

Insaisissable Graal

*La fusion nucléaire par laser
au temps des pionniers*

JEAN-LOUIS BOBIN

 **edp sciences**

17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Illustration de couverture, source CEA.

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-3060-2

ISBN (ebook) : 978-2-7598-3061-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences, 2023

*À tous ceux qui, au Centre d'Études de Limeil, ont contribué
aux succès obtenus au cours de cette période mémorable.*

*Il émet par le bout, cohérente et transverse,
Une onde terrifiante autant qu'un bulldozer.
Où peut-on se garder du torrent qui renverse ?
Je suis hanté ! laser ! laser ! laser ! laser !*

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	11
Ch. 1. Pourquoi la fusion nucléaire par laser ?	17
1. Fusion nucléaire	17
2. Lasers	24
3. Une idée dans l'air des années 1960, chauffer un plasma au moyen du laser	32
4. Facès cachées de la fusion par laser	35
Ch. 2. Débuts	39
5. Naissance d'une communauté scientifique	39
6. Interaction laser matière : manière forte et subtilité ?	42
7. Création de plasma : sérendipité et grands classiques	43
8. Le problème des premiers électrons	45
Ch. 3. En France, le partenariat CGE/CEA	49
9. Les laboratoires de Marcoussis	49
10. Jean Robieux et la fusion nucléaire	51
11. Brevets et lobbying	54
12. Le centre CEA de Limeil	56
13. Claquage des gaz : quand les « boules » sont des diabolos	60
14. Remaniements et ondes de claquage	64
15. Irradiation des surfaces solides, ions multichargés	68
16. Autres recherches	74
17. Concurrences	78
Ch. 4. Vers la détection de réactions nucléaires de fusion	81
18. Des lasers de plus en plus puissants	81
19. De L-4 à C-6	87
20. Picosecondes ?	91
21. Focalisation	95
22. Du deutérium à l'état solide	96
23. Nouvelles de Moscou	99
24. Les neutrons qui venaient du froid	102
25. Après le froid, le show	104
Ch. 5. Nouvelle donne	109
26. Rumeurs et chuchotements	109
27. 1971-1972 : un coin du voile est levé	111
28. Surcompressions et déclassification	114
29. Des labos et des hommes (dont quelques femmes)	121

30. Quand des universités s'en mêlent.....	126
31. La saga KMS-Fusion.....	130
Ch. 6. La science de l'interaction laser plasma au temps des pionniers	137
32. Des réunions stimulantes	137
33. Top model	143
34. Choix d'un paramètre d'interaction	148
35. Non linéarités	151
36. Les suites d'un effet visiteur	154
Ch. 7. La fusion inertielle au temps des pionniers	159
37. Un peu de thermodynamique	159
38. Quand la fusion par laser marche... sur ordinateur	164
39. Microballons et l'art de les irradier uniformément selon KMS.....	170
40. Limites à la compression.....	174
41. Ce qui ne pouvait pas marcher.....	176
42. Il manquait une pièce au puzzle	178
43. Lasérologie comparée	179
Ch. 8. Postérité	185
44. Le périlleux passage d'un monde numérique au monde réel.....	185
45. Après les illusions du début, les changements d'échelle	187
46. Quels lasers ou quels autres grands instruments pour la fusion inertielle ?.....	191
<i>Annexes</i>	195
1. Brevet CGE déposé le 26 avril 1963	196
2. Brevet CGE déposé le 11 juin 1963.....	202
3. Note d'information du CEA de septembre 1969 (communiqué de presse).....	207
<i>Glossaire</i>	209
<i>Bibliographie</i>	215

AVANT-PROPOS

La fusion thermonucléaire contrôlée est souvent présentée comme le Saint Graal des technologies destinées à mettre des sources d'énergie à la disposition de l'humanité. Alors que le xxi^{e} siècle est déjà bien entamé, des scientifiques sont toujours à sa recherche. Cette forme d'énergie nucléaire aurait bien des avantages. Le combustible est abondant. Il n'y a pas de danger d'emballement. Les déchets radioactifs se limitent à des matériaux activés sous l'effet des neutrons, problème aisément gérable.

Mobilisée depuis le milieu du xx^{e} siècle, une vaste communauté internationale n'a pas encore réussi à construire un réacteur à fusion générateur d'électricité. ITER, le projet de confinement magnétique le plus avancé en ce premier quart du xxi^{e} siècle, ne comporte pas de couplage à un alternateur. La fission n'avait pas nécessité d'aussi longs délais.

Cette rapidité avec laquelle la fission a été exploitée, une fois découverts les mécanismes physiques de base, apparaît comme une exception dans l'histoire des sources d'énergie. Les circonstances exceptionnelles de la Seconde Guerre mondiale avaient permis d'associer quelques-uns des plus grands physiciens du moment à des ingénieurs de premier ordre pour faire, en moins de cinq ans avec l'appui

d'industriels promptement mobilisés, ce qui en d'autres temps aurait sans doute pris des décennies. Parmi les réalisations de cette période d'activité intense, il y avait des systèmes où la réaction de fission en chaîne était contrôlée à un niveau de puissance qui ouvrait la voie à la production d'électricité. Celle-ci intervint au cours des années 1950. Une quinzaine d'années seulement s'est écoulée entre la découverte de la fission à la fin de 1938 et les premiers couplages au réseau.

Parmi les raisons qui expliquent les succès fulgurants de la fission, il en est une fondamentale qui tient à la physique. En effet cette réaction libérant de l'énergie est provoquée par des neutrons qui ne sont pas affectés par la barrière de potentiel électrostatique protégeant les noyaux des atomes contre d'éventuelles incursions de projectiles chargés positivement. *A contrario* les réactions de fusion ont lieu entre particules chargées dont l'énergie doit être suffisante pour avoir une bonne probabilité de franchir la barrière par effet tunnel. Pour qu'il en soit ainsi, la température du milieu réactif se compte, comme au centre des étoiles, en dizaines si ce n'est en centaines de millions de degrés. On conçoit aisément que maîtriser dans ces conditions la fusion, appelée alors thermonucléaire, soit une entreprise d'une rare difficulté. Pour ne prendre qu'un exemple, les premiers travaux ont fait apparaître un manque de connaissances flagrant, à combler d'urgence, sur ce quatrième état de la matière très chaude et complètement ionisée que l'on appelle un *plasma*.

Les pionniers de l'énergie nucléaire, forts des réussites éclair basées sur la fission, voyaient la fusion déboucher sur le marché de la production d'électricité au bout de peu d'années. En 1952 aux États-Unis, Thomas Johnson, directeur de la division des recherches de l'AEC (*Atomic Energy Commission*) estimait qu'il faudrait de trois à quatre ans et un million de dollars pour savoir s'il serait ou non possible de confiner un plasma chaud en vue de la fusion. Pour de multiples raisons dont la moindre n'est pas la nécessité de réduire autant que possible d'immenses étendues d'ignorance, les recherches entreprises à l'époque ont avancé beaucoup plus lentement qu'alors

espéré. Plusieurs générations d'acteurs d'une aventure scientifique loin d'être terminée sont passées par des séquences d'exaltation entrecoupées de périodes de doute.

C'est ainsi qu'au début des années 1960, il régnait une grande incertitude sur l'avenir du confinement magnétique. Les prévisions de Thomas Johnson, en temps comme en numéraire étaient dépassées au point de menacer l'avenir de la filière. L'invention des lasers apporta une alternative crédible dans le domaine de la fusion nucléaire en plus de la possibilité d'explorer de nouveaux territoires de la physique. Par la puissance qu'elle transporte, une impulsion laser peut chauffer rapidement la matière jusqu'à des températures d'intérêt thermonucléaire. Elle peut aussi, directement ou indirectement, la comprimer en même temps qu'elle la chauffe à l'imitation du fonctionnement familier d'un moteur à combustion interne. Cette seconde possibilité, explorée par le calcul dans le centre de recherches californien de Livermore, fut tenue secrète jusqu'au début des années 1970.

Pendant les années 1960, les physiciens furent nombreux à se tourner vers l'interaction laser matière avec ou sans arrière-pensées relatives au domaine thermonucléaire. Assez rapidement, on vit se constituer une communauté scientifique impliquant, au-delà des laboratoires spécialisés dans l'énergie nucléaire et de grands centres de recherches nationaux ou privés, nombre d'universités dont les chercheurs étaient attirés par les problèmes prometteurs que posait l'utilisation d'intensités lumineuses sans commune mesure avec ce dont on avait disposé jusque-là.

Sur ce point, l'amélioration des performances des lasers, tant par la puissance disponible que par la qualité du faisceau, permit d'accroître de façon spectaculaire, en quelques années seulement, l'intensité de rayonnement propre à impacter une cible.

Pendant une bonne décennie, les recherches sur la fusion par laser eurent, tel Janus, deux faces. L'une visible et source d'une abondante littérature, l'autre cachée jusqu'aux révélations de la fin de 1971

et surtout de 1972 qui annoncèrent la fin du temps des pionniers. Quelques rapports et articles, écrits bien des années plus tard, sont des témoignages plus ou moins aseptisés sur le déroulement d'une histoire qui fut en partie secrète. On en trouve quelques-uns dans le livre de Guillermo Velarde et Natividad Carpintero Santamaria, tous deux professeurs à l'Institut polytechnique de l'Université de Madrid, *Inertial Confinement Fusion : A Historical Approach by Its Pioneers*¹ (ci-après ICF : HAP) qui rassemble des contributions venant d'acteurs de ce double déroulement, au grand jour et dans l'ombre, des avancées de la fusion par confinement inertiel. Le côté humain, absent de ces textes, en est partiellement révélé à travers des interviews accordées à l'*American Institute of Physics* (AIP)².

Alex Wellerstein, professeur d'histoire des sciences au *Stevens Institute of Technology* et décrypteur du rigoureux secret entourant les débuts de l'aventure nucléaire civile et militaire aux États-Unis, a consacré quelques pages de son livre *Restricted Data, the History of Nuclear Secrecy in the United States*³ à la déclassification partielle, au début des années 1970, des travaux effectués indépendamment par deux équipes de théoriciens au cours des années 1960 sur la fusion par laser. Il avait aussi présenté les principales péripéties de cette histoire lors de diverses conférences, dont l'une à Paris le 17 décembre 2015, en insistant sur les problèmes de la protection du secret et les circonstances qui poussent ou contraignent à lever celui-ci. Les revendications de priorité ont été au cœur des tractations, au moins autant, me semble-t-il, que les habituels jeux de pouvoir entre scientifiques et apparatchiks de la bureaucratie chargée de gérer les programmes de recherches (cf. **chapitre 5**).

La France a été un acteur important dans l'histoire de la fusion par laser. Mais, la succession des événements y a été différente de celle

1. Foxwell and Davies (2007).

2. <https://www.aip.org/taxonomy/term/3786>, Oral histories: Laser Fusion.

3. The University of Chicago Press (2021). Voir aussi "*The twisted tale of laser fusion*" sur le blog de la journaliste scientifique Chelsey B. Coombs : <http://scienceline.org/author/chelsey-b-coombs/>

qui s'est déroulée aux États-Unis. On en trouve quelques éléments disséminés dans les ouvrages⁴ de Jean Robieux, à l'époque figure de proue des laboratoires de Marcoussis appartenant au groupe de la Compagnie Générale d'Électricité (CGE, future Alcatel-Lucent et maintenant NOKIA). Il est peu loquace sur la partie CEA des travaux exécutés en collaboration avec le Centre d'Études de Limeil. Le présent ouvrage vise en partie à combler cette lacune. Il reflète aussi une perception de ce qui s'est passé ailleurs dans le monde à travers les contacts noués avec de nombreux chercheurs lors de conférences, de visites ou même de séjours un peu prolongés. Écrit cinquante ans après les événements par un témoin qui fut aussi un acteur, basé sur des souvenirs personnels croisés avec des documents tardivement accessibles, il ne prétend pas à l'exhaustivité ni à l'absence de biais que seul pourrait revendiquer un vrai travail d'historien.

Les propos prêtés à divers protagonistes sont pour la plupart extraits des interviews accordées à l'AIP, et viennent plus rarement de conversations que j'ai pu avoir avec eux.

4. Jean Robieux, *High Power Interactions : Isotopes separation – Nuclear fusion control – Elementary particles selective creation*. Ed. Lavoisier (2000) ; *Vers l'Énergie Abondante Sans Pollution : La fusion nucléaire par laser*, Ed. Louis de Broglie (2008).

1

Pourquoi la fusion nucléaire par laser ?

1. FUSION NUCLÉAIRE

Il existe deux manières de libérer de l'énergie à partir du noyau des atomes. La première appelée fission consiste à casser les noyaux des éléments les plus lourds comme l'uranium en les soumettant à un flux intense de neutrons. La seconde consiste à faire réagir les noyaux d'éléments légers, hydrogène et ses isotopes, pour en obtenir de plus lourds. Cette fusion nucléaire est à l'origine de la puissance rayonnée par les étoiles dont le Soleil. Il est légitime de vouloir la maîtriser sur Terre comme on l'a fait dans le cas de la fission pour produire de l'électricité.

Construire une source d'énergie à partir de réactions de fusion, c'est d'abord vouloir reproduire sur Terre des processus en jeu au sein des étoiles, mais à partir de réactions nucléaires différentes bien qu'elles conduisent au même résultat : la fabrication de noyaux d'hélium 4. Au centre des étoiles, le processus commence avec la

réaction proton-proton qui est, du point de vue des forces nucléaires, une interaction faible. Sa minuscule probabilité, connue par le calcul mais jamais encore mesurée car trop petite pour l'instrumentation disponible, est compensée par la quantité énorme d'hydrogène que la force de gravitation a rassemblée. Le régime permanent ainsi obtenu permet à l'astre de vivre des milliards d'années. Ce n'est évidemment pas transposable sur Terre. Alors on a recours aux isotopes lourds de l'hydrogène, deutérium et tritium qui ont des probabilités de réaction très supérieures.

RÉACTIONS DU DEUTÉRIUM

Le deutérium (D) est le premier isotope lourd de l'hydrogène. Son noyau, stable mais peu lié, se compose d'un proton et d'un neutron. Il réagit avec une probabilité intéressante sur lui-même pour donner soit un proton et un noyau de tritium comportant un proton et deux neutrons, soit un neutron et un noyau d'hélium-3, deux protons et un neutron. Aucune des deux branches de la réaction DD ne l'emporte sur l'autre.

Du point de vue de la fusion, deux autres réactions du deutérium sont encore meilleures. La réaction deutérium tritium (DT) qui produit un neutron et un noyau d'hélium-4 libère plus d'énergie. Elle est en même temps plus vigoureuse que toutes les autres réactions du deutérium. La réaction deutérium hélium-3 libère autant d'énergie que la précédente mais elle a une probabilité moindre. Produisant un proton et un hélium-4, elle est a-neutronique ce qui limite fortement la radioactivité induite, d'où son intérêt.

Les réactions de fusion que l'on se propose d'utiliser sont mises en œuvre de la même façon que dans les étoiles, c'est-à-dire en régime thermonucléaire au sein d'un milieu excessivement chaud. Il est possible d'obtenir ainsi un facteur d'amplification élevé entre l'énergie récupérable à partir des produits de la réaction de fusion et l'énergie qu'il a fallu déployer pour mettre en condition le combustible.

RÉGIME THERMONUCLÉAIRE

Dans un gaz dont la température se compte en millions de degrés, les noyaux des isotopes de l'hydrogène sont complètement dépouillés de leurs électrons et se déplacent en tous sens avec une énergie cinétique dont la moyenne est représentative de la température. La distribution en énergie de ces particules s'étend jusqu'à des valeurs où la probabilité de réaction devient importante. La réaction est ainsi le fait de particules dont l'énergie est comprise dans un intervalle de la queue de distribution. Dans un état d'équilibre, cet intervalle est constamment repeuplé grâce à l'agitation thermique. Les produits de réaction ont une énergie très supérieure à l'énergie thermique moyenne correspondant à la température des réactants, permettant ainsi d'atteindre des facteurs d'amplification élevés.

Avant l'invention des lasers et hors les dispositifs à usage militaire, la seule façon imaginable de contrôler sans explosion la réaction de fusion consistait à la réaliser au sein d'un gaz très peu dense, amené à température convenable et isolé de toute paroi de façon à limiter les possibilités de refroidissement aux seules pertes, inévitables, par rayonnement. Cette conception de la fusion nucléaire a ainsi des traits communs avec le feu, domestiqué par l'espèce humaine depuis quelque 400 000 ans. Dans les deux cas, les réactions, nucléaires ou chimiques, se produisent en milieu gazeux. Mais une énorme différence apparaît avec les températures en jeu : des centaines de millions de degrés pour la fusion contre des centaines de degrés pour le feu. On conçoit la difficulté de maîtriser un milieu réactif sous des températures un million de fois supérieures à celles de nos fourneaux et de nos chaudières.

À cent millions de degrés et même bien avant, la matière est un gaz complètement ionisé, constituant ce que l'on appelle un *plasma* d'ions et d'électrons, exhibant une grande sensibilité aux champs électromagnétiques internes ou externes. Du champ magnétique, associé à des courants circulant dans le plasma ou imposé de l'extérieur isole le

plasma de toute paroi à condition que la densité d'énergie du champ soit au moins égale à celle de la matière chaude. La disposition la plus simple est celle d'un anneau de plasma plongé dans une configuration magnétique dont la densité d'énergie doit être compatible avec la résistance qu'opposent aux contraintes les matériaux de structure. En conséquence, la densité particulière dans le plasma ne doit pas dépasser en ordre de grandeur le cent millième de la densité moléculaire de notre atmosphère.

L'objectif est alors d'obtenir un régime permanent dans lequel la puissance déposée dans le milieu actif par les produits de réaction compensera exactement la puissance perdue par rayonnement. Les conditions de température pour qu'il en soit ainsi ont été publiées par R. F. Post en 1956 pour les réactions du deutérium : 40 millions de degrés pour la réaction deutérium-tritium ; 300 millions pour les réactions deutérium-deutérium. C'est plus qu'au centre des étoiles.

CONDITIONS D'AUTO-ENTRETIEN

À température donnée, on sait calculer un taux de réaction (ou réactivité) puis, à partir de là, une puissance communiquée au plasma qui doit être au moins égale à la puissance perdue par rayonnement sinon le feu thermonucléaire s'éteint ou ne prend pas. La **figure 1** montre ce qu'il en est dans le cas de la réaction DT, la plus accessible des réactions du deutérium.

On notera que les courbes de gain et de pertes se coupent en deux points E_1 et E_2 susceptibles de représenter un état d'équilibre. Le plus bas en température, E_1 , est instable. En effet, une excursion en température se traduit soit par une extinction de la réaction, les pertes l'emportant sur les gains, soit par un emballement dans le cas contraire. En revanche E_2 est stable. Quel que soit le sens de l'écart, le bilan des gains et des pertes ramène à l'équilibre.

...

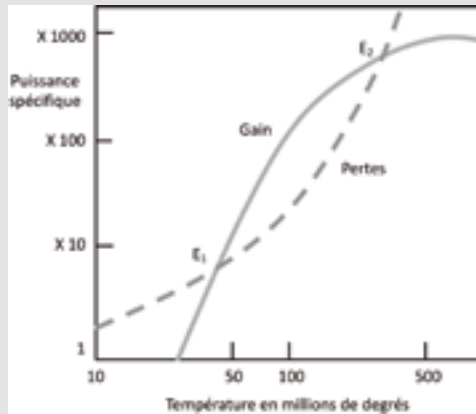


Figure 1 | Gain (puissance déposée par les produits de la réaction DT) et pertes, rapportés à un même volume de plasma, en fonction de la température de celui-ci (échelles logarithmiques). La plage favorable se situe entre 40 et 300 millions de degrés.

Réaliser cette ambition passe par des conditions supplémentaires. Il en est une, importante, qui porte sur le produit de la densité particulière du plasma par le temps de fonctionnement en régime semi-continu. Elle porte le nom de critère de Lawson d'après de nom de l'ingénieur britannique qui l'a énoncé en 1957.

COMBUSTIBLE BRÔLÉ ET CRITÈRE DE LAWSON

Les réactions de fusion sont binaires : un projectile qui heurte une cible a une probabilité de réagir proportionnelle à la densité n de cibles multipliée par un nombre qui a la dimension d'une surface. L'inverse de ce produit est une longueur, un libre parcours moyen de réaction qui divisé par la vitesse du projectile définit un temps de réaction. La fraction de combustible thermonucléaire brûlé est alors représentée par le rapport, inférieur ou égal à l'unité, entre le temps τ de fonctionnement du dispositif et le temps de réaction, rapport qui se décompose en le produit $n\tau$ multiplié par une fonction de la température seule. Le produit $n\tau$ caractérise ainsi l'efficacité d'un réacteur thermonucléaire.

...
 Celui-ci est un élément d'une boucle comportant un récupérateur de chaleur et une machine thermique actionnant un générateur d'électricité dont une partie du courant est utilisée pour mettre en condition le plasma, le reste allant vers le réseau. Ce reste existe et le système est effectivement une source d'énergie électrique lorsque le produit $n\tau$ est supérieur à une valeur qui ne dépend que de la température du milieu. Il existe un point bas dont on retient la valeur pour une expression simplifiée du critère de Lawson qui s'énonce ainsi pour la réaction deutérium-tritium : *le produit de la densité particulière (par m^3) par le temps (s) doit être supérieur à 10^{20} .*

Il convient donc de produire un plasma à la température requise pendant un temps satisfaisant au critère de Lawson. La voie de recherches connue sous le nom de confinement magnétique fit l'objet d'une importante opération de promotion en 1958 à Genève lors de la deuxième (et dernière) Conférence internationale sur les applications pacifiques de l'énergie atomique (*Atoms for Peace*) organisée par les Nations unies. Pour la communauté scientifique américaine, ce fut l'occasion, de répondre à l'avance prise par l'URSS dans le domaine spatial avec la réussite éclatante que constituait la mise sur orbite du premier satellite artificiel, le fameux « *Sputnik* ». Or en 1956, Igor Kourchtatov, savant atomiste qui accompagnait le duo de dirigeants N. S. Khrouchtchev et N. A. Boulganine lors d'une visite d'état en Grande-Bretagne, avait présenté au Centre nucléaire de Harwell quelques résultats soviétiques obtenus avec des décharges électriques à forte intensité. « *Rien que l'on ne sache déjà* » dirent aussitôt les physiciens britanniques de l'époque, mais c'était l'apparition tonitruante sur la scène publique de la problématique de la fusion contrôlée, traitée jusque-là de façon discrète sinon secrète dans les laboratoires. La seconde conférence de Genève offrit aux États-Unis l'opportunité de valoriser l'inventivité et le savoir-faire des scientifiques de ce pays face à l'URSS. En plus des présentations en séances, la délégation américaine avait monté une exposition

spectaculaire. On était à la fin d'une décennie de grande créativité. De nombreuses configurations furent ainsi montrées aux participants comme aux simples visiteurs. C'était fascinant et cela fit naître en moi le désir de participer à l'aventure scientifique, alors à ses débuts, de l'énergie thermonucléaire.

Tout brillant qu'il fut, le spectacle offert à Genève était quelque peu en trompe-l'œil. Après l'enthousiasme du début des années 1950, l'optimisme était retombé en raison d'instabilités dévastatrices qui tendaient à désorganiser le confinement magnétique en des temps bien trop courts pour satisfaire au critère de Lawson. Le salut vint vers la fin des années 1960 avec les avancées prometteuses permises par la configuration Tokamak exploitée en URSS sur une idée d'Andrei Sakharov remontant à 1951. Telle est l'origine de la filière qui a progressé jusqu'à la construction du réacteur ITER, chantier auquel collaborent des représentants de nombreux pays.

Dès la fin des années 1950, la coopération internationale a été la règle en matière de confinement magnétique, le secret n'étant plus justifié. Il ne l'avait à vrai dire jamais été sinon par la volonté politique de contrôler les affaires que l'on appelait alors atomiques. Pour une bureaucratie, imposer le secret est un moyen d'exercer un pouvoir sur des scientifiques indisciplinés. L'état de guerre froide fut une motivation forte pour maintenir en totalité ou en partie la confidentialité sur l'autre façon d'aborder la fusion contrôlée telle qu'elle est suggérée par la **figure 1**.

