour la réalisation d'une nouvelle centrale et la France s'apprête à lancer la construction d'un nouveau réacteur. Ces deux unités sont les premières d'une nouvelle génération baptisée EPR, développée par Framatome, Siemens.

## **1945-2000 : le développement des centrales thermiques au gaz naturel**

Si la mise au point de la turbine à gaz a trouvé à s'appliquer d'abord dans le secteur aéronautique, elle trouvera dès la fin de la seconde guerre mondiale un nouveau champ d'exploitation avec la production d'électricité. La première mise en service d'une turbine à gaz pour l'entraînement d'un alternateur électrique a été faite par EDF en 1946 à Saint Denis. En 1952, 44 turbines étaient en service dans le monde et 128 en 1957 avec une puissance totale de 1,1 million de kW.

L'idée de combiner une turbine à combustion avec une turbine à vapeur en récupérant la chaleur d'échappement a été exposée par différents auteurs dès les années 1920. La première démonstration de cycle combiné n'a toutefois été faite qu'en 1949 par General Electric et c'est surtout à partir des années 1980 que le dispositif fit l'objet d'un développement industriel. En France, les centrales électriques fonctionnant au gaz naturel se développent avec la découverte du gisement de Lacq en 1951.

## **1970-2000 : les énergies face aux impératifs de sobriété et de préservation de l'environnement**

### **1973-1986 : l'impératif des économies d'énergie**

Après le choc pétrolier de 1973, le « plan Messmer » engagé par la France ne comportait pas uniquement la mise en oeuvre d'un programme de production électronucléaire. Il reposait sur deux autres piliers : une diversification des sources d'approvisionnement et une politique vigoureuse d'économie d'énergie. Les niveaux de prix des énergies imposaient en effet de s'intéresser aux rendements d'utilisation de l'énergie afin d'optimiser

le système et d'accroître l'indépendance énergétique du pays. Cette préoccupation se traduit par la création par l'Etat de l'Agence pour les économies d'énergie (AEE) en 1974.

A cette époque, les savoir-faire pour économiser l'énergie n'existent que dans le secteur industriel. L'initiative est d'ailleurs prise par le secteur des industries lourdes, fortement consommateur d'énergie et soumis à une vive concurrence internationale. Une partie des ingénieurs sont alors transférés du développement de la production vers l'optimisation des procédés.

L'Etat s'engage alors à soutenir les investissements d'économies d'énergie dans les PME, le logement social, la construction neuve, les services publics. 1974 est aussi la date de la première réglementation thermique pour la construction des bâtiments neufs, inexistante auparavant. C'est aussi l'époque des premières limitations de vitesse.

Avec le deuxième choc pétrolier en 1979 (le prix du pétrole est désormais 10 fois supérieur à son niveau de 1972), c'est maintenant tout un ensemble de professions qui s'efforce d'économiser l'énergie : pose d'isolation, récupération de chaleur sur les fumées, programmation horaire des chauffages, changements de procédés... Les efforts de recherche engagés depuis 1973 mettent aussi progressivement en évidence des potentiels nouveaux : matériaux d'isolation, optimisation par contrôle automatisé des procédés, fours à induction... D'une manière générale, les équipementiers renouvellent profondément leurs gammes d'appareils mis en vente (systèmes de chauffage, composants du bâtiment, équipement industriels, système de contrôle...). En 1983, l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie – née de la fusion en 1982 de l'AEE, du commissariat

à l'énergie solaire et de la Missions chaleur – se voit dotée d'un fond spécial qui permettra d'injecter 300 millions d'euros par an dans le financement des investissements de maîtrise de l'énergie.

Parce qu'il s'agit d'une stratégie diffuse, souvent sans sophistication valorisante, le potentiel des économies d'énergie a longtemps été sous-estimé. Pourtant, le niveau des économies d'énergie réalisées pour l'année 1990 par rapport à 1973 atteint en France 30 millions de tep, soit davantage que la part de l'électricité d'origine nucléaire dans la consommation finale d'énergie. Ces efforts en faveur des économies d'énergie seront fortement infléchis à partir du contre choc pétrolier de 1986.

#### **1980-2000 : la lente diffusion des techniques d'exploitation de l'énergie solaire**

⇒ *L'essor timide des technologies photovoltaïques*

Après la mise au point des premières cellules photovoltaïques durant le 19<sup>ème</sup> siècle, c'est le développement des recherches spatiales qui, vers les années 1950, va motiver la poursuite des travaux de recherche. En 1954, les chercheurs américains G.L.Pearson, C.S.Fuller et D.M.Chaplin mettent au point une batterie solaire, alimentée par des petites cellules photovoltaïques de silicium.

Il faut cependant attendre les années 1980 pour que démarre l'installation de panneaux photovoltaïques dans le monde, et surtout la fin des années 1990 pour que celle-ci s'accélére. La puissance installée passe de moins de 10 000 kWh au début des années 1980 à 100 000 kWh durant la deuxième moitié des années 1990 puis, à plus de 700 000 kWh en 2003.

⇒ *La place marginale occupée par les centrales électriques fonctionnant à partir de vapeur d'eau d'origine solaire*

La première centrale thermique solaire importante au monde a été construite en URSS à Achkhabad, capital de la république du Turkménistan, en 1960. Dans une centrale de ce type, l'électricité est produite par un turboalternateur classique entraîné par de la vapeur d'eau issue de l'échauffement d'un réservoir d'eau grâce au rayonnement solaire.

La plus grande centrale thermique de ce type actuellement en service dans le monde est celle de Barstow en Californie, dont l'exploitation a débuté en 1982. La France a expérimenté ce dispositif sur une courte période durant les années 1980. Située dans les Pyrénées Orientales, près de Targassonne, la centrale Thémis fut la plus puissante centrale électrosolaire d'Europe. Dans des conditions d'ensoleillement optimales, elle pouvait injecter 2 500 kW sur le réseau électrique. 201 miroirs paraboliques orientables répartis sur cinq hectares concentraient les rayons du soleil sur un point focal situé au sommet d'une tour de plus de 100 mètres, permettant de produire une vapeur à 450°C. Thémis fut raccordée au réseau de 1983 à 1986 puis partiellement démantelée en raison d'un coût de production du kWh trop élevé.

#### **1930-2000 : le développement progressif de l'exploitation de l'énergie éolienne**

A la suite des premiers modèles d'éoliennes proposés par le Danois Paul La Cour au tournant du 20<sup>ème</sup> siècle, on assiste à un timide essor des aérogénérateurs d'électricité, dans les années 1930, aux Etats-Unis, en URSS, en Scandinavie, en Grande-Bretagne et en Allemagne. Le conflit mondial des années 1939-1945 mit un terme

provisoire à ce mouvement. Il fallu attendre 1958 pour que la France élabore un projet éolien. Une éolienne expérimentale a fonctionné de 1955 à 1963 en France, dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'Etudes Scientifiques et Techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF. Cette technologie sera cependant délaissée par la suite jusqu'aux années 1970, période à partir de laquelle le Danemark reprend son développement. On assiste alors à l'adoption de mats cylindriques ou coniques en remplacement des pylônes à structure treillis, notamment en vue de réduire le niveau de bruit généré.

L'éolien est aujourd'hui l'énergie renouvelable la plus en vogue avec une puissance installée dans le monde qui est passée de 1 749 000 kWh en 1990 à 39 500 000 kWh en 2003, en passant par 7 636 000 kWh en 1997.

### **1970-2000 : multiplication des carburants « verts »**

Le contexte de crise pétrolière et plus récemment de prise en compte des enjeux de pollution de l'atmosphère a stimulé la mise au point de carburants alternatifs à ceux issus du pétrole, essence et gazole principalement. Ces travaux de recherche portent d'une part sur la (re)découverte de processus de transformation de la biomasse en carburants (biocarburants). Il faut en effet rappeler que, à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, déjà, on expérimentait l'alcool de betterave sur les premiers moteurs à combustion interne. Après un apogée peu après 1930, les biocarburants furent supplantés par les produits pétroliers. Les recherches en matière de carburants alternatifs visent également la mise au point de nouveaux procédés de valorisation des

énergies fossiles conventionnelles (pétrole et gaz) pour la production de carburants moins polluants.

