

## Prologue

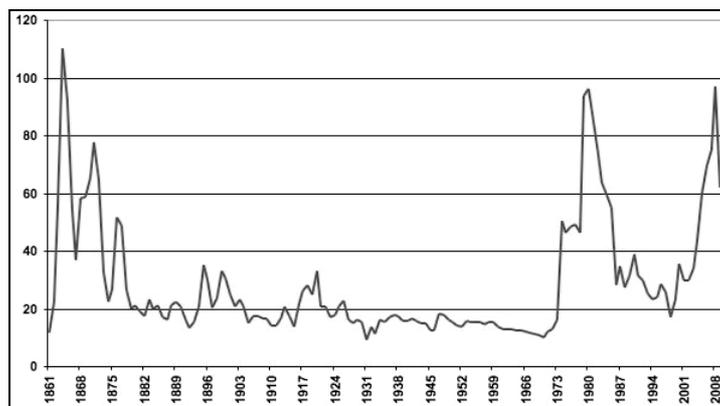
# Émergence des énergies renouvelables et nucléaire

Jean HLADIK

Les deux chocs pétroliers de 1973 et 1979 portèrent un coup très dur aux économies occidentales qui, depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale, avaient vu croître leur prospérité en partie grâce au pétrole acheté à très bas prix. Les brutales augmentations des prix du baril de pétrole engendrèrent une prise de conscience de la dépendance de l'économie générale des pays industrialisés envers les énergies non renouvelables.

Vingt ans avant le premier choc pétrolier, une direction de recherche s'était déjà largement développée dans de nombreux pays en vue d'acquérir une certaine indépendance énergétique : la production d'électricité par des centrales nucléaires. C'était une retombée du savoir-faire acquis par les militaires, tant américains que soviétiques, lors de la fabrication des bombes atomiques et à hydrogène. En France, où l'« on n'a pas de pétrole mais on a des idées », ainsi que le clamait un slogan de l'époque, le programme nucléaire connaît au cours de l'année 1974 une accélération sans précédent.

Une brusque effervescence mondiale va avoir lieu à partir du premier choc pétrolier afin de favoriser le développement des énergies renouvelables. De nombreux scientifiques se tournent vers l'amélioration et la recherche de techniques solaires performantes. Des associations militent pour le développement des énergies renouvelables. Les gouvernements encouragent financièrement toutes les initiatives en ce sens.



Évolution des prix du baril de pétrole en dollars constants de 1861 à 2008  
(B.P. Statistical Review – 2010)

Mais, peu à peu, l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole, l'OPEP, va perdre sa suprématie et son influence dans la formation des prix pétroliers et elle ne pourra éviter le contre-choc pétrolier du milieu des années 1980 entraînant une baisse rapide des prix du baril. Les pays occidentaux réussissent à renverser la situation grâce à une augmentation de la production pétrolière dans différents points du globe : Mexique, Alaska, Mer du Nord, etc. Les prospections offshore se multiplient et le prix du pétrole se retrouve au niveau des 20 dollars le baril, en dollars constants calculés en 2008, prix comparable à celui des années 1920, ainsi que le montre le graphique de la page précédente. La vague d'intérêt pour les utilisations de l'énergie solaire retombe alors rapidement et les budgets de recherche et développement disparaissent presque complètement.

## **Le développement des centrales nucléaires dans le monde**

C'est en pleine guerre froide, en décembre 1953, que le président américain Dwight Eisenhower (1890-1969) s'adresse à l'assemblée générale de l'ONU pour présenter un célèbre programme, « Atoms for Peace », visant à développer l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'énergie électrique. La première conférence internationale sur l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire se tient à Genève en août 1955 ; elle consacre le lancement mondial des centrales nucléaires dont l'essor industriel aura lieu à partir des années 1960.

La construction des centrales nucléaires va s'étendre dans de nombreux pays, encouragée par les idées d'indépendance énergétique ainsi que de puissance militaire, la maîtrise de l'enrichissement du combustible civil nucléaire permettant de passer éventuellement au nucléaire militaire. À partir des années 1960, plus de 400 centrales nucléaires seront construites dans le monde en une trentaine d'années.