En effet, puisque le point E_1 est instable, pourquoi ne pas laisser la réaction s'emballer à condition de limiter la quantité de combustible thermonucléaire de façon à contenir l'inévitable explosion comme on le fait dans les cylindres des moteurs thermiques de nos voitures ? L'analogie est ici avec le feu explosif, en beaucoup plus violent. L'énergie libérée par la réaction doit alors être supérieure à l'énergie nécessaire pour mettre la matière en état de réagir. Telle est la voie du *confinement inertiel* qui implique les lasers. Elle conduit à réviser le critère de Lawson (cf. **encadré**).

COMBUSTIBLE BRÛLÉ DANS LE CONFINEMENT INERTIEL

Lors d'une réaction explosive, le temps n'a plus le même rôle. Conséquence de la compression, l'explosion thermonucléaire est un phénomène d'une violence extrême. Son contrôle passe par la minimisation de la masse de réactifs dont au moins 30 % doivent être consommés.

La disposition du combustible, de dimension caractéristique R (le rayon d'une boule en géométrie sphérique), n'a qu'une existence transitoire. La fraction de combustible brûlé dépend alors du rapport entre R et le libre parcours de réaction qui doit être supérieur ou égal à cette même fraction, 30 %. Dans ces conditions, le produit nR de la densité particulaire n par le rayon est représentatif de l'efficacité. En pratique, on se réfère plutôt à l'*épaisseur massique efficace* ρR où ρ est la masse volumique proportionnelle à n . La fraction de combustible brûlé en régime explosif devant être nettement plus grande en un temps court qu'en régime continu, la condition sur le produit ρR s'avère plus sévère que le critère de Lawson.

À ρR donné la masse de combustible varie comme l'inverse carré de la masse volumique. De cette propriété purement géométrique découle l'intérêt de la forte compression appliquée à une petite masse. Ces questions seront développées dans les chapitres 5 et 7.

En matière de fusion thermonucléaire, on peut résumer de la manière suivante les difficultés de l'entreprise : dans le confinement magnétique, on cherche à stabiliser des états de la matière qui dans la nature n'existent que de façon transitoire ; dans le confinement inertiel au contraire, on cherche à utiliser de façon transitoire des états de la matière qui dans la nature peuvent perdurer pendant des milliards d'années grâce à la force de gravitation. C'est dire l'immensité du défi à relever.

2. LASERS

Au début des années 1960, alors que les recherches sur le confinement magnétique piétinaient, l'invention du laser suscita l'intérêt de

scientifiques en mal de solutions alternatives. Ce nouveau venu dans les laboratoires n'allait-il pas permettre la mise en œuvre de ce que l'on n'appelait pas encore le confinement inertiel ?

Le laser est la matérialisation d'un vieux rêve de l'humanité : l'amplification de la lumière. Par l'énergie qu'il est capable de transporter, sa couleur extrêmement bien définie et sa cohérence, cet instrument fascine le grand public et les décideurs au moins autant que les scientifiques. Tout a commencé par une intuition d'Albert Einstein (1916) qui, pour remédier aux incohérences de la théorie du rayonnement, avait postulé l'existence d'une émission stimulée.

L'ÉMISSION STIMULÉE ET L'AMPLIFICATION DE LA LUMIÈRE

À l'échelle microscopique, un atome ou une molécule émet des quanta de lumière lors de transitions entre niveaux d'énergie bien définie. Un tel effet se produit soit spontanément, soit selon une intuition d'Einstein, sous l'influence des quanta déjà présents. La théorie quantique rigoureuse, élaborée dix ans après la publication d'Einstein, inclut automatiquement cette émission stimulée (**figure 2**).



Figure 2 | Émission spontanée, émission stimulée. L'émission stimulée apporte une possibilité d'amplification de l'intensité lumineuse.

Ce mécanisme ouvre la voie à l'amplification de la lumière par une réaction en chaîne : cascade d'émissions stimulées donnant lieu à une croissance exponentielle de l'intensité. Et comme les photons ainsi créés ont même direction, même fréquence et même phase, on peut obtenir un faisceau lumineux très directif, très monochromatique donc très cohérent.

L'amplification des ondes électromagnétiques par émission stimulée ne fut obtenue qu'après la Seconde Guerre mondiale quand les progrès de l'instrumentation et l'avancée des connaissances en physique atomique et moléculaire en eurent rendu possible la réalisation matérielle. Les années 1950 furent dans ce domaine aussi une époque de grande créativité pendant laquelle commença de se développer une nouvelle branche de la science et de la technologie : l'électronique quantique.

À la base du laser, il y a donc une réaction en chaîne qui peut s'amorcer dans un milieu optiquement actif moyennant certaines conditions nécessaires. La première est que sur une population d'émetteurs, on trouve plus d'électrons sur le niveau supérieur que sur le niveau inférieur de la transition, contrairement à la normale. Cet état d'*inversion de population* est obtenu par ce que l'on appelle un *pompage*. Diverses méthodes ont été expérimentées pour cela parmi lesquelles figure le *pompage optique* dont les pionniers avaient été, en France, Alfred Kastler et Jean Brossel au laboratoire de spectroscopie hertzienne⁵ de l'École Normale Supérieure.

LASER À TROIS OU QUATRE NIVEAUX

Pour obtenir une inversion de population compatible avec le contrôle de l'émission laser, il faut jouer avec les niveaux d'énergie des atomes ou des molécules. Les schémas de base impliquent trois ou quatre niveaux (**figure 3**).

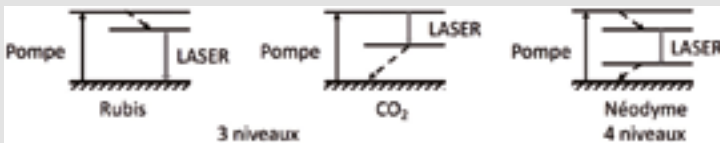


Figure 3 | Exemples de systèmes laser à trois ou quatre niveaux. Les flèches en tireté correspondent à des transitions non radiatives. Dans le cas du rubis, la transition susceptible d'être amplifiée se termine sur le fondamental, configuration qui ne permet pas l'émission laser en continu.

5. Devenu laboratoire Kastler Brossel (LKB).

On commença dans les années 1950 par le plus facile : l'amplification des micro-ondes par émission stimulée (MASER pour *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) avant de s'attaquer à la lumière visible. En effet, comme l'avait montré Einstein dans son article fondateur, l'émission stimulée amplifiée peut l'emporter d'autant plus facilement sur l'émission spontanée que la fréquence est plus basse.

La course à l'amplification de la lumière visible, donc au LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), fut lancée après qu'Arthur L. Schawlow et Charles H. Townes eurent montré par la théorie en 1958 que l'on pouvait obtenir, dans une cavité Fabry-Perot (c'est-à-dire entre deux miroirs aux coefficients de réflexion finement ajustés), des conditions favorables à l'amplification. Ne percevant pas d'application immédiate aux télécommunications, l'état-major des laboratoires Bell (« *Bell labs* ») où à l'époque, Schawlow était chercheur et Townes, consultant, accueillit ces idées avec un enthousiasme tout relatif comme l'a relaté Townes en 1968 dans un article écrit pour la revue *Science*. Cela n'empêcha pas des chercheurs de ces mêmes laboratoires, où régnait une grande liberté d'entreprendre à la condition de réussir dans ses initiatives, de participer à la compétition qui fut fort vive en vue de la démonstration expérimentale de la production d'une lumière à la fois très puissante, très monochromatique et très directive, ces dernières qualités étant deux signatures de la cohérence.

Le premier laser fut en 1960 l'œuvre d'un outsider, Theodore Maiman (1927-2007) un ingénieur qui était employé au centre de recherches californien de l'avionneur Hughes, laboratoire privé (comme les *Bell labs*) et tirant une grande partie de ses ressources de contrats avec l'État fédéral. Quelque temps auparavant, Maiman avait miniaturisé un maser à rubis mais ce type d'appareil s'avéra sans avenir. Cependant, ce travail lui procura une connaissance approfondie des propriétés optiques du rubis. Il eut l'intuition que ce matériau était susceptible d'amplifier des impulsions de lumière visible (rouge

en l'occurrence à la longueur d'onde de 694 nm). Il eut à subir des commentaires décourageants émis par des sommités de ce domaine de recherches alors en pleine effervescence. Schawlow par exemple affirmait en effet qu'un tel système à trois niveaux dont la transition radiative a le niveau fondamental pour état final ne pouvait fonctionner, ce qui est intuitivement vrai en régime permanent mais discutable pour des impulsions. À la poursuite d'un régime pulsé, Maiman persévéra dans son idée et, réussit à obtenir l'effet laser dans un montage d'une élégante simplicité. Un barreau de rubis aux faces planes convenablement argentées formant cavité était placé co-axialement à l'intérieur d'un modeste flash hélicoïdal de photographe, le tout enfermé dans un tube cylindrique aux parois intérieures réfléchissantes (**figure 4**).

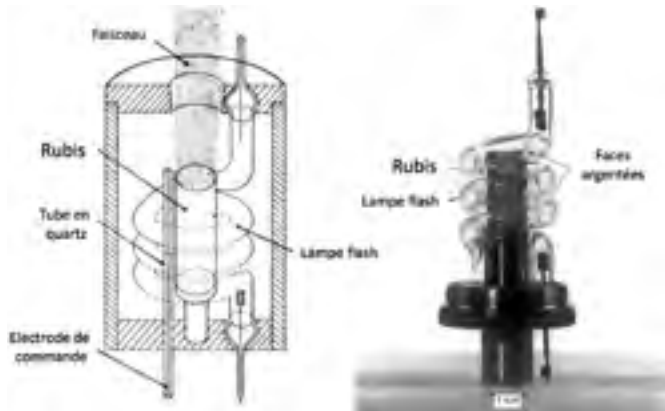


Figure 4 | Le premier laser de Th. Maiman.

Maiman devança d'une courte tête bien d'autres chercheurs. Ayant reçu une formation d'ingénieur plus que de physicien et menant ses recherches dans un laboratoire industriel, il eut un peu de mal à faire apprécier son résultat par la communauté académique de l'électronique quantique. D'autant qu'il y eut quelques ratés dans les circuits de communication. Samuel Goudsmit, l'éditeur des *Physical Review Letters* d'habitude plus perspicace, manqua de clairvoyance en refusant un article sans même le soumettre à examen au prétexte que ce

n'était jamais qu'une affaire de maser comme il en avait déjà publié tellement d'autres. Finalement, une conférence de presse, fait rarissime alors pour une découverte scientifique, et une courte note dans la revue britannique *Nature* furent les canaux par lesquels Maiman fit connaître son invention⁶.

Charles Townes écrira plus tard de la lettre à *Nature* qu'il s'agit de « l'article le plus important par mot que la revue n'ait jamais publié en cent ans » propos un brin exagéré peut-être si l'on pense par exemple au spin de l'électron ou à la structure en double hélice de l'ADN, découvertes majeures également annoncées par de brèves communications dans cette prestigieuse revue.

La conférence de presse eut un grand retentissement. Les journalistes titrèrent sur le rayon de la mort (**figure 5**), application que Maiman n'avait pas voulu citer face au feu roulant des questions. Mais ce vieux fantasme apportait à leurs comptes rendus la dose de sensationnalisme destinée à capter l'attention du grand public. Avait-on besoin de ce piment quand on voit à quel point, un bon demi-siècle plus tard, les lasers sont entrés dans notre vie quotidienne ?

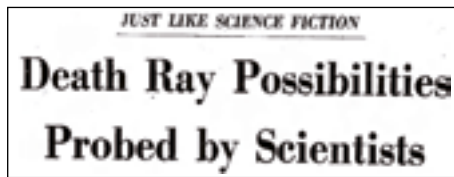


Figure 5 | Titre du communiqué d'Associated Press après la conférence de Maiman.

Dans l'effervescence du début des années 1960, on n'inventa pas le laser mais, en un très court intervalle de temps, *toutes sortes* de lasers dont les milieux émetteurs sont aussi divers que possible : des cristaux, des semi-conducteurs, des verres, des gaz, des gaz ionisés, des liquides organiques... Il en va de même pour les méthodes de pompage : électrique, optique, chimique... et les modes de fonctionnement : continu,

6. Pour un historique assorti de quelques règlements de comptes, cf. T. H. Maiman, *The Laser Odyssey*, Laser Press (2000).

pulsé, récurrent... Les querelles de priorité furent nombreuses allant parfois en justice comme dans l'affaire des brevets Gold.

On assista aussi à la naissance d'une multitude d'entreprises destinées à commercialiser ces nouveaux outils aux applications que l'on présentait nombreuses et profitables. Comme on n'est jamais mieux servi que par soi-même, Theodore Maiman quitta Hughes en 1961 pour fonder sa propre compagnie, la *Korad Corporation*, afin d'exploiter les possibilités de sa création essentiellement dans le domaine médical.

Parmi toutes ces nouveautés, certaines présentaient de quoi susciter l'intérêt des physiciens des plasmas et de la fusion nucléaire. Le laser façon Maiman, fonctionnant en régime relaxé, émettait une succession d'impulsions d'amplitude décroissante. La puissance crête se comptait en kilowatts ce qui était déjà bien et permit à la grande presse de titrer sur le rayon (de la mort) plus brillant qu'un million de soleils. Mais on fit rapidement beaucoup mieux avec le *laser à impulsion géante* inventé en 1962 par F. G. McClung et R. W. Hellwarth, eux aussi chercheurs dans les laboratoires Hughes. En déclenchant l'émission, à l'aide d'un obturateur à ouverture rapide placé dans la cavité, lorsque l'inversion de population atteint son maximum, on obtient en effet une impulsion dont la puissance se mesure en mégawatts soit un gain d'un facteur 1000.

Entre-temps (1961), Elias Snitzer, alors chercheur chez *American Optical*, avait mis en évidence un effet laser dans le proche infrarouge (autour de $1,06 \mu\text{m}$) lorsque des ions de néodyme, une terre rare, sont dispersés dans un barreau de verre. Cette découverte ouvrait la possibilité de construire à moindres frais des lasers de grande puissance.

Avatar de la dynamique des impulsions laser qui pourrait présenter un intérêt pour la fusion nucléaire par la puissance crête qu'il laisse entrevoir, on découvrit au milieu des années 1960 un nouveau mode de fonctionnement. En plaçant dans la cavité un absorbant saturable qui devient transparent lorsque l'intensité lumineuse qui le traverse dépasse un certain seuil, Anthony J. DeMaria et ses collaborateurs chez *United Aircraft* obtinrent en 1966 un train d'impulsions

extrêmement brèves. Leur largeur se compte en effet en picosecondes (millième de milliardième de seconde).

Pour obtenir de la puissance en mode pulsé, un matériau actif de petite taille dans une cavité ne suffit évidemment pas. Il convient de faire grandir l'impulsion en lui faisant traverser de l'élément actif préalablement pompé. À cet égard, la découverte de l'effet laser dans le verre au néodyme ouvrait la voie à la réalisation d'amplificateurs laser puissants au matériau actif moins onéreux et plus facile à élaborer que des cristaux comme le rubis pour obtenir des pièces optiques de grande taille.

Conçue à cette époque, l'architecture générale des lasers de puissance est rapidement devenue un standard. Elle comporte d'abord un étage pilote où se forme l'impulsion dans un barreau oscillateur en cavité. À partir de 1973, on remplaça le verre des oscillateurs par des cristaux de grenat d'aluminium et d'yttrium (YAG pour *Yttrium Aluminum Garnet*) dopés au néodyme qui assurent une meilleure reproductibilité. L'impulsion traverse ensuite une cascade d'amplificateurs dont le diamètre des barreaux est de plus en plus grand afin de maintenir la densité de flux en dessous de valeurs permettant de prévenir d'éventuels dommages.

La divergence naturelle du faisceau est souvent suffisante pour assurer l'augmentation de son diamètre au long de la chaîne. Mais le diamètre des barreaux est nécessairement limité parce que le rayonnement des flashes, entrant latéralement, ne peut pénétrer au-delà d'une distance qui pour le verre au néodyme ne dépasse pas 5 cm. Pour aller vers de plus grands diamètres, on a inventé l'amplificateur à disques (cf. **chapitre 4**). Mais là encore, il existe une limitation ne serait que par l'impossibilité de fabriquer des pièces optiques au-delà d'une certaine dimension. Cette réalité associée à la nécessité de pratiquer des irradiations de très grandes puissances en géométrie sphérique en vue de la fusion, oblige de disposer de nombreuses chaînes en parallèle amplifiant de façon synchronisée des impulsions issues d'un unique pilote.

La progression dans le domaine des lasers de puissance destinés à la fusion fut rapide et spectaculaire (**figure 6** et **paragraphe 43**).



Figure 6 | En 1980 à Livermore, Theodore Maiman posait avec les éléments de son premier laser devant 6 chaînes du laser SHIVA qui en comportait 20 pour une énergie totale par impulsion de 10 kilojoules en une nanoseconde. On est passé de l'un à l'autre en moins de vingt ans, SHIVA ayant été inauguré en 1977. © Droits réservés.

D'autres lasers de puissances furent développés au cours des années 1960. Le matériau actif pouvait être du CO_2 émettant dans l'infrarouge (à une longueur d'onde de $10,6 \mu\text{m}$), de l'iode, toujours dans l'infrarouge mais à $1,3 \mu\text{m}$, ou encore le KrF (fluorure de krypton), laser à excimères émettant dans l'ultraviolet (248 nm). Le pompage de tels lasers ne s'effectue pas au moyen de flashes, mais par voie électronique, gage d'un meilleur rendement.

3. UNE IDÉE DANS L'AIR DES ANNÉES 1960, CHAUFFER UN PLASMA AU MOYEN DU LASER

Parmi tous les domaines de recherche qui, avec le laser, s'ouvrirent au début des années 1960, la fusion nucléaire contrôlée fit l'objet d'un développement particulièrement dynamique.

Les fortes intensités lumineuses qu'il était envisageable d'atteindre en concentrant un faisceau lasers impulsif au foyer d'un miroir ou d'une lentille laissaient en effet prévoir la possibilité d'obtenir, par conversion de la densité d'énergie lumineuse en densité d'énergie thermique, les conditions nécessaires à une combustion thermonucléaire. Le laser pouvait-il apporter une alternative crédible au confinement magnétique, seule voie explorée jusque-là et qui au début des années 1960 marquait le pas ? En l'espace de quelques mois, aux États-Unis, en Europe et dans ce qui était alors l'URSS, on effectua les premiers calculs et on en fit connaître des résultats particulièrement attrayants. On en cacha d'autres.

À partir d'hypothèses raisonnables, on trouve que des conditions d'intérêt thermonucléaire quant aux températures et aux densités sont facilement atteintes lorsque l'énergie lumineuse d'un laser est convertie en énergie thermique d'un plasma. Des premiers calculs firent l'objet de publications dans la littérature scientifique ouverte. Le coup d'envoi vint d'URSS avec une communication faite à Paris par Nicolai Basov et Oleg Krokhin, de l'Institut Lebedev, au printemps de 1963 lors d'une Conférence internationale sur l'électronique quantique⁷. Le texte en est repris dans un article paru en 1964 dans le JETP d'abord en russe puis traduit en anglais. Il y est précisé en note que la possibilité de chauffer un plasma au moyen d'un laser avait été reconnue par Basov lors d'une présentation en 1961 devant le plenum de l'Académie des sciences de l'URSS.

L'idée de base est d'utiliser un rayonnement laser focalisé pour chauffer un plasma jusqu'aux températures requises pour la fusion. L'apport de chaleur doit évidemment être supérieur aux pertes dont il existe trois causes principales : le rayonnement, la conduction thermique et l'expansion du plasma. Analysant la dynamique de l'évolution des gains et des pertes, Basov et Krokhin arrivaient à la conclusion

7. N. G. Basov & O. N. Krokhin, in *Électronique quantique, Comptes rendus de la 3^e conférence internationale*, Paris 1963, P. Grivet & N. Bloembergen ed. vol. 2, p. 1373 (1964).

qu'une puissance laser de l'ordre du gigawatt dans une impulsion de dix nanosecondes pouvait porter à une température quelque peu inférieure à dix millions de degrés un plasma d'hydrogène sous une densité particulière cent fois supérieure à celle de l'atmosphère soit 3.10^{21} par centimètre cube. Pour obtenir ce résultat, ils comptaient sur l'accroissement à venir des performances des lasers de puissance associé à l'élaboration d'une méthode adéquate non encore définie pour procéder aux irradiations.

On retrouve la même démarche dans un article, paru dans *Physics of Fluids* en 1964, de John Dawson alors étoile montante de la prestigieuse équipe de théoriciens du laboratoire de physique des plasmas de Princeton (États-Unis). Donnant plus de détails que la communication des Russes, il arrivait aux mêmes conclusions et concluait par un catalogue d'applications potentielles qui, outre le remplissage de bouteilles magnétiques en vue de la fusion nucléaire, concernaient l'astrophysique et divers problèmes fondamentaux de physique des plasmas. On était alors en pleine guerre froide et selon une rumeur qui courait à l'époque, le travail de Dawson aurait été une commande de l'administration américaine de la recherche pour montrer, sans rien révéler de ce qui se tramait à Livermore (cf. paragraphe suivant), que les États-Unis étaient aussi dans la course. À noter que des calculs similaires avaient été effectués par Albert Engelhardt qui à l'époque était chercheur dans les laboratoires de Westinghouse à Pittsburg⁸.

En France, Alfred Kastler publia quelques réflexions sur le sujet dans une brève note à l'Académie des sciences de Paris présentée à la toute fin de 1963 tandis que Jean Robieux, de la Compagnie Générale d'Électricité, lançait à partir de quelques calculs demeurés longtemps confidentiels une vaste opération de lobbying pour inciter la France à initier un programme de recherches sur la fusion nucléaire par laser (cf. **chapitre 3**).

8. Westinghouse Research Laboratories Report 63-128-113-R2, référencé dans l'article de Dawson.

Tous ces chercheurs avaient en tête le chauffage de la matière. La lumière laser irradiant une cible doit alors répondre à une triple exigence énoncée par Jean Robieux : être capable d'ioniser le deutérium-tritium, de le chauffer jusqu'à des températures d'intérêt thermonucléaire et d'agir pendant un temps conforme au critère de Lawson.

LA TRILOGIE DE ROBIEUX

Pour ce qui concerne l'ionisation, il est facile de calculer l'ordre de grandeur de l'intensité que doivent atteindre les ondes électromagnétiques agissant sur un atome neutre en s'appuyant sur l'argument suivant : le travail d'extraction d'un électron sous l'effet du champ électrique de l'onde doit surpasser le potentiel d'ionisation. Avec un potentiel d'ionisation de quelques électrons-Volts, le champ de l'onde incidente doit dépasser 10^8 V/cm ce qui correspond à une intensité autour de 10^{14} W/cm². Or en focalisant sur 1 μm² une impulsion laser d'un joule en 100 ns, on obtient 10^{15} W/cm².

Le chauffage est un transfert d'énergie entre la lumière et la matière. Or il se trouve que les électrons d'un gaz ionisé, appelé aussi plasma, ont une fréquence d'oscillation caractéristique qui a un double rôle : coupure car les ondes ne peuvent se propager dans le milieu que si leur fréquence dépasse cette valeur ; résonance favorable à un transfert d'énergie si les fréquences des ondes et du milieu qu'elles rencontrent coïncident. Or la fréquence de plasma à la densité d'un solide coïncide pour la lumière avec le domaine visible ou ultraviolet. On entrevoit ainsi des conditions favorables au chauffage.

Reste le critère de Lawson. À l'état solide, la densité particulaire est d'environ 5.10^{22} cm⁻³ ce qui impose un temps de confinement supérieur à 2 nanosecondes. Il faut compter sur l'inertie de la matière même chaude pour que la densité du solide soit maintenue au moins pendant ce temps.

4. FACES CACHÉES DE LA FUSION PAR LASER

L'état de guerre froide dans lequel le monde était plongé au moment de la naissance des lasers a fait qu'une partie de l'histoire de la fusion

par laser est restée longtemps couverte par le secret. Aux États-Unis, le laboratoire californien de Livermore avait été fondé par Ernest Lawrence et Edward Teller (1908-2003), à l'initiative de ce dernier, pour développer l'armement thermonucléaire de façon plus active qu'au centre d'études historique de Los Alamos⁹. Il ouvrit ses portes en 1954 après que les premiers essais conçus selon la configuration imaginée par Teller et Ulam aient été couronnés de succès. Géré par l'université de Californie pour le compte de l'AEC, il accueillait aussi des installations qui ne pouvaient être implantées sur le campus de Berkeley. Elles prenaient trop de place ou alors elles devaient rester confidentielles au moins pour quelque temps. Sous l'impulsion de Teller, sans la bénédiction de qui rien d'important ne se fit à Livermore pendant un demi-siècle, des voies originales y étaient explorées.

Depuis le milieu des années 1950, on y était à la recherche de nouveaux projets après les démonstrations des premières années de la décennie. Une idée qui avait cours à l'époque était d'utiliser, dans le cadre de grands chantiers de construction d'infrastructures, des explosions nucléaires de faible puissance en augmentant le rapport de l'énergie libérée par fusion à celle provenant de la fission afin de minimiser la radioactivité résiduelle (projet « *Plowshare* »)¹⁰. Stirling Colgate (1925-2013), Ray Kidder (1923-2019) et John Nuckolls, chercheurs déjà confirmés dans la théorie thermonucléaire, utilisèrent séparément leurs connaissances pour élaborer, avec l'aide de codes numériques, les premiers du genre, des schémas impliquant de petites masses de combustible. C'est ainsi que naquit le concept de micro-fusion basé sur la compression d'une petite sphère de DT sous l'effet d'un flux de rayonnement. Un des problèmes était d'éviter le recours à un engin à fission pour initier le processus. Le laser à impulsion géante avec les perspectives qu'il ouvrait tombait à pic.

9. L'histoire de la création du laboratoire de Livermore est racontée dans un sous chapitre du livre d'Herbert York : *The Advisors*, Freeman (1976).

10. Edward Teller, Wilson K. Talley, Gary H. Higgins and Gerald W. Johnson. *The Constructive Uses of Nuclear Explosions*, McGraw Hill (1968).

Dans les années 1950 et 1960, la Fusion par Confinement Inertiel (FCI) conçue à Livermore, idées de base et calculs, relevait du secret le plus absolu. Une première « déclassification » eut lieu en 1971-1972, suivie de quelques autres mais toujours partielles. On y reviendra longuement au chapitre 5.

Colgate et Nuckolls ayant été appelés à d'autres tâches en raison de la rupture par l'URSS d'un moratoire sur les essais nucléaires, un modeste programme expérimental de fusion par laser fut lancé à partir de 1962 sous la direction de Kidder. **Une première étape prévoyait un laser à rubis comportant douze faisceaux pour une énergie totale de 1 joule.** Une partie de cette activité ne fut pas soumise au secret. Elle constitua la partie émergée d'un iceberg dont la partie immergée resta dormante quelque temps. Afin de nouer des contacts avec la communauté scientifique en train de se constituer dans le monde académique comme chez les industriels, le laboratoire passa par l'intermédiaire d'un universitaire connu, au courant des problèmes de défense, le professeur Keith Brueckner de l'université de Californie à San Diego dont il sera abondamment question à propos de la saga KMS (cf. **chapitre 5**). Il était à l'époque vice-président et directeur des recherches d'un organisme appelé *Institute for Defense Analyses* (IDA) qui s'intéressait aux applications militaires des lasers et pouvait échanger avec Livermore d'utiles informations, notamment sur le développement de lasers de puissance.

L'invention du laser suscita également l'intérêt des physiciens du Centre soviétique d'études nucléaires à vocation militaire de Sarov (Arzamas-16) dont l'existence fut tenue secrète jusqu'à la fin de l'URSS. En témoigne Andreï Sakharov qui écrivit dans un chapitre de commentaires inclus dans le recueil de ses publications scientifiques compilé lors de son exil à Gorki : « *Dans un séminaire en 1960 (ou 1961, je ne sais plus), j'ai discuté de la possibilité d'obtenir, au moyen du laser, une réaction thermonucléaire contrôlée* »¹¹. D'après les souvenirs de ses anciens collègues rapportés dans un article de revue

11. Andreï Sakharov, *Œuvres scientifiques*, Éditions Anthropos, France, (1984).

écrit en 2010 par N. V. Karlov, O. N. Krokhin et S. G. Lukishova, il proposa d'utiliser le rayonnement laser pour amorcer des réactions de fusion dans de petites sphères contenant du deutérium ou un mélange deutérium-tritium. C'était contemporain de la présentation des calculs de Basov et Krokhin devant l'Académie des sciences de l'URSS.

2

Débuts

5. NAISSANCE D'UNE COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

En plus d'être l'illustration d'une intuition géniale d'Einstein, les lasers sont aujourd'hui à l'origine d'une multitude d'applications dans de nombreux domaines de la science, de la technologie et de la vie courante. C'était loin d'être le cas au début des années 1960, car juste après l'invention de Maiman, on voyait dans le laser une simple curiosité scientifique. On ironisait alors dans toutes les langues sur la solution sans problème (à part le rayon de la mort qui fit la une de la presse à sensation) et des francophones renchérisaient sur le thème : « *laser à quoi ? laser à rien* ».

Cependant, des physiciens savaient que des phénomènes nouveaux, parfois insoupçonnés, étaient susceptibles d'apparaître lorsque de fortes intensités lumineuses sont concentrées au foyer d'une lentille ou d'un miroir. Le laser allait permettre de procéder à des expériences sur le sujet. C'était une promesse de révolution pour l'optique, branche de la physique en perpétuel renouvellement. Les premiers lasers étaient des objets de taille réduite. En ces temps de « *big science* »

croissante à la mesure des budgets consacrés aux grands instruments, on imaginait aisément de pouvoir pratiquer de nouveau une science à petite échelle et budget relativement modeste, riche néanmoins de découvertes. Dans tous les pays développés, de nombreux chercheurs appartenant à de grands laboratoires publics ou privés aussi bien qu'à des petites structures universitaires se lancèrent dans l'étude de l'interaction laser matière. Leur objectif était rarement la fusion, réservée *a priori* aux spécialistes de l'énergie nucléaire.

Les chercheurs ont à leur disposition plusieurs moyens de faire connaître les résultats de leurs travaux. Le plus valorisant auprès de la communauté scientifique est la publication dans une revue généraliste prestigieuse telle que *Nature*. Les physiciens avaient aussi à l'époque les toutes jeunes *Physical Review Letters*. Ce canal n'est pas toujours fiable. On a vu comment les choses pouvaient mal tourner à propos de Maiman. Des revues destinées à un lectorat spécialisé sont tout aussi sérieuses dans leurs procédures d'appréciation des manuscrits mais elles sont moins cotées. Vis-à-vis d'un public plus large, la communication à travers la plus ou moins grande presse et les médias audiovisuels échappe souvent aux scientifiques.

Il est important d'être reconnu par ses pairs, ceux qui travaillent dans le même domaine. La publication n'y suffit pas. Les rencontres, permettant d'échanger des idées de façon formelle ou informelle et souvent de nouer de durables relations amicales, s'avèrent indispensables. Elles se produisent le plus souvent à l'occasion de conférences dont certaines sont récurrentes, organisées par des instances diverses : grands laboratoires, sociétés savantes nationales ou internationales, fondations, voire, s'agissant de la fusion contrôlée, une variété d'énergie nucléaire, les Nations unies par l'intermédiaire de l'Agence Internationale pour l'Énergie Atomique (AIEA).

Ceux qui s'engageaient dans l'interaction laser matière ont d'abord bénéficié de l'accueil bienveillant des Conférences internationales d'électronique quantique. Celle de Paris en 1963 comprenait ainsi la communication de Basov et Krokhin sur la fusion par laser et celle

de Maker, Terhune et Savage sur le claquage des gaz. Celle de Miami en 1968 eut aussi son importance avec l'annonce faite par Basov d'émissions sporadiques de neutrons. Celle de Montréal en 1972 fut le théâtre d'un grand show orchestré par Teller venu pour valoriser les concepts élaborés dans le secret à Livermore et cette fois dévoilés, du moins en partie.

Mais la communauté qui commençait de prendre forme ne tarda pas à instituer ses propres réunions à effectifs plus réduits : quelques dizaines quand les grands-messes de l'électronique quantique rassemblaient plus de mille participants. Plus de détails sur ces conférences spécialisées seront donnés dans le **chapitre 6**.

Cette communauté regroupait des spécialistes des lasers de puissance, des fournisseurs d'équipements et des chercheurs attirés par la science de l'interaction rayonnement matière à haut flux en plus des perspectives nouvelles qui venaient de s'ouvrir vers la fusion nucléaire. Les représentants des centres d'études nucléaires (Livermore puis tardivement, Los Alamos pour les États-Unis, Culham pour la Grande-Bretagne, Limeil pour la France...), étaient au final minoritaires mais leur influence était grande et s'accrut encore à partir de 1972 lorsque les programmes lancés à Livermore amorcèrent la transition entre le temps des pionniers et celui des grands projets. Les laboratoires privés, actifs dans les débuts (*United Technologies* avec Alan Haught, *Westinghouse* avec Albert Engelhardt), disparurent des radars dès la fin des années 1960. Mais Engelhardt, après avoir quitté Westinghouse où il avait accueilli en stage quelques Européens, continua de faire partie d'un ensemble naturellement évolutif. Il passa par le Canada avant de rejoindre Los Alamos. Des universités américaines dont celle du Michigan et plus tardivement celle de Rochester dans l'État de New York fournirent un fort contingent de membres permanents de la communauté. D'autres américains sont venus de laboratoires nationaux comme le NRL (*Naval Research Laboratory*) ou le PPPL (*Princeton Plasma Physics Laboratory*) en plus des centres nucléaires.

Hors des États-Unis, cet aréopage, d'emblée très international, comprenait d'abord les Soviétiques par qui tout avait commencé à l'Institut Lebedev, flanqués dans la même institution d'une équipe rivale autour d'Alexandre Prokhorov qui, en 1964, avait obtenu un prix Nobel de physique partagé avec Nicolai Basov et Charles Townes. Du Canada au Japon en passant par l'Europe occidentale (Allemagne, Grande-Bretagne, Italie...), de nombreux chercheurs ont rejoint cette cohorte et participé à de multiples rencontres riches en échanges d'idées.

En France, outre la CGE et les centres CEA de Limeil et de Saclay, on compta des équipes universitaires (Marseille, Nice, Poitiers, Toulouse...). Une mention spéciale doit être accordée à l'École polytechnique, avec la création autour d'Édouard Fabre, à l'initiative de Pierre Vasseur alors directeur des laboratoires, d'un groupe de recherches dont une partie de l'activité s'est développée en concertation avec le CEA. Les chercheurs et leurs équipements étaient, au début, logés très à l'étroit près de l'amphithéâtre Arago dans le coin de la physique des anciens locaux de la Montagne Sainte-Geneviève. Considérablement renforcée au cours des ans, cette équipe est devenue le Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI), réputé pour la qualité des études qui y sont menées. Il dispose aujourd'hui d'importants moyens expérimentaux sur les campus de Palaiseau et de l'Orme des Merisiers.

6. INTERACTION LASER MATIÈRE : MANIÈRE FORTE ET SUBTILITÉ ?

La matière émet, absorbe et diffuse toutes les lumières. L'interaction se produit aussi bien au niveau nucléaire qu'au niveau du cortège électronique des atomes et des molécules ou encore avec des modes collectifs d'oscillation. Des transferts d'énergie ont lieu dans un sens ou dans l'autre. Dans ces processus, des propriétés spécifiques des lasers sont mises à profit, ensemble ou séparément : l'énergie et la puissance transportées d'une part, la finesse de la raie émise et la cohérence de ce rayonnement d'autre part.

La manière forte se justifie par la certitude qu'en concentrant autant de puissance sur une cible, quelle qu'en soit la nature, il ne peut manquer de se produire des phénomènes intéressants aussi bien à l'échelle moléculaire qu'au niveau macroscopique. Toute substance peut ainsi être sinon détruite du moins transformée. C'est la philosophie du rayon de la mort transposée dans le domaine scientifique. On casse, mais c'est pour créer d'autres états de la matière et, pourquoi pas, porter des isotopes de l'hydrogène jusqu'à des conditions favorables à l'amorçage de réactions thermonucléaires.

Pour frapper fort, il convient d'abord de s'assurer d'avoir les moyens de le faire. Ce simple constat a entraîné une course à la puissance des lasers, étalée sur un bon demi-siècle. Il faut en plus opérer avec discernement et méthode. De multiples effets attendus ou non vont entrer en jeu. Quels sont-ils ? Comment évoluent-ils dans le temps ? Sont-ils utiles ou nuisibles au but poursuivi ? Comment éventuellement les maîtriser ? Telles sont des questions qui se posent aux chercheurs engagés sur la voie de la fusion nucléaire. Ils ne peuvent y répondre qu'en faisant preuve de la subtilité inhérente à toute science. Avec l'interaction laser matière, un immense domaine s'ouvrait à l'investigation. On pressentait que la cohérence associée à des intensités lumineuses hors de portée des époques antérieures allait apporter du nouveau. On ne fut pas déçu comme le prouva l'abondance des mécanismes physiques mis à jour, imbriqués parfois de façon complexe et qu'il est indispensable de décrypter.

Ainsi la création de plasma par focalisation d'une impulsion laser dans un gaz est d'abord une manifestation de force brute mais conduit à des problèmes fondamentaux quant à l'origine des premiers électrons.

7. CRÉATION DE PLASMA : SÉRENDIPITÉ ET GRANDS CLASSIQUES

Obtenir des plasmas par laser en concentrant le faisceau dans un gaz fut au départ une manifestation de l'effet Sérendib : visant un certain objectif on obtient sinon son contraire du moins un résultat

totalemment imprévu. L'histoire des sciences est pleine d'événements de cet ordre. En l'occurrence, la surprise se produisit en 1962 : pensant que les intensités lumineuses que permettait d'atteindre la focalisation d'une impulsion « géante » allaient provoquer des effets d'optique non-linéaire qu'ils se proposaient d'étudier, des chercheurs des laboratoires Ford, P. D. Maker, R. W. Terhune et C. M. Savage, constatèrent l'apparition inattendue d'une boule très lumineuse au foyer de leur lentille. L'air à cet endroit était ionisé donc devenu un plasma sous l'influence du rayonnement reçu. Ce phénomène est appelé *claquage* par analogie avec ce qui se passe dans un isolant soumis à une tension électrique supérieure à un certain seuil. Il est facile à reproduire (**figure 7**).

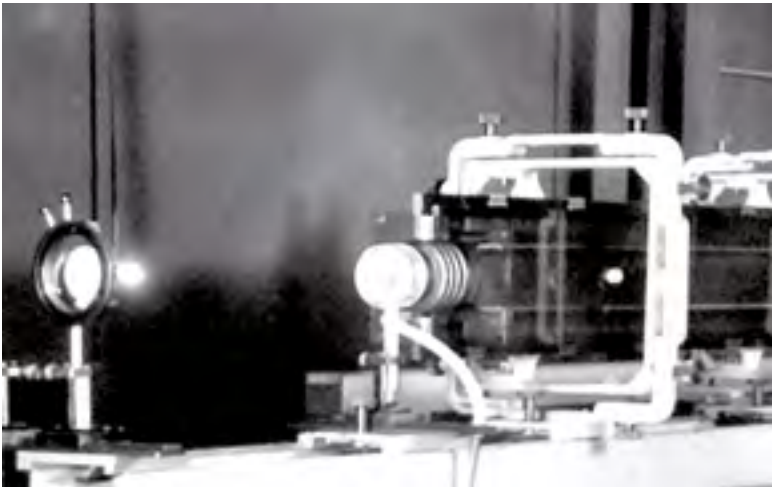


Figure 7 | Boule de plasma créée au foyer d'un miroir concave par un laser CO₂ impulsif de la CGE. © Compagnie Générale d'Électricité.

La transformation d'un gaz en plasma lorsqu'on l'irradie avec du champ électromagnétique de haute fréquence est un phénomène bien connu depuis le début du XX^e siècle. Il est accessible à tout un chacun : une ampoule fluocompacte débranchée s'illumine lorsqu'on la place à l'intérieur d'un four à micro-ondes. La création d'un plasma est le résultat d'une succession de phases à caractère collectif. Des électrons

libres toujours présents dans un gaz à la température ordinaire sont accélérés par absorption d'énergie électromagnétique lors de collisions avec les neutres, jusqu'au potentiel d'ionisation. De nouveaux électrons sont ainsi libérés dont le nombre est multiplié par un effet d'avalanche causé par ce processus répétitif. Intervient enfin la thermalisation du gaz d'électrons dont l'existence est révélée par la lumière émise, comme dans tout milieu chaud, lors de l'excitation des atomes et des molécules qu'il contient.

Mais le volume focal dans lequel règne pour peu de temps le champ électromagnétique de l'onde laser est trop réduit, quelques milliards de centimètres cubes, pour que s'y trouve à un instant donné avec une probabilité raisonnable ne serait-ce qu'un électron. En effet la concentration d'électrons libres dans l'atmosphère à la température ordinaire est de l'ordre de la centaine par centimètre cube. Il est donc nécessaire de faire appel à des mécanismes d'ionisation directe pour la création des premiers électrons libres, problème qui sera examiné dans le paragraphe suivant.

La naissance d'un plasma lumineux par l'impact d'une forte intensité de rayonnement laser sur la surface d'un métal ne met pas en jeu de phénomènes nouveaux. Les électrons sont déjà présents et circulent librement à l'intérieur du conducteur. La fraction de lumière qui n'est pas réfléchie pénètre dans une mince couche superficielle, appelée profondeur de peau, qu'elle peut chauffer jusqu'à la volatiliser et la transformer en plasma qui va s'écouler vers l'extérieur selon une dynamique restant à analyser (cf. **paragraphe 33**).

Le cas d'un diélectrique solide combine celui des gaz en ce qui concerne l'ionisation et celui des métaux pour la dynamique de l'écoulement de plasma. On verra plus loin comment il se présente dans la situation particulière du deutérium solide.

8. LE PROBLÈME DES PREMIERS ÉLECTRONS

Les lasers émettent dans l'infrarouge, le visible ou le proche UV. Leurs interactions avec la matière à l'échelle atomique ou moléculaire

mettent en jeu des photons dont l'énergie est inférieure au potentiel d'ionisation. Mais la forte intensité obtenue en concentrant le faisceau laser change la donne. On peut aborder cette question de façon classique, comme l'avait fait Robieux, ou quantique.

IONISATION À L'ÉCHELLE MICROSCOPIQUE

L'approche classique repose sur le champ électrique élevé propagé par l'onde de forte intensité. Ce champ a pour effet de modifier la carte du potentiel dans lequel se trouve plongé l'électron périphérique d'un atome ou d'une molécule (**figure 8**). Selon l'ampleur de l'abaissement de la barrière de potentiel, l'électron pourra s'échapper par effet tunnel ou alors directement.

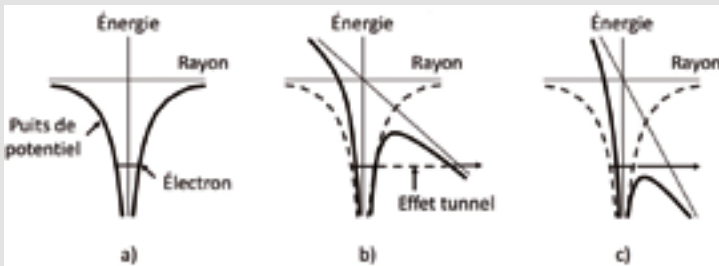


Figure 8 | Abaissement d'une barrière de potentiel électrostatique par un champ électrique : a) niveau de l'énergie d'un électron dans un puits de potentiel atomique non perturbé ; b) modification du potentiel en présence d'un champ électrique extérieur ; la brisure de symétrie permet à l'électron de traverser la barrière par effet tunnel ; c) cas d'un champ extérieur suffisamment élevé pour abaisser la barrière de potentiel jusqu'à une valeur inférieure au niveau d'énergie de l'électron.

Dans les échanges d'énergie avec les atomes ou les molécules, il est souvent avantageux de considérer que la lumière est constituée de projectiles appelés photons dont l'énergie individuelle est le produit de la fréquence d'oscillation par la constante de Planck de valeur très petite ($h \approx 6,62 \cdot 10^{-23}$ Js). On connaît depuis le milieu du XIX^e siècle, l'effet photoélectrique dans lequel l'absorption de lumière par un matériau provoque une émission d'électrons. Il s'interprète dans un cadre quantique par l'absorption d'un photon d'énergie égale à

...

...
l'énergie d'ionisation d'un atome à partir de l'état fondamental d'un électron périphérique.

Mais avec de la lumière visible, l'énergie d'un photon est insuffisante pour provoquer directement l'ionisation. Celle-ci ne peut être obtenue que par l'absorption simultanée de plusieurs photons (**figure 9**).

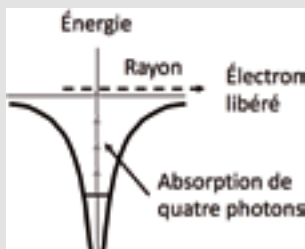


Figure 9 | Ionisation multiphotonique : dans ce schéma, l'absorption simultanée de quatre photons est nécessaire pour atteindre l'ionisation depuis le niveau fondamental de l'électron périphérique.

Les premières études sur les effets multiphotoniques sont dues à Maria Goeppert-Mayer qui dans sa thèse, soutenue en 1929, avait calculé la probabilité d'une absorption à deux photons par un atome. Ce résultat de mécanique quantique est resté une simple curiosité scientifique jusqu'à l'apparition des lasers trente ans plus tard. Grâce à la cohérence et aux intensités que le laser permet d'atteindre, la probabilité d'une ionisation multiphotonique n'est plus négligeable. Le nombre d'électrons émis par unité de temps varie alors comme l'intensité du rayonnement élevée à une puissance égale au nombre de photons nécessaire pour parvenir à l'ionisation.

Comme on le verra au **chapitre 3**, dans les conditions des expériences des années 1960, l'ionisation multiphotonique n'est qu'une première étape, certes indispensable mais qui compte peu dans les échanges d'énergie entre le rayonnement et la matière intervenant dans le claquage des gaz. Elle n'en demeure pas moins un phénomène fondamental des plus intéressants qui fit l'objet à Saclay d'un programme de recherches à la fois expérimentales et théoriques

menées pendant de nombreuses années sous la supervision de Claude Manus.

Des expériences extrêmement précises d'ionisation de gaz rares sous basse pression ont été menées dès 1965 par Gérard Mainfray et ses collaborateurs. La théorie telle qu'elle a été développée dans le même groupe de chercheurs par Yves Gontier et Michel Trahin fait appel à tout l'arsenal des méthodes mathématiques et numériques de la mécanique quantique pour prendre en compte la structure complexe de l'édifice atomique. Sur ce sujet de l'ionisation multiphotonique, Nicolai B Delone et ses coauteurs de l'Institut Lebedev de Moscou avaient été des précurseurs, obtenant eux aussi, au cours des années, de nombreux résultats significatifs.

La recherche sur les effets multiphotoniques fut reprise à Limeil quelque temps plus tard avec une expérience en chambre d'ionisation permettant de compter les électrons arrachés à des atomes par des impulsions laser : thèse de Michel Louis-Jacquet (1977).

3

En France, le partenariat CGE/CEA

9. LES LABORATOIRES DE MARCOUSSIS

Pendant les Trente Glorieuses, l'État français encourageait les grands industriels à créer, s'ils ne l'avaient déjà fait, d'importantes unités de recherche à l'image de ce qui avait été réalisé outre-Atlantique depuis le début du xx^e siècle. Ainsi, le groupe de la Compagnie Générale de Télégraphie Sans Fil (CSF) avait développé le laboratoire de Corbeville, acquis à la fin des années 1940. La Compagnie Générale d'Électricité (CGE) quant à elle, se dota de son propre centre de recherches à l'américaine avec les laboratoires de Marcoussis construits entre 1958 et 1961. Le mimétisme alla jusqu'à l'édification d'un bâtiment sur le modèle (en plus petit) de la barre érigée aux laboratoires Bell (*Bell labs*) à Murray Hill, New Jersey, célèbre pour son couloir long d'un mile.

Le groupe CGE était un ensemble de grandes filiales jouissant d'une large autonomie y compris dans le domaine de la recherche-développement (R&D). Le laboratoire central, tout juste créé, se voulait un pôle de recherche plus avancées. Il avait une double

mission : préparer l'avenir en explorant de nouveaux domaines susceptibles de se traduire en activités innovantes au sein des filiales ; apporter à celles-ci un soutien scientifique et technique dans le cadre de leur propre R&D. Le financement provenait de contributions des filiales et de contrats passés avec la puissance publique *via* la Direction Générale des Recherches Scientifiques et Techniques (DGRST) dépendant du Premier ministre ou la Direction des Recherches et Moyens d'Essais (DRME) du ministère des Armées. Rien d'étonnant étant donné les liens que certains qualifient d'incestueux entre les grands industriels et l'État dans une France colbertiste. Pour preuve, le président directeur général de la CGE entre 1965 et 1970 fut Jean-Marie Louvel, certes ingénieur polytechnicien mais surtout ancien ministre de la Quatrième République et sénateur sous la Cinquième. On imagine que son carnet d'adresses était fort bien rempli.

La croissance fut rapide. Les effectifs dépassèrent bientôt 1 000 employés dont plus de 100 chercheurs d'un niveau comparable à celui des établissements publics. Il apparaît un demi-siècle plus tard que les laboratoires de Marcoussis ont été un élément essentiel dans l'orientation du groupe vers l'électronique, support matériel des technologies de la communication et de l'information.

Les lasers ont à divers titres joué un rôle moteur dans cette évolution. Il fallait être un peu visionnaire au début des années 1960 pour le pressentir. Ce fut le cas d'individualités marquantes qui présidaient aux destinées des laboratoires parmi lesquelles on peut citer Jean Dauvin, Gérard Lehmann et surtout Jean Robieux.

Jean Dauvin (1898-1987) fut le premier directeur de cet établissement après en avoir été l'initiateur et présidé à la construction. C'était si l'on peut dire un récidiviste. Il avait dans le passé piloté la mise en place du Centre National d'Études des Télécommunication (CNET) mais c'était sous le régime de Vichy, ce qui lui valut d'être écarté du projet après la libération. Il avait quitté peu après le service des PTT pour pantoufler dans l'industrie.

Inspiré par son potentiel comme instrument de mesure, Gérard Lehmann (1909-2005) avait inscrit l'étude du laser parmi les premiers programmes de recherche des laboratoires de Marcoussis. Elle fut mise en œuvre et développée dans de multiples directions par Jean Robieux (1925-2012) qui était à la tête du département des recherches physiques de base. D'autres ingénieurs étaient chargés du passage au stade industriel qui se concrétisa aussi par la création en 1966 d'une filiale commune avec un autre grand groupe de l'industrie française, Saint-Gobain. Ce fut la Compagnie Industrielle des Lasers (CILAS) dont le siège était implanté à l'origine sur un emplacement voisin près du village de Villarceau.

Une des premières réalisations de la CILAS, fut la télémétrie par laser. Une expérience de démonstration entre les deux sites, Marcoussis et Villarceau, était volontiers montrée aux visiteurs en raison de la singularité d'un résultat très évocateur pour des Français connaissant leur histoire : 1515 m ! Sur une telle distance, on pouvait plus sérieusement se rendre compte, une fois la nuit tombée, de la divergence naturelle du faisceau comme de la sensibilité de la direction de propagation à la turbulence atmosphérique.

10. JEAN ROBIEUX ET LA FUSION NUCLÉAIRE

Ne travaillant pas dans un laboratoire national spécialisé dans l'énergie nucléaire ni à l'université, Jean Robieux fait partie des chercheurs en milieu industriel ayant réagi à l'invention des lasers en pensant à la fusion nucléaire. Un autre exemple est Albert G. Engelhardt, alors chez Westinghouse (cité par Dawson dans son article de 1964).

À sa sortie de l'École polytechnique, Robieux était entré dans le corps des ingénieurs de la navigation aérienne. Après l'école d'application, il eut l'autorisation d'aller passer un an au *California Institute of Technology* (Caltech) où il fit la rencontre, pour lui décisive, de Simon Ramo (1913-2016), ingénieur et entrepreneur de grande envergure. Cet éminent spécialiste des microondes et de la technologie des missiles fut un pionnier de la conquête aérospatiale. Il fut

tour à tour et parfois simultanément chercheur et industriel, toujours avec succès. Le R du sigle de la compagnie TRW rend hommage à celui qui fut l'un de ses fondateurs. À son contact, Robieux acquit la certitude d'avoir les aptitudes nécessaires pour réussir une carrière dans la science appliquée. De retour en France, il quitta dès que possible l'administration pour entrer en 1954 au centre de recherches de la CSF. Il y travailla sur les ferrites et sur les antennes dans le domaine des hyperfréquences. Au passage, il tira de cette activité les éléments d'une thèse d'État, *Lois générales de la liaison entre radiateurs d'ondes*, soutenue en 1959. Les problèmes liés aux ferrites lui donnèrent l'occasion de nouer des relations avec le laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure (Pierre Aigrain, Alfred Kastler et son équipe).

En 1961, Ambroise Roux, l'un des vice-présidents de la CGE devenu plus tard le PDG de la compagnie et un membre particulièrement influent du monde des affaires, recruta Robieux pour prendre, au sein des laboratoires de Marcoussis, la tête d'un département de recherches physiques de base. Sa mission était de mettre en œuvre des innovations susceptibles d'ouvrir des marchés à des produits de haute technologie fabriqués et commercialisés par le groupe. Il fut lui aussi immédiatement séduit par les potentialités des lasers et s'employa à en développer les applications dans des domaines aussi variés que les télécommunications (qui faisaient partie des métiers de base de la CGE), la séparation isotopique ou encore la fusion thermonucléaire.

De 1961 jusqu'à sa retraite en 1990, il occupa divers postes au sein de la direction des laboratoires de Marcoussis où son influence décru à partir de 1980, ce qui lui laissa du temps pour occuper en parallèle un poste de professeur à l'École Centrale. Très attaché à sa Bretagne natale, il fut aussi le fondateur en 1991 de l'École Louis de Broglie à Rennes (elle fait aujourd'hui partie du groupe des Écoles Catholiques d'Arts et Métiers – ECAM). Il fut membre correspondant de l'Académie des sciences et dans les dernières années de sa vie faisait

toujours avec enthousiasme la promotion de la fusion nucléaire par laser (**figure 10**).



Figure 10 | Jean Robieux en 2009 faisait toujours avec conviction la promotion de la fusion par laser. © Lucien Deschamps P2100.

Il y avait pensé dès l'apparition des premiers lasers à impulsion géante. Selon ses propres termes :

« Après quelques tâtonnements, je cherchais toujours à définir un domaine de recherche entièrement nouveau, demandant un grand effort d'imagination et de créativité. Mais au cours de mes vacances estivales¹², où j'avais une plus grande liberté, je fus amené à m'intéresser aux phénomènes d'absorption de l'onde optique par des plasmas denses. Je constatai qu'un plasma ayant la densité d'un solide acquérait une fréquence de résonance proche de celle de la lumière visible ou même de l'ultraviolet et pouvait par conséquent absorber une grande partie de l'énergie lumineuse. Les premiers

12. En 1962, NdA.

lasers venaient d'être mis au point une ou deux années plus tôt, et même si leur puissance était faible, il s'agissait malgré tout d'une lumière émise sous une forme hautement organisée. Il me vint à l'idée que si un laser puissant capable d'émettre une impulsion de lumière visible et de très courte durée pouvait être orienté sur une très petite sphère, la lumière pourrait ioniser la matière puis la comprimer et la chauffer suffisamment pour déclencher des réactions de fusion nucléaire. Je tenais là le domaine entièrement nouveau que je recherchais ! »

Au début des années 1960, Jean Robieux avait attaqué ce problème avec des idées qui aujourd'hui paraissent bien naïves. Mais, à l'époque, ses calculs d'ordre de grandeur comme ceux de Basov et Krokhin, ceux de Dawson ou d'autres... ont contribué au débroussaillage de cette question essentielle : le laser peut-il faire avancer les recherches sur la fusion contrôlée ?

Les lasers à impulsion « géante » de 1961-1962 étaient de toutes premières réalisations aux performances modestes, une fraction de joule en 100 ns. Les chiffres obtenus par Jean Robieux indiquaient l'effort minimal à faire en matière de technologie laser pour pouvoir réaliser les conditions de la fusion nucléaire. Il fit partager à Jean Dauvin sa conviction que la CGE avait le potentiel de recherche et de développement nécessaire pour se lancer dans l'étude et la réalisation de lasers plus puissants et aux durées d'impulsion plus courtes qui trouveraient leur place sur le marché de la fusion.

11. BREVETS ET LOBBYING

La mise en pratique des propositions de Robieux sur la fusion par laser pouvait dans son esprit avoir une importance stratégique qu'il était nécessaire de faire reconnaître mais discrètement. Selon une tradition bien établie en France comme ailleurs, la CGE, grand groupe industriel, avait ses relais au plus haut niveau gouvernemental. Des rapports, coécrits avec Raymond Rocherolles, avaient fait à

la fin de 1962 leur chemin jusqu'au sommet de l'État. Confidentiels, ils ne donnèrent pas lieu à publication dans la littérature scientifique ouverte, empêchant ainsi Jean Robieux de figurer parmi les pères fondateurs reconnus de la fusion nucléaire par laser.

Les idées de Robieux sur le sujet firent aussi l'objet de deux brevets d'invention relatifs à leur mise en pratique. Dans son principe scientifique, la fusion nucléaire par laser n'est pas brevetable mais tout ou partie d'un dispositif imaginé pour l'obtenir peut l'être. Les demandes de brevet soumises par la CGE et reproduites en annexe sont conformes à cette philosophie. Sous le même titre : *Dispositif de fusion thermonucléaire commandée*, elles ont été déposées en 1963, l'une le 26 avril sans mention d'inventeur, l'autre le 11 juin aux noms de Jean Robieux et Raymond Rocherolles. Ces brevets ne furent accordés et rendus publics qu'en juin 1968 (*Bulletin officiel de la propriété industrielle*, 1968) après un long délai justifié par le caractère de leur contenu considéré pendant tout ce temps comme sensible. La date de publication fit qu'ils passèrent inaperçus.

D'autres demandes de brevet concernant des points techniques et ne mentionnant pas explicitement la fusion nucléaire, furent déposées pour être accordées et publiées au bout d'un an, délai normal pour respecter la confidentialité industrielle, seule concernée dans ces cas précis.

L'année 1963 fut décisive. La communication de Basov et Krokhin à la conférence de Paris sur l'électronique quantique avait attiré l'attention de spécialistes de l'énergie nucléaire. Le lobbying exercé par la CGE rencontrait ainsi un climat favorable au lancement d'un programme de recherches visant la fusion par laser.

La CGE n'avait aucune compétence en matière nucléaire et ne pouvait donc agir seule. Il apparut très vite que la meilleure des solutions était un partenariat avec le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) où des unités travaillaient sur la fusion nucléaire. Après une courte négociation, il fut décidé que par l'intermédiaire de la DRME du ministère des Armées, les laboratoires de

Marcoussis recevraient une dotation pluri-annuelle pour développer des lasers de puissance. La partie relative à l'interaction avec des cibles et à la fusion nucléaire était dévolue au Centre de Limeil de la Direction des Applications Militaires (DAM) du CEA où des chercheurs avaient la compétence requise en matière de physique expérimentale des plasmas et de réactions de fusion, avec l'avantage de travailler au sein d'un environnement où la discrétion est le plus souvent de mise. Le futur ministre de la Recherche Pierre Aigrain fit beaucoup pour cet arrangement. Il était alors directeur à la DRME et il avait été l'un des premiers à être convaincu par les potentialités des lasers en matière de fusion nucléaire, allant même jusqu'à préconiser de prendre de solides mesures de radioprotection en cas de réussite.

12. LE CENTRE CEA DE LIMEIL

La batterie de Limeil, annexe du fort de Villeneuve-Saint-Georges, était à l'origine un poste avancé de la deuxième ligne de fortifications entourant la capitale, érigée après la guerre franco-prussienne de 1870 sous la direction du général Séré de Rivières (**figure 11**). Situé à une vingtaine de kilomètres au sud-est de Paris, le site abritait une petite unité de recherches de la Direction des Études et Fabrications d'Armement (DEFA), installée là depuis 1955.

D'abord antenne de la section atomique de la DEFA dont l'histoire a été écrite par Paul Bonnet¹³, on y développa des sources éclair de neutrons performantes qui firent leurs preuves lors de la première explosion nucléaire au Sahara en février 1960. Se posa dès lors la question de l'intégration des équipes au sein de la direction des applications militaires du CEA. Le temps de régler différents problèmes administratifs, la batterie devint Centre d'Études nucléaires de Limeil à la fin de cette même année.

13. Paul Bonnet, « La section atomique de la DEFA » in *L'histoire de l'armement terrestre dans la période 1945-1975* (1996).



a)



b)

Figure 11 | La batterie de Limeil en 1955 avant sa transformation en laboratoire : a) ouvrage d'entrée avec son pont roulant à effacement latéral ; b) casernements où des lasers furent implantés quelques années plus tard. Source : <http://www.fortiff.be/iff/index.php?page=l86>

L'endroit avait gardé des traces visibles de son passé guerrier. Les anciens casernements, des casemates encore habitables, pouvaient servir de laboratoires ou d'ateliers. On les surmonta d'un étage de bureaux tandis que d'autres bâtiments étaient édifiés sur des emplacements disponibles. Les barres et les hangars tristement fonctionnels ainsi que les casemates maladroitement relookées affichaient un ordre qui devait plus aux hasards de l'histoire qu'à un dessein cohérent (**figure 12**). En 1961, des bureaux étaient encore équipés de téléphones de campagne modèle EE8. Depuis la mise en service d'un restaurant d'entreprise flambant neuf, personne ne regrettait l'antique et très militaire roulante qui avait jusque-là servi les repas de midi.



Figure 12 | Vue aérienne du Centre de Limeil vers 1961. Source : <http://www.fortiff.be/iff/index.php?page=l86>

Le site prit de l'importance lorsque des unités en provenance d'autres centres du CEA y furent implantées au cours des années 1960. Des ingénieurs et des mathématiciens étaient regroupés dans un service de physique mathématique chargé des calculs relatifs aux armes nucléaires. Ce service gérait un ordinateur, parmi les plus puissants de l'époque, renouvelé fréquemment au fur et à mesure des progrès de l'informatique et des autorisations d'exporter auxquelles étaient soumises les firmes d'outre-Atlantique en pointe dans le domaine naissant de l'informatique. Le langage de programmation était le FORTRAN dans ses versions successives et l'interface homme-machine était constituée à l'entrée, de cartes perforées selon

le bon vieux code Hollerith et à la sortie, d'interminables listings pliés en accordéon.

L'autre entité scientifique appelée service de physique générale avait une vocation expérimentale. C'était un amalgame d'équipes originaires de la DEFA et du CEA. On y trouvait un peu de tout : outre les fameuses sources de neutrons, un accélérateur de particules, des décharges électriques de natures diverses... Quelques théoriciens complétaient cet inventaire. Les chercheurs, dont quelques chercheuses, étaient jeunes, débutants ou peu s'en faut pour la plupart. Les « seniors » avaient autour de quarante ans : André Brin dirigeait le service et Francis Delobea supervisait tous les programmes expérimentaux concernant la physique des plasmas chauds et de la fusion.

Dans une conférence interne à la fin de 1962, un ingénieur ancien officier de marine qui fit un bref passage au service de physique générale, Claude Ayçoberry, avait présenté le laser aux autres chercheurs du centre sans, pour autant qu'il m'en souvienne, mentionner la fusion nucléaire parmi les applications potentielles. La fusion s'imposa dans les esprits après le lobbying de la CGE renforcé par la communication de Basov et Krokhin à la Conférence internationale d'électronique quantique tenue au palais de l'UNESCO à Paris au printemps de 1963.

Le service de physique générale était tout désigné pour prendre en charge un programme de fusion par laser en association avec l'industriel. Les théoriciens se livrèrent à quelques calculs (optimistes) montrant qu'une énergie laser d'environ 10 kilojoules ferait l'affaire.

Occupé par d'autres projets, ma participation au démarrage de cette aventure fut marginale. Elle se limita à la rédaction en 1964 d'une note interne confirmant par des évaluations à la louche (je n'étais pas au courant de celles de Robieux, restées confidentielles) qu'un plasma de deutérium-tritium chauffé par laser à une densité supérieure ou égale à celle du solide pouvait effectivement fournir une énergie de fusion intéressante, à la condition de rester confiné en géométrie sphérique.

Il est important de rappeler ici qu'au début des années 1960, la France en était au tout début de la mise en œuvre d'un programme d'armement nucléaire. Elle expérimentait ses premiers engins à fission que les persifleurs de service dénigraient en les appelant : « bombinettes du Général ». Il était trop tôt pour que puissent avoir lieu, comme aux États-Unis, des transferts de connaissances entre physique des armes et fusion par laser. Le déroulement de l'histoire suivit un tout autre scénario. À la DAM, malgré quelques études théoriques menées principalement par des anciens de la DEFA, on ne détenait pas encore la clé permettant d'aller à coup sûr vers des explosions thermonucléaires dont la réalisation à l'époque ne faisait pas l'objet de programmes d'urgence. La situation était ainsi très différente de celle de Livermore où la fusion par laser pouvait être développée à partir d'un certain acquis. La succession des événements prit donc un tour particulier. À Limeil, on manqua pendant quelques années d'un corpus théorique solide pour guider des recherches qui furent consacrées d'abord et surtout aux problèmes d'interaction laser matière bien que les chercheurs n'aient jamais perdu de vue la finalité thermonucléaire sans vraiment savoir, pendant quelques années, comment arriver à la fusion autrement qu'en chauffant un plasma.

Domaine de recherche fondamentale très actif dès le milieu des années 1960, l'interaction laser matière n'était pas couverte par le secret et pouvait donner lieu à des publications dans la littérature ouverte ainsi qu'à des échanges avec des chercheurs d'autres laboratoires, souvent étrangers, facultés dont les physiciens de Limeil ne se privèrent pas d'user. Les publications étaient cependant soumises à autorisation préalable, délivrée par la haute hiérarchie de la DAM.

13. CLAQUAGE DES GAZ : QUAND LES « BOULES » SONT DES DIABOLOS

En 1963, les performances des lasers disponibles étaient bien modestes surtout si on les compare aux réalisations d'aujourd'hui. On était très heureux de disposer d'une fraction de joule extraite en

quelques dizaines de nanosecondes d'un unique barreau de rubis ou de verre au néodyme. Cela restreignait singulièrement la finalité des premières recherches expérimentales sur la création et le chauffage de plasmas.

Menées à Limeil par Pierre Veyrié avec une équipe d'abord réduite puis progressivement étoffée par de judicieux recrutements, les premières expériences d'interaction d'un faisceau laser avec la matière ont visé à décrypter les mécanismes physiques conduisant à l'état de plasma : chapitre ionisation de la trilogie de Robieux. Le plus simple était d'étudier le claquage (transformation en plasma) de l'air du laboratoire ou d'autres gaz. Pour cela, le rayonnement d'un laser pulsé était concentré à l'aide de lentilles de diverses focales, ceci pour faire varier l'intensité lumineuse. Un calorimètre placé au-delà du foyer permettait de mesurer l'énergie transmise. Le résultat ne manqua pas de surprendre. Une absorption presque totale coïncidait avec l'apparition du plasma lorsque l'intensité au foyer dépassait $5,10^{10} \text{ W/cm}^2$ (unité pratique hors système).

L'intensité provoquant l'ionisation était très inférieure aux valeurs calculées par Robieux. La tentation était grande d'y voir la conséquence de phénomènes non-linéaires. Une première interprétation fit appel à l'ionisation multiphotonique, un atome ou une molécule absorbant d'un seul coup plusieurs photons pour qu'un électron soit éjecté selon un mécanisme décrit dans le chapitre précédent. Pierre Nelson avait procédé à une analyse théorique de ces effets qui lui avait permis de calculer un seuil en intensité. L'accord avec l'absorption était remarquable (**figure 13**) mais cachait une réalité plus complexe.

Une étude approfondie faisant appel à une multiplicité de diagnostics montra que l'ionisation multiphotonique n'a pas le rôle prépondérant qu'on lui avait attribué initialement. Elle ne contribue pas à l'absorption massive observée. Ce n'est, dans de telles expériences, que le mécanisme initiateur de la dynamique assez compliquée de la formation et de l'évolution des « boules de claquage ». La coïncidence des seuils théorique et observé confortait cette interprétation. Mais pour

les effets multiphotoniques ce n'était qu'une preuve indirecte contrairement aux résultats des expériences spécifiques menées à Moscou par Nicolai Delone comme à Saclay par Gérard Mainfray et qui permettaient d'explorer en détails toute la richesse de ces phénomènes.

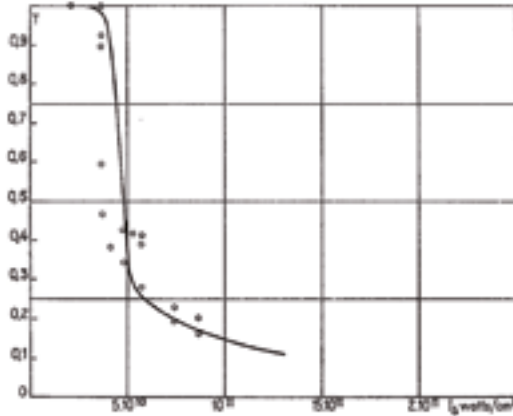


Figure 13 | Fraction T de lumière transmise lors d'un claquage de l'air par laser. Points expérimentaux (cercles) et théorie multiphotonique (trait continu). © CEA.

Lorsque les impulsions laser durent suffisamment longtemps avec un front de montée pas trop raide, ce qui était bien le cas des études effectuées à Limeil, l'évolution de la population d'électrons dans son ensemble prend rapidement le pas sur le mécanisme individuel d'ionisation à l'échelle atomique.

Quelle que soit la façon dont sont créés les premiers électrons, la suite des événements passe d'abord par l'avalanche en jeu dans le claquage haute fréquence. Elle aboutit à la présence d'un gaz d'électrons qui provoque localement un excès de densité d'énergie. Il s'en suit une expansion entretenue par l'absorption de la lumière et c'est là une autre nouveauté. Il s'établit ainsi l'équivalent d'ondes de détonation. La première se propage en deçà du foyer en direction de la lentille. Si l'absorption de la lumière n'y est pas complète, il s'en propage une autre au-delà du foyer et qui s'éloigne de la lentille. L'énergie cédée par l'onde laser remplace dans ce mécanisme l'énergie libérée par une

réaction chimique explosive. La théorie de cette détonation radiative fut développée à Limeil par Jean-Louis Champetier indépendamment de travaux similaires menés à Ottawa par Stuart A. Ramsden, un universitaire anglais de passage, et P. Savic. Cette phase se caractérise par la forme en diabolo de la « boule » de plasma telle que la révèlent des clichés de caméra électronique pris par Francis Flux lors d'expériences de claquage du deutérium et reproduits sur la **figure 14**.

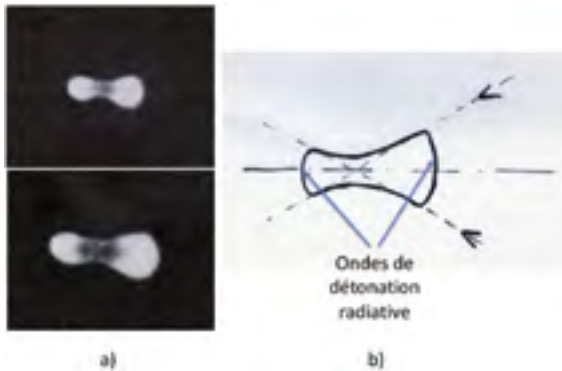


Figure 14 | « Boule de claquage » autour du foyer d'une lentille. L'intensité laser venant de la droite entretient des ondes de détonation radiative : a) instantanés pris à 8 ns d'intervalle avec un temps de pose inférieur à la nanoseconde ; b) schéma montrant les deux ondes de détonation radiative qui absorbent la presque totalité de la lumière incidente. © CEA.

CAMÉRAS ÉLECTRONIQUES

Les caméras électroniques sont une innovation des années 1960 destinée à l'étude de phénomènes ultrarapides. Elles comportent dans leur principe un tube de télévision compact, muni d'une photo cathode et activé par une circuiterie adaptée aux temps inférieurs à la microseconde. Certaines étaient commercialisées aux États-Unis par la firme TRW mais restèrent longtemps sous embargo à l'export ce qui obligea le Centre de Limeil à développer ses propres appareils (Roland Loichot). Utilisées entre autres pour suivre l'évolution du claquage des gaz, elles pouvaient fonctionner de deux façons : image par image (**figure 14**) ou alors en mode balayage de fente.

14. REMANIEMENTS ET ONDES DE CLAQUAGE

En 1966, il y eut d'importants mouvements de personnel dans le Centre de Limeil à commencer par le changement du directeur du site. Le service de physique générale en eut sa part. Les théoriciens dont Pierre Nelson reçurent d'autres affectations. Ce fut aussi le cas de Pierre Veyrié ainsi que d'André Brin partis au siège du CEA. Francis Delobbeau prit alors la direction du service laissant une place vide qu'après de brefs passages dans d'autres unités, le nouveau directeur du centre, Jean Berger, me proposa d'occuper. La réorganisation avait été assez profonde car la haute direction avait en plus institué une programmation par projets qui visait à combattre le cloisonnement inhérent à une structure pyramidale rigide, les chefs de projet ayant autorité partielle sur des éléments répartis dans plusieurs services. Interagissant peu avec d'autres, ayant conservé son organigramme de base, le service de physique générale était peu concerné. Toutefois, sans doute pour éviter une singularité, l'activité de recherches fut découpée en projets ce qui, tout bien pesé, ne présentait ni avantages particuliers ni inconvénients flagrants. Plus de cadres se retrouvèrent parés du titre de chef. C'était plutôt bon pour le moral.

Dans ce contexte, j'avais la responsabilité de l'ensemble des expérimentations relatives aux plasmas donc, d'abord, de tout ce qui tournait autour des lasers et représentait l'essentiel de l'activité.

Le programme d'interaction dans les gaz était alors sur la fin. L'heure était aux hautes pressions ou aux diélectriques solides y compris les glaçons de deutérium dont on verra au chapitre suivant comment ils étaient élaborés.

L'interprétation des expériences suscitait cependant d'interminables controverses. En effet, il n'est pas évident de définir proprement un seuil de claquage. Le phénomène résulte d'un enchevêtrement de multiples causes, dépend de nombreux paramètres et se manifeste par l'apparition d'une lumière reçue par un détecteur : comment se débarrasser de la sensibilité de celui-ci ? quel est le critère pertinent ?

Je n'eus pas à intervenir dans les disputes encore en cours à ce sujet jusqu'au début de 1967. Les progrès en matière de laser impulsionsnels s'étaient traduits par une augmentation de la puissance crête accompagnée d'un raccourcissement de la largeur temporelle à mi-hauteur. Le front de montée était ainsi plus raide. Un nouveau mode de propagation du plasma de claquage était alors apparu : une zone lumineuse se détachait du front de détonation radiative et courait plus vite que ce dernier en direction de la lentille de focalisation. Cela correspondait à une création de plasma sans déplacement de matière. Divers compléments d'enquête conduisirent à la conclusion qu'il s'agissait d'une onde de claquage, quelle que soit la définition du seuil. J'en proposais une, basée sur la thermalisation des électrons, la température de ceux-ci étant, pour la physique des plasmas, une grandeur assez facilement accessible à la mesure. C'était consensuel et applicable aux conditions d'un phénomène prévu dans une théorie proposée par Yu. P. Raizer en 1965 et que les perfectionnements apportés aux lasers nous avaient permis de caractériser semble-t-il pour la première fois.

Comme toujours en pareil cas, une fois un nouvel effet découvert, on joue avec. On change de cible (cf. paragraphe suivant), on change la longueur d'onde du laser... on allonge la focale jusqu'à obtenir un chapelet de petits plasmas. À Limeil, le résultat le plus spectaculaire fut obtenu avec le faisceau d'un laser pulsé à CO₂ le long de la partie haute du couloir desservant les casemates de l'ancienne batterie. Le chapelet de plasmas s'étendait sur des dizaines de mètres ! Conséquence inattendue, ceux qui avaient participé ou assisté un peu longuement à la démonstration avaient le visage bronzé comme s'ils revenaient des sports d'hiver.

Ces boules de claquage étaient en effet très chaudes et leur rayonnement était riche en ultraviolets. Nous n'avons pas poursuivi la recherche pour savoir si c'étaient de bons UVA. Mais la perspective de transformer un laboratoire de Limeil en salon de bronzage afin de rentabiliser le programme laser alimenta quelque temps les conversations méridiennes à la cantine du Centre.

OBSERVATION DES ONDES DE CLAQUAGE

Une caméra électronique en mode balayage de fente permet de mettre en évidence un phénomène nouveau dans le claquage des gaz après une augmentation de la puissance des lasers associée au raidissement du front de montée. Succédant à un comportement identifié à une détonation radiative, une faible lueur consécutive à l'ionisation se propageait beaucoup plus rapidement soit en direction de la lentille si le gaz était sous haute pression (**figure 15**), soit de part et d'autre du point focal lorsque la pression était plus basse. Dans tous les cas la vitesse d'expansion était incompatible avec un déplacement de matière.

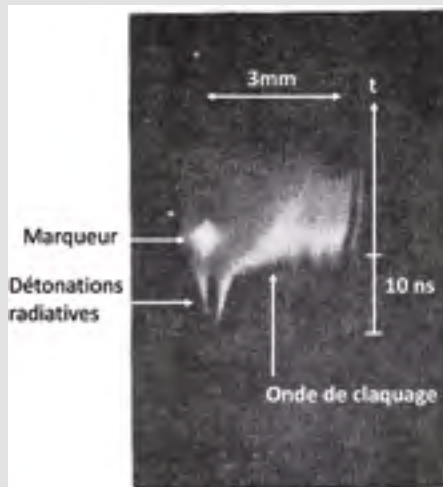


Figure 15 | Onde de claquage enregistrée par une caméra électronique en mode balayage de fente qui permet de suivre la propagation du plasma. Le temps s'écoule de bas en haut. Le faisceau laser vient de la droite. La zone focale est comprise entre les points de départ des détonations radiatives. Un marqueur indique l'instant du pic de l'impulsion (1,6 GW). Le gaz était du deutérium à la pression atmosphérique.

L'onde de claquage n'est pas toujours régulière. Elle peut se fragmenter en amorçages successifs de processus conduisant localement à l'ionisation. En utilisant de très longues focales on aboutit même

...
à la formation d'une multitude de boules de plasma bien alignées le long de l'axe du faisceau (**figure 16**).



Figure 16 | Alignement de boules de plasmas obtenu en concentrant la lumière d'un laser à verre au néodyme au moyen d'une lentille de très longue focale.
© Compagnie Générale d'Électricité.

À l'exception des effets de bronzage, je présentai nos résultats à la Conférence internationale d'électronique quantique de Miami en mai 1968¹⁴. J'étais accompagné d'Alain Terneaud qui exposa de son côté les études faites à Limeil sur la structure de nos faisceaux laser. La CGE était présente aussi pour faire état des performances jusqu'alors inégalées de ses chaînes de puissances. Il y avait une forte délégation soviétique permise par l'esprit de détente qui prévalait en ces premières années de l'ère de Léonid Brejnev. Détail insolite pour l'époque, je me souviens en particulier d'un orateur invité, N. N. Sobolev, faisant ses emplettes apparemment seul dans un vaste supermarché du centre-ville.

À l'occasion de cette conférence, je fis la connaissance de Nicolai Basov avec qui j'eus par la suite des relations extrêmement cordiales.

14. Je n'ai donc pas vécu les événements qui se sont déroulés en France pendant ce mois historique, mais j'en suivis les péripéties à travers la presse et les médias américains qui s'en firent largement l'écho jusque parfois les gros titres en une.

Sa communication de dernière minute (« *post deadline* »), que j'avais trouvée sur le moment peu convaincant, était relative à des émissions sporadiques de neutrons lors de l'irradiation de deutériure de lithium par une impulsion picoseconde. Il en sera question plus en détail dans le **chapitre 4**.

15. IRRADIATION DES SURFACES SOLIDES, IONS MULTICHARGÉS

Une bonne façon de créer un plasma consiste à focaliser l'impulsion laser sur la surface d'un solide placé dans le vide ou sous atmosphère contrôlée. De telles expériences s'inscrivaient naturellement dans le programme majeur visant à obtenir des conditions favorables à la fusion thermonucléaire. À Limeil, elles étaient menées dans plusieurs directions. La disponibilité de nombreux lasers laissait du champ libre à l'initiative individuelle.

Lorsque le solide est un métal l'ionisation ne pose évidemment pas de problème. Le cas d'un diélectrique transparent pour la lumière incidente est plus complexe. Avec un point focal situé loin à l'intérieur du matériau, le résultat final est souvent catastrophique mais spectaculaire comme le montre ce cliché d'un cube de plexiglas après irradiation en profondeur (**figure 17**). Le dépôt d'énergie est tel que des fractures partent dans tous les sens. On conçoit qu'un tel désastre soit à éviter dans le verre des amplificateurs de la chaîne laser. On reviendra dans le chapitre suivant sur les conditions de la tenue au flux des verres au néodyme.

En analysant au moyen d'une caméra électronique les phases initiales de l'interaction avec un diélectrique, on retrouve le rôle de l'onde de claquage. On l'observe en effet en focalisant le faisceau laser légèrement sous la surface de bâtonnets de plexiglas ou dans le cadre des recherches sur la fusion, à l'intérieur de glaçons de deutérium (**figure 18**). Lorsqu'elle débouche à la surface du diélectrique solide, il se forme un panache de plasma en mouvement rapide entre-tenu par l'intensité laser incidente selon une dynamique dont le détail sera présenté plus loin (cf. **chapitre 6**).

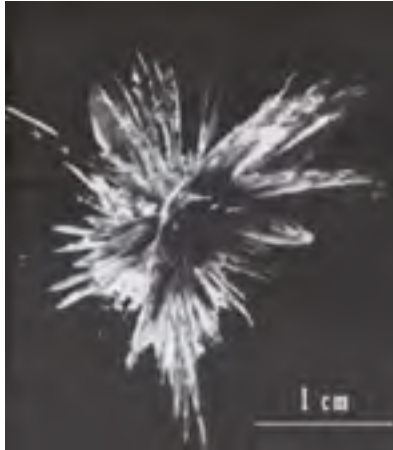


Figure 17 | Fractures induites par la focalisation d'un faisceau laser dans un bloc de plexiglas. © CEA.

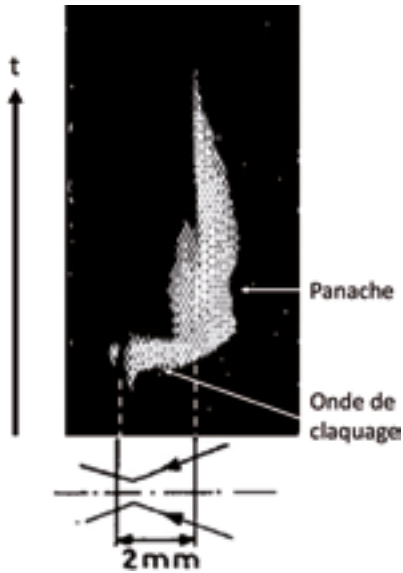


Figure 18 | Onde de claquage dans un bâtonnet de deutérium solide. Le faisceau laser (2 GW pendant 2 ns) venant de la droite est focalisé assez profondément à l'intérieur. Le temps s'écoule de bas en haut. © CEA.

Plusieurs lasers de puissance étant simultanément disponibles, les expériences d'interaction étaient menées en parallèle. Une chambre à vide standardisée à huit hublots avait été dessinée et réalisée à plusieurs exemplaires. On pouvait aussi y introduire une atmosphère contrôlée dans sa composition comme pour sa pression. C'était à la fois souple et pratique. Les cibles étaient de deux sortes : les métaux et le deutérium solide, donc pour la bonne forme administrative, autant de projets.

Gianfranco Tonon était en charge des expériences d'irradiation de métaux. Contrairement aux cas des gaz ou des diélectriques solides, il n'existe pas de phase d'ionisation. Les électrons libres sont déjà là. Le couplage avec les ondes laser se fait immédiatement par effet de peau. L'échauffement local qui en résulte commence de volatiliser le métal. Les phases transitoires sont brèves et un écoulement de plasma chaud s'établit dont le détail sera décrit plus loin. Les températures obtenues dépassent aisément le million de degrés. Dans ces conditions les atomes sont dépouillés d'un grand nombre de leurs électrons. Les états de charge présents sont représentatifs des conditions de température et de densité dans un régime permanent qui s'apparente à l'équilibre coronal bien connu des astrophysiciens.

Naturellement, un tel milieu rayonne et l'on reconnaîtra plus tard l'importance de ce rayonnement pour les micro-implosions par attaque indirecte. La répartition en énergie, avec du fond continu et un enchevêtrement de raies, défie les spectroscopistes. Cependant une méthode brutale mais efficace faisant appel à des absorbants a permis d'estimer la température électronique du plasma et même d'en suivre l'évolution au cours du temps. Mais il n'était pas question de reconstituer, d'après les spectres, la distribution des ions multichargés.

Pour connaître celle-ci, l'expérience d'interaction elle-même fournit une clé. En effet, le plasma se détend dans le vide dans toutes les directions d'un demi-espace à partir d'une très petite aire correspondant à la tache focale. Densité et température diminuent trop vite pour que la recombinaison puisse s'effectuer. La distribution des espèces chargées est comme « gelée ». Les ions produits continuent

leur chemin et peuvent atteindre un détecteur si l'on a pris soin d'en disposer un à quelque distance.

LES IONS MULTICHARGÉS SE RAMASSENT À LA PELLE

La pelle à ions multichargés était en fait un analyseur électrostatique capable non seulement de les ramasser mais aussi de les trier en fonction du rapport de leur charge à leur masse. Dans ce dispositif, inventé par des collègues du CEA travaillant sur la fusion par confinement magnétique dans le centre de Fontenay-aux-Roses, une trajectoire en arc de cercle est imposée aux ions. Cette configuration agit comme un filtre. L'énergie des ions à la sortie est, à masse égale, proportionnelle à leur charge. Ils ont alors des temps de vol différents et arrivent ainsi séparément sur le détecteur (**figure 19**). Je n'ai pas manqué, au cours de mes enseignements à l'université, de m'inspirer du fonctionnement de cet appareil pour élaborer des problèmes d'examen à l'intention d'étudiants de tous niveaux.

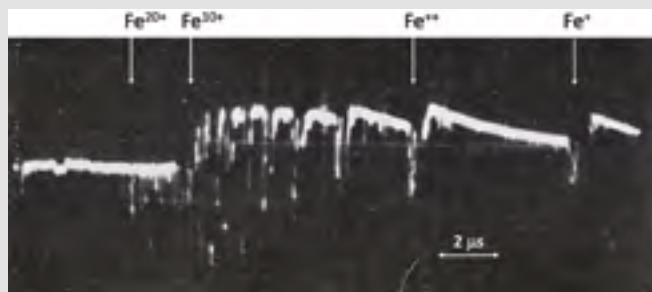


Figure 19 | Ions multichargés obtenus par l'impact d'une impulsion laser focalisée sur une cible en fer. Les plus chargés arrivent les premiers sur le détecteur, suivis par la succession des états de charge décroissants. On note le dédoublement des pics dû à la présence de deux isotopes, ^{54}Fe et ^{56}Fe , dans le métal de la cible. © CEA.

Le résultat principal de ces expériences est que pour obtenir un maximum d'ions dans un certain état de charge, il existe un optimum d'intensité incidente. Les analyses théoriques conduites avec Gianfranco Tonon dans le cadre du modèle qui sera discuté plus loin permettaient de définir les conditions à remplir pour obtenir une

quantité spécifiée à l'avance d'ions de charge donnée. Les records de charges observées sont l'aluminium 13 fois ionisé, donc complètement dépouillé de ses électrons, et le fer 20 fois ionisé. Une extrapolation tout à fait accessible aurait produit de l'uranium 50 fois ionisé. Une rumeur (jamais démentie) nous attribuait de l'uranium 60 fois ionisé.

Ces études dont les premiers résultats avaient été diffusés peu avant 1970 avaient éveillé l'intérêt de physiciens nucléaires : ceux de Limeil d'abord (A. Pérez et C. Faure), qui trouvaient là une opportunité d'entamer des recherches originales en physique des accélérateurs ; ceux d'autres institutions ensuite, en vue du projet GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) qui sera plus tard implanté à Caen.

La question était de savoir si l'interaction laser pouvait contribuer à créer des sources d'ions compétitives. Les ions existaient, émis dans un demi-espace, encore fallait-il les extraire, les trier et les canaliser, donc concevoir des dispositions adéquates pour injecter des ions de charge bien définie à l'entrée d'un accélérateur.

EXTRACTION DES IONS MULTICHARGÉS

La **figure 20** représente un montage réalisé à Limeil. La cible métallique plane est surmontée d'un cache hémisphérique percé de deux ouvertures circulaires : l'une latérale pour donner accès au faisceau laser ; l'autre axiale pour limiter la dispersion angulaire des ions. La cible est portée à un potentiel positif de quelques milliers de volts tandis que l'électrode d'extraction est reliée à la masse.

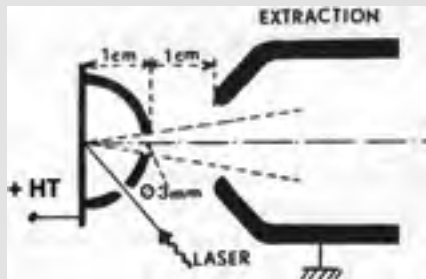


Figure 20 | Extraction et canalisation des ions. © CEA.

Une collaboration fructueuse avec d'autres laboratoires avait pu s'instaurer. Elle commençait même de déborder le cadre national. Nous avons ainsi tenu à Limeil un colloque d'une demi-journée pour présenter nos résultats sur le sujet. On en trouve le compte rendu sous forme d'articles compilés dans une livraison du *Bulletin d'Informations Scientifiques et Techniques* du CEA.

Ce numéro du *BIST* est remarquable à plus d'un titre. À des scientifiques de la DAM habituellement tenus à l'écart du reste du monde scientifique, il associe en effet des chercheurs de l'institut de physique nucléaire de l'université de Lyon et un représentant de l'autre côté du rideau de fer : Yuri Oganessian du Centre de Dubna en Russie, un des rares laboratoires soviétiques partiellement ouverts aux étrangers. Cerise sur le gâteau, la couverture de ce numéro entièrement consacré aux ions lourds multichargés porte la date de *juin 1791* ! Bien qu'ayant joué le rôle de rédacteur en chef, je n'avais aucun contrôle sur la couverture qui à part ce gag, était d'une désespérante banalité. Mais au vu du résultat, j'assume d'avoir fait partie de lointains précurseurs !

Curieusement, les sources d'ions par laser n'ont pas connu les développements auxquels on aurait pu s'attendre. On y repense de temps à autre. Ainsi au CERN, des expériences d'interaction laser destinées à la production d'ions Pb^{20+} ont été effectuées au cours des années 1990.

La plupart des irradiations de solides ont été faites sous vide. Des expériences ont aussi été menées en présence d'une atmosphère résiduelle sous basse pression afin d'éviter les claquages. Le panache de plasma qui s'échappe de la cible comprime et met en mouvement le gaz raréfié entraînant ainsi la propagation d'un front de choc hémisphérique à des irrégularités près (**figure 21**).

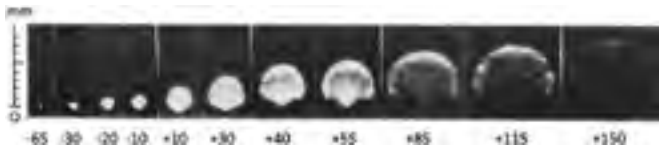


Figure 21 | Formation d'une onde de choc dans un gaz raréfié lors de la propagation du panache de plasma créé par la focalisation d'un faisceau laser sur une surface métallique. Les temps sont en nanosecondes. © CEA.

16. AUTRES RECHERCHES

La matière à l'état de liquide transparent peut également servir de cible aux faisceaux laser. À Limeil, les interactions avec des liquides ont fait l'objet d'expérimentations essentiellement non programmées. En ces temps lointains, l'utilisation des salles d'expériences n'était pas réglementée. Des célébrations improvisées en petit comité s'y déroulaient assez souvent. Le prétexte en était la chandeleur, une naissance, une promotion ou encore la « quille » d'un stagiaire militaire¹⁵... Avec un laser en état de marche dans la pièce, on ne se privait pas de procéder à des essais imaginés dans l'euphorie ambiante. Il est ainsi scientifiquement prouvé qu'une impulsion laser non focalisée traversant de l'eau gazeuse ou du champagne provoque l'éclosion d'une grande abondance de bulles. En revanche, il ne se passe rien de tel dans le whisky même allongé d'eau plate.

Les lasers utilisés pour la création de plasmas provenaient de l'industrie. Cependant à Limeil, on n'était pas resté inactif en matière d'émission stimulée. En particulier, Jean-Michel Jégo avait entrepris de sa propre initiative des études originales. Son « mini laser » était une autre façon de rechercher des impulsions courtes. Deux faces en regard d'un parallélépipède de matériau actif, verre ou rubis, étaient recouvertes l'une d'une couche totalement réfléchissante, l'autre d'un revêtement semi-réfléchissant, de façon à constituer une cavité. Le pompage s'effectuait à l'aide d'un faisceau laser à néodyme ou à rubis converti en fréquence. La maîtrise dans le réglage des couches, acquise par Alain Ternaud et Jean-Claude Buges, permit d'obtenir l'effet laser sur des longueurs de quelques millimètres.

Au cours de cette recherche, Jean-Michel Jégo découvrit de façon accidentelle un autre effet laser, cette fois en observant une anomalie dans la diffusion à 90° de la lumière laser par un claquage dans de l'azote ou dans l'air du laboratoire. L'intensité diffusée en fonction du temps présentait, un pic étroit, contemporain de la transition vers

15. Nom vulgaire d'un représentant de cette main d'œuvre corvéable à merci : les scientifiques du contingent.

un état de forte absorption. Aucun état d'équilibre ne saurait exister à cet instant. Les autres gaz ne donnaient rien. Un miroir disposé derrière la boule de claquage dans l'azote, perpendiculairement à l'axe d'observation, augmentait l'intensité du pic par un facteur 7 à 8 (e^2). Une cavité Pérot-Fabry plan-plan la renforçait encore. Enfin, l'emploi d'une cavité confocale se traduisait par un accroissement tel que toutes les molécules contenues dans la boule devaient participer à cette émission. Il y avait clairement effet laser dans l'azote moléculaire. Avec Alain Decoster, je participais aux interprétations. La grande finesse de la raie et la brièveté de l'émission suggéraient un processus super radiant à la Dicke lorsque le phénomène se produisait en l'absence de miroirs.

Prolongeant ce type de recherche, Marc Novaro et Florence Lagarde avaient mis en évidence une émission stimulée dans l'ultraviolet (174 nm) lorsque du Xénon sous pression est excité par un faisceau d'électrons et que se forment des états moléculaires transitoires. Il y avait dans ce résultat l'amorce d'un pas qui ne fut pas franchi vers des lasers à excimers.

La cohérence, enfant chéri des vulgarisateurs et des médias est une propriété des lasers qui renforce le caractère singulier de ces sources de lumière. De peu d'importance et parfois même nuisible lorsqu'il s'agit d'appliquer la force brute d'intensités de rayonnement hors du commun, la cohérence est un sous-produit du processus amplificateur : l'émission stimulée. Les relations de phase en sont favorisées ce qui rend l'onde laser assez proche de l'onde plane monochromatique des manuels donc susceptible de créer facilement des figures d'interférences.

Beaucoup de plasmas sont transparents pour la lumière visible et leur indice de réfraction dépend de la densité électronique. Placés dans l'un des bras d'un interféromètre à deux ondes, un Mach-Zehnder par exemple, ils entraînent un déplacement des franges. À partir de là, diverses méthodes permettent de reconstituer une carte d'indice, donc de densité. Les plasmas d'interaction étant le

plus souvent de très petite taille, des méthodes d'interférométrie spécifiques ont été développées. Ainsi le système à quatre miroirs de Mach-Zehnder est avantageusement remplacé par le double miroir épais de Jamin. Mieux, un seul miroir épais peut suffire à faire interférer entre elles les deux ondes obtenues par dédoublement du faisceau qui a traversé le plasma (**figure 22**). Dans le même ordre d'idées, en plaçant une petite lentille divergente dans le trou axial d'une lentille de focalisation et en éclairant le tout avec un faisceau laser continu de grand diamètre, on obtient des interférogrammes utiles au contrôle de la lentille.

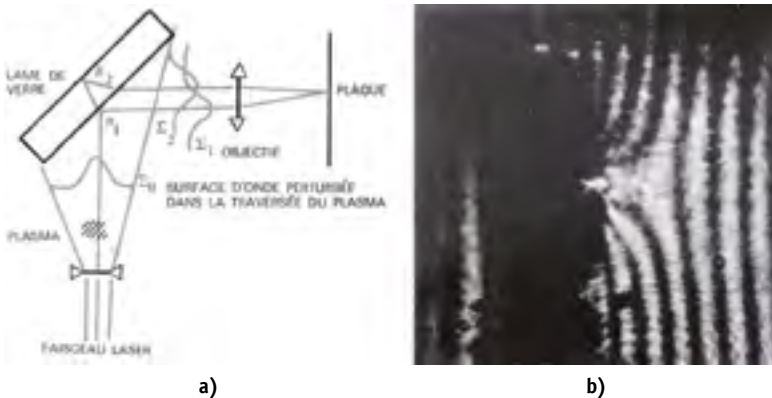


Figure 22 | a) Interféromètre à dédoublement ; b) exemple de déplacement des franges d'interférence par un plasma créé par l'impact d'une impulsion laser focalisée sur la surface d'une feuille de béryllium. © CEA.

La puissance associée à la cohérence d'un faisceau laser éclairant un interféromètre, permet d'obtenir des interférogrammes avec les temps de pose courts nécessaires pour sonder, à un instant donné, un plasma dont l'évolution est particulièrement rapide. Deux méthodes ont été utilisées : ou bien synchroniser un laser de diagnostic avec le laser d'interaction, ou bien prélever une partie de ce dernier. Dans les deux cas, un dispositif multimiroirs aux coefficients de réflexion ajustés que ses concepteurs, Alain Terneaud et Jean-Claude Buges, appelaient « lame piano » permettait de prendre jusqu'à 10 images au

cours d'une même expérience avec des intensités équilibrées. J'étais dans la salle lorsqu'Alain Terneaud présenta cet appareil lors d'une conférence à San Francisco en mai 1968. Après cet exposé, le président de séance Fred Ribe, alors acteur important des programmes de fusion par confinement magnétique à Los Alamos, intervint pour saluer la virtuosité de ceux qui avaient réalisé un tel système de diagnostic des plasmas.

La cohérence du laser a donné vie à une vieille idée, l'holographie, procédé par lequel l'information relative à chaque point d'un objet peut être stockée sur la totalité d'une plaque photographique et restituée sous forme d'une image tridimensionnelle. Le cinéma en relief en est une application évidente... que l'on attend toujours. Mais si deux hologrammes d'un même objet qui subit une légère modification sont enregistrés successivement sur la même plaque, la restitution fait apparaître des franges d'interférence trahissant le changement. L'interférométrie holographique a été utilisée avec succès pour le diagnostic des plasmas de claquage de gaz (**figure 23**).

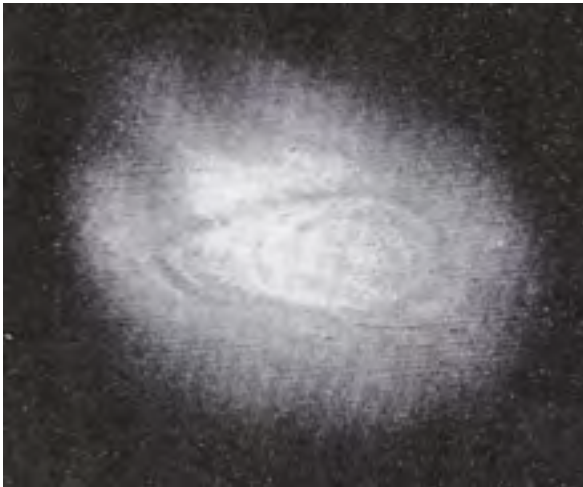


Figure 23 | Interférométrie holographique d'un claquage de gaz. Le faisceau laser vient de la droite. Il est focalisé en un point situé vers l'extrémité gauche de la « boule » de plasma dont la présence est révélée par le système de franges. © CEA.

17. CONCURRENCES

Le rubis ne fut que peu de temps le concurrent du verre au néodyme. À tout hasard, un laser de puissance à rubis avait été commandé aux États-Unis chez Westinghouse, d'où son nom de W-4, le 4 voulant dire 4 étages d'amplification. D'un fonctionnement malaisé, ce laser ne fut guère utilisé pour des expériences d'interaction. Ses piètres performances firent que l'on n'insista pas dans cette voie. W-4 fut finalement donné à l'université de Rouen à l'initiative d'un chercheur CNRS local, Michel Trinité, qui fit un séjour à Limeil comme scientifique du contingent dans les années 1970.

L'activité laser des laboratoires de la CGE ne se limitait pas au verre au néodyme. Lors de mon premier déplacement à Marcoussis, j'avais eu droit au tour du propriétaire. Je n'avais pas échappé à l'attraction pour visiteurs : le percement d'une brique par l'action d'un faisceau continu issu d'un laser moléculaire à CO_2 . Contrairement au néodyme qui émet dans l'infrarouge proche, à la longueur d'onde de $1 \mu\text{m}$ après pompage optique, le gaz carbonique émet dans un infrarouge un peu plus lointain, à la longueur d'onde de $10 \mu\text{m}$ après pompage par des moyens électriques : un courant d'électrons. Cette méthode est favorable pour le rendement qui peut dépasser 10 % contre moins de 1 % dans le cas du pompage par flash. On pouvait croire ce laser promis à un bel avenir industriel. Des décennies plus tard, le bilan est modeste. Le soudage par laser n'a pas semble-t-il remplacé l'arc électrique dans les ateliers de ferrage des constructeurs automobiles.

Mais le laser à CO_2 n'existe pas qu'en régime continu. En appliquant, transversalement à la direction de propagation du faisceau, une brève décharge électrique dans le milieu gazeux actif on obtient un pic d'intensité lumineuse, de largeur à mi-hauteur 100 ns environ, suivie d'un palier étendu sur un peu plus d'une ms. La CGE sollicita Paul Rebut, un expert reconnu de la fusion contrôlée travaillant au centre CEA de Fontenay-aux-Roses, pour étudier les potentialités de tels lasers vis-à-vis de l'énergie thermonucléaire. Quelles que furent

ses conclusions son rapport n'eut, à ma connaissance, pas de suite. Cependant, la CGE construisit pour nous au moins deux de ces lasers impulsionnels : un monocoupe pour des expériences d'interaction sous une longueur d'onde différente de celle du néodyme, un autre à répétition pour l'application à une source d'ions.

La CGE n'était pas seule sur le marché du laser de puissance. Sa rivale française dans le domaine des télécommunications, la CSF, avait compté parmi ses chercheurs du centre de Corbeville, Guy Mayer et François Gires (quinze ans plus tard nous étions collègues dans le système universitaire français), qui avaient acquis une solide réputation parmi les pionniers des lasers. Malheureusement pour elle, la CSF ne réussit jamais à passer au stade semi-industriel.

Ce passage fut au contraire réussi par un jeune professeur de l'université d'Orsay, Georges Bret, qui abandonna une confortable carrière au sein de l'enseignement supérieur pour fonder la société Quantel. Il avait travaillé avec Gires sur les méthodes de déclenchement et de blocage en phase des lasers. Il avait des idées précises sur ce que devait être un laser d'une nouvelle génération. Avant lui, on s'était surtout attaché à obtenir le maximum de gain sans trop se préoccuper de qualité du faisceau. C'était suffisant au niveau de quelques dizaines de gigawatts et pour les expériences de principe faites jusque vers la fin des années 1960. Ce n'était pas extrapolable en l'état.

Ayant reçu un héritage substantiel, Georges Bret eut les moyens de mettre ses conceptions en pratique en dessinant des têtes laser compactes et très stables. Dans l'oscillateur, il avait remplacé le verre par un cristal de grenat d'yttrium et l'aluminium (YAG) dopé au néodyme. Le flash était cadencé de façon à obtenir un train d'impulsions de basse énergie mais très reproductibles. Un obturateur électro-optique laissait passer à la demande, une telle impulsion pour la faire entrer dans la chaîne d'amplification. Celle-ci était étirée de façon à incorporer nombre d'éléments optiques destinés à rendre aussi régulière que possible l'intensité dans la section droite du faisceau. Dans la nouvelle architecture dont le schéma d'ensemble prévaut encore

aujourd'hui, le milieu amplificateur n'occupe plus qu'une longueur très réduite sur le trajet de l'impulsion.

Les débuts de Quantel furent typiques d'une « *start up* » de cette période. Siège social et ateliers étaient logés dans les étages et les caves d'un pavillon de banlieue, à Vigneux-sur-Seine. Après les premiers succès et les rentrées d'argent correspondantes, la société déménagea vers des locaux plus fonctionnels et plus aisément accessibles sur la zone industrielle de Courtabœuf. Plus tard, le très entrepreneur Georges Bret avait créé en Californie la compagnie Quantel International qui à ses débuts partagea un local avec une autre start-up promise à un bel avenir : Apple, fondée et animée par les tout jeunes et charismatiques Steve Jobs et Steve Wozniak. Georges Bret disparut prématurément, à la fin de l'année 1992. Quantel existe toujours en tant que composante du groupe Lumibird.

4

Vers la détection de réactions nucléaires de fusion

18. DES LASERS DE PLUS EN PLUS PUISSANTS

Les lasers utilisés à Limeil étaient pour l'essentiel conçus et réalisés par le partenaire industriel, la CGE, à partir de cahiers des charges élaborés en commun. Normalement, l'initiative des solutions techniques revenait aux chercheurs et aux ingénieurs des laboratoires de Marcoussis où la partie développement et industrialisation, à la culture d'entreprise massivement imprégnée du syndrome NIH.¹⁶, était de bonne qualité mais sans tout à fait atteindre le niveau de la partie recherche. Pour superviser les travaux destinés à fournir aux physiciens de l'interaction les lasers dont ils avaient besoin, le service de physique générale avait délégué, en la personne d'André Blanc, physicien chevronné venu de Saclay, un représentant permanent à Marcoussis.

Il était important de créer puis de maintenir à Limeil une expertise en matière de lasers. Un groupe de spécialistes de l'optique avait été

16. *Not Invented Here !* Inventé ailleurs. On en verra plus loin un exemple.

formé autour d'Alain Terneaud, avec Jean-Claude Buges, Jean-Michel Jégo et Jean de Metz. À part Jégo, ils avaient été formés à l'École supérieure d'optique. Tous m'ont impressionné par leur compétence et leur professionnalisme. En plus des relations techniques avec la CGE, ils étaient chargés des problèmes de focalisation et des diagnostics interférométriques. Comme on a pu le voir au chapitre précédent, ils se sont montrés aussi très inventifs dans différents domaines de l'optique ouverts par l'invention des lasers.

Ils étaient présents, ès qualités, aux rencontres entre responsables des deux institutions partenaires. Ces réunions mensuelles, destinées à faire le point et à mettre en œuvre les évolutions imposées par les besoins de l'interaction, n'étaient pas toujours de tout repos. À Limeil, on avait ses idées concernant les lasers, tandis qu'à Marcoussis, à l'exemple de Jean Robieux, on avait sa vision de la fusion nucléaire. Cela provoqua quelques mémorables parties de bras de fer.

Un cas d'affrontement ne fut jamais réglé : il s'agissait de mesurer l'énergie contenue dans les impulsions laser. Cette grandeur importante figurait au cahier des charges, d'où la nécessité de la connaître avec précision. Or chacun avait sa méthode et sa définition des unités. Les résultats n'étaient jamais les mêmes. Le joule étalon de Marcoussis resta définitivement inférieur au joule étalon de Limeil.

Cependant, grâce aux efforts conjugués des deux parties, on assista à une progression spectaculaire des performances, de l'encombrement et bien évidemment du coût des lasers de puissance à impulsion géante. Bien au-delà du modeste oscillateur à rubis ou à verre des débuts, on aboutit à des ensembles imposants qu'on imaginait, avec raison comme le prouva la suite, presque indéfiniment extensibles. Leur architecture générale était conforme au standard d'une chaîne où l'impulsion sortie d'un étage pilote parcourait ensuite une série d'amplificateurs de diamètre croissant. L'augmentation du diamètre du faisceau était assurée par des systèmes afocaux insérés entre les étages d'amplification. Ce système était obligatoire dans les casemates de Limeil où, l'espace étant particulièrement restreint, il était impossible d'utiliser la divergence naturelle.

Le matériau actif des lasers construits par la CGE était le verre au néodyme émettant dans l'infrarouge à une longueur d'onde proche de 1 μm alors que le rubis émet dans le rouge à 694.3 nm. Dans les amplificateurs, le barreau de verre était entouré d'une lampe éclair (« flash ») hélicoïdale (**figure 24**). Un point faible de l'énergétique des lasers à l'état solide était et reste le rendement de pompage. Les lampes émettent un spectre large. Seule est utile la petite partie correspondant aux bandes d'absorption pour la transition qui donne lieu à l'effet laser. Il est important qu'un maximum de lumière aille vers le matériau actif. Le flash était donc disposé à l'intérieur d'un réflecteur métallique. De plus, le barreau de verre était entouré d'une chemise où circulait un liquide, dit de « *cladding* », censé assurer un meilleur contact optique tout en contribuant au refroidissement. La composition de cette « potion magique » était plus ou moins secrète.

Le diamètre des barreaux de verre ne peut pas croître au-delà du double de la longueur d'absorption de la lumière des flashes, soit environ 10 cm. Or l'intensité lumineuse doit rester inférieure à une valeur garantissant l'absence de dommages. La puissance d'un faisceau issue d'un barreau est ainsi bornée supérieurement. Pour circonvenir la limitation ainsi introduite, une solution est de multiplier les chaînes d'amplification en parallèle, une autre est de remplacer le barreau par des disques. Il en sera question plus loin.

Le verre au néodyme, outre qu'il permettait de se fournir chez des industriels hexagonaux héritiers d'une longue tradition d'excellence, avait bien passé l'épreuve de la puissance. Mais un problème demeurait : la tenue au flux de matériaux soumis à des intensités de rayonnement sans commune mesure avec celles de la lumière du jour. L'indice de réfraction habituel des corps transparents n'a plus cours. Il faut tenir compte de la polarisation du milieu. Le verre, amorphe, semblait mieux tenir que les solides cristallins. Des recherches sur le sujet étaient entreprises un peu partout dans le monde, mais il faudrait du temps avant qu'apparaissent des résultats fiables et bien compris.

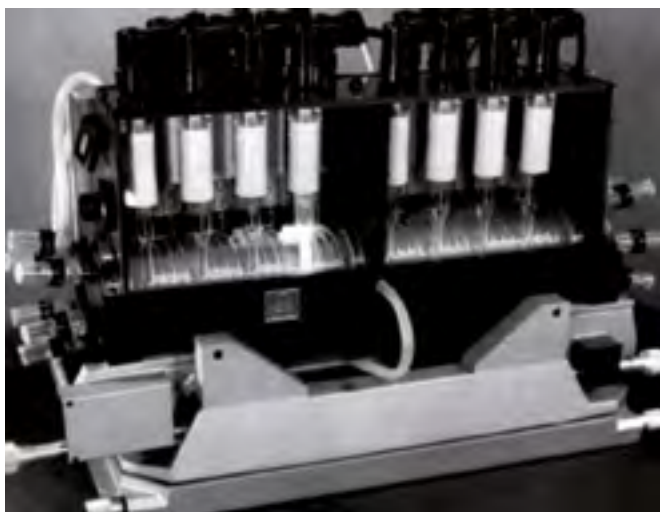


Figure 24 | Amplificateur de puissance standard de la CGE à la fin des années 1960.
© Compagnie Générale d'Électricité.

Aussi bien à Limeil qu'à Marcoussis, les premières études sur la tenue des matériaux, assez sommaires, suffirent cependant pour montrer que les barreaux lasers dont le verre était élaboré dans des creusets de platine étaient sujets, après le passage du faisceau laser, à des fractures localisées. On aboutit rapidement à la conclusion que des inclusions microscopiques de ce métal étaient à l'origine du phénomène en provoquant localement des surchauffes après absorption de la puissance qu'elles interceptaient. Signe d'un manque évident de mémoire ou d'un défaut de communication, ce problème ressurgit au début des années 1980 lorsqu'au centre californien de Livermore on construisait le laser Nova.

Entre-temps, plutôt que de procéder par coulées successives, les laboratoires de Marcoussis associés à un industriel du verre, SOVIREL, avaient imaginé une coulée continue. Le pari reposait sur la conviction que le marché des lasers de puissance allait prendre une extension considérable. Il faisait l'impasse sur le fait qu'au rythme prévu, la coulée continue aurait consommé en quelques jours un an

d'une production mondiale de néodyme très modeste à l'époque. Un essai en vraie grandeur fournit un verre de qualité médiocre. L'affaire n'alla pas plus loin. Il en reste un témoignage qui ne se laisse découvrir que par les initiés : un tronçon du verre de la coulée continue est exposé en bonne place au musée des Arts et Métiers à Paris où son origine n'est pas précisée.

Pour avancer dans la construction de lasers de puissance, des principes de précaution s'imposaient. Les cavités parasites qu'auraient pu constituer les barreaux eux-mêmes étaient éliminées en inclinant de 6 degrés les faces d'entrée et de sortie. Pour éviter un éventuel astigmatisme, on n'avait pas retenu l'angle de Brewster, d'usage universel chez les autres fabricants de lasers. Bien entendu, les creusets de platine avaient été éliminés du processus de fabrication des verres, mais les seuils de dommage restaient mal connus. La répartition de l'intensité dans la section droite du faisceau était sujette à d'importantes fluctuations. En conséquence, la plus grande prudence s'imposait quant à l'intensité maximale admissible.

Les expériences sur cibles solides présentent un inconvénient supplémentaire : une partie de la lumière incidente est réfléchiée et renvoyée vers le laser. Il en résulte un risque d'amplification de ce faisceau de retour, concentré au fur et à mesure qu'il progresse. Il fallait donc placer un obturateur en sortie du laser. Cela présentait de plus l'avantage de limiter un effet de cavité parasite à l'échelle de la chaîne amplificatrice tout entière. La technique utilisée faisait appel à un effet découvert par Faraday au milieu du XIX^e siècle : le plan de polarisation de la lumière qui traverse un matériau transparent tourne lorsqu'on applique un champ magnétique parallèle à la direction de propagation. Des rotateurs de Faraday furent donc dessinés et installés sur les chaînes laser. Le diamètre du faisceau en sortie dépassant de loin la taille des prismes de Nicol, les polariseurs étaient constitués de piles de glaces inclinées.

Tous ces perfectionnements apportés aux lasers de puissance eurent pour effet de porter à 500 joules, l'énergie contenue dans

une impulsion lumineuse de 30 nanosecondes impactant une cible, démonstration faite à Marcoussis en 1967. Par ses réalisations, la CGE se trouvait à cette date largement en tête de la course à la puissance. Ce remarquable résultat qui, au passage, valut à Jean Robieux une invitation à l'Élysée, pouvait être exploité de deux façons : sur le plan industriel, en essayant de commercialiser cette technologie, notamment aux États-Unis ; sur le plan scientifique, en donnant aux chercheurs de Limeil la possibilité de devancer leurs concurrents. Nous avons en effet la priorité pour appliquer aux expériences d'interaction les perfectionnements apportés aux lasers par les laboratoires de Marcoussis.

La tentative de commercialisation fut un demi-succès. En 1966, au cours d'une visite à l'AEC (*Atomic Energy Commission*) pour présenter ses projets de fusion par laser et les réalisations de la CGE qui permettaient de les concrétiser, Jean Robieux s'était heurté à une fin de non-recevoir. Ses interlocuteurs dirent ne pas être intéressés, attitude parfaitement hypocrite car ils ne pouvaient ignorer le travail accompli dans le secret à Livermore depuis le début de la décennie. C'était chez eux une réponse systématique. Quelques années plus tard ils n'accueillirent pas mieux les propositions de Brueckner et Siegel dont il sera question au chapitre 5 et voulurent même les forcer à laisser tomber un projet relevant en partie du secret couvrant les explosions thermonucléaires. Il n'y avait donc rien à attendre de ce côté-là. En revanche, après semble-t-il un échange entre Lyndon Johnson, alors président des États-Unis, et le général de Gaulle, une mission comprenant Alexander Glass (alors au *Naval Research Laboratory*, NRL à Washington D.C. après être passé par l'IDA – son premier poste une fois obtenu, à l'université Yale, un doctorat sous la direction de Gregory Breit) et Arthur Guenther (*Air Force laboratories*, Albuquerque) vint en France pour visiter Marcoussis et Limeil. Le NRL fit ensuite l'acquisition d'une chaîne laser de la CGE mise en œuvre sur place à Washington par John Emmett qui venait d'obtenir un doctorat préparé à Stanford sous la direction du pionnier de

l'électronique quantique Arthur Schawlow, futur prix Nobel. Selon Alexander Glass qui en fit état dans son interview à l'AIP, la transaction eut son côté insolite. Elle conduisit en effet les responsables du NRL à entrer en contact avec le coffre-fort américain de Fort Knox, le général ayant exigé et obtenu que de telles exportations soient réglées en or et non pas en dollars.

La CGE vendit deux lasers de puissance supplémentaires aux États-Unis. L'un à un établissement militaire établi sur le site de China Lake en Californie, l'autre au laboratoire privé du Michigan, KMS-Fusion, créé pour exploiter les idées de K. A. Brueckner (cf. **chapitre 5**), pour servir de base à une installation à deux faisceaux, baptisée Chroma au début des années 1970. Dans ce dernier cas, l'achat se fit par les canaux ordinaires du commerce international tout comme pour le laser vendu aux Allemands du centre de recherches de Garching.

19. DE L-4 À C-6

En 1966, le laser à verre au néodyme le plus puissant installé à Limeil était L-4 (quatre étages d'amplification), installé dans une casemate de l'ancienne batterie. Il comportait deux chaînes d'amplification en parallèle. Mais le déclenchement de l'impulsion géante était commandé par un prisme tournant animé par un moteur électrique. Très robuste et fiable, ce système avait un inconvénient majeur : l'orientation de l'axe du faisceau variait au cours de la durée de l'impulsion. Il était impossible dans ces conditions de définir avec précision les paramètres locaux, tache focale et intensité, sans lesquels on ne peut faire des études quantitatives.

La tendance générale qui se dégageait des expériences d'interaction était qu'il fallait aller vers des impulsions laser, certes plus puissantes mais aussi plus courtes que les 30 ns à mi-hauteur fournies par l'oscillateur de base, quelle que soit la méthode de déclenchement. Le front de montée devait être raidi sur plusieurs ordres de grandeur d'intensité. Dans ce but, la CGE avait réalisé un prototype d'obturateur à cellule de Pockels particulièrement efficace. Placé en

sortie de pilote, il découpait dans l'impulsion géante, trop longue, une forme mieux adaptée à nos demandes. Cette réelle avancée technologique aurait pu donner lieu à commercialisation dans le monde entier moyennant un effort de développement. La direction et les ingénieurs de Marcoussis ne le voulurent pas. Ils se contentèrent de fabriquer et de nous vendre, très cher, les quelques équipements dont nous avons besoin. C'était conforme à l'état d'esprit des groupes industriels français de ce temps-là, très liés à l'État et ne visant que rarement au-delà de l'hexagone.

Autour de 1967-1968, L-4 subit un sérieux « lifting ». On remplaça le prisme tournant par un déclencheur électro-optique. On mit en place la cellule de découpage et l'on ajouta un étage d'amplification pour compenser la perte d'énergie due à la mise en forme de l'impulsion. On agrémenta le tout de divers perfectionnements mineurs pour améliorer la qualité du faisceau. Ainsi naquit L-5, un laser quelque peu bricolé, toujours à l'étroit dans sa casemate, mais cheval glorieux de toutes les batailles de l'époque des pionniers (**figure 25**).



Figure 25 | Le laser L-5. © Compagnie Générale d'Électricité.

Pendant que L-5 servait aux expériences d'interaction dont il sera question plus loin, le laser de la génération suivante était en

construction. Destiné à irradier des cibles sphériques selon les axes des six faces d'un cube, il était composé de six chaînes amplifiant en parallèle des impulsions courtes. Cette configuration avait imposé le nom de C-6 (**figure 26**). Il fut opérationnel en 1972.

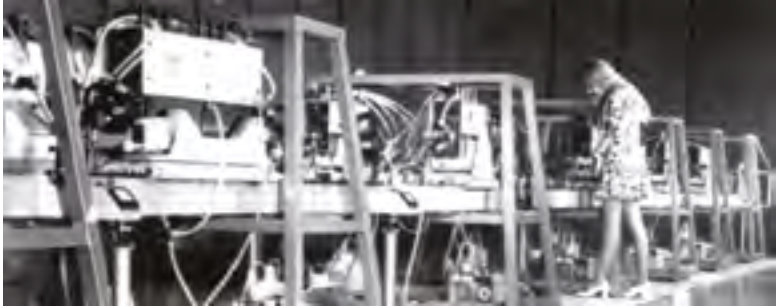


Figure 26 | Chaînes d'amplification (groupées par deux) du laser C-6. © CEA.

Entre-temps, une solution au problème de l'amplification de faisceaux de grand diamètre avait été conçue et mise en œuvre par le laboratoire californien de Livermore : l'amplificateur à disques. Au courant de cette innovation dès 1968, j'en vantais les mérites auprès de la CGE où la résistance, au nom du principe NIH et sans doute aussi pour éviter d'avoir à payer des redevances sur un dispositif breveté, s'avéra intraitable. C-6 n'eut pas de disques ! Alors que, dans le même temps, pour augmenter la puissance de leur laser CGE, les chercheurs du NRL comme ceux de KMS-Fusion complétèrent leurs chaînes par des amplificateurs à disques.

L'AMPLIFICATEUR À DISQUES

Ceux-ci, d'épaisseur limitée (5 cm au maximum), sont inclinés de façon à recevoir le faisceau, préalablement polarisé, sous l'incidence de Brewster. La lumière de lampes éclair rectilignes pénètre dans le verre par les faces planes ce qui procure un pompage homogène. Le dessin comporte un nombre pair de disques elliptiques montés tête-bêche (**figures 27 et 28**).

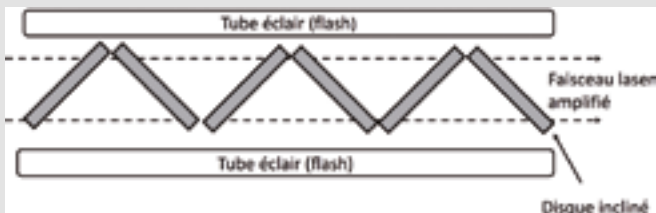


Figure 27 | Schéma de principe de l'amplificateur à disques

Le gain à travers l'épaisseur d'un disque est insuffisant pour que toute l'inversion de population participe à l'amplification. On exploite mieux le pompage en faisant traverser les disques plusieurs fois par le faisceau. Les multipassages peuvent également servir pour des faisceaux de diamètre inférieur à celui des disques comme cela fut réalisé à Livermore avec 9 passages obtenus en dirigeant le rayonnement laser grâce à un jeu de miroirs.



Figure 28 | Première réalisation d'un amplificateur à disques à Livermore. © Droits réservés.

S'il ne fut pas pourvu de disques, C-6 eut droit à un traitement spécifique pour son implantation dans un espace moins contraint qu'à l'intérieur des casemates historiques : une construction légère dressée dans le grand hall d'expériences construit au-dessus d'une section des fossés, préalablement rendue étanche, de l'ancienne batterie. Ce sous-sol sert

à loger les condensateurs, les interrupteurs et la câblerie nécessaires à l'alimentation des flashes. À l'intérieur de la salle contenant C-6, une « cabane » thermostatée, élevée après coup, abritait l'ensemble oscillateur, dispositif de mise en forme temporelle et préamplificateurs avant la division du faisceau en six branches équilibrées. Grande nouveauté, la salle d'interaction était séparée de la salle laser. La paroi entre les deux était percée d'ouvertures pour le passage des faisceaux. Des locaux annexes contenaient le poste de commande et de contrôle ainsi que l'enregistrement des mesures. Plus tard, on aménagea une galerie pour les visiteurs lorsque C-6, avec deux chaînes supplémentaires et une technologie modernisée utilisant des modules amplificateurs plus compacts, fut devenu OCTAL, toujours sans disques (**figure 29**).



Figure 29 | Le laser OCTAL vers 1975. © CEA.

20. PICOSECONDES ?

Au cours de cette évolution vers des puissances de plus en plus élevées apparut un nouveau mode impulsionnel susceptible *a priori* de pousser encore plus loin les performances des chaînes laser. D'une

façon générale, la création d'une impulsion géante se fait en fermant la cavité d'un oscillateur au moyen d'un obturateur qui en contrôle la capacité d'amplification. La largeur à mi-hauteur des impulsions ainsi produites est d'environ 30 ns. La transparence induite dans certains liquides ou verres (absorbants saturables) lorsque l'intensité de rayonnement dépasse un certain seuil avait été utilisée pour tenir ce rôle d'obturateur. En 1966, Anthony DeMaria et ses collaborateurs des laboratoires de *United Aircraft* à Hartford (Connecticut) avaient montré que la présence de tels corps dans la cavité oscillatrice peut produire un blocage en phase ("*mode locking*") qui entraîne la formation d'un train d'impulsions de très faible largeur : de 10 à 30 picosecondes et dans certains cas, moins (**figure 30**).



Figure 30 | Train d'impulsions issues d'un oscillateur laser bloqué en phase, enregistré par un oscillographe cathodique. La largeur des pics, représentative de la dynamique de l'instrumentation utilisée, masque la durée de chaque impulsion qui se compte en picosecondes. © CEA.

L'information parvint à Limeil par une voie détournée. Au retour d'un voyage aux États-Unis à l'automne de 1967, Pierre Vasseur, directeur des laboratoires de l'École polytechnique, l'avait communiquée au professeur Jacques Yvon, le très respecté conseiller scientifique de la DAM, futur Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique, qui nous en fit part. Ce fut l'occasion de se rendre en délégation à Corbeville où les spécialistes locaux de l'optique non linéaire, Guy Mayer, François Gires et Serge Lowenthal, confirmèrent, calculs à l'appui, la réalité de ces impulsions ultracourtes dont les durées posaient un problème de

mesure car inaccessibles à l'électronique du temps dont la résolution temporelle était très insuffisante.

On eut donc recours à des méthodes originales d'autocorrélation faisant appel, pour être visibles, à des phénomènes d'optique non linéaire. Une autre solution est un obturateur agissant à l'échelle de la picoseconde inventé par le québécois Michel Duguay, alors chercheur aux *Bell labs*.

L'OBTURATEUR DE DUGUAY

Remarquablement simple dans son principe, il se compose d'une cuve contenant du sulfure de carbone (CS_2) placée entre deux polariseurs croisés. Ce liquide devient biréfringent sous l'effet du champ électrique d'une intense impulsion picoseconde. La lumière venant d'un objet peut alors être transmise pendant un court instant pour aller impressionner un film photographique. Ce procédé peut être utilisé pour visualiser le passage d'une impulsion picoseconde à travers un diffuseur : du lait dilué dans de l'eau dans les expériences de Duguay (**figure 31**). Il y faut un peu de doigté dans le maniement des lignes à retard optique servant à obtenir le synchronisme entre les passages des impulsions dans le diffuseur et dans l'obturateur. Finalement, une déconvolution permet d'accéder à la durée des impulsions.

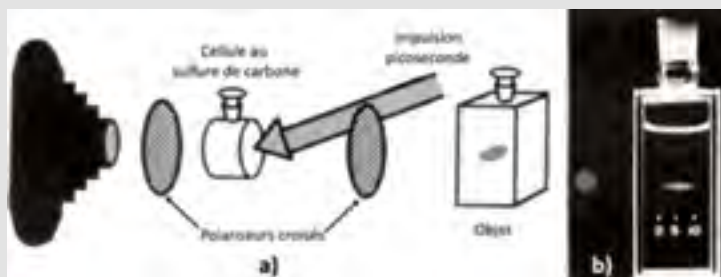


Figure 31 | Principe du montage utilisé pour déterminer la durée des impulsions picoseconde : a) schéma de l'obturateur ; b) instantané de la lumière diffusée ; les graduations sont en mm ; la longueur de la trace doit être corrigée du déplacement pendant le temps de pose (à la vitesse de la lumière visible dans le liquide, $1 \text{ ps} = 0,23 \text{ mm}$) ; la tache ronde à gauche correspond à l'impact sur la pellicule de l'impulsion qui a déclenché l'obturateur.

On notera que la méthode employée par Duguay revient à mesurer une durée avec une règle graduée. C'est ce qu'on fait aussi quand on procède à l'ajustement de lignes à retard optiques. Cette correspondance temps-espace induit une perception particulière de ce que l'on appelle improprement faisceau lorsqu'il s'agit d'un train d'impulsions dont la durée se compte en picosecondes. À 10 ps soit 3 mm dans l'air ou le vide, on a plutôt affaire à une succession de pastilles de lumière. En dessous de la picoseconde (0,3 mm), on se retrouve avec des sortes de pétales de lumière de plus en plus minces lorsque la durée décroît.

Les impulsions picosecondes suscitèrent des réflexions et des calculs à la fois sur le mécanisme de blocage en phase et sur ce qu'il convenait d'attendre de telles impulsions. On aboutit assez vite à la conclusion que la picoseconde s'accompagnant d'une énergie trop faible était mal adaptée au programme poursuivi alors à Limeil en vue de la fusion. Au contraire, ce fut la solution retenue par les chercheurs moscovites de l'Institut Lebedev (cf. **paragraphe 23**).

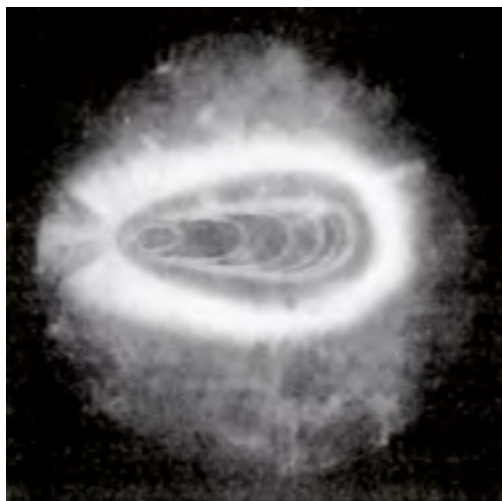


Figure 32 | Les contours successifs d'un plasma de claquage de gaz en expansion vers la lentille de focalisation (à droite de la figure) sont révélés par un dispositif d'imagerie Schlieren éclairé par un train d'impulsions picosecondes. © CNR/A. J. Alcock.

Hors la course à la fusion nucléaire, l'intérêt de ces impulsions brèves était double. Des intensités bien plus élevées qu'avec les habituelles impulsions nanosecondes devenaient accessibles pour explorer de nouveaux domaines de la physique de l'interaction. De plus, les picosecondes présentaient un avantage évident pour les diagnostics optiques instantanés. Les expériences réalisées à Ottawa par John Alcock et Claudio de Michelis (**figure 32**), en étaient la preuve. On construisit donc à Limeil en plus de C-6/OCTAL une chaîne picoseconde dont le nom de code était P-102.

21. FOCALISATION

La création de plasma au moyen d'un faisceau laser est une conséquence de la concentration d'énergie obtenue au foyer d'une lentille ou d'un miroir concave. La qualité de la focalisation est d'une extrême importance. Des solutions sont connues depuis Descartes et la lentille sphéro-elliptique (1637). Mais elles sont difficiles à mettre en œuvre pour des faisceaux lumineux de grand diamètre. Après divers tâtonnements c'est finalement Jean de Metz qui proposa une lentille plan convexe dont la surface courbe était asphérique et calculée point par point. Il restait cependant une difficulté. Les réfractions s'accompagnent de réflexions qui finissent par concentrer sur l'axe à l'intérieur de la lentille des intensités de rayonnement éminemment destructrices. Un remède radical consistait à éliminer le problème en perçant chaque lentille d'un trou axial. Il parut opportun de breveter ces lentilles. Le résultat de multiples discussions avec des spécialistes de la propriété industrielle fut assez surprenant. En décryptant la rédaction alambiquée usuelle en pareil cas, il s'avéra que le seul élément brevetable est le trou axial. Jean de Metz revendiqua comme un titre de gloire d'avoir réussi à breveter le trou.

Pour la fabrication, on s'adressa à l'Institut d'optique où J.-P. Marioge avait réalisé une machine à commande numérique capable, à partir d'un tableau de données, de tailler le verre suivant

n'importe quelle surface courbe. De magnifiques pièces d'optique dont le diamètre dépassait 10 cm furent ainsi réalisées (**figure 33**).

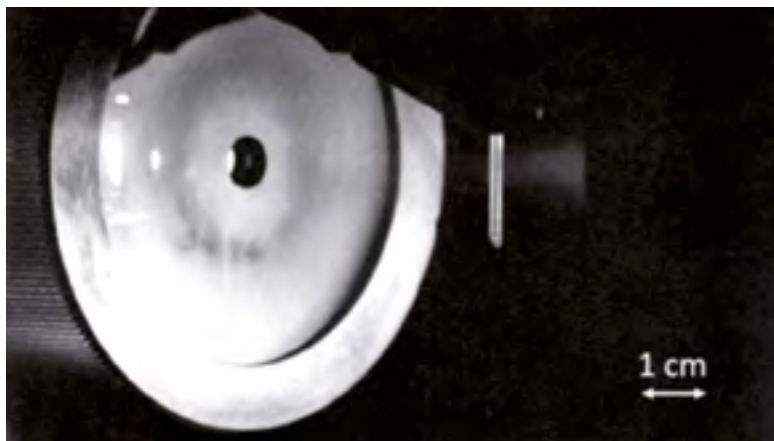


Figure 33 | Lentille plan-asphérique en position pour irradier un bâtonnet de deutérium solide. © CEA.

22. DU DEUTÉRIUM À L'ÉTAT SOLIDE

En raison des ambitions thermonucléaires, il convenait d'irradier des cibles riches en isotopes lourds de l'hydrogène. Conséquence heureuse de la pluridisciplinarité du service de physique générale où les techniques de réfrigération jusqu'à la température de l'hélium liquide étaient pratiquées pour des études de supraconducteurs menées par Jean Solé, le choix s'était porté sur le deutérium solide. Mais le pari était osé. Allait-on obtenir un solide avec des surfaces planes bien définies en vue de l'interaction ? Quel serait son comportement sous vide ?

En l'occurrence, Dame Nature se montra plutôt bonne fille. La méthode adoptée était simple : d'abord condensation du gaz dans un cryostat, solidification puis extrusion par le fond à travers une ouverture de section carrée, la pression étant exercée par un piston enfoncé manuellement au moyen d'une vis. Ce dispositif était superposé à une chambre d'interaction où régnait un vide secondaire. Le

point de focalisation ne pouvait être éloigné de plus d'un centimètre du « nez » de la filière. Les contraintes étaient donc sévères pour un ensemble où devaient cohabiter de très basses et de très hautes températures : les quelques degrés Kelvin de l'hélium liquide du cryostat et les millions de degrés du plasma d'interaction, celui-ci heureusement très localisé et transitoire.

L'appareil imaginé et construit à Physique générale (**figures 34 et 35**) donna du premier coup d'excellents résultats. Sans être tout à fait comparable à du dentifrice, le deutérium solide s'avéra suffisamment plastique pour être extrudé mais assez rigide pour garder sa forme sous vide en attendant le tir laser. Obtenir des glaçons bien droits relevait du tour de main que longtemps Jean-Luc Bocher fut le seul à posséder.

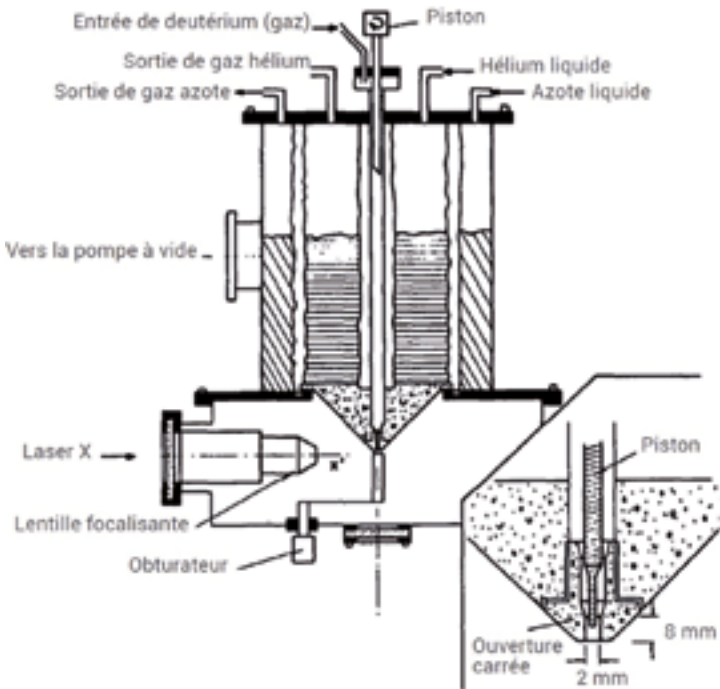


Figure 34 | Schéma du cryostat et de la filière d'extrusion. © CEA.

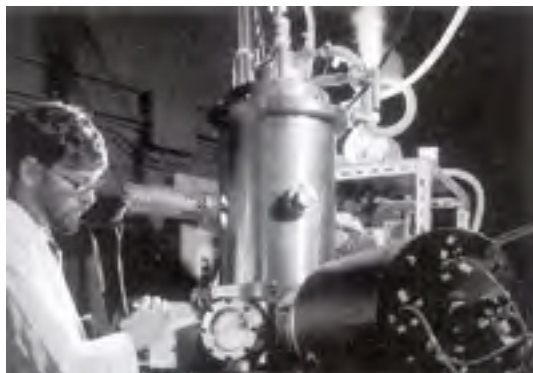


Figure 35 | La chambre d'interaction et le cryostat qui lui est superposé (l'opérateur est Jean-Luc Bocher). © CEA.

Dans une version ultérieure, on automatisa cette procédure de fabrication du glaçon, éliminant du coup le facteur personnel. Dernier perfectionnement : le découpage du glaçon de façon à en détacher un fragment. Tombant en chute libre, le granule interceptait deux faisceaux laser continus, produisant ainsi les signaux nécessaires pour commander l'irradiation en vol par le laser de puissance (**figure 36**).

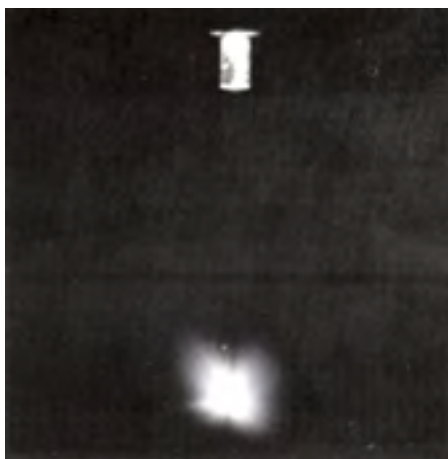


Figure 36 | Irradiation par plusieurs faisceaux laser d'un granule de deutérium en chute libre. © CEA.

23. NOUVELLES DE MOSCOU

En 1968, année restée dans les mémoires pour d'autres raisons, de faibles émissions de neutrons, peu reproductibles, avaient été annoncées par des chercheurs de l'Institut Lebedev à Moscou. Ce résultat fit l'objet d'une communication de dernière heure à la Conférence d'électronique quantique de Miami (au mois de mai !) et dans la foulée, d'une lettre au JETP. Sous la direction de l'incontournable Nicolai Basov, une équipe de cet institut avait détecté des neutrons en irradiant des cibles deutérées avec des impulsions picosecondes produites par un laser à verre au néodyme.

Le recours à ce type de laser était surprenant mais compréhensible *a posteriori*. Sachant que les hautes températures de plasma requièrent une puissance élevée, l'amplification d'impulsions picoseconde tout juste inventées était apparue aux yeux de spécialistes de l'électronique quantique comme le moyen le plus rapide d'obtenir le résultat cherché.

Leur installation comportait un oscillateur, bloqué en phase grâce à une cellule à absorbant saturable qui permet d'obtenir un train d'impulsions de la forme illustrée par la **figure 31**. Ces impulsions ayant chacune une durée d'environ 10^{-11} s étaient séparées par 7 ou 8 ns. Il était possible d'en isoler une à l'aide d'un obturateur électro-optique (cellule de Kerr) pour l'amplifier ensuite à travers une chaîne composée de 4 barreaux de verre dopé au néodyme. L'énergie à la sortie pouvait atteindre 20 J mais fluctuait beaucoup d'un tir à l'autre.

D'après ce qui en a été publié, le dispositif expérimental d'interaction était minimaliste (**figure 37**). La cellule d'interaction était de taille modeste : un cylindre de hauteur un peu supérieure à la longueur focale de la lentille qui obturait une de ses extrémités. La cible en deutéride de lithium (DLi) était située au foyer de la lentille. Un vide primaire régnait à l'intérieur du cylindre.

En plus d'une mesure de l'énergie de l'impulsion laser, la détection des neutrons était apparemment le seul diagnostic. Elle se faisait à l'aide d'un scintillateur plastique de grand diamètre enrobé d'une

coque d'aluminium et disposé à proximité de la cellule mais en laissant la possibilité d'interposer un mur en briques de plomb.

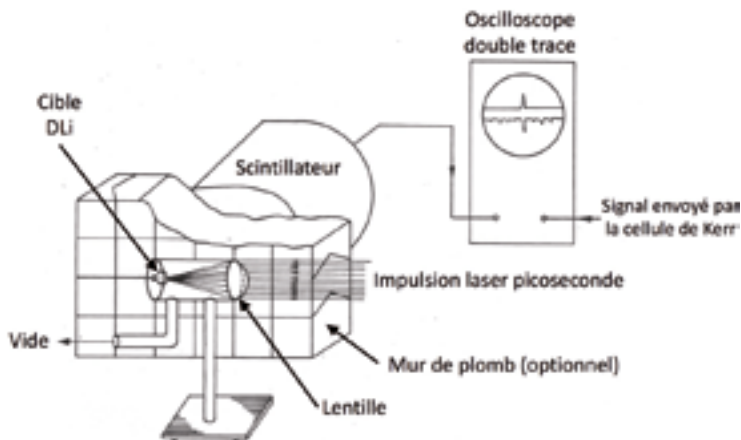


Figure 37 | Schéma de l'expérience russe de 1968.

NEUTRONIQUE À LA MOSCOVITE

Les physiciens de l'Institut Lebedev, *a priori* peu familiers de l'instrumentation nucléaire, avaient mis en œuvre une méthode simple et originale pour s'assurer de l'origine des neutrons éventuellement détectés. Le signal issu du scintillateur était envoyé sur l'une des voies d'un oscilloscope double trace, l'autre recevant une impulsion correspondant à l'ouverture de la cellule de Kerr. La plage de lecture était de l'ordre de la microseconde pour s'affranchir de l'erraticité du système de commande. L'efficacité de détection annoncée était assez grande et sans doute optimiste : au moins 10 % des neutrons émis par le plasma devaient atteindre le compteur. Dans les cas retenus comme positifs, un pic était observé sur la trace correspondant aux neutrons qui devait coïncider temporellement avec le pic indiquant le déclenchement de l'obturateur. Un éventuel pic sans coïncidence était attribué au rayonnement cosmique. Cet appareillage avait été testé à l'aide d'un générateur de neutrons par laser représenté sur la **figure 38**.

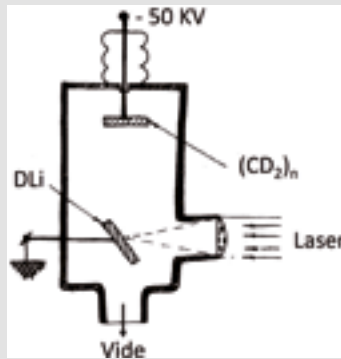


Figure 38 | Source de neutrons de référence utilisée à l'Institut Lebedev.

Dans cette source, les ions, créés par l'impact d'une impulsion laser focalisée sur une cible en deutériure de lithium reliée à la masse, étaient accélérés vers une électrode revêtue de plastique deutéré porté à un potentiel négatif suffisant pour obtenir des réactions DD. La bouffée de neutrons ainsi produite se traduisait par un signal en coïncidence temporelle avec celui venant de la commande de la cellule de Kerr.

Dans l'expérience de recherche de neutrons émis au cours de l'interaction, l'énergie laser variait de façon aléatoire entre 5 et 25 J. Au cours des essais qui ont donné des signaux sur les détecteurs de neutrons, certains pics sont apparus en coïncidence avec le témoin de l'ouverture de la cellule, d'autres non qui furent attribués au rayonnement cosmique. Le tableau suivant résume les résultats obtenus, du printemps 1968 jusqu'au printemps 1969, en plusieurs séries de 5 à 10 tirs chacune en faisant pivoter la cible de façon à ce que le faisceau laser soit focalisé sur une partie non encore irradiée de sa surface.

Série	Nombre de tirs d'énergie supérieure à 6 joules	Nombre de coïncidences	Écran de plomb
1	8	1	Non
2	6	3	Non
3	6	2	Oui
4	15	4	Oui

Les physiciens soviétiques avaient calculé que la température moyenne du plasma devait être de l'ordre de 30 millions de degrés mais aucune mesure de cette température n'avait pu être réalisée. Les puissances mises en jeu dans cette expérience étaient considérables, de l'ordre de 1 à $2 \cdot 10^{12}$ watts (térawatt), ce qui a entraîné une dégradation rapide du matériau actif, le verre au néodyme, de leur chaîne amplificatrice qui ne comportait pas de dispositif anti-retour. Les essais en conséquence n'ont pas été poursuivis au-delà de ces premières campagnes de tir.

24. LES NEUTRONS QUI VENAIENT DU FROID

À Limeil, les lasers de puissance étaient protégés des retours destructeurs. La préparation de bonnes cibles en deutérium étant assurée, les expériences d'interaction ont pu se dérouler de façon très méthodique sous la responsabilité de Francis Flux. Elles étaient, à la fin de 1968, à la pointe de la physique et de la technique. Les mesures de la température du plasma en fonction de l'intensité laser laissaient espérer des réactions thermonucléaires deutérium-deutérium (DD), aisément identifiables grâce aux neutrons de 2,45 MeV. On apporta au laser les améliorations nécessaires pour les obtenir en passant de L-4 à L-5, la plus importante étant le découpage de l'impulsion afin d'en raidir le front de montée et d'en abrégier la durée (**figure 39**).

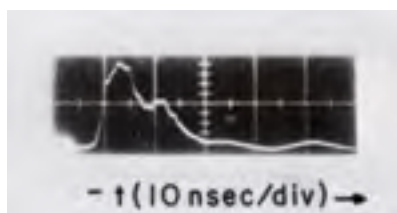


Figure 39 | Impulsion du laser L-5 en 1969. La puissance maximale en sortie de chaîne atteignait 4 GW. © CEA.

La détection des neutrons bénéficia de la pluridisciplinarité du service de physique générale. La proximité était grande avec les physiciens nucléaires locaux et les échanges en étaient facilités d'autant. Or

ils avaient réalisé des détecteurs tout à fait adaptés à des recherches impliquant des émissions de neutrons par bouffées. C'étaient d'abord des scintillateurs plastiques d'assez grand volume pour suivre dans le temps, avec une résolution comparable à celle d'autres diagnostics, l'évolution d'une émission neutronique. Grâce à cette instrumentation, on attendait les neutrons de pied ferme.

Il fallut patienter jusqu'au début de l'été 1969. J'étais dans mon bureau quand le téléphone sonna. On me demanda de descendre au labo d'urgence car les scintillateurs venaient de produire des signaux. En raison d'une expérience acquise dans d'autres contextes, j'étais sinon le seul du moins l'un des rares parmi les physiciens des plasmas à savoir reconnaître une éventuelle signature de neutrons si tel était bien le cas. Une fois sur place, je n'eus aucun doute. Les brefs pics de même amplitude dus à l'émission d'un gamma de capture marquant la fin du ralentissement des neutrons dans le scintillateur étaient bien là. Le signal présentait un pic contemporain de l'impulsion laser suivi d'une queue correspondant à des neutrons diffusés par les équipements et/ou réfléchis par les parois de la casemate aux dimensions restreintes où était installée l'expérience.

En plaçant le scintillateur à des distances différentes de la source il était possible de vérifier par temps de vol l'énergie attendue des neutrons créés par la réaction deutérium-deutérium. Mais ces détecteurs ne permettaient pas d'évaluer convenablement le nombre de neutrons produits. Pour cela, il fallait disposer d'autres compteurs. Les physiciens nucléaires en avaient sous la main.

DES DÉTECTEURS EN FORME DE BOMBARDES

Conçus et réalisés localement, ils étaient d'un modèle que je crois original, du moins par leur aspect. Un long tube Geiger-Müller contenant du tri fluorure de Bore était placé suivant l'axe d'un bloc de paraffine enfermé dans une enveloppe métallique. Vu de l'extérieur, l'objet se présentait sous la forme d'un cylindre d'un bon mètre de long et de 40 centimètres de diamètre, orientable dans un plan vertical et

...

...
 monté sur une plateforme à roulettes. L'aspect assez primitif de la chose lui valut son surnom de *bombarde*. Il existait deux détecteurs du type qui vient d'être décrit plus un troisième équipé, pour accroître la sensibilité, de trois tubes à BF_3 disposés en faisceau autour de l'axe. Chaque neutron, ralenti dans la paraffine puis capturé dans le BF_3 , où il provoque l'émission d'une particule alpha, est à l'origine d'une impulsion de courant enregistrée par une échelle de comptage ou envoyée sur un oscillographe. Une fois effectuées les corrections de temps mort et d'absorption dans la paraffine, un rapport d'angles solides un peu délicat conduisait à une évaluation tout à fait correcte du nombre de neutrons émis lors d'un tir dans le deutérium solide.

Contrairement à ce qui s'était passé chez les Russes, cette émission était abondante et reproductible. Ce résultat fut placé sous embargo le temps qu'une étude systématique menée par Francis Floux dans le cadre d'une campagne de vérifications qui dura une bonne partie de l'été, montre de façon indiscutable que cette émission était contrôlable en réglant l'intensité du rayonnement laser reçu par la cible. À la fin du mois d'août, les certitudes étaient acquises : des neutrons étaient produits dans des conditions prévisibles et reproductibles en irradiant du deutérium solide avec les impulsions nanoseconde à front raidi de L-5.

25. APRÈS LE FROID, LE SHOW

Les hautes sphères du CEA furent aussitôt avisées de ces résultats et réagirent sans délai. Annonce fut faite « *urbi et orbi* » par l'intermédiaire d'un communiqué à l'Agence France-Presse (cf. **annexe 3**). Une note à l'Académie des sciences, transmise par le Haut-Commissaire Francis Perrin, était également prévue. Le retentissement hexagonal fut suffisamment grand pour obliger de réunir en toute hâte une conférence de presse à Limeil même.

Je découvris ce remue-ménage en rentrant des États-Unis après la conférence Gordon qui s'était tenue dans les environs de Seattle à

la fin du mois d'août 1969 (cf. **paragraphe 32**). J'eus juste le temps de tempérer le triomphalisme un peu naïf de la note à l'Académie. Et devant un commencement de fièvre médiatique qui me parut malsain, je pus seulement obtenir que le point de presse (accompagné d'un buffet !) n'ait pas lieu avant la présentation à l'Académie programmée pour le lundi 15 septembre. Il se tint le même jour en fin d'après-midi. Jean Viard, futur directeur des applications militaires alors chargé des recherches au niveau des décideurs de la DAM, en fut le maître de cérémonie.

Quelle aubaine ! Un centre militaire du CEA s'ouvrait aux journalistes qui, connus ou obscurs, vinrent en foule. Les hiérarchies du CEA de la DRME et de la CGE étaient là aussi, en nombre très supérieur à celui des scientifiques impliqués. On put tirer de ces contacts quelques enseignements dont le premier était la haute idée que les vedettes de la presse et des médias ont d'elles-mêmes. Que d'obscurs chercheurs doivent le respect à tel grand chroniqueur ne faisait aucun doute dans l'esprit de ce dernier qui écrivait dans un quotidien du soir.

Tous les visiteurs eurent droit, par groupes, à une démonstration de tir laser. Afin que l'ensemble des présents autour de la chambre d'interaction puisse voir l'expérience, les opticiens avaient formé sur un écran, au moyen d'une lentille, une image agrandie mais renversée du glaçon de deutérium pendu à son porte-cible (**figure 40**). La lecture des quotidiens du lendemain réserva une belle surprise : les représentants de la presse avaient reçu une photo où le sens vertical n'était pas précisé. Ils ont reproduit ce qu'ils avaient vu : une image sens dessus dessous. Allez dire après cela qu'ils ne sont pas objectifs ! Il en alla de même pour la couverture de revues scientifiques des mois suivants. Ainsi naissent les légendes (**figure 41**)...

C'était là une autre leçon de cette rencontre avec la presse : une information ou une image lâchée dans les médias échappe rapidement à tout contrôle. Des années plus tard, la jaquette du livre d'Orazio Svelto, *Principles of Lasers*, exhibait encore le symbole phallique du

glaçon de deutérium dressé sur un piédestal pour recevoir l'impact du faisceau laser.

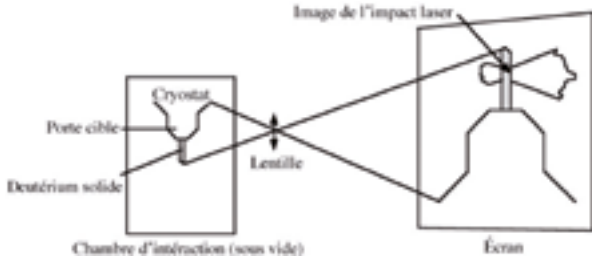


Figure 40 | Dispositif de visualisation pour visiteurs. Il produit une image agrandie mais renversée.



Figure 41 | Le bâtonnet de deutérium dressé sur un piédestal est entré dans la légende. © Palais de la Découverte & Plenum.

Seule exception, *Sciences et Avenir* mit le bâtonnet de deutérium dans le bon sens à la fin de 1969 et fit de même dans un numéro spécial de 1970 consacré au laser. Une réunion avec François de Closets au siège du CEA avait été l'occasion de remettre les choses à l'endroit. Ironie sans doute involontaire, l'image est bien en quatrième de

couverture du numéro de décembre 1969, mais la une porte ce gros titre : « *Les illusions d'optique* ».

En ce qui concerne la communication purement scientifique, il y eut un avatar supplémentaire. Avec Francis Floux, nous avons préparé une version en anglais, légèrement étoffée, de la note à l'Académie des sciences. Soumise aux *Physical Review Letters*, elle nous fut renvoyée au motif que la proclamation des résultats avait déjà été faite au cours de la conférence de presse et dans les comptes rendus de l'Académie. Toutefois, la lettre de refus ouvrait la porte à une publication dans la *Physical Review* qui ne posa aucun problème. L'article parut dans le numéro de mars 1970. La date de réception mentionnée est celle de la soumission aux *PRL*.

Si elle eut une bonne couverture médiatique, l'annonce des émissions de neutrons n'eut pas l'effet escompté par les initiateurs de la conférence de presse. Après le « non » au référendum du 27 avril 1969, le général de Gaulle avait quitté le pouvoir et les nouveaux gouvernants, se souciant peu de science, se montrèrent indifférents, au grand dam sans doute de certains.

L'événement du 15 septembre conféra aux auteurs de la publication une certaine forme de vedettariat. Ce fut pour plusieurs d'entre nous le quart d'heure warholien. Il fallut continuer de jouer les guides touristiques dans les salles de manips, de rencontrer des journalistes, de répondre à des interviews dont une en anglais par téléphone (rude exercice quand on est cueilli à froid) avec Gloria Lubkin éditorialiste et future rédactrice en chef de la revue de l'*American Institute of Physics* (AIP) *Physics Today*... Quelque temps plus tard, le jour où Nicolai Basov, de passage en France, visita le Centre de Limeil, on refit devant lui l'expérience qui produisit un nombre de neutrons exceptionnellement élevé.

L'émission des neutrons fit l'objet de nombreux articles et rapports. Elle aurait pu être le chant du cygne du laser L-5. Mais l'exploitation de ce laser continua pour des expériences d'interaction un peu plus fondamentales. À la mise en service de C-6, les neutrons furent au rendez-vous du premier tir d'essai sur glaçon de deutérium.

5

Nouvelle donne

26. RUMEURS ET CHUCHOTEMENTS

En 1967, les recherches théoriques menées à Limeil sur les explosions thermonucléaires avaient abouti. Le mérite en revenait principalement à Michel Carayol, un ingénieur de l'armement détaché au CEA. Du point de vue de l'arsenal nucléaire, après les essais réussis en 1968 sur le champ de tir du Pacifique, la France était enfin parvenue au niveau des autres membres permanents du Conseil de sécurité des Nations unies. Une nouvelle catégorie de secret, spécifique et plus sévère que l'habituel secret défense, fut instituée. Il y eut comme une barrière psychologique bien étanche entre une minorité d'initiés aux arcanes des idées qui avaient conduit à la solution et la majorité des personnels du CEA-DAM, tout juste autorisée à savoir qu'« on » avait trouvé.

Cette nouvelle situation n'eut aucune conséquence immédiate pour les programmes de recherches sur l'interaction laser. Ils continuèrent pendant plusieurs années d'être totalement déconnectés des problèmes de physique des armes, non qu'ils eussent pu y contribuer

en quoi que ce soit sur le plan des concepts, mais pour profiter de certains acquis, en particulier dans le domaine de la simulation numérique.

Sur un plan moins sensible, la rumeur, fondée ou non, se propageait assez facilement au sein de la communauté internationale de l'interaction laser. C'est ainsi que Limeil fut crédité de la production d'ions uranium 60 fois chargés, et en 1969, avant les communiqués officiels, de la détection de neutrons.

Pendant l'année 1970, une nouvelle étonnante circula, entretenue par des fuites que l'on sentait calculées : un laboratoire privé implanté à Ann Arbor dans le Michigan, KMS-Fusion, prétendait détenir le moyen de commercialiser à bref délai la fusion par laser. Mais rien n'était révélé de la façon de s'y prendre. Le nom de Keith Brueckner, physicien théoricien réputé, professeur sur l'un des plus récents campus de l'université de Californie, celui de La Jolla près de San Diego, était associé à cette information.

À l'automne de 1970, j'avais été invité à présenter en séance semi-plénière, rare privilège pour un étranger, les résultats obtenus à Limeil sur l'interaction laser et les émissions neutroniques lors de la réunion de la division Plasma de l'APS qui cette année-là se tenait dans la capitale Washington DC. Les rumeurs sur KMS couraient comme attendu et Peter Hammerling, un proche de Brueckner qui avait pris contact avec moi dans les couloirs, ne fit que confirmer l'existence de projets mirifiques portés par la compagnie sans m'en dire plus sinon que son patron, l'universitaire doublé d'un entrepreneur Keeve M. (Kip) Siegel, se livrait à un intense lobbying auprès du Congrès.

Comme on le sut plus tard, il se passait en coulisses le prélude à une confrontation avec l'AEC donc directement ou indirectement avec Livermore dont on ne connaissait jusqu'alors les programmes que par de rares communications, parfaitement anodines d'un point de vue de secret-défense, de Ray Kidder et de ses collaborateurs. L'amplificateur à disques, unique exemplaire sur une seule chaîne laser, a déjà été cité. Lorsqu'au mois de mai 1968 je rencontrai Kidder

à Livermore sans pénétrer plus loin que la salle de restaurant, il fut surtout question de ces instabilités dans l'interaction laser plasma dont un aspect expérimental sera décrit dans le chapitre suivant. C'était alors un sujet émergent abordé surtout par des théoriciens. Kidder était en train d'y travailler sérieusement et se proposait de l'inclure dans une synthèse destinée à une école d'été.

27. 1971-1972 : UN COIN DU VOILE EST LEVÉ

À Limeil, la fusion n'avait jamais cessé d'être présente à l'esprit des chercheurs occupés à décrypter l'interaction laser-plasma. Pour l'irradiation de sphères, on y hésita entre 6 ou 8 faisceaux lasers avant de projeter C-6 puis Octal. Mais, faute de partages de connaissances avec les concepteurs d'armes, le point crucial d'une forte compression du combustible thermonucléaire nous échappait complètement. Les neutrons obtenus depuis 1969, provenaient soit de la partie du solide, atteinte par une onde de chaleur, soit du panache de plasma peu dense mais très chaud qui s'échappait de la cible. Cette dernière possibilité suggéra une idée de générateur à fusion basé sur la canalisation du panache au moyen d'un champ magnétique de façon à conserver un écoulement monodimensionnel pendant le temps nécessaire à satisfaire au critère de Lawson. Cette étude menée avec Denis Colombant, un diplômé des Arts et Métiers et docteur du MIT venu à Limeil au titre de scientifique du contingent, et Gianfranco Tonon donna lieu à une prise de brevet. En même temps, le confinement et le chauffage d'une petite sphère sous l'effet d'un rayonnement laser étaient toujours d'actualité. C-6, avec ses six chaînes pour une irradiation symétrique suivant les axes des faces d'un cube, avait été conçu et construit dans ce but.

Mais, à l'été 1971, participant à la conférence de l'AIEA sur la fusion à Madison (Wisconsin), j'avais appris par James Shearer, un collaborateur de Kidder, que des bouleversements se préparaient à Livermore. Signe avant-coureur, John Emmett dont j'avais fait la connaissance au cours d'une visite au NRL de Washington où il était

alors en poste, venait d'être recruté pour lancer sur de nouvelles bases un programme de fusion par laser. Tout s'éclaira lorsqu'Emmett rendit visite à Limeil au début de l'année 1972. Il me remit ce jour-là une copie d'un document rédigé par Lowell Wood et John Nuckolls, où en termes sibyllins était décrite une méthode de compression de cibles jusqu'à des densités de l'ordre de 10 000 fois celle du liquide, assorties de températures propres à initier une micro-explosion thermonucléaire.

C'était la première fois que j'entendais le nom de John Nuckolls. Ce ne serait pas la dernière et je n'étais vraisemblablement pas le seul, en dehors de Livermore et de l'AEC, à découvrir son existence. Emmett semblait faire grand cas de ce spécialiste des phénomènes thermonucléaires, resté jusqu'alors dans l'ombre, ou plus exactement, dans la partie immergée de l'iceberg ce qui s'accordait bien semble-t-il à son caractère froid et distant. Entré à Livermore en 1955 après un diplôme obtenu à l'université Columbia, il avait fait sur ordinateur un certain nombre de travaux dont des calculs relatifs à une centrale électrique souterraine utilisant comme source primaire d'énergie une succession de petites explosions thermonucléaires. Grâce à des concepts comme la mise en forme de la pression appliquée ou l'inflammation par point chaud central, il avait montré, informatique de l'époque à l'appui, que la masse de combustible pouvait être abaissée jusqu'à 1 mg. Un tel ordre de grandeur laissait prévoir la possibilité d'utiliser les lasers à impulsions géantes en escomptant évidemment une sérieuse extrapolation de leurs performances.

En 1972, John Nuckolls fit une entrée fracassante dans la communauté de l'interaction laser avec son compère Lowell Wood. Ce dernier est une personnalité singulière. Titulaire d'un doctorat en astrophysique, cet autre protégé d'Edward Teller avait été recruté à Livermore en 1969. Il participait à la conception et à la mise en forme de tous les projets un peu novateurs voire, exotiques. Bon connaisseur et utilisateur de l'outil informatique, il avait racheté (à très bas prix comme surplus) l'ordinateur « IBM Stretch » du

centre, devenu obsolète, pour l'installer dans la grange de la ferme où il vivait en pleine campagne californienne. C'était bien avant les ordinateurs personnels qui sous un petit volume font aussi bien sinon mieux que ces énormes machines. Plus tard, sous la présidence de Ronald Reagan, il fut un protagoniste majeur de l'Initiative de défense stratégique, plus connue sous le nom de « guerre des étoiles », ce qui lui valut dans certains milieux le surnom peu flatteur de « *Doctor Evil* » que l'on pourrait traduire en français courant par : « le maléfique ». Parvenu à l'âge de la retraite, il poursuit près de Seattle une carrière d'inventeur en cheville avec Bill Gates. Il intervient dans une multitude de domaines qui vont du casque anti-commotion pour sportifs jusqu'au politiquement incorrect génie climatique (« *geo engineering* ») visant à atténuer par des technologies appropriées le réchauffement planétaire. Très imaginatif, il comptabilise à ce jour plus de brevets d'invention que le grand Thomas Edison.

Je fis en sorte que le texte de Wood et Nuckolls qui m'avait été remis fut largement diffusé. Au passage, j'avais détecté dans un propos d'Emmett sur une croissance plus rapide qu'exponentielle, l'approche d'une singularité (**figure 42**) dans la loi de pression appliquée à une microbille qu'une mise en forme adéquate d'une impulsion laser irradiant la surface externe permettait effectivement d'approcher.

La première réaction à la DAM appartient à un archétype popularisé par une célèbre série policière qui faisait les beaux jours des rares chaînes de télévision de l'époque : « *bon sang mais c'est bien sûr !* ». Que n'y avions-nous pensé plus tôt ? Les connaissances étaient là, les moyens de calcul aussi, mais le cloisonnement entre unités comme le secret spécifique touchant le domaine thermonucléaire, respecté avec la plus grande rigueur au sein de l'organisme, avaient empêché que jaillisse l'étincelle. Avec le recul du temps, ce n'était pas si simple. On en sait maintenant beaucoup plus sur le processus de maturation qui a caractérisé le programme de Livermore et accessoirement sur la naissance de KMS fusion.



Figure 42 | Réaction personnelle. Source : dessin de l'auteur.

28. SURCOMPRESSIONS ET DÉCLASSIFICATION

L'innovation majeure contenue dans les communications en provenance de Livermore ou de KMS résidait dans les compressions excessivement élevées, un facteur 10 000 par rapport à l'état liquide, grâce auxquelles l'énergie laser nécessaire se réduisait, selon les informations publiées, à une valeur comprise entre un kilojoule et quelques dizaines de kilojoules, performance réalisable à court terme à partir de techniques éprouvées.

Selon Nuckolls cette idée était l'aboutissement d'une démarche qu'il a résumée de façon lapidaire par : « *des mégatonnes au mégajoule* ». Il donne un historique assez détaillé de ses contributions et de celles de ses collègues de Livermore, dans ICF : HAP. Une succession d'expériences numériques menées dès le dernier tiers des années 1950 visait à déterminer les conditions nécessaires à l'explosion thermonucléaire

de masses de deutérium-tritium inférieures au gramme, si possible sans recours à la fission. Cette recherche poursuivie malgré des interruptions dues à des programmes prioritaires avait permis de dégager quelques lignes de force : la nécessité d'une compression d'autant plus élevée que la masse à traiter est petite, la programmation adéquate de la pression à appliquer sur la boule à imploser, l'allumage de la réaction à partir d'un point chaud central.

En septembre 1961, donc peu après l'invention du laser, John Nuckolls adressa un mémo à John Foster, son directeur de centre, pour proposer un moteur thermonucléaire. Il y écrivait : « *l'idée est... de réaliser la fusion par un procédé analogue au cycle des moteurs à combustion interne. Du DT ou du D brûle dans une série de micro-explosions confinées... Un système laser serait ici particulièrement avantageux car l'énergie serait aisément transférée... à un granule de DT afin de provoquer directement une implosion sans intermédiaire... Le calcul montre la faisabilité du procédé pour un granule de DT de quelques milligrammes... Les applications possibles sont la production d'électricité (projet Sherwood¹⁷) ou la propulsion de fusées (projet fusion Rover).* » Il reconnaît dans son récit qu'une telle proposition pouvait aisément passer pour de la science-fiction. En plus, elle arrivait au plus mauvais moment. Un regain de tensions dans les relations internationales imposait de travailler sur d'autres sujets et par ailleurs, la communauté scientifique n'en était qu'aux premiers balbutiements des technologies laser.

Pendant le reste des années 1960, la fusion par laser tint à Livermore une place semble-t-il assez réduite. Kidder et ses collaborateurs menaient des études de laser originales comme la réalisation d'un amplificateur à disques, et des expériences d'interaction semblables à ce qui se pratiquait dans d'autres laboratoires en plus de calculs d'implosion qui restaient couverts par le secret contrairement à leurs autres activités. Mais vers la fin de la décennie, reprenant des

17. Nom de code des recherches sur la fusion contrôlée, au départ secrètes, menées à l'époque aux États-Unis sous l'égide de l'AEC.

calculs de micro-implosions, Nuckolls profita des avancées concrétisées entre-temps dans les domaines connexes des ordinateurs et des simulations numériques. George Zimmerman physicien expert