#### *⇒ Antiquité : découverte de l'éthanol*

L'éthanol est le nom savant de l'alcool éthylique ou plus simplement de l'alcool que l'on trouve dans toutes les boissons dites alcoolisées. Le procédé pour l'obtenir – distillation et fermentation du sucre des betteraves ou de l'amidon des pommes de terre et des céréales – remonte à l'antiquité. Dans le cadre du système automobile actuel, il peut être mélangé à l'essence dans des proportions allant de 5 à 85%. Au-delà de 20% l'adaptation des moteurs de voitures est souvent nécessaire.

L'éthanol présente un intérêt environnemental certain. Le remplacement d'une tonne d'essence par une tonne d'éthanol réduit de 75% les émissions de gaz à effet de serre. En effet, on considère que les émissions de CO<sub>2</sub> lors de la combustion de l'éthanol sont annulées par le fait que le CO<sub>2</sub> en question a été préalablement absorbé par la plante qui a servi à produire ce biocarburant : le bilan atmosphérique ne serait donc pas modifié. Cette compensation n'est cependant pas égale à 100% dans la mesure où la culture des végétaux nécessaires à cette production implique l'utilisation de combustible fossile classique pour les tracteurs, lors de la transformation en carburant...

La crise pétrolière des années 1970 et 1980 qui va cependant relancer l'intérêt de sa production. C'est le Brésil qui va s'engager le premier et de façon massive dans cet effort de production, suivi par les Etats-Unis. Ces deux pays demeurent encore aujourd'hui les principaux producteurs et consommateurs d'éthanol à des fins de carburant.

#### *⇒ 1661 : découverte du méthanol*

Le méthanol, ou alcool méthylique, a été découvert par le chimiste irlandais Robert Boyle en

1661, dans les produits de distillation du bois. Mais ce sont deux français, Jean-Baptiste Dumas et Eugène Péligot, qui en établirent la constitution en 1835.

⇒ 1987 : début des recherches sur le diester

Le Biodiesel ou diester est obtenu à partir d'huile végétale (colza, soja...) mélangée à de l'éthanol pour en réduire la viscosité. Il présente le même intérêt environnemental que le bioéthanol en matière d'émissions de CO<sub>2</sub>. Destiné à entrer dans la composition du gazole traditionnel à hauteur de 5%, le diester a été mis au point par l'Institut Français du Pétrole – dont la principale antenne de recherche est installée en région lyonnaise (Solaize) depuis 1967 – dans le cadre d'un partenariat avec la fédération des oléagineux et des protéagineux. Près de dix ans de recherches seront nécessaires pour parvenir à la mise au point.

Aujourd'hui, les plus gros producteurs de biodiesel sont les États-Unis, l'Allemagne et la France.

⇒ 1930 : première exploitation du Gaz Naturel pour Véhicule (GNV)

Le gaz naturel pour véhicules, constitué à 97% de méthane, est du gaz naturel conditionné pour être utilisé dans les moteurs des véhicules. Il fait partie des carburants fossiles les moins polluants : par rapport au gazole, le GPL rejette 50% de moins d'oxyde d'azote et aucune particule. Cependant, parce qu'il présente des performances mécaniques inférieures, le GNV entraîne une légère surconsommation par rapport au gazole, laquelle réduit son intérêt sur le plan des émissions de CO<sub>2</sub>. L'Italie a été le premier pays à utiliser de façon significative le GNV dans les années 1930, notamment en raison de la disponibilité de ressources en gaz naturel dans ce pays, et représente aujourd'hui le marché le plus important

d'Europe, avec plus de 380 000 véhicules. Toutefois, plus de la moitié du parc GNV mondial se situe actuellement sur le continent américain, et notamment en Argentine et au Brésil.

⇒ 1970 : diffusion du Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL)

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL) est constitué d'un mélange de butane et de propane issu du raffinage du pétrole et du traitement du gaz naturel. Il présente des caractéristiques environnementales équivalentes au GNV. Toutefois, son utilisation entraîne, comme pour le GNV mais de façon plus marquée, des surconsommations qui réduisent son intérêt environnemental.

Dans les années 1970 et 1980, le GPL a été très en vogue aux Pays-Bas, en Belgique et en Italie, jusqu'à ce que l'on découvre la supériorité du gaz naturel. Encore aujourd'hui, le GPL représente près de 60 % du parc « essence » en Hollande, plus de 30 % en Italie, de 40 à 60 % aux États-Unis et au Canada.

⇒ 1996 : mise au point de l'aquazole

Issu de recherches conduites par ELF durant les années 1990, l'aquazole se présente sous la forme d'une émulsion d'eau dans du gazole (diesel). Il présente l'intérêt de diminuer considérablement les émissions d'oxyde d'azote, de particules et de fumées noires. Il s'avère donc particulièrement intéressant pour les poids lourds et les bus. Toutefois, selon une étude de l'Ademe sur des bus présentée en 2002, l'utilisation de l'Aquazole entraîne une augmentation d'environ 10% de la consommation par rapport au gazole. Comme l'Aquazole contient 13% d'eau, il n'y a pratiquement pas de gain en terme d'énergie.



## LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES EN RÉGION LYONNAISE

La région lyonnaise se veut actrice de l'avenir énergétique. Elle comprend en effet de nombreux organismes (grandes entreprises, PME-PMI, laboratoires de recherche publics) impliqués dans des travaux de recherche s'inscrivant dans les perspectives décrites plus haut. Au delà du recensement exhaustif de ces organismes, il est important de mettre en évidence les plus importants d'entre eux à l'échelle internationale, ainsi que les actions qu'ils conduisent actuellement, au sein notamment de différents pôles de compétitivité.

### Les acteurs lyonnais des technologies d'économie d'énergie

#### Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur des transports

⇒ *L'amélioration des moteurs conventionnels, voie de recherche majeure de l'IFP et le pôle de compétitivité lyonnais « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »*

L'Institut Français du Pétrole (IFP), dont la principale antenne de recherche (630 personnes) est basée à Solaize au sud de Lyon, poursuit des recherches dans les principales directions décrites plus haut en ce qui concerne l'amélioration de l'efficacité des moteurs conventionnels :

- l'amélioration de l'injection directe sur les moteurs existants : Dans ce domaine, les travaux visent à élaborer des algorithmes et

des stratégies de contrôle électronique du moteur innovants et robustes. L'IFP a ainsi développé ses propres structures de contrôle du couple pour des applications sur moteurs essence, diesel et gaz naturel. Le calibrage – c'est-à-dire le paramétrage du système de contrôle électronique – fait également l'objet de travaux importants.

- la généralisation de la suralimentation à des fins de « downsizing » : La réduction de la consommation des moteurs diesel grâce à la suralimentation et l'adaptation de ce principe aux moteurs essence constitue un axe de recherche important de l'IFP. Celui-ci poursuit notamment les améliorations de son procédé basé sur le balayage des gaz brûlés résiduels. Ce dernier, développé à l'origine sur une base moteur à injection directe (IDE), est désormais complètement validé en injection indirecte avec des gains similaires. On obtient, par exemple, entre 30 et 40% de couple supplémentaire à très bas régime. Le concept du downsizing est également analysé dans le cas de petites cylindrées afin d'identifier son potentiel ultime.

- la mise au point de nouveaux processus de combustion : A ce titre, grâce à sa double expertise dans les moteurs et carburants, l'IFP participe à deux partenariats internationaux organisés en vue de la mise au point de nouveaux modes de combustion, le Consortium international Diesel HCCI (Homogeneous

charge compression ignition) et le Consortium international Essence CAI (Controlled Auto-Ignition). Les travaux conduits dans ce cadre visent notamment à s'assurer de l'adéquation (maîtrise des interactions physico-chimiques) entre ces nouvelles technologies moteur et les carburants disponibles actuellement, qu'ils soient d'origine pétrolière ou carburants alternatifs (issus du gaz ou de la biomasse). Une partie de ces travaux axés sur la combustion est opérée en collaboration avec PSA Peugeot Citroën et Renault au sein du Groupement scientifique moteurs (GSM). La position de leader de l'IFP dans ces domaines de recherche repose en particulier sur les compétences poussées qu'il détient en matière de modélisation du groupe motopropulseur.