### **Une courte période d'euphorie nucléaire aux États-Unis**

La fabrication par les Américains des premières bombes atomiques qui allaient détruire Hiroshima et Nagasaki avait nécessité la mise en œuvre d'un immense complexe scientifique et industriel consacré au nucléaire. Profitant de cette avancée technologique, ce furent les Américains qui allaient réaliser des réacteurs nucléaires expérimentaux conduisant, dès 1951, à une première centrale de production d'électricité d'origine nucléaire. Une centaine de « tranches nucléaires » verront le jour aux États-Unis en une vingtaine d'années, chaque « tranche » étant constituée d'un réacteur nucléaire associé à un échangeur thermique, un groupe turboalternateur pour la production d'électricité, et un transformateur pour le couplage au réseau. Une centrale nucléaire est la juxtaposition de plusieurs tranches sur un même site.

Cependant, le développement euphorique de la décennie 1960 et du début des années 1970 va pratiquement s'arrêter à partir de 1974. Les investissements privés dans de nouvelles centrales vont se tarir et la plupart des réacteurs en projet seront annulés. Aux États-Unis, aucune centrale nucléaire qui avait été décidée après 1972 ne sera achevée. Différents facteurs vont se conjuguer pour aboutir à cet arrêt de la prolifération du nucléaire civil aux États-Unis. D'une part, l'opinion

publique a pris conscience de la dangerosité des produits radioactifs et des mesures administratives de protection de plus en plus contraignantes vont augmenter les délais de réalisation et élever le coût des installations et de leur exploitation. De plus, le stockage à long terme des déchets radioactifs qui restent dangereux durant des milliers d'années, n'est toujours pas résolu.

La défiance envers le nucléaire s'accroît après le premier accident majeur de l'histoire du nucléaire civil qui eut lieu le 28 mars 1979 aux États-Unis, dans la centrale de Three Mile Island, en Pennsylvanie. Un réacteur à eau pressurisée de 900 mégawatts subit une fusion partielle du cœur du réacteur, provoquée par une succession de défaillances techniques et humaines qui conduisirent à une perte d'alimentation en eau du circuit de refroidissement. Il n'y eut que de faibles rejets vers l'extérieur de la centrale grâce à l'enceinte de confinement. Ce ne fut que six ans plus tard que des équipes ont pu pénétrer dans l'enceinte afin de se faire une idée précise de l'état du combustible fondu qui, durant toutes ces années, avait dû être refroidi. L'évacuation du combustible ne fut achevée qu'en 1991. L'opération a coûté près d'un milliard de dollars.

#### **Les techniques nucléaires se diversifient dès 1950**

Alors que les réacteurs américains récupèrent la chaleur produite par le combustible nucléaire par une circulation d'eau ordinaire pressurisée ou bouillante, différents pays vont effectuer des recherches et développer de nouveaux types de réacteurs.

Dès le début des années 1950, les Canadiens vont poursuivre le développement de la filière CANDU (Canadian Deuterium Uranium) ; c'est un réacteur à uranium naturel et eau lourde avec récupération de la chaleur par une circulation d'eau lourde pressurisée. Fin 1993, 33 tranches nucléaires étaient en fonctionnement au Canada. Au fil des années, les plus anciennes centrales seront définitivement arrêtées ou temporairement pour mise en conformité de leur niveau de sécurité. Finalement, en 2004, seules 16 tranches sont encore en fonctionnement.

Les Anglais vont développer les filières MAGNOX, réacteurs à uranium naturel, avec modérateur au graphite et circulation de gaz, et AGR, de type analogue mais utilisant de l'uranium enrichi. En 1983, le Royaume Uni possède 32 tranches nucléaires des types MAGNOX et AGR produisant de l'électricité. La découverte de gisements de gaz et de pétrole va largement influencer la politique gouvernementale qui n'envisage plus dans l'immédiat de nouvelles constructions de tranches nucléaires.

Le régime communiste de l'Union Soviétique prenait particulièrement soin de ses scientifiques après la seconde guerre mondiale. Un fort potentiel de recherche sur le nucléaire militaire et civil se développa rapidement. En août 1953, l'URSS fit exploser sa première bombe à hydrogène, moins d'un an après celle des États-Unis. La filière des réacteurs nucléaires civils dite WWER, Wodo-Wodinoï Energuetit-checkii Reaktor, fut mise en service pour la production d'électricité en 1954, peu de temps après les Américains. Ces réacteurs sont à eau ordinaire pressurisée. Une autre filière dite RBMK, Reaktor Bolshoi Moschnosti Kanalnye, consiste en un réacteur à uranium enrichi, modérateur au graphite et transport calorifique par eau bouillante.

Le développement des centrales nucléaires en Union Soviétique resta très inférieur aux programmes prévus par les planifications successives. Le potentiel de production d'énergie nucléaire pour l'ensemble des pays de l'ex-URSS était de l'ordre de 53 GW à la fin 2003, soit à peine plus de la moitié des 100 GW prévu lors de la planification énergétique de 1984. De nombreuses raisons, inhérentes au système soviétique, expliquent ce décalage mais la catastrophe de Tchernobyl en 1986 freina grandement ce programme nucléaire.

Le plus grave accident nucléaire, avant le drame japonais, est celui qui survint au réacteur n°4 de la centrale de Tchernobyl, en Ukraine, le 26 avril 1986. Située à 130 kilomètres de Kiev, cette centrale était le fleuron de l'Union Soviétique. Quatre réacteurs y avaient été construits depuis 1970, deux autres étaient en chantier, et les prévisions portaient sur une centrale de douze réacteurs qui aurait alors été la plus grande du monde.

D'une puissance de 1 000 MW, le réacteur n°4, de type RBMK, avait été achevé en 1983, à peine trois ans avant la catastrophe. Une expérience particulière devait être réalisée sur ce réacteur afin de tester la sécurité de marche des circuits de refroidissement en cas de perte d'alimentation électrique. Pour cela, plusieurs dispositifs avaient été déconnectés et, notamment, le système d'arrêt d'urgence. Au cours de l'expérience, le réacteur dépasse brusquement plus de cent fois la puissance de sa valeur nominale de marche. Une explosion pulvérise une grande partie du bâtiment contenant le réacteur dont le combustible nucléaire n'est pas entouré d'une enceinte de confinement, ce qui envoie une masse considérable de produits radioactifs dans l'atmosphère. Le nuage radioactif se dispersera sur les territoires proches puis sur une grande partie de l'Europe, dont la France.

Le combustible nucléaire n'est qu'en partie détruit et continue d'émettre des produits radioactifs ; il sera recouvert par 5 000 tonnes de matériaux puis un sarcophage sera construit au-dessus. Sur cet immense chantier, environ 600 000 personnes interviendront jusqu'à l'automne 1987 car la radioactivité ne permet pas de travailler très longtemps dans un tel environnement. Ces travailleurs seront appelés les *liquidateurs*. Une estimation, jugée minimale, de 16 000 décès des liquidateurs par cancer a été faite par le Centre international de recherche sur le cancer. Le nombre total de liquidateurs souffrant de maux provenant des doses de radiations reçues n'est pas connu. En 2011, le sarcophage est détérioré et menace ruine ; il doit être recouvert d'une nouvelle arche de confinement en cours de construction d'un coût estimé à 1,6 milliard d'euros.

## **Deux pays ont la plus grande concentration de réacteurs nucléaires : Japon et France**

En 2011, 442 réacteurs nucléaires fonctionnent dans 31 pays, produisant un total d'énergie électrique de 374 GW soit environ 2,8 % de l'énergie mondiale. Les États-Unis en possèdent le plus grand nombre, soit 104 réacteurs fournissant environ 20 % de l'électricité utilisée dans ce pays. La densité surfacique de réacteurs par rapport à la superficie des États-Unis, de l'ordre de 9,6 millions de kilomètres carrés, est faible ; la majorité des réacteurs se situe dans la moitié Est du pays, et les 70 centrales ne compte qu'un ou deux réacteurs.

### **Le Japon et la catastrophe nucléaire de Fukushima**

Dès 1960, le Japon importe des États-Unis un prototype expérimental de réacteur américain à eau bouillante (REB). À partir de 1967, les Japonais vont développer un parc de réacteurs nucléaires REB et REP (eau pressurisée) qui en fera rapidement le troisième producteur mondial d'électricité nucléaire, après les États-Unis et la France. En 2011, le Japon possède 54 tranches nucléaires réparties dans 17 centrales qui assurent la production de 35 % de l'électricité nipponne. La superficie du Japon est de 377 944 km<sup>2</sup>. La densité surfacique de réacteurs nucléaires est donc très élevée.

Le Japon est un archipel volcanique, fortement montagneux, d'où une répartition de la population groupée principalement le long des côtes. Le nombre d'habitants étant d'environ 127 millions, la population est très dense dans les zones habitables. De plus, une forte activité sismique est très fréquente et des tsunamis ont souvent balayé les côtes. Le vendredi 11 mars 2011 un tremblement de terre d'une magnitude 9 se produit à 24 400 mètres de profondeur, à une centaine de kilomètres au large de l'Est du Japon. Trois minutes plus tard, l'Agence météorologique japonaise émet une alerte au tsunami. Une immense vague de plus de 10 mètres de hauteur va balayer des centaines de kilomètres de la côte nord-est japonaise provoquant des milliers de morts.

La centrale de Fukushima-Daiichi, située en bordure de la côte pacifique, comportait 6 réacteurs nucléaires de type REB ou REP. Une enceinte en béton devait protéger la centrale des tsunamis mais elle s'avère insuffisante et l'eau de mer endommage le système de refroidissement des réacteurs. Rapidement, trois des réacteurs qui étaient en service vont subir des dommages de plus en plus graves car les combustibles nucléaires ne sont plus refroidis. De l'hydrogène est émis par suite de ce réchauffement et, en se mélangeant avec l'oxygène de l'air, plusieurs explosions vont avoir lieu au cours des jours suivants, détruisant les toitures des bâtiments, expulsant des nuages radioactifs. Des hélicoptères largueront de l'eau sur les réacteurs puis des pompiers seront appelés en renfort pour asperger les enceintes de confinement. Mais la radioactivité ambiante devient de plus en plus intense. De l'eau hautement contaminée se retrouve autour des enceintes et dans des bâtiments ce qui fait craindre l'apparition de fissures dans les enceintes de confinement. Trois semaines après le début de l'accident, l'incertitude se poursuit et il faudra sans doute des années, pour connaître exactement l'état des enceintes et des combustibles fondus.

### **En 1999, la France frôle une catastrophe du genre Fukushima**

Un réacteur à eau pressurisée, REP de type U.S.A., est développé en France dans les années 1960 mais ce ne sera qu'à partir de 1974 qu'un grand développement va être envisagé pour le nucléaire français avec la construction, de 1977 à 1997, de 58 tranches nucléaires de type REP répartis dans 19 centrales. Celles-ci produisent actuellement 78 % de l'électricité consommée en France. Malgré de nombreux incidents qui ont lieu chaque année sur ces réacteurs, les mesures de sécurité des centrales semblent tranquilliser les thuriféraires du nucléaire.

Un important accident est pourtant survenu à la centrale du Blayais, construite dans l'estuaire de la Gironde, accident qui aurait pu se terminer comme à Fukushima. Le 27 décembre 1999, sous l'effet des vents très violents qui ont

ravagé une partie de la France, des vagues sont passées au-dessus de la digue de protection et ont inondé des galeries souterraines. Entre 18 h 30 et 20 h 50, l'alimentation électrique est perdue ; deux réacteurs sur quatre passent sur moteurs diesel. Vers 21 heures, la route d'accès au site est inondée ; la relève des équipes ne peut plus se faire. Pour la première fois, il y a mise en place en temps réel d'une organisation nationale de crise. Finalement, un scénario catastrophe sera évité de justesse. Ce jour là, le coefficient de marée était de 77, donc relativement faible

## **La recherche sur les énergies renouvelables dans les années 1980**

La flambée d'activisme en faveur des énergies renouvelables durant la décennie 1975-1985 fut remarquable. Chacun redécouvrait que le Soleil était le pourvoyeur essentiel de l'énergie que la planète consommait frénétiquement. Que la chaleur dégagée par le feu de bois n'était qu'un condensé d'énergie solaire, qu'il en était de même pour les énergies fossiles : charbon, pétrole et gaz naturel, que les générateurs d'électricité des grands barrages ne tournaient que grâce à l'énergie hydraulique fournie par le biais de l'évaporation solaire, que les éoliennes ne tournaient que par suite du chauffage solaire de l'atmosphère qui engendre les vents. On s'étonnait que presque toute l'énergie consommée à cette époque provenait de l'énergie solaire hormis les énergies géothermique et de fission nucléaire, cette dernière n'étant encore qu'assez faible dans la consommation énergétique mondiale.

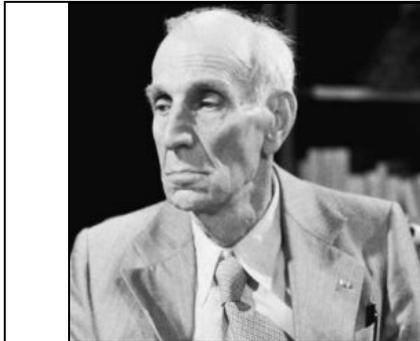
### **Les scientifiques du monde entier se mobilisent**

Les recherches sur l'amélioration des techniques utilisant les énergies renouvelables avaient été complètement délaissées dès le début du XX<sup>e</sup> siècle. Les installations artisanales encore en activité disparurent rapidement après la Première Guerre mondiale. Les moulins à vent et à eau, concurrencés par les minoteries industrielles, cessèrent leurs activités. Les derniers cargos transatlantiques à voile disparurent dans les années 1930. Les machines thermiques, gavées de stocks à bon marché d'énergie fossile, imposèrent leur loi.

Le renouveau d'intérêt pour les énergies renouvelables durant les années 1980 suscita de nouvelles recherches dans de nombreux laboratoires du monde entier.

Des scientifiques de renommée mondiale présidèrent les colloques internationaux sur les applications de l'énergie solaire alors que leur spécialité était éloignée de ce sujet, montrant ainsi leur prise de conscience des problèmes énergétiques et leur soutien aux recherches en cours dans ces domaines.

### L'exemple d'Alfred Kastler, prix Nobel de physique 1966



#### **Alfred Kastler (1902-1984)**

Spécialiste de l'électronique quantique et de la spectroscopie, Kastler élaborait la méthode dite de *pompage optique* qui permet l'inversion des populations d'électrons dans un atome.

Ce procédé est à la base du fonctionnement des masers et lasers. Membre de l'Académie des Sciences en 1964, il obtint le prix Nobel de physique en 1966.

Ainsi, par exemple, le Centre International de Physique Théorique de Trieste en Italie organisa, à partir de 1980, une série de colloques et de séminaires annuels consacrés aux applications de l'énergie solaire. Lors du second séminaire, en 1980, Alfred Kastler prononça le discours d'ouverture dont nous donnons quelques extraits, montrant son intérêt pour les recherches et les développements en cours des applications de l'énergie solaire [Kas1] :

*L'énergie solaire est à l'origine de toute vie terrestre. Issues de la réaction de fusion nucléaire qui, à l'intérieur du Soleil, transforme l'hydrogène en hélium, les radiations solaires franchissent en huit minutes la distance qui sépare le Soleil de la Terre pour entretenir la vie sur notre planète.*

*[...] L'énergie en réserve dans le Soleil n'est pas inépuisable, mais nous savons qu'elle assurera le rayonnement de cet astre pendant des milliards d'années avant de s'épuiser, avant même de donner des signes d'affaiblissement. À l'échelle de la vie de l'espèce humaine, nous pouvons donc la considérer comme inépuisable, comme pratiquement illimitée dans le temps.*

Alfred Kastler décrit ensuite longuement les caractéristiques et les potentialités de l'énergie solaire atteignant le sol de la Terre. Après avoir parlé de l'énergie thermique qui s'accumule dans les matériaux terrestres sous l'action du rayonnement solaire, Kastler, spécialiste de l'électronique quantique, évoque alors l'existence des cellules photovoltaïques qui commençaient à être utilisées pour des installations de très faible puissance :

*[...] Mais au lieu de laisser se transformer l'énergie rayonnante du Soleil en chaleur, on peut, en utilisant des dispositifs appropriés, la transformer directement en énergie électrique ou en énergie chimique. Le premier type de ces transformations peut être assuré par l'emploi de cellules photovoltaïques basées sur l'effet photoélectrique des semi-conducteurs et notamment du silicium.*

*À l'heure actuelle, le prix de ces générateurs d'énergie électrique est encore beaucoup trop élevé pour leur permettre de concurrencer d'autres sources d'énergie électrique, sauf dans le cas de générateurs de faible puissance, inférieure au kilowatt, installés en zone isolée. Mais le perfectionnement incessant des techniques de construction et la mise au point de procédés automatiques*

*de fabrication en grande série nous donnent l'espoir que l'emploi de ces piles se généralisera d'ici une dizaine d'années.*

*En attendant, on utilise ces piles pour générer l'énergie électrique en des lieux isolés vers lesquels le transport d'énergie est prohibitif : bouées lumineuses en mer et dans les chaînes montagneuses inaccessibles, pompage de l'eau dans les pays du Sahel, approvisionnement en énergie des vaisseaux spatiaux grâce aux panneaux solaires couverts de telles cellules.*

*Le deuxième type de ces transformations utilise des générateurs photochimiques qui emploient les photons solaires pour dissocier les molécules d'eau et fabriquer de l'hydrogène, combustible de l'avenir pour faire mouvoir les automobiles. On peut prévoir que cette méthode connaîtra elle aussi un développement futur considérable.*

Trente années ont passé depuis les prévisions faites par Alfred Kastler en ce qui concerne les cellules photovoltaïques. Le développement actuel des panneaux photovoltaïques, encouragé par la législation européenne, correspond au « perfectionnement incessant des techniques de construction » envisagé par Kastler. Les recherches dans ce domaine permettent d'obtenir de nouvelles cellules autres que celles utilisant le silicium, abaissant les prix de revient.

Alfred Kastler termine son allocution sur une note optimiste :

*[...] L'humanité a réussi à résoudre dans le passé bien des problèmes difficiles. Elle a réussi à éliminer les grandes épidémies, terreurs de jadis. Elle pourra, si elle oriente ses efforts dans la bonne direction, résoudre le problème de la soif d'énergie. L'énergie solaire est appelée à jouer un rôle de premier plan.*

#### **L'exemple d'Abdus Salam, prix Nobel de physique 1979**



##### **Abdus Salam (1926-1997)**

En 1957, Abdus Salam devint professeur de physique théorique à l'Imperial College de Londres. En 1964, il est nommé directeur du Centre International de physique théorique de Trieste. Steven Weinberg, Sheldon Glashow et Abdus Salam mirent au point la théorie de l'interaction électrofaible qui réalise l'unification des interactions électromagnétique et faible. Ils se partagèrent le prix Nobel de physique 1979 pour l'invention de la théorie électrofaible.

Abdus Salam était directeur du Centre International de Physique Théorique de Trieste durant les années 1980. C'est lui qui mit le Centre à la disposition des spécialistes de l'énergie solaire qui organisèrent de multiples rencontres au cours de ces années. Le discours d'introduction du III<sup>e</sup> séminaire sur l'énergie solaire fut prononcé, en anglais, par Abdus Salam [Sal1].

Salam mit en relief l'importance du rôle de la recherche sur l'énergie dans les pays en voie de développement, ainsi que la mission du Centre de Trieste dans ce