

Vers L'Énergie Abondante Sans Pollution

LA FUSION NUCLÉAIRE PAR LASER

Comment supprimer le désastreux réchauffement climatique

Par Jean ROBIEUX

Membre Correspondant de l'Académie des Sciences

Membre de l'Académie des Technologies

***DANGER MORTEL DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE
NECESSITE VITALE D'UNE METHODE DE PRODUCTION
D'ENERGIE RADICALEMENT NOUVELLE***

Les transports, le chauffage des immeubles, l'industrie exigent une énergie dont la plus grande part est produite par la combustion du pétrole et du gaz. Elle génère de grandes masses de gaz carbonique CO₂ qui absorbent le rayonnement de la terre et entraînent l'élévation de la température. Cet effet de serre produit un réchauffement climatique qui rendra la vie impossible sur la terre au cours des prochains siècles.

Les énergies renouvelables et les économies d'énergie sont à développer. Elles ne peuvent pas résoudre les problèmes graves posés par nos larges besoins d'énergie pour le chauffage, le transport, l'alimentation des activités industrielles.

Une méthode de production d'énergie radicalement nouvelle qui n'utilise pas le carbone est donc indispensable à la survie de l'humanité.

Ordre de grandeur des méthodes de production d'énergie en France

Pour dégager des idées simples, nous allons considérer le cas de la France. On pourra en déduire des conclusions qui seront valables pour le monde entier.

L'unité largement utilisée pour évaluer la consommation d'énergie est la « Tonne Equivalent Pétrole » la TEP. C'est l'énergie fournie par la combustion d'une tonne de pétrole. Comme nous consommons par an une énergie égale à un grand nombre de tonnes de pétrole, on utilise comme unité d'énergie la Mégatep qui est égale à 1 million de TEP.

Charbon	6,12 Mteps
Pétrole	72,15 Mteps
Gaz	35,44 Mteps
Electricité	36,44 Mteps
ENRT (énergies renouvelables produisant de la chaleur)	10,47 Mteps
Total	161 Mteps

Consommation finale énergétique française en 2005 par secteurs de production

L'énergie totale consommée en France est de 161 Mteps : 70 % est produite par la combustion du carbone contenu dans le charbon, le pétrole et le gaz. Elle déverse un grand nombre de millions de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère. Ceci entraîne un réchauffement climatique désastreux.

Pour diminuer la production de CO₂, on peut envisager d'accroître la production d'énergie électrique par les centrales nucléaires et hydroélectriques. Elles produisent 36,4 Mtep. Vingt pour cent de cette énergie est apportée par les centrales hydroélectriques. Celles-ci ne pourront pas accroître leur contribution car les sites les plus favorables ont été utilisés. Pour augmenter la part de l'énergie électrique nous devons construire de nouvelles centrales nucléaires.

Ces centrales utilisent la fission nucléaire d'atomes lourds comme l'Uranium. La technologie des centrales construites en France est de bonne qualité. Leur utilisation n'a jusqu'ici

conduit à aucun accident grave. On doit cependant tenir compte du fait qu'un dérèglement de leur fonctionnement peut conduire à une explosion aux lourdes conséquences pour la santé dans un large environnement. C'est ce qui s'est produit à Tchernobyl en Ukraine. D'autre part, ces centrales génèrent des déchets radioactifs pendant de nombreux millénaires. Elles demandent un combustible qui ne se présente pas partout sur la terre. Son approvisionnement pose des problèmes économiques et politiques qui sont de graves sources de tension. On peut envisager de construire pendant encore quelques décennies des centrales à fission nucléaire pour maintenir la production actuelle. Par contre un large accroissement de ces centrales, pour tripler ou quadrupler la production d'énergie, présenterait des inconvénients qui ne seraient pas acceptables.

On développe actuellement les énergies renouvelables produites par les éoliennes, les piles solaires, l'agriculture. Elles ne génèrent pas de CO₂ donc n'augmentent pas l'effet de serre. C'est un avantage essentiel, il convient donc d'accroître nos efforts dans ce domaine. Grâce à elles, nous pouvons espérer diminuer la croissance de l'effet de serre mais leur contribution ne sera pas suffisante pour supprimer le réchauffement climatique.

Pour empêcher que celui-ci ne détruise la possibilité de vivre sur la terre, nous devons absolument mettre au point au cours des prochains siècles une méthode de production d'énergie radicalement nouvelle permettant d'obtenir une énergie abondante pour un coût relativement modeste.

Nous allons montrer que la fusion nucléaire par laser nous apportera à temps la méthode de production d'énergie dont nous avons un vital besoin. Pour comprendre cette méthode, nous devons d'abord expliquer deux lois fondamentales de la physique qui sont à la base de la production d'énergie. Elles ont été découvertes par Einstein en 1905 et Planck en 1900.

En 1905, Einstein montre que la masse immobile contient beaucoup d'énergie

Une masse m immobile contient une énergie

$$W = mc^2$$

c est la vitesse de la lumière

$c = 300.000$ kilomètres par seconde

Les masses qui nous entourent contiennent une immense quantité d'énergie, largement suffisante pour nous.

Le calcul montre que l'énergie consommée par la France pendant un an est contenue dans une masse immobile de 100 kilogrammes. On en tire une conclusion essentielle.

Nous ne manquons pas d'énergie. Les masses qui nous entourent en contiennent d'immenses quantités très supérieures à nos besoins.

Le problème qui nous est posé est d'extraire de la matière une énergie qui est utilisable par nous. Nous verrons qu'elle doit apparaître sous la forme d'une énergie thermique, de chaleur, qui sera transformée en énergies mécanique et électrique. Grâce à elles nous pourrons entraîner les automobiles, chauffer les maisons, alimenter nos industries.

Einstein nous dit où se trouve l'énergie. Il ne nous dit pas comment la faire apparaître sous une forme utilisable par nous.

En 1900 Planck fit une découverte qui nous donne la voie à suivre pour y parvenir.

En 1900, Planck découvre la loi du rayonnement lumineux des corps chauds

La structure granulaire de la matière en est déduite

Une pièce de fer dont on élève la température devient rouge, puis blanche. Planck a expliqué ce phénomène en montrant que la lumière est émise par grains $h\nu$ proportionnels à la fréquence ν de l'onde optique.

Niels Bohr en a déduit que la matière est constituée par de petits grains qu'on appelle des atomes.

Si on entend le son d'une cloche on peut en déduire sa dimension. Si le son est grave la cloche est grosse. S'il est aigu la cloche est petite. Du rayonnement de la cloche, on déduit sa structure spatiale.

Planck a découvert le rayonnement de la matière. Niels Bohr en a déduit qu'elle est constituée par des atomes dont il a déterminé la structure spatiale.

Le plus simple des atomes est celui de l'hydrogène dont la structure est représentée sur la **Fig.1**.

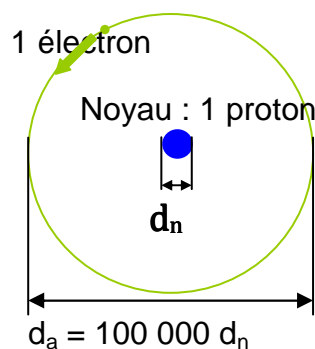


Fig.1 Atome d'hydrogène

$$d_n = 10^{-13} \text{ cm} \quad d_a = 10^{-8} \text{ cm}$$

Au centre de l'atome d'hydrogène se trouve un noyau constitué par une particule élémentaire, le proton. Il porte une charge électrique e .

Un électron porteur d'une charge électrique $-e$ tourne autour du noyau.

La masse M du proton est 2000 fois plus grande que la masse m de l'électron.

Le diamètre d_n du noyau est 100.000 fois plus petit que le diamètre d_a de la trajectoire sphérique parcourue par l'électron dans l'atome.

Pour évaluer l'énergie de la charge sur le noyau il faut calculer l'énergie qu'il faut dépenser pour porter une charge positive sur une sphère dont le très petit diamètre est d_n . Il apparaît que cette énergie est d'autant plus grande que d_n est petit. Il faudra donc dépenser beaucoup plus d'énergie pour porter une charge électrique sur le noyau du diamètre d_n que sur la sphère de diamètre d_a , sur laquelle se trouve l'électron.

Une unité commode pour évaluer les énergies mises en jeu est l'électron/Volt (**eV**). C'est l'énergie d'une charge e portée à un potentiel d'un volt.

Il apparaît que l'énergie de l'électron circulant sur la sphère de diamètre d_a est de l'ordre de **1 eV**.

L'énergie de la charge d'un proton dans le noyau est de l'ordre de 1 million d'**eV**.

Nous pouvons immédiatement en déduire qu'il sera beaucoup plus facile de faire interagir les électrons de deux atomes différents que les particules de leurs noyaux.

Structure des atomes

L'atome d'hydrogène a la structure la plus simple. Elle est représentée sur la **Fig.1**.

Celles des atomes de Deuterium et de Tritium, schématisées sur la **Fig.2**, sont proches de celle de l'hydrogène.

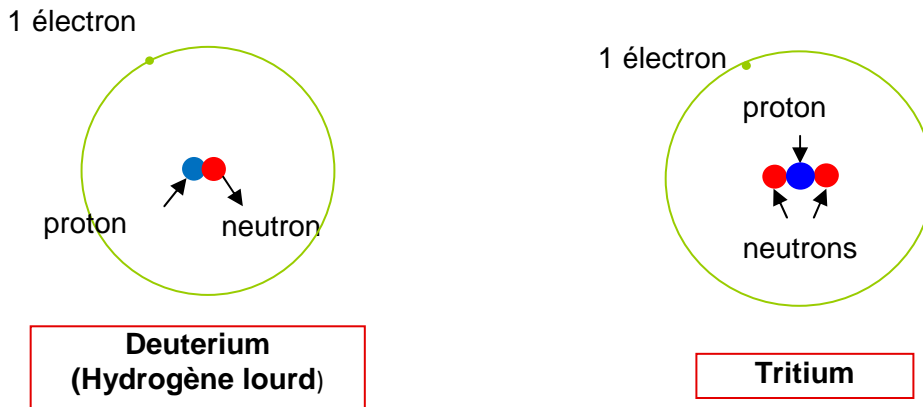


Fig.2 Atomes de Deuterium et Tritium

Le neutron et le proton ont des masses voisines.

Le neutron ne porte pas de charge électrique.

Le noyau de Deuterium contient un proton et un neutron, celui du Tritium un proton et deux neutrons.

Le Deuterium D et le Tritium T sont des isotopes de l'Hydrogène. L'eau lourde D²O entre dans la proportion de $\frac{1}{5000}$ dans l'eau ordinaire. Chaque litre d'eau en contient 0,2 milligramme. Le Deuterium peut être produit par l'électrolyse de l'eau. Ce n'est pas le cas du Tritium beaucoup moins abondant.

Les noyaux des autres atomes contiennent un certain nombre de protons et de neutrons.

L'atome de carbone contient six protons et six neutrons, celui de l'oxygène contient huit protons et huit neutrons.

La structure de l'atome de carbone est représentée sur la **Fig.3**. Celle de l'atome d'oxygène sur la **Fig.4**

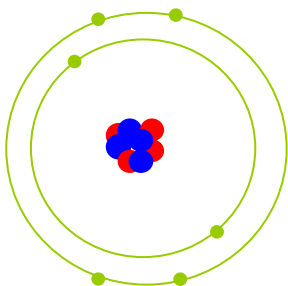


Fig.3 Atome de Carbone

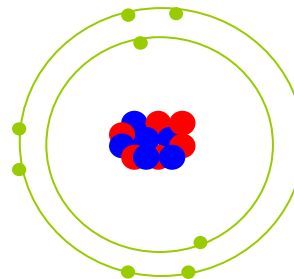


Fig.4 Atome d'Oxygène

Les réactions entre atomes A et B produisent des molécules AB

La structure de la molécule AB dépend de la forme des atomes A et B. Les structures des molécules sont très variées.

Le calcul et l'expérience montre que si le cortège des électrons est complété à huit par une association convenable des atomes, l'énergie de la molécule, donc sa masse, est minimale. Ainsi l'hydrogène qui a un électron périphérique s'unit à l'oxygène qui a six électrons périphériques pour constituer la molécule H₂O.

Les Fig. 3 et Fig.4 montrent que le carbone a quatre électrons périphériques et l'oxygène en a six.

La Fig. 5 montre comment C et O₂ peuvent s'associer pour former une molécule de CO₂ dont l'énergie, donc la masse, sera plus faible que la masse de C et O₂ séparés.

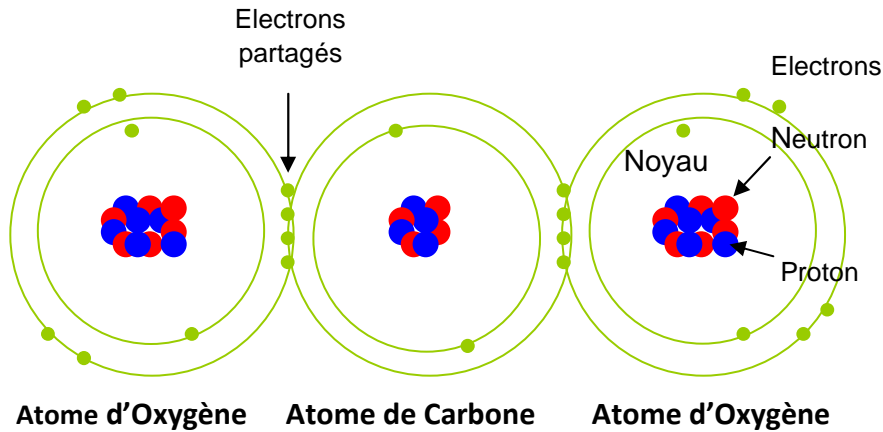
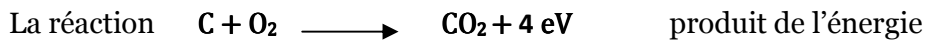


Fig.5 Molécule de CO₂



Ceci résulte du fait que la molécule de CO₂ est sur un niveau d'énergie plus bas que C + O₂. Il en résulte que la réaction produit une diminution Δm de la masse m des combustibles C + O₂. Il y a donc une production d'énergie

$$W = \Delta m \cdot c^2$$

MÉTHODE GÉNÉRALE DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE

Pour produire l'énergie, on fait se combiner deux corps A et B pour constituer un corps AB. Si la masse de AB est plus légère que celle de A+B on produira une énergie. Ceci résulte de la loi d'Einstein. Si Δm est la différence entre la masse de A+B et AB, l'énergie produite sera donnée par la relation précédente.

Si on tient compte de la structure de la matière que nous venons d'expliquer, nous pouvons prévoir que nous disposerons de deux classes de réactions entre deux corps A et B : les réactions chimiques au cours desquelles seuls les électrons interviennent, les réactions nucléaires qui sont déterminées par les noyaux.

Les réactions chimiques entre électrons

La réaction peut résulter d'une modification de la position des électrons sans que les noyaux jouent un rôle. Ce sont les réactions chimiques qui se manifestent souvent dans la vie courante, par exemple en brûlant du bois.

Nous avons dit que l'énergie des électrons est très faible. On peut donc prévoir que l'énergie produite par atome sera petite. Le calcul montre qu'elle sera de l'ordre du dixième de milliardième de l'énergie mc^2 contenue dans la masse immobile de la matière des corps A et B qui se combinent.

Nous avons vu que l'énergie mc^2 nécessaire à la France pendant un an est contenue dans une masse de 100 kilogrammes de matière. Pour produire l'énergie nécessaire, il faudra donc utiliser une masse de combustibles 10 milliards de fois plus grande que 100 Kilogrammes, c'est à dire 1000 milliards de kilogrammes, soit 1 milliard de tonnes. Les masses de CO₂ produites au cours de la production d'énergie s'exprimeront en centaines de millions de tonnes. Elles sont suffisamment grandes pour produire un désastreux réchauffement climatique.

Nous constatons que le réchauffement climatique entraîné par la production de CO₂ par l'utilisation du carbone résulte de la structure de la matière. Il est donc radicalement inévitable.

Les réactions de fission et de fusion nucléaires entre noyaux

Nous sommes donc conduits à considérer l'utilisation des réactions entre noyaux. Nous avons noté que l'énergie des particules du noyau est environ un million de fois plus grande que celle des électrons. Ceci résulte de la petitesse du noyau. On peut en déduire qu'un réacteur nucléaire produira par unité de masse une énergie environ un million de fois plus grande.

Si des réactions chimiques demandaient la mise en œuvre de 1 milliard de tonnes de matière, il suffira de 1000 tonnes pour produire la même énergie par des réactions nucléaires. Il n'y a pas de production de CO₂ donc pas de réchauffement climatique.

Les réactions nucléaires apportent donc de grands progrès. Par contre elles sont plus difficiles à réaliser que la combustion du carbone.

On distingue deux catégories de réactions nucléaires :

- Les réactions mettant en œuvre des noyaux lourds et fragiles comme celui de l'Uranium. On les appelle des ***fissions nucléaires***.
- Les réactions entre éléments légers par exemple, l'Hydrogène, le Deuterium, le Tritium. Ce sont les ***fusions nucléaires***.

Des centrales nucléaires utilisant la fission sont aujourd'hui réalisables. Nous avons noté que leurs inconvénients sont grands. Il ne semble pas possible d'accroître suffisamment leur nombre pour que le réchauffement climatique disparaisse.

Aujourd'hui on a pu utiliser la fusion pour faire la très puissante bombe H. On n'a pas pu encore réaliser des centrales électriques tirant parti de la fusion nucléaire.

Pour produire l'énergie grâce à la fusion nucléaire, il faut réaliser une grande densité et une haute température de la matière en respectant les contraintes de sécurité et financières d'une centrale électrique.

Une méthode tire parti des possibilités de compression offertes par l'utilisation d'un champ magnétique. C'est le principe du projet internationale ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) qui est en cours de réalisation à Cadarache.

Une méthode utilise la compression et l'élévation de température par un faisceau laser dans une sphère suffisamment petite pour que l'on puisse récupérer l'énergie produite. C'est la fusion nucléaire par laser. J'ai proposé ce concept en novembre 1962. L'intérêt de ce concept a été immédiatement accepté par le Général de Gaulle. Depuis lors j'ai participé aux travaux sur ce sujet et je rencontre fréquemment dans les congrès internationaux les équipes au travail dans ce domaine.

PRODUCTION D'ÉNERGIE PAR LA FUSION NUCLÉAIRE PAR LASER

Grâce à l'élaboration d'impulsions laser, beaucoup plus brèves qu'auparavant par Gérard Mourou, il apparaît aujourd'hui très probable qu'on obtiendra l'allumage des réactions avant 2025. Les expériences faites en vue de l'atteindre sont très prometteuses. Le principe de cet allumage est représenté sur la **Fig.4**.

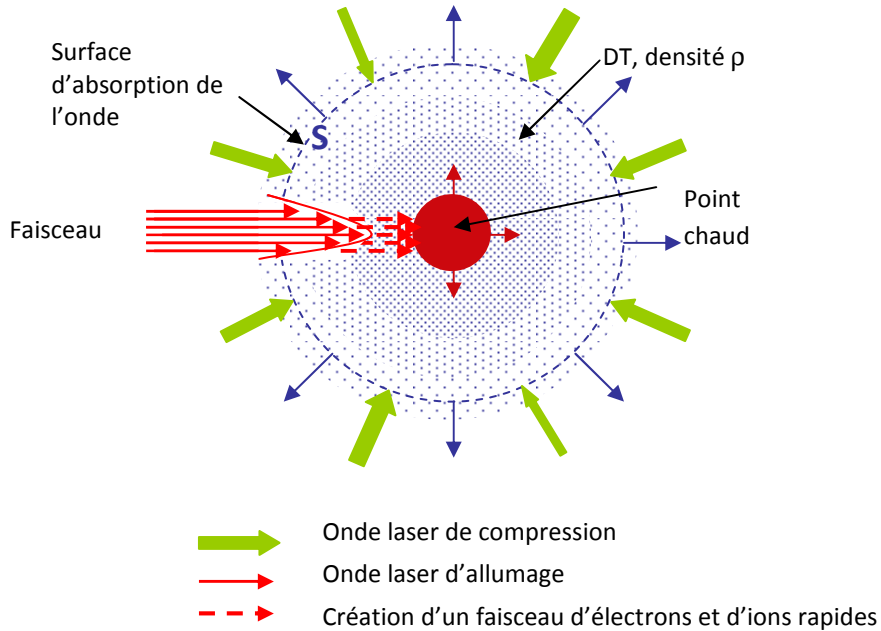


Fig.4 Principe de l'allumage rapide permis par des impulsions très brèves
 « The Physics of Inertial Fusion » de Atzeni et Meyer-Ter-Vehn(2004)
 Oxford Science Publications

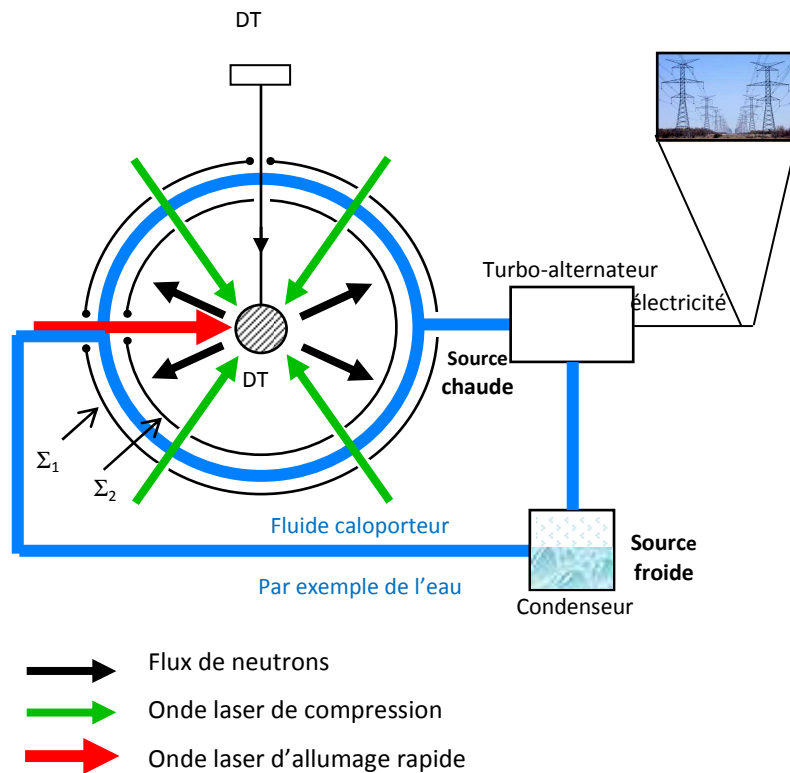


Fig.5 Structure schématique d'une centrale électrique utilisant la fusion par laser

L'énergie produite par les réactions de fusion est transportée par un flux de neutrons généré par les réactions de fusion. Ce flux est absorbé par le caloporteur, par exemple de l'eau, qui circule entre les sphères Σ_1 et Σ_2 . Ce caloporteur alimente la source chaude d'une turbine qui entraîne un alternateur générateur d'énergie électrique. La sphère DT émet 10 fois par seconde une énergie suffisante pour que la centrale produise 1 Gigawatt (1 milliard de watts), comme les puissantes centrales électriques actuelles.

Lorsque l'allumage rapide aura été obtenu, je suis convaincu qu'on pourra réaliser dans une cinquantaine d'années des centrales électriques produisant une énergie abondante pour un coût modeste. Cette conviction repose sur une expérience personnelle approfondie des technologies qui seront mises en œuvre.

Une partie essentielle de la centrale est constituée par un système d'allumage qui produit le flux lumineux représenté en rouge sur la **Fig.5**. Il sera réalisé par la mise en œuvre des technologies de fabrication collectives des circuits électroniques qui ont permis de passer des câbles hertziens pesant des tonnes vers les années 1955 aux téléphones portables d'aujourd'hui. Il contiendra d'importantes masses de verre traversées par un grand flux laser.

J'ai eu la responsabilité opérationnelle des équipes qui ont réalisé les câbles hertziens Paris-Lille et Paris-Lyon vers 1955 ; Ils pesaient une dizaine de tonnes. De 1962 à 1970 j'ai dirigé les équipes qui ont transformé ces lourds systèmes en téléphones portables légers et fiables largement utilisés aujourd'hui.

Mon laboratoire à Marcoussis a créé la technologie des lasers de grande puissance à l'origine des recherches en vue de la fusion nucléaire. Nous avons réussi à obtenir une tenue de verre suffisante pour atteindre les grandes puissances indispensables. Depuis j'ai suivi les progrès dans ce domaine.

De plus on constate que la structure de la centrale n'exige pas de matériaux soumis à de sévères contraintes qui risqueraient de rendre la centrale irréalisable. Ceci nous conduit à penser que nous n'avons pas à prévoir de grandes difficultés dans la réalisation.

Les technologies actuelles utilisent le carbone, ce qui est désastreux. La fusion nucléaire par laser utilise le Deuterium, l'hydrogène lourd, qui se trouve en quantité suffisante dans l'eau partout sur la terre. Elle ne produit pas de dangereux déchets.

Il est aujourd'hui pratiquement certain que la fusion par laser nous apportera avant la fin de ce siècle une production d'énergie électrique abondante sans pollution ni danger pour un coût relativement modeste. Le combustible, le Deuterium, se trouve en quantité suffisante partout sur la terre.

Grâce à cette énergie électrique abondante on pourra transformer le mélange $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ en un hydrocarbure utilisable par les automobiles et l'alimentation des humains. Le CO_2 est prélevé dans l'atmosphère et lui est rendu après combustion de l'hydrocarbure. Il n'y a donc pas production de CO_2 . La cause de l'effet de serre est donc supprimée. Le réchauffement climatique qui détruit la vie sur la terre est éradiqué.

L'énergie électrique abondante pourra être transformée avec un bon rendement en une énergie optique analogue à l'énergie solaire. Elle pourra être utilisée pour transformer $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$ en des aliments contenant l'énergie nécessaire à la vie des hommes. On supprimera la faim dans le monde qui fait aujourd'hui souffrir un milliard de personnes.

INFLUENCE MAJEURE DES CONGRÈS SUR LA FUSION PAR LASER À SAN FRANCISCO EN 2009 ET A BUDAPEST EN 2010

En septembre 2009, le congrès IFSA (sixième *International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications*) a rassemblé 500 chercheurs de haut niveau originaires des Etats-Unis, France, Russie, Japon, Chine, Allemagne, Angleterre...

Je participe à ces congrès depuis 1965, à une époque où ils ne rassemblaient qu'une vingtaine de personnes, surtout des Français et des Russes. Ils étaient alors les premiers à ouvrir la voie sur ce sujet. Les exposés à ce congrès de San Francisco ont été très riches. On peut ainsi résumer les points de vue des principaux responsables :

L'allumage des réactions nucléaires dans une sphère suffisamment petite pour qu'on puisse utiliser l'énergie produite n'a pas encore été obtenue.

Vers 1990 Gérard Mourou a réussi à élaborer des impulsions laser dont la durée peut être mille fois plus brève que celle des impulsions actuellement utilisée.

Le calcul et l'expérience montrent que l'énergie électromagnétique de l'onde incidente sur la petite sphère est transformée en l'énergie des électrons et des ions de la matière. Ces particules sont entraînées à une vitesse proche de la vitesse de la lumière.

L'allumage apparaît lorsqu'on a obtenu une concentration suffisante de l'énergie émise par le laser. Les impulsions beaucoup plus brèves qu'auparavant obtenues par Gérard Mourou permettront d'atteindre la concentration d'énergie nécessaire.

Le calcul montre qu'un choix convenable de la structure de concentration permettra d'obtenir l'allumage pour une énergie relativement modeste. Il en résultera la possibilité de réaliser des centrales électriques pour une large plage d'applications sans qu'on ait à prévoir des difficultés technologiques difficilement surmontables.

Au congrès de San Francisco j'ai longuement discuté de cette question avec les principaux responsables américains, japonais, russes.... Tous m'ont dit qu'ils étaient absolument certains que l'allumage sera obtenu grâce aux impulsions ultra-brèves obtenues par Gérard Mourou.

Tous pensent qu'on doit dès aujourd'hui entreprendre les travaux de conception et de réalisation de la centrale de production d'énergie. On peut commencer à travailler à la réalisation des petites sphères, par exemple on étudie la réalisation et les difficultés à surmonter pour le transport des cibles à basse température de leur éclairage par le laser, de la structure de l'allumette laser, de la conversion en chaleur de l'énergie des neutrons produit par la fusion, etc....

Il a été prévu qu'on réalisera dès 2040 de réaliser une démonstration de principe de centrale électrique utilisant la fusion nucléaire. Ceci nous permettra d'agir vite pour empêcher l'effet destructeur du réchauffement climatique.

Pour préciser le sens des expressions que nous utilisons pour définir l'évolution de la création d'une technologie, nous allons considérer l'histoire de la création d'une technologie que nous connaissons bien, celle de la possibilité de voler, celle de l'aviation.

Le premier appareil à moteur ayant réussi à quitter le sol est l'Eole de Clément Ader. Il a accompli un vol d'une cinquantaine de mètres le 9 octobre 1890 dans le parc du château d'Arminvilliers. Ceci démontrait la possibilité de faire voler un plus lourd que l'air. C'est ce que nous appelons une démonstration de principe.

Il apparaît aujourd'hui probable que cette phase sera franchie vers 2040 pour la fusion par laser.

Le 13 janvier 1908, Henri Farman, sur avion Voisin, boucle à Issy les Moulineaux le premier kilomètre en circuit fermé. Le 29 juillet 1909, Louis Blériot traverse la Manche de Calais à Douvres. On peut considérer qu'en 1909, on savait comment réaliser un prototype d'une série d'avions pouvant être fabriqué en série. De nombreux appareils civils et militaires ont été réalisés immédiatement après 1910.

Lorsque nous disons que dès une certaine date nous saurons réaliser en série des centrales utilisant la fusion par laser, cela veut dire que nous aurons atteint le niveau de création de l'aviation en 1910.

Dans le cas de la fusion par laser, nous disons que le niveau de la réalisation d'un prototype sera probablement atteint en 2080. Si un effort important, prioritaire est décidé, cette possibilité pourrait s'ouvrir dès 2060.

Je pense que cette façon de traiter le problème est tout à fait appropriée à la situation à laquelle nous devons faire face.

J'ai expliqué dans mon livre « *Vers l'énergie abondante sans pollution. La fusion nucléaire par laser* » que la réalisation d'une centrale serait à coup sûr d'un coût relativement modeste. En effet la structure schématique de la centrale, représentée sur la fig (5) montre qu'elle est constituée de deux parties dont les fonctionnements sont indépendants :

D'une part l'allumette alimente la flèche rouge qui représente le trajet de l'impulsion laser ultra-brève qui entraîne l'allumage.

D'autre part la récupération de l'énergie des neutrons produits par la fusion et sa transformation en énergie thermique et électrique.

L'allumette est un système électro-optique tirant largement parti des méthodes de réalisation collectives des circuits qui ont permis aux téléphones portables d'être fiables et peu chers. On peut être certain que l'allumette sera efficace et d'un prix acceptable.

L'absorption des neutrons peut être effectuée sur une sphère de rayon aussi grand que nécessaire. On ne prévoit pas de rencontrer de très grandes difficultés de réalisation. Cette sûreté que nous pouvons prévoir pour la réalisation résulte pour l'essentiel de l'indépendance du dispositif d'allumage et de la récupération et transformation de l'énergie produite. Grâce à cette indépendance la réalisation n'exige pas de matériaux qui doivent présenter des caractéristiques très difficiles à obtenir, par exemple avoir des propriétés électroniques fines et supporter la traversée de flux intenses d'énergies.

Obtenir l'efficacité nécessaire demandera des années de travaux par des équipes d'optronique puissantes. Le problème à résoudre est maintenant bien posé. Il faut dès aujourd'hui mettre au travail des équipes puissantes et compétentes pour le résoudre. Ce travail est déjà commencé.

Certains pensent que la fusion par laser est une utopie qui pourra être utile un jour mais pas avant des siècles. Ceci ne correspond pas à la réalité. Le congrès de San Francisco a montré qu'une expérience démontrant la possibilité de produire de l'énergie grâce à la fusion laser sera probablement réalisée vers 2040. Dès aujourd'hui des travaux de développement sont en cours pour définir certaines parties. Ils apportent des emplois de plus en plus nombreux.

En septembre 2010, au congrès européen ECLIM (*European Conference on Laser Interaction with Matter*) à Budapest, les perspectives offertes pour l'allumage de la fusion nucléaire par laser ont été approfondies. Il est apparu très probable que l'allumage de la fusion sera obtenu au cours des toutes prochaines années, probablement d'abord à Livermore, près de San Francisco.

La date à laquelle cette technologie sera disponible dépend pour une bonne part de la concentration des moyens vers l'objectif d'une production d'énergie électrique pour les besoins de l'économie civile.

Aujourd'hui cette concentration est assurée aux USA à San Francisco. On peut raisonnablement espérer que la démonstration de principe y sera effectuée vers 2040. Le premier prototype de centrale pourrait être disponible en 2080. Si une priorité absolue était donnée à ces travaux il n'est pas impossible d'atteindre ce but vers 2060.

La possibilité de réaliser des accélérateurs de grande énergie grâce à l'interaction des impulsions brèves avec un plasma a été exposée. La physique des grandes énergies demande des accélérateurs atteignant des énergies de plus en plus grandes. Les méthodes actuelles exigent de longs et coûteux accélérateurs. Les impulsions brèves permettront de beaucoup réduire la longueur et de faire mieux et moins cher.

Le congrès a souligné l'importance pour la recherche fondamentale des très grandes concentrations d'énergie permises par les impulsions brèves. On envisage d'étudier la structure du vide, la création de paires de particules...

Nous savons qu'en France le *Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA)* oriente d'excellente manière ses travaux vers les perspectives offertes à la physique par les impulsions brèves.

L'Institut Lumière Extrême créée par Gérard Mourou à Palaiseau obtiendra certainement des résultats scientifiques d'importance majeure dans ce domaine nouveau passionnant.

Ce congrès a ouvert une perspective nouvelle à la coopération internationale. Ceci a été pour moi une joie. J'ai pris de nombreux contacts avec des allemands, des tchèques, des hongrois... Je suis convaincu que de nombreuses coopérations peuvent être créées entre les pays européens.

Dans mon livre « Vers l'énergie abondante sans pollution. La fusion nucléaire par laser » paru en 2008, on trouvera un exposé sur les perspectives offertes par le laser à la production d'énergie. Les prévisions que j'ai exposé dans ce livre sont entièrement conformes aux idées exprimées dans ce congrès de Budapest.

HISTORIQUE

Lorsqu'il revint au pouvoir, le Général de Gaulle demanda en 1960 à l'industrie d'encourager la recherche. La Compagnie Générale d'Electricité était alors une puissante compagnie dans les domaines électriques et électroniques. Elle décida de créer un puissant Centre de Recherche à Marcoussis près de Montlhéry. Je fis partie de l'équipe initiale et on me demanda de faire des propositions susceptibles d'ouvrir la voie à de nouvelles technologies.

Le laser venait d'être découvert et j'ai pensé qu'en concentrant l'énergie d'un puissant laser sur la matière, on pourrait obtenir des phénomènes entièrement nouveaux, en particulier le contrôle de la fusion nucléaire. Une proposition sur ce thème fut transmise au Général de Gaulle le 22 novembre 1962. Il l'accepta aussitôt et on nous demanda de prendre contact avec la Direction des Applications Militaires du CEA (CEA-DAM). André BRIN, Directeur du Département de Physique Générale du Centre de Limeil, prit la direction de l'opération. Limeil étudiait les interactions du laser avec la matière. Marcoussis élaborait les lasers demandés par Limeil.

Cette coopération entre Limeil et Marcoussis remporta de grands succès. En 1967 nos lasers étaient trente fois plus puissants que les autres dans le monde. Le président des Etats-Unis demanda au Général l'aide de la France qu'il accorda aussitôt. Cette coopération entre les Etats-Unis et la France se poursuit aujourd'hui. En 1969 le Centre de Limeil fit, indépendamment des russes, une expérience de fusion par laser qui peut être considérée comme une première mondiale d'importance majeure.

En 1992, François Mitterrand annonce un moratoire sur les essais nucléaires, puis le 24 septembre 1996, Jacques Chirac décide l'arrêt définitif des essais. Depuis un programme de simulation est en place, pour conserver la maîtrise de cette arme et réaliser des expériences de modélisation qui sont faites grâce à un laser qui émet 1 million de joules, le LMJ à Bordeaux.

Vers 1990, Gérard Mourou propose une méthode d'émission d'impulsions beaucoup plus brèves qu'auparavant. L'interaction avec la matière est très efficace. Elles ouvrent la voie à l'allumage de la fusion nucléaire dans des sphères suffisamment petites pour être utilisées en vue de la production d'énergie.

L'Angleterre, le Chine viennent d'entreprendre de grands efforts sur la fusion par laser. Ils rejoignent la France, les Etats-Unis, la Russie et le Japon qui depuis quarante ans travaillent sur le sujet.

PERSPECTIVES ÉCONOMIQUES ET SOCIALES OUVERTES

Perspectives en France

Importance essentielle des applications civiles de la fusion par laser

Les Français, grâce au Général de Gaulle et à leur créativité ont largement contribué depuis 1962 à l'ouverture de nouvelles perspectives à la science et à la technologie par la fusion nucléaire par laser.

Il est essentiel qu'ils recueillent la récompense de leurs efforts sur les plans économiques et sociaux.

Aujourd'hui il est très probable qu'on pourra construire dès 2040 une démonstration de principe de la production d'énergie par la fusion par laser. Elle consommera le Deuterium, l'Hydrogène lourd, qui se trouve en quantité suffisante dans l'eau partout sur la terre. La fiabilité sera grande, son coût acceptable. Ses déchets seront sans danger.

Depuis 1993 l'effort français dans le domaine de la fusion par laser est d'une grande ampleur. Il est organisé autour du laser 1 Mégajoule pour les applications militaires dont la construction s'achève à Bordeaux et dont le bâtiment a été inauguré par le président Nicolas Sarkozy le 14 octobre 2010.

Depuis une vingtaine d'années il semble bien que l'humanité se propose d'organiser une vie plus pacifique. Les méthodes de production d'énergie actuelles produisent un réchauffement climatique qui menace la survie de l'humanité. On a besoin d'une méthode radicalement nouvelle fournissant l'énergie électrique d'une manière abondante, sans pollution, pour un coût acceptable, à partir d'un combustible en quantité suffisante partout sur la terre. Nous savons que la fusion par laser permettra dès 2040 de réaliser des centrales électriques respectant ces conditions.

Il apparaît donc approprié d'orienter en priorité l'effort français dans le domaine de la fusion par laser vers la production d'énergie électrique pour les applications civiles.

Nous devons comprendre que donner la priorité à l'application civile ne veut pas dire négliger l'amélioration de la bombe H. Certes, il ne faut pas négliger l'importance de disposer d'une bombe H capable d'immenses destructions. Elle permet de dissuader un ennemi de nous attaquer. C'est un élément essentiel de notre défense nationale dont la création a été décidée par le Général de Gaulle. Elle garantit pour une part notre indépendance. De remarquables travaux scientifiques ont permis aux Français de construire cette arme. Robert Dautray, en particulier, a joué un rôle éminent dans la bataille qui a conduit à son élaboration. De nombreux Français estiment qu'il convient de maintenir l'efficacité de cette arme car elle est une sauvegarde de l'indépendance de leur pays.

La principale difficulté pour construire un système de production d'énergie est d'obtenir un allumage efficace exigeant une énergie minimale.

Nous avons des raisons de penser qu'il est plus difficile de le trouver si la sphère illuminée est petite, comme pour la production d'énergie que si la sphère est plus grosse, comme pour une bombe.

En conséquence une recherche en vue de l'application civile a une bonne probabilité d'ouvrir des possibilités nouvelles aux applications militaires. Il n'est pas aussi probable que la recherche en vue d'applications militaires ouvrira de nouvelles perspectives aux applications civiles de production d'énergie.

La production d'énergie par la fusion par laser inventée par les Français leur permet de contribuer d'une manière essentielle à la suppression du réchauffement climatique. Ceci est bien dans la ligne des services souvent rendus par la France à l'humanité pour améliorer sa culture et la qualité de sa vie. Il est très souhaitable qu'elle puisse jouer un rôle essentiel dans la suppression du réchauffement climatique permise par l'originalité de ses travaux. Elle peut aussi à bon droit vouloir bénéficier des larges débouchés économiques ouverts par une capacité à réaliser des centrales électriques d'un coût acceptable, sans pollution, utilisant un combustible disponible en quantité suffisante partout sur la terre. Ceci contribuera à une forte diminution du chômage chez elle dans un monde où la compétition s'accroît.

La science doit jouer un rôle essentiel dans notre culture. Elle apporte la joie de la découverte des belles lois de la nature. L'expérience montre que c'est grâce à un approfondissement de la connaissance des lois de la science que l'humanité peut survivre. La science doit donc prendre une grande importance dans notre vie, en particulier dans la formation de nos jeunes.

On pourrait attirer leur attention sur les perspectives ouvertes par la science à l'économie et à la technologie. La réalisation des centrales demande de grandes compétences en physique, mathématique, chimie, etc.... des possibilités d'emploi vers le contrôle de la fusion par laser pourraient être proposées chaque année aux écoles Polytechnique, Centrale, Supelec, aux universités, aux IUT, etc....

La décision d'orienter les recherches dans le domaine des lasers vers la production d'une énergie électrique abondante sans pollution pourrait être accompagnée de mesures propres à susciter dans notre pays un grand enthousiasme. Le but est de servir toute l'humanité, d'assurer sa survie. Ceci mérite de grands dévouements.

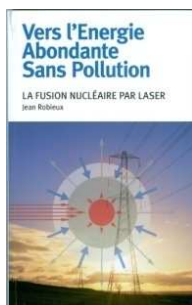
Perspectives dans le monde

Aujourd'hui, les plus puissants pays du monde sont convaincus du grand danger du réchauffement climatique. Les économies d'énergie et l'accroissement des énergies renouvelables ne peuvent supprimer l'effet de serre et il est essentiel d'éviter l'utilisation de la combustion du carbone, du pétrole et du gaz qui produit le CO₂. Une nouvelle méthode de production d'énergie est indispensable. Les hauts responsables de l'orientation des technologies dans les principaux pays du monde sont largement convaincus de l'intérêt d'utiliser la fusion nucléaire par laser pour atteindre le but.

Au cours des dernières années, j'ai eu de profonds échanges avec les responsables chinois, japonais, russes, anglais, allemands, italiens. Les chinois viennent de démarrer un effort de grande ampleur. Les anglais sont particulièrement dynamiques et prennent l'initiative d'un effort international, appelé HIPER (High Power laser Energy Research), sur le sujet. Je pense que le monde entier prend conscience de l'importance vitale de l'enjeu. Une large coopération se développe. On peut légitimement penser qu'avant la fin de ce siècle, cet effort fraternel pour tirer parti de la fusion par laser permettra à l'humanité de disposer d'un moyen pour supprimer le désastreux réchauffement climatique et la faim sur la terre.

On trouvera une connaissance plus profonde du sujet dans le livre :

**« Vers l'Énergie Abondante sans Pollution.
La fusion nucléaire par laser »
Jean ROBIEUX**



www.editions-louisdebroglie.com