L'action de recherche de l'IFP en matière d'amélioration des performances des moteurs conventionnels s'inscrit aujourd'hui dans un nouvel environnement en région lyonnaise avec la labellisation en 2005 par le Comité Interministériel pour l'Aménagement du territoire du pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015<sup>1</sup> ». Un des projets de R&D de ce pôle de compétitivité concerne en effet l'ensemble « Motorisation et chaîne cinématique » avec notamment comme

---

<sup>1</sup> Avec l'appui du Grand Lyon et de la CCI de Lyon, l'association Lyon Urban Truck&Bus 2015 été créée à l'initiative de Renault Trucks, Irisbus France, l'Institut Français du Pétrole (IFP), l'Institut National pour la Recherche dans les Transports et leur Sécurité (INRETS). L'ambition de Lyon Urban Truck & Bus 2015 est de répondre aux défis soulevés par la croissance des besoins de mobilité, des personnes et des marchandises dans un environnement urbain. Il s'agit de travailler sur le camion et le bus urbain afin de promouvoir des systèmes de transports urbains plus économes, plus sûrs, plus propres, plus fiables et mieux intégrés dans leur environnement.

objectif l'optimisation des moteurs thermiques (diesel, allumage commandé...).

⇒ *La motorisation hybride, autre enjeu de recherche pour l'IFP et « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »*

L'IFP travaille plusieurs approches couvrant les différents niveaux d'hybridation envisageables sur un véhicule (système Stop & Start, récupération d'énergie au freinage...). Une première démarche porte sur la conception et l'architecture des moteurs thermiques afin d'optimiser leurs performances dans le contexte d'une application hybride. L'IFP développe également des stratégies de contrôle innovantes visant à optimiser le fonctionnement du moteur et la gestion de l'énergie à bord du véhicule. Plusieurs projets d'application sont envisagés. L'un d'entre eux porte sur le développement d'un démonstrateur hybride sur la base d'un véhicule automobile à vocation urbaine alimenté au gaz naturel. Une première démonstration réalisée (en collaboration avec Gaz de France) avec un véhicule de série Toyota Prius full hybrid adapté au gaz naturel a d'ailleurs permis d'atteindre des gains de consommation records au dernier Challenge Bibendum : 3,56 kg de GNV pour 144 km, soit l'équivalent d'une consommation de 3,63 litres d'essence au 100 km. Ce véhicule présente ainsi un niveau d'émissions de CO<sub>2</sub> particulièrement réduit : moins de 85 g/km sur cycle normalisé.

Le développement de différentes motorisations hybrides constitue par ailleurs le deuxième objectif du projet de R&D « Motorisation et chaîne cinématique » du pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015 ».

⇒ *Les véhicules de transports collectifs urbains de demain, l'un des horizons de projet de « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »*

L'un des enjeux que cherche à relever le pôle de compétitivité lyonnais réside dans la mise au point de véhicules de transports collectifs urbains hautement performants, c'est à dire susceptibles de prendre en charge une part croissante des déplacements de personnes en milieu urbain. Pour ce faire l'un des projets de R&D porte sur l'amélioration de l'architecture et du confort des véhicules. Ce volet articule trois axes de travail :

- Technologies : structure véhicules, nouveaux matériaux, intégration des motorisations hybrides, nouveaux concepts ;
- Performances du système : amélioration des prestations véhicules, optimisation du rendement des chaînes de traction, optimisation des consommations globales du système ;
- Prestations : allègement, traitement des vibrations et du bruit, accessibilité, nouvelles architectures innovantes.

Outre l'IFP, le pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015 » compte la participation de deux autres centres de recherche d'envergure en matière de transports.

- L'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (l'INRETS) : créé par décret interministériel du 18 septembre 1985, l'INRETS a pour mission d'effectuer ou d'évaluer toutes les recherches et tous les développements technologiques consacrés à l'amélioration pour la collectivité, des systèmes et moyens de transports et de circulation du point de vue technique, économique et social. Le Comité Interministériel d'Aménagement et de Compétitivité des Territoires (CIACT) a entériné le 14 octobre 2005 le déménagement de l'INRETS sur le site de Lyon-Bron, où sont

déjà implantés cinq de ses laboratoires. D'ici à la fin 2008, la Direction générale et le Secrétariat général de l'Institut prendront leur place au sein d'un nouveau bâtiment. L'activité scientifique de l'INRETS est organisée en trois axes : Accroître la sécurité des personnes ; Optimiser l'usage des réseaux de transport ; Accroître la fiabilité et la durabilité des systèmes de transport, optimiser leur consommation énergétique et réduire leur impact sur l'environnement.

- Le Laboratoire d'Economie des Transports : équipe pluridisciplinaire créée il y a 30 ans et regroupant aujourd'hui une soixantaine de personnes, le LET est la principale équipe de recherche française dans son domaine. L'une des spécificités du laboratoire réside dans son double ancrage académique et sectoriel. A la production scientifique traditionnelle des équipes de recherche s'ajoutent des activités contractuelles et d'expertise contribuant à l'aide à la décision des pouvoirs publics. Les axes de recherche du LET répondent aux principaux enjeux du champ de recherche largement déployé à l'échelle internationale sous le vocable de « Transportation science ». Généralement liés à des contrats de recherche, ces axes sont les suivants : Marchés, organisations et systèmes d'incitations (calcul économique ; évaluation, tarification et financement des infrastructures de transport...) ; Mobilité et usages de l'espace et du temps (budgets temps ; accessibilité et politique de mobilité durable ; localisation des activités et formes urbaines...) ; Modélisation et simulation de la mobilité des personnes et des marchandises (modélisation des déplacements

de marchandises en ville ; simulation et prospective de la mobilité urbaine des personnes...).

⇒ *La promotion des modes de transports*

« doux », l'initiative « Vélo'v » du Grand Lyon

Favoriser les déplacements urbains à vélo passe notamment par une action spécifique concernant l'accès aux vélos eux-mêmes. En la matière, plusieurs villes françaises, Rennes, La Rochelle et Strasbourg, se sont lancées dès les années 1990 dans la mise à disposition de bicyclettes pour circuler en ville. Toutefois, des recherches (INRETS, 2003) ont montré que ces expériences se révélaient trop modestes pour que leur impact soit sensible en termes de report modal. De ce point de vue, les politiques conduites dans d'autres pays européens tels que les Pays-Bas, l'Allemagne ou la Suisse, apparaissent plus volontaristes, avec des résultats significatifs à la clef.

Ainsi, depuis mai 2005, l'agglomération lyonnaise, à l'initiative de la communauté urbaine, est passée à la vitesse supérieure et s'est engagée dans la mise en place progressive d'un dispositif de mise à disposition de vélo en libre-service. Baptisé Vélo'v et gérée par la société JCDecaux dans le cadre du marché d'exploitation et de renouvellement du mobilier urbain que lui a confié le Grand Lyon en 2004, cette démarche se veut résolument ambitieuse et innovante. Elle propose actuellement 3 000 vélos répartis sur 250 stations, lesquelles ont été implantées sur les communes de Lyon et Villeurbanne à proximité des gares et transports en commun et de telle sorte qu'il y ait une station vélo tous les 300 mètres en moyenne et à moins de 5 minutes à pied l'une de l'autre. En 2007, l'offre sera encore étendue pour atteindre 4 000 vélos répartis sur 340 stations (Grand Lyon, 2007). L'accès aux

vélos s'effectue grâce à une carte d'abonnement de courte ou de longue durée – la première est disponible directement dans les bornes électroniques de chaque station, la seconde via une inscription sur Internet – selon le principe que le service ne devient payant qu'au delà d'une demi-heure d'utilisation. Sur un plan technique, les vélos proposés se distinguent par leur robustesse et leur simplicité. Conçus par la vénérable entreprise stéphanoise « Cycle Mercier »<sup>1</sup>, ils sont notamment équipés de moyeu à vitesses intégrées (3 vitesses, ni dérailleur, ni pignons). Le succès du dispositif Vélo'v est incontestable. Après une première année pleine de fonctionnement en 2006, il s'est définitivement imposé comme un véritable moyen de transport collectif individuel : 487 024 cartes courte durée ont été achetées ; 5 520 000 locations ont été effectuées soit une moyenne de 15 123 locations par jour ; 11 300 000 kms ont été parcourus soit 283 fois le tour de la terre ou 5 000 kms par vélo. Cette initiative ne cesse de séduire de nouvelles agglomérations, Marseille, Aix-en-Provence et Bruxelles s'étant depuis engagé à en faire bénéficier leur territoire (mavilleavelo, 2007).

### **Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment**

⇒ *Les laboratoires de recherches lyonnais soutenus par le PREBAT*

---

<sup>1</sup> La marque des cycles Mercier fut fondée à Saint-Étienne par Émile Mercier (1899-1973). La marque se dote d'une équipe cycliste professionnelle dès 1920. Mercier reste en compétition jusqu'en 1984, date du dépôt de bilan. Les salariés reprennent l'entreprise en 1985. C'est le renouveau qui s'appuie sur la grande distribution, délaissant les réseaux classiques des petits revendeurs. La production annuelle pour 2005 est d'environ 120 000 bicyclettes (également sous la marque Poulidor), dont 1 200 pour l'opération vélo'v (Wikipedia, 2006).

En région lyonnaise, cinq organismes ont vu leurs projets de recherche trouver le soutien du Programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment<sup>1</sup> (PREBAT) initié en 2002 par le Plan Urbanisme Construction Architecture (Ministère de l'équipement).

- Le Centre Technique des Industries Aérouliques et Thermiques (CETIAT): créé en 1960 et situé à Villeurbanne, sur le Domaine Scientifique de La Doua, le CETIAT est un laboratoire d'études, d'essais et d'étalonnages dans les domaines de l'aéroulique, de la thermique et de l'acoustique doté de 80 ingénieurs et techniciens. Il réalise chaque année un programme d'études collectives pour ses partenaires, dont les grandes orientations pour la période 2004-2007 sont : Normalisation, réglementation, certification ; Recherche et développements collectifs ; Métrologie ; Transfert et diffusion des connaissances. Les projets de R&D du CETIAT soutenus par le PREBAT concernent la qualité de l'air intérieur – projet « Caractérisation des capteurs utilisés

---

<sup>1</sup> Les finalités du PREBAT sont de développer la recherche, le transfert des technologies et l'expérimentation selon trois axes stratégiques. La modernisation durable des bâtiments existants : l'objectif de recherche et de développement poursuivi est d'obtenir, à l'horizon 2015-2020, dans des conditions techniques, économiques et sociales acceptables, des solutions techniques permettant la rénovation banalisée de bâtiments avec une performance énergétique aussi proche que possible de celle des bâtiments neufs. La préfiguration des bâtiments neufs de demain : l'objectif de recherche et de développement poursuivi est de permettre à l'horizon 2015- 2020 la construction banalisée de bâtiments de tous types très performants au plan énergétique. L'émergence de bâtiments à énergie positive : l'objectif de recherche et de développement poursuivi est de pouvoir construire et rénover dès que possible une part importante des bâtiments pouvant fournir plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Une part significative des bâtiments réhabilités devra pouvoir bénéficier des méthodes et des techniques mises au point.

en modulation de débit » (appel à projets 2004) – l'efficacité énergétique et la fiabilité des systèmes de ventilation des locaux – projet « Diagnostic des systèmes de ventilation » (appel à projets 2002) – et la maîtrise de la demande d'électricité – projet « Affichage Energétique de la Ventilation » (appel à projets 2003).

- Le Laboratoire des Sciences de l'Habitat (LASH) de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE) : Situé dans les locaux de l'ENTPE à Vaulx-en-Velin, le LASH conduit depuis plusieurs années un programme de recherche, d'études et de formation supérieure portant sur la « physique du bâtiment ». Les recherches développées sont centrées sur l'acoustique, la lumière ainsi que sur les systèmes thermiques et aérouliques. Dans le cadre de l'appel à projets 2002, le PREBAT a sélectionné le projet de recherche « Optimisation de l'usage de conduits de lumière naturelle » du LASH. Ce projet répondant au concept d'architecture bioclimatique vise à développer des solutions techniques pour assurer l'éclairage naturel des zones situées loin de l'enveloppe des bâtiments.

- Elyo Cylergie : basé à Ecully, Elyo Cylergie est le centre de R&D d'Elyo, société de services en efficacité énergétique et environnementale intégrée au groupe SUEZ Energie Services. Les projets de R&D d'Elyo Cylergie soutenus par le PREBAT concernent la gestion et le contrôle des performances des systèmes énergétiques des bâtiments au cours du temps (appel à projets 2002), ainsi que la modulation des débits des systèmes de

renouvellement de l'air intérieur (appel à projets 2003).

- ALDES : Entreprise d'envergure mondiale spécialisée dans le traitement de la qualité de l'air dans les bâtiments et dont le siège social est situé à Vénissieux, ALDES propose des solutions innovantes dans 5 secteurs spécifiques : ventilation ; aspiration centralisée ; diffusion et distribution d'air ; protection incendie ; acoustique. Les deux projets de R&D d'ALDES récemment soutenu par le PREBAT portent sur la ventilation des locaux : projet « Système de ventilation basse consommation destiné au collectif et au tertiaire » (appel à projets 2002), projet « Système de ventilation préchauffage rafraîchissement hybride pour la maison individuelle » (appel à projets 2004).

- Ingélux consultants : cabinet de conseil dont le siège social est localisé à Vaulx en Velin, Ingélux a pour mission de conduire, sur le plan opérationnel, des missions en éclairage valorisant les développements réalisés à l'ENTPE. Il participe à ce titre au projet « Optimisation de l'usage de conduits de lumière naturelle » du LASH. Ingélux a obtenu par ailleurs le soutien du PREBAT pour deux projets de recherche en matière de maîtrise de la demande d'électricité : « Eclairage de postes de travail à très hautes performances visuelles et énergétiques » (appel à projets 2003) ; « Délestage électrique partiel en éclairage » (appel à projets 2004).

Outre ces organismes dont l'action de recherche s'inscrit dans le cadre du PREBAT, il faut souligner la présence en région lyonnaise d'un autre acteur important, celle du Centre de thermique de Lyon

(CETHIL). Situé lui aussi sur le campus de la Doua à Villeurbanne puisque rattaché à l'Institut national des sciences appliquées (INSA), le CETHIL conduit des recherches couvrant des domaines très variés de la thermique et de l'énergétique. C'est l'un des seuls laboratoires nationaux et internationaux qui traite en continu une gamme aussi étendue d'échelles de longueurs et de températures : de la nanostructure au bâtiment, du coulis de glace à la combustion. Deux de ses axes de recherche concernent spécifiquement la question des performances énergétiques du bâtiment : Énergétique des Systèmes Solaires (études menées sur les concepts bioclimatiques notamment) ; Thermo-Aérodynamique des Bâtiments (modélisation, simulation numérique et validation expérimentale des transferts thermiques, aérodynamiques et hydriques liés à l'objet « Bâtiment »).

⇒ *Le MAT'Electrique, promoteur de l'innovation pour l'électricité et la lumière*

Le MAT'Electrique est une vitrine technologique dédiée au confort électrique qui appartient au groupe régional Sonepar Sud-Est. Créée en 1990, elle a pour objectifs de faire découvrir, promouvoir, valoriser la filière électrique et fédérer ses acteurs.

Le MAT'Electrique est un concept unique en Europe : un centre de 4 000 m<sup>2</sup> implanté au cœur de Lyon, conçu à l'image des « markets centers » (centres d'affaires) américains qui regroupe en un même lieu tous les produits relatifs à l'éclairage, la climatique, l'appareillage et la domotique. Le MAT'Electrique réunit ainsi un large éventail de professionnels à la pointe de leur domaine, qui peuvent louer des espaces afin d'exposer leurs produits et proposer des solutions concrètes. Par ailleurs, le grand public, c'est à dire les acteurs professionnels du marché, architectes d'intérieur et

d'extérieur, promoteurs, concepteurs lumières, designers mais aussi les particuliers, peuvent y bénéficier de conseils spécialisés. Au total plus de 50 fabricants sont représentés au MAT'Electrique à travers des espaces de marques constructeurs mais également des espaces spécialisés tels que EUROPA dédié à l'éclairage, CLIMATIC réservé aux produits de chauffage et de climatisation, DOMOSIC consacré à la domotique, et BIEN-ETRE où EDF présente ses normes, labels et tarifications. Outre ce rôle de vitrine technologique, le MAT'Electrique se revendique porteur de la promotion et de la valorisation de la filière électrique, mais aussi d'innovation. Il est l'un des trois membres fondateurs de la fête des Lumières, avec la Ville de Lyon et EDF Service Métropole. Il a également initié le programme d'étude QELE (Qualité Environnementale des Locaux d'Enseignement), en partenariat avec la région Rhône-Alpes. Il décerne aussi chaque année les MAT d'or, qui récompensent les trois meilleurs produits électriques distribués par Sonepar Sud-Est.

### **Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur de l'industrie**

Les économies d'énergie dans l'industrie chimique constituent l'un des projets retenus dans le cadre d'Axelera<sup>1</sup>, pôle de compétitivité lyonnais à vocation

<sup>1</sup> Avec l'appui du Grand Lyon et de la CCI de Lyon, l'association AXELERA a été créée par les membres fondateurs du pôle, Arkema, CNRS, IFP, Rhodia et Suez, pour porter le projet « Pôle de compétitivité Chimie-Environnement Lyon Rhône-Alpes » labellisé en 2005. Ce projet vise à élaborer des programmes de recherche innovants pour le développement d'une chimie plus dynamique, plus compétitive et encore plus respectueuse de l'environnement. Les projets de coopération réunissent autour de thématiques clefs industrie, formation et recherche académique. Les grands thèmes identifiés portent sur la catalyse, les procédés et les matériaux.

mondiale sur le secteur Chimie-environnement. Piloté par l'IFP, l'un des principaux partenaires d'Axelera, le projet « Intensification des procédés » a pour objectif la réduction de la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement des réacteurs chimiques. Il repose sur plusieurs axes de recherches :

- Mise au point de microréacteurs aptes à un fonctionnement en production de masse dans les usines chimiques ;
- Détermination des conditions optimales de fonctionnement de ces réacteurs ;
- Détermination des conditions optimales de fabrication (dépôt de catalyseur, soudures) ;
- Optimisation du couple réacteurs-réactions chimique ;
- Mise au point des processus industriels permettant la mise en œuvre et le contrôle amélioré des réacteurs (notamment les périphériques : systèmes de contrôle, systèmes d'alimentation...).

### **Les acteurs lyonnais des technologies énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone**

#### **Les technologies énergétiques alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion**

⇒ *Les biocarburants, autre axe majeur des recherches conduites par l'Institut Français du Pétrole*

L'IFP travaille depuis 1980 dans le domaine des biocarburants avec, en particulier, la mise au point au début des années 1990 du procédé Esterfip de production de biodiesel à partir d'huile de colza et de méthanol par catalyse homogène. Depuis, L'IFP

a développé un nouveau procédé de production de biodiesel par catalyse hétérogène Esterfip-H. Cette nouvelle génération conduit à des performances améliorées, avec un biodiesel de meilleure qualité et moins de sous-produits. Une première génération du catalyseur correspondant ayant été industrialisée en 2005, le procédé Esterfip-H, commercialisé par Axens, sera mis en oeuvre en 2006 par la société Sofiproteol à Sète, ce qui constitue une première industrielle mondiale. Les objectifs des travaux de R&D en cours visent la réduction des coûts et le développement de nouveaux procédés pour la valorisation du glycérol (sous-produit de la réaction).

Par ailleurs, l'IFP cherche à développer de nouvelles filières énergétiques par conversion de biomasse lignocellulosique d'origines forestière et agricole (bois, paille, cultures dédiées, déchets végétaux, etc.) de manière à accéder à une ressource moins limitée, qui n'entre pas en concurrence avec l'usage alimentaire. Pour cela, l'IFP étudie les transformations facilitant le transport de la biomasse, parmi lesquelles la pyrolyse rapide ou la torréfaction. Dans ce domaine, une attention particulière est portée à la caractérisation fine des produits qui en sont issus dans la perspective de leurs utilisations (biocarburants, charges d'unités de raffinage ou de gazéification). L'IFP étudie également la mise au point d'une technologie de gazéification pour la production de gaz de synthèse, à partir de laquelle des carburants de synthèse Fischer-Tropsch ou de l'hydrogène seront produits. Le développement d'un procédé de production à haut rendement de bioéthanol à partir de lignocellulose est également à l'ordre du jour avec, en 2005, le démarrage du projet européen Nile (New improvements for lignocellulosic ethanol) que

l'IFP coordonne. Il vise à mettre au point de nouvelles technologies pour une conversion efficace de la lignocellulose en éthanol avec validation de ces technologies dans un pilote et estimations technico-économiques et environnementales. D'une durée de quatre ans, ce projet intégré rassemble une vingtaine de partenaires. Il bénéficie également du soutien de l'Agence Nationale de la Recherche.

⇒ *Les biocarburants, objet de recherche du centre de recherche de Total*

Situé à Solaize, le centre de recherche de Total s'appuie sur une équipe de 230 personnes. Le développement et l'amélioration des performances des biocarburants figurent parmi ses axes de travail.

### **Les technologies de production de chaleur à partir des énergies renouvelables**

La région lyonnaise possède une capacité de recherche sur le secteur spécifique de la géothermie. Outre ses recherches portant sur les systèmes de ventilation, évoquées dans le point concerne les économies d'énergie dans le bâtiment, le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT) conduit des travaux en matière de géothermie. Ceux-ci portent plus spécifiquement sur la mise au point de pompes à chaleur. Deux projets de recherche ont ainsi trouvé le soutien du PREBAT : « Méthodes d'essais des pompes à chaleur de type sol eau » (appel à projets 2002) et « Méthodes d'essais pour la caractérisation des performances des pompes à chaleur de type sol-eau et sol-sol » (appel à projet 2003).

## Les technologies de l'énergie nucléaire

La filière Nucléaire est fortement représentée sur la région lyonnaise qui dispose d'importantes capacités d'ingénierie et de R&D. Elle compte en effet trois implantations importantes d'EDF :

- EDF SEPTEN (Service d'Etudes et de Projets Thermiques et Nucléaires) : il développe les projets des futures centrales nucléaires en relation avec le CEA.
- EDF UNIPE : c'est un spécialiste des équipements nucléaires et de la maintenance.
- EDF CIDEN (Centre d'Ingénierie Déconstruction Environnement) : spécialiste de la maîtrise d'ouvrage des centrales en fin de vie.

La région lyonnaise possède par ailleurs un centre de recherche public dédié à l'atome : l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon. Situé sur le campus de La Doua à Villeurbanne et comptant une équipe de recherche de 200 personnes environ, l'IPNL poursuit des travaux dans plusieurs directions. Deux axes intéressent directement la filière électronucléaire : l'étude de la matière nucléaire chaude ; et surtout l'étude de l'aval du cycle du combustible. Les recherches concernant ce deuxième axe sont effectuées dans le cadre du Programme sur l'Aval du Cycle Electronucléaire (PACE) du CNRS avec pour principaux partenaires industriels l'ANDRA, EDF et le CEA. Les résultats obtenus sont périodiquement présentés et discutés devant la communauté scientifique. Les principales thématiques développées concernent le stockage des déchets nucléaires et les réacteurs nucléaires du futur (Génération IV). Centré sur l'analyse des processus de transport des produits de fission et des actinides (généralement simulés par des isotopes non radioactifs) au sein de différents

matériaux de confinement du combustible ou des déchets, ces travaux apportent une contribution à l'évaluation de la sûreté des assemblages de combustibles et du stockage des déchets nucléaires.

Fort de ses deux sites de production de Bugey et de Saint-Alban, la région lyonnaise constitue plus largement un territoire majeur de production de la filière électronucléaire française. Ces deux sites font en effet l'objet d'activités de maintenance et d'amélioration conduites par le leader mondial de l'énergie nucléaire, AREVA. Sans équivalent en Europe, le pôle nucléaire lyonnais compte par ailleurs la présence de plusieurs sous-traitants d'importances :

- ROBATEL : fondée en 1830 et localisée à Genas, la société ROBATEL est spécialisée dans la fabrication d'emballages de transport et de stockage de matières radioactives, de cellules blindées, de gants, de protections d'irradiateurs, de protections neutroniques...
- REEL : située à St-Cyr-au-Mont-d'Or, REEL est une société dont l'activité porte sur la conception, la fabrication, l'installation et la maintenance d'équipements spéciaux de manutention. L'un des domaines d'application des technologies proposées est le nucléaire
- VELAN SA. : localisée à Lyon, VELAN est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de robinetterie dans les domaines : de l'énergie nucléaire et conventionnelle, de la cryogénie, des gaz liquéfiés, de la marine et des vannes pour applications spécifiques. Ainsi, plus de 300 centrales nucléaires dans le monde ont choisi VELAN pour leur équipement en vannes. Cette société est par ailleurs l'un des seuls robinetiers qualifiés pour les vannes tritium

dans le cadre des programmes de recherche sur la fusion.

- G.A.D.S. : implanté au sein du Parc Industriel de la Plaine de l'Ain, G.A.D.S. est l'une des filiales d'AREVA dédiées à l'assainissement radioactif et aux activités annexes (petits démantèlements, logistique nucléaire, maintenance et nettoyage industriel).

### **Les technologies de production d'électricité à partir des énergies renouvelables**

Outre la production de chaleur, la production d'électricité constitue un autre terrain de recherche prometteur pour la région lyonnaise pour ce qui concerne les énergies renouvelables. La recherche se concentre plus précisément sur le solaire photovoltaïque.

En la matière, on retrouve deux organismes de recherche conduisant par ailleurs des travaux portant sur les économies d'énergie dans le bâtiment : Ingelux dont un projet d'éclairage grâce à l'électricité photovoltaïque a trouvé le soutien du PREBAT dans le cadre de l'appel à projet 2004 – « Développement de systèmes d'éclairage photovoltaïque sans batterie pour usage diurne dans les locaux aveugles » – et le Centre de thermique de Lyon (CETHIL) dont les travaux sur l'Énergétique des systèmes solaires vise notamment la définition de nouveaux concepts de composants multifonctionnels co-(tri-)générateurs d'énergie (chaleur, électricité, froid). A ces deux centres de recherche il faut ajouter le Laboratoire de Physique de la Matière de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, dont un des axes de recherche porte sur l'énergie photovoltaïque.

Surtout, la région lyonnaise compte deux des principaux acteurs français de l'industrie photovoltaïque :

- Photowatt : fondé en 1979 et installé à Bourgoin-Jallieu en Isère, Photowatt est le premier fabricant français de plaques, cellules et modules photovoltaïques. De renommée mondiale et comptant 25 années d'expérience, cette société emploie 560 personnes dont 20 pour la R&D. Verticalement intégrée, Photowatt produit à partir du silicium les lingots qui lui permettront de réaliser les plaques, les cellules et les modules polycristallins. La R&D est au cœur de la stratégie de développement de la société dans la mesure où l'amélioration du rendement de conversion des produits, la multiplication des applications du photovoltaïque et la baisse des coûts de production constituent les facteurs majeurs de la compétitivité dans ce secteur. C'est dans cette optique que Photowatt travaille activement sur le développement d'une nouvelle technologie révolutionnaire à base de microbilles de silicium permettant l'utilisation de systèmes flexibles sur des surfaces non encore exploitées.

- Tenesol : Créée en 1983 et détenue à parité par Total et EDF (50/50) depuis mai 2005 (rebaptisée Tenesol à cette occasion), la société est le 1<sup>er</sup> assembleur mondial de systèmes photovoltaïques. Situé sur la commune de La-Tour-de-Salvagny, Tenesol comprend une équipe de R&D d'une vingtaine de personnes et a pour vocation la conception, l'installation et le suivi d'équipements photovoltaïques. La société conçoit des systèmes sur mesure, et, depuis 1999, fabrique

ses propres panneaux solaires. Les panneaux photovoltaïques fabriqués par Tenesol sont principalement destinés à l'habillage de toits en Europe. La production de la société devrait permettre d'équiper les toits de 2500 foyers européens par an. Présent sur quatre continents, Tenesol a réalisé plusieurs dizaines de milliers d'installations solaires.

Photowatt et Tenesol sont parmi les principaux partenaires composant le pôle de compétitivité rhonalpin TENERDIS (Technologies Energies Renouvelables Rhône-Alpes Drome Isère Savoie). TENERDIS a pour objectif de développer la production d'énergies renouvelables (solaire, biomasse, hydraulique) et d'assurer leur transformation sur des vecteurs d'énergie actuels et futurs (électricité, chaleur et hydrogène). Le volet concernant l'énergie solaire s'appuie notamment sur la création en 2005 de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) sur le site de Technolac en Savoie.

L'industrie photovoltaïque lyonnaise comprend par ailleurs un tissu de PME spécialisées : IMERYS TC (conception et fabrication de toitures intégrant des panneaux solaires) et SOLARFORCE (création et vente de produits pour la production d'énergie photovoltaïque) à Limonest, SOLARCOM à Saint-Fons (fabrication de matériels électroniques et de systèmes photovoltaïques), TRANE (matériel de conditionnement air, réfrigération, climatisation. Fabrication et distribution de matériels photovoltaïques) à Dardilly, TRYBASOLAR (fabrication de chaudières à gaz et à granulés, et de capteurs solaires) à Lyon.

## Les acteurs lyonnais des technologies de séquestration du dioxyde de carbone

La région lyonnaise est bien placée s'agissant du développement des technologies du captage, du transport et du stockage du CO<sub>2</sub>. L'Institut Français du Pétrole est un chef de file important dans ce domaine au niveau européen, les compétences nécessaires au développement de la séquestration étant celles mises en oeuvre dans le cadre de l'exploitation pétrolière.

### Les technologies du captage du dioxyde de carbone

⇒ *Le projet européen Inca-CO<sub>2</sub> de coordination de recherches piloté par l'IFP*

Soutenu notamment par le 6<sup>ème</sup> Programme cadre européen de R&D (PCRD), le projet Inca-CO<sub>2</sub> a pour objectif de positionner, sur le plan international, le savoir-faire européen dans le domaine du captage et du stockage du CO<sub>2</sub>. Ce projet réunit, depuis 2005, autour de l'IFP, 6 centres de recherche européens, BGS (Grande-Bretagne), BRGM (France), GEUS (Danemark), OGS (Italie), Sintef (Norvège) et TNO (Hollande) ainsi que 4 partenaires industriels majeurs, Alstom, BP, Statoil et Vattenfall (premier groupe suédois d'électricité très fortement implanté en Allemagne). Ce groupe constitue une structure de coopération, de concertation et d'échanges sur laquelle va s'appuyer la Commission Européenne dans ses négociations internationales. Plusieurs axes seront parallèlement développés : identifier les possibilités de coopération futures entre l'Europe et ses partenaires internationaux (Australie, Canada,

États-Unis et Japon), fournir toutes les informations utiles aux représentants européens siégeant dans les organisations internationales comme le CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) et dégager une vue cohérente sur l'activité internationale relative au domaine du captage et du stockage du CO<sub>2</sub>, afin de promouvoir les politiques européennes à venir.

⇒ *Le programme européen intégré CASTOR piloté par l'IFP*

Dans le cadre du 6<sup>ème</sup> Programme cadre européen de R&D, l'Institut Français du Pétrole a été désigné pilote du programme de recherche CASTOR (du captage au stockage du CO<sub>2</sub>). Planifié sur 4 ans (février 2004/février 2008), ce projet vise le développement et la validation, grâce aux travaux conjoints entre industriels et organismes de recherche publics acteurs du projet, d'une partie importante des technologies innovantes nécessaires au captage du CO<sub>2</sub> dans les fumées industrielles, et à son stockage géologique. Le projet CASTOR vise plus spécifiquement à permettre le captage et le stockage de 10% des émissions de CO<sub>2</sub> en Europe, soit environ 30% du CO<sub>2</sub> émis par les centrales électriques et les industries européennes. Les principaux objectifs du projet Castor sont les suivants :

- réduction importante des coûts de captage postcombustion (de 50-60€ à 20-30 € par tonne de CO<sub>2</sub>). Le défi réside notamment dans l'extraction du CO<sub>2</sub>, dilué dans un gros volume de fumées, à faible pression. Les différents procédés envisageables sont testés dans une installation pilote, en aval de la centrale à charbon de 400 000 kW d'Esbjerg (Jutland, Danemark), exploitée par la société ELSAM ;

- meilleure acceptation du concept de stockage géologique, en termes de capacité, de fiabilité, de durée et de sécurité ;
- élaboration d'une stratégie intégrée européenne englobant le captage, le transport et le stockage du CO<sub>2</sub>.

⇒ *Les autres programmes de recherche sur le captage auxquels participe l'IFP*

Les voies alternatives de captage à l'étude sont davantage adaptées à de nouvelles installations industrielles. L'IFP est ainsi impliqué dans plusieurs autres programmes de recherche européens.

- ENCAP : ce projet piloté par la société suédoise Vattenfall vise le développement de procédés de capture « pré-combustion » et « oxycombustion » du CO<sub>2</sub> pour les systèmes de production d'électricité, à partir de différents combustibles (charbon, gaz naturel ou combustibles pétroliers).
- HYPOGEN : lancé en 2004, ce projet vise à développer, sur dix ans, un démonstrateur de production d'électricité à partir de gaz naturel avec captage amont (séparation de l'hydrogène et du carbone) et stockage du CO<sub>2</sub>.

⇒ *Les projets de R&D du pôle de compétitivité lyonnais « Axelera » concernant la filière de la séquestration du CO<sub>2</sub>*

Un premier projet concerne la thématique « Maîtrise et évaluation de l'efficacité environnementale ». Piloté par Elyo Centre-Est Méditerranée, ce projet s'inscrit dans le contexte de sévèrisation des contraintes environnementales, notamment en matière de pollution atmosphérique. Il vise à améliorer la maîtrise de la nature et de la quantité de polluants rejetés par les gaz de combustion dans l'atmosphère. Centré sur la question spécifique des bilans environnementaux des procédés de

l'industrie chimique, ce projet poursuit plusieurs objectifs :

- recenser les contraintes réglementaires applicables aujourd'hui et extrapolables à court et à moyen terme, sur le plan régional, national et européen ;
- sur le plan international, faire l'inventaire des publications, brevets et bonnes pratiques en matière d'outils et de méthodes de mesure et de suivi industriel des émissions, recenser les systèmes de mesures automatiques existants et leurs modes d'installation, de calibrage, de maintenance et d'exploitation, passer en revue les services associés ;
- tester sur site et qualifier les techniques nouvelles prometteuses disponibles ;
- identifier les manques, proposer des solutions en terme d'outils et de méthodes pour les combler, élaborer un guide de recommandations ;
- Proposer un outil de mise à disposition des données d'émissions au grand public sur Internet ;
- Etablir un guide de recommandations en terme de mesures primaires et de traitement des fumées en fonction du processus de combustion concerné ;
- Développer des outils de mesure et des outils d'action sur les procédés.

Un autre projet, intitulé « Capture des gaz » et piloté par l'IFP, traite des deux principales étapes opérationnelles de séquestration du CO<sub>2</sub> : captage et stockage. Ses objectifs généraux sont : l'évaluation de solutions pour un stockage géologique du CO<sub>2</sub> ; la réduction des coûts de capture et de concentration du CO<sub>2</sub>.

## Les technologies du stockage géologique du dioxyde de carbone

⇒ *Le projet CO2GeoNet de coordination des recherches au niveau européen auquel participe l'IFP*

Il s'agit d'un réseau thématique européen visant à élaborer une réflexion commune et à promouvoir le stockage du CO<sub>2</sub>. Coordonné par le British Geological Survey, ce réseau regroupe une soixantaine de membres en provenance de 15 pays européens. Plusieurs objectifs ont été définis pour la période de cinq ans durant laquelle l'UE finance son intégration :

- Maintenir le cap sur sa lancée et conserver à l'Europe la place de leader qu'elle a en matière de stockage géologique du CO<sub>2</sub> et projeter cette avance dans l'arène internationale ;
- Améliorer l'efficacité par l'harmonisation des programmes de recherche nationaux, la prévention des doublons en matière de recherche, et le partage des infrastructures et des droits de propriété intellectuelle existants et nouvellement acquis ;
- Identifier les écarts dans les connaissances et élaborer de nouveaux projets de recherche et des outils pour les combler. Chercher à obtenir des financements extérieurs venant de programmes nationaux ou industriels afin de diversifier, constituer et renforcer le portefeuille des activités de recherche partagées ;
- Fournir aux décideurs des informations techniques, impartiales et d'excellente qualité sur le stockage géologique du CO<sub>2</sub>, et ce faisant attirer la confiance publique dans cette technologie, participer à l'élaboration de mesures, de règlements et de normes communes ;

- Assurer une formation pour soutenir les partenaires, intégrer de nouveaux membres dans le réseau et s'occuper de la relève des chercheurs pour l'avenir ;

- Exploiter les droits de propriété intellectuelle du réseau, aussi bien comme source de revenus pour soutenir le réseau que pour préparer l'industrie européenne à être compétitive sur les marchés mondiaux de l'énergie à faible émission de carbone.

⇒ *Le projet PICOREF coordonné par l'IFP*

Entre 2001 et 2005, le Réseau des Technologies pétrolières et gazières – réseau français associant des entreprises du secteur pétrolier et parapétrolier français, des centres de recherche et des universités (dont l'IFP et l'école des mines de Saint-Étienne) – a conduit le projet PICOR. Piloté par l'IFP, ce projet a permis de faire le point des connaissances et des outils pour les industries d'extraction pétrolière et de stockage souterrain. L'année 2005 est une année de transition entre cette recherche de base et son application à des projets industriels. Lancé pour deux ans, le nouveau projet PICOREF vise désormais à identifier des sites de piégeage du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol français et de mettre au point une approche méthodologique dédiée à l'étude d'un site dans la mesure où seul un tel site permettra de faire la démonstration que le stockage se comporte comme le prédisent les modèles. Le secteur Sud-Est du bassin de Paris a été retenu pour cette investigation, car sa géologie est particulièrement bien connue grâce aux travaux pétroliers.

Les roches perméables dans lesquelles est envisagé le stockage du CO<sub>2</sub> contiennent soit de l'eau très salée, impropre à toute utilisation, soit des gisements d'hydrocarbures. PICOREF, aujourd'hui,

travaille sur les potentialités des deux options, dans la perspective d'ouvrir en France, à l'horizon 2010, un site d'expérimentation en vraie grandeur.

⇒ *Les autres programmes de recherche sur le stockage auxquels participe l'IFP*

L'IFP participe également à des programmes de recherche sur le stockage à l'échelle européenne.

- RECOPOL : Dans le cadre du 5<sup>ème</sup> Programme cadre européen de R&D, ce projet, coordonné par la société néerlandaise TNO, vise à développer le premier pilote européen de démonstration de l'injection de CO<sub>2</sub> dans des veines charbon. Un site a été sélectionné dans le bassin de Silésie en Pologne. Plusieurs questions doivent ainsi être résolues : le stockage de CO<sub>2</sub> dans le charbon et la production simultanée de méthane sont-ils techniquement viables ? le stockage est-il stable et durable ? quelle est la production de méthane associée ? quels sont les critères à prendre en compte pour développer cette technologie dans d'autres bassins houillers ?

- ICBM : Coordonné par l'Imperial College de Londres, ce projet concerne le développement de technique de laboratoire et de caractérisation pour l'amélioration de la récupération de méthane par injection/séquestration de CO<sub>2</sub> dans les veines de charbon.

- CO<sub>2</sub>STORE (anciennement SACS) : Coordonné par la compagnie pétrolière norvégienne Statoil, ce projet consiste à étudier l'opération industrielle de réinjection de CO<sub>2</sub> en provenance du gisement de gaz de Sleipner dans l'aquifère intermédiaire d'Utsira, situé à 1000 m de profondeur. Il s'agit de la première opération industrielle et expérimentale de

stockage géologique du CO<sub>2</sub> au monde. On y injecte 1 million de tonnes de CO<sub>2</sub> par an depuis 1996. L'objectif principal du projet est de démontrer la validité du concept de stockage de CO<sub>2</sub> en aquifère salin, de tester des méthodologies pour surveiller et prévoir la migration du CO<sub>2</sub>, et enfin d'établir un guide de « bonnes pratiques » pour les futures opérations du même type.



**ANNEXE :**  
**PROPOSITION DE HIÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE  
À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE**

Pour embrasser d'un regard l'ensemble de l'histoire des techniques des transports et la participation de la région lyonnaise à celle-ci, il est apparu utile de tenter une hiérarchisation des avancées techniques majeures décrites dans la première partie de ce document.

Deux critères de choix complémentaires orientent la classification : portée de la rupture technique produite + ampleur de la diffusion dans les processus productifs, les pratiques quotidiennes...

On remarquera que bon nombre de ces avancées concernent les techniques de l'énergie avec lesquelles le système de transport entretient des relations étroites.

A l'échelle mondiale :

1. Domestication du feu (-500 000 ans)
2. Mise au point de la machine à vapeur (1700-1800)
3. Invention du moteur à explosion (1860-1864)
4. Invention du générateur électrique (1869-1873)
5. Première utilisation de la force animale pour le transport (-5000 ans avant JC)
6. Lampe électrique à incandescence (1878-1879)
7. Maîtrise de la réaction nucléaire (1900-1945)
8. Invention de la turbine hydraulique (1827)
9. Mise au point des premiers moulins à eau (-100 avant JC)
10. Première utilisation du vent pour la propulsion des bateaux (-3000 avant JC)

A l'échelle de la région lyonnaise :

1. Invention de la turbine hydraulique par l'ingénieur des mines stéphanois Benoît Fourneyron (1827)
2. Mise en service de la première usine hydroélectrique de France sur le site de Cusset à Villeurbanne, la plus puissante au monde à l'époque (1899)
3. Mise au point du réacteur nucléaire UNGG par le CEA de Grenoble (1950-1960)
4. Mise en service du plus puissant réacteur surgénérateur du monde, Superphénix à Creys-Malville (1986)
5. Première exploitation au monde de la houille blanche par Aristide Bergès et Jean-Baptiste Neyret à Lancey et Rioupérour en Isère (1862-1869)
6. La société lyonnaise « L'énergie industrielle » fondée par Pierre-Marie Durand devient un géant européen de la production et de la distribution d'électricité (1906-1946)

7. Mise en exploitation pionnière de mines de charbon dans la région stéphanoise (13<sup>ème</sup> siècle)

8. La société d'éclairage au gaz de la ville de Lyon, créée en 1834 par Jules Renaux, devient la plus importante compagnie de distribution de gaz d'éclairage d'Europe (milieu du 19<sup>ème</sup> siècle)

## SOURCES

### Le concept d'énergie

<http://www.cea.fr/jeunes>

Bobin J.L., Huffer E. et Nifenecker H. (sous la direction de)– L'énergie de demain. Techniques, environnement, économie – Les Ulis : EDP sciences, 2005

Wiesenfeld B. – L'énergie en 2050. Nouveaux défis et faux espoirs – Les Ulis : EDP sciences, 2005

### Histoire des techniques de l'énergie

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>

[http://www.cogema.fr/servlet/ContentServer?pagename=cogema\\_fr/home](http://www.cogema.fr/servlet/ContentServer?pagename=cogema_fr/home)

<http://www.cnr.tm.fr/fr/index.htm>

<http://www.drire.gouv.fr/ile-de-france/ssol/geothermie/geohist.htm>

[http://www.fleuverhone.com/prem\\_rea.html](http://www.fleuverhone.com/prem_rea.html)

<http://www.geothermie-perspectives.fr/05-geothermie/index.html>

<http://www.petrole-gaz.info/>

<http://www.poweron.ch/fr/geschichte/content--1--1166.html>

<http://www.rmomo.ch/histoiredugaz/index.html>

<http://www.unctad.org/infocomm/francais/gaz/descript.htm>

Ademe – Les bus propres : quelles solutions techniques pour les réseaux ? – Données et références – Valbonne : 2002

Baudet Jean – De l'outil à la machine : histoire des techniques jusqu'en 1800 – Paris : Vuibert, 2003

Baudet Jean – De la machine au système : histoire des techniques depuis 1800 – Paris : Vuibert, 2004

Beltran Alain – La fée électricité – Paris : Gallimard, 1991

Beltran Alain, Griset pascal – Histoire des techniques aux 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècles – Paris : Armand Colin, 1990

Beltran Alain, Martine Bungener et Jean-François Picard – Histoire(s) de l'EDF. Comment se sont prises les décisions de 1946 à nos jours – Paris : Bordas, 1985

Berthon Maurice-Edouard – Dictionnaire des inventions et des techniques – Paris : Publications Universitaires, 2004

Borje Guy et Marjorie, Clavaud René – Les transports à Lyon – Jean Houré éditeur, 1984

Debeir Jean-Claude, Deleage Jean-Paul, Hemery Daniel – Les servitudes de la puissance: Une histoire de l'énergie – Paris: Flammarion, 1986

Giscard d'Estaing Valerie-Anne (sous la direction de) – Le livre mondial des inventions 2000 – Paris : Fixot, 1999

Giscard d'Estaing Valerie-Anne (sous la direction de) – Le livre mondial des inventions 1989 – Paris : Fixot, 1999

Lequin Yves (sous la direction de) – Rhône-Alpes, 500 années lumières – Paris : Plon, 1991

Lhomme Jean-Christian – Les énergies renouvelables. Histoire, état des lieux et perspectives – Paris : Delachaux et Niestlé, 2001

Mongereau Noël – Lyon du 20<sup>ème</sup> au 21<sup>ème</sup> siècle. Tricentenaire de l'Académie des Sciences, Belles-Lettres et Arts de Lyon (1700-2000) – Lyon : Editions Lyonnaises d'art et d'histoire, 2000

Viollet Pierre-Louis – Histoire de l'énergie hydraulique. Moulins, pompes, roues et turbines de l'Antiquité au 20<sup>ème</sup> siècle – Paris : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2005

Vuillermot Catherine – Pierre-Marie Durand, avoué lyonnais, roi de l'électricité – Vingtième siècle. Revue d'histoire, 2000, volume 25, n°65

### **Les principaux acteurs de la recherche en matière de technologies énergétiques en région lyonnaise**

<http://www.aldes.com/siteCORPORATE/corpoHome.asp>

<http://www.axelera.org/>

<http://www.cetiat.fr/index.cfm>

<http://www.elyo.fr/>

<http://www.entpe.fr/Prive/index-recherche.htm>

<http://www.inrets.fr/>

<http://www.insa-lyon.fr/cethyl/>

[http://www.ifp.fr/IFP/fr/ifp/fb12\\_03.htm](http://www.ifp.fr/IFP/fr/ifp/fb12_03.htm)

<http://www.ifp.fr/IFP/fr/rechercheindustrie/moteurscarburants/fc05.htm>

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/textes/sequestration.htm>

<http://www.ingelux.com/accueil3.htm>

<http://www.let.fr/>

<http://www.lyon.cci.fr/site/cms/2005042015065763/Economie-lyonnaise/Secteurs-d-activites/Energie/Caracteristiques/Energie--Caracteristiques?selectedMenu=20060213115634>

[http://www.photowatt.com/home/home\\_fr.php?page=../about/about\\_fr.htm](http://www.photowatt.com/home/home_fr.php?page=../about/about_fr.htm)

<http://www.total-energie.fr/fr/entreprise/historique.php>

Association Lyon Urban Truck & Bus 2015 – Les grands projets du pôle de compétitivité. Dossier de presse – 2006

Institut Français du pétrole – Projet européen Castor. CO2 : du captage au stockage – 2006

Institut Français du pétrole – Rapport annuel 2005 – 2006

Ministère de l'écologie et du développement durable – Charbon propre. Mythe ou réalité ? – Paris, 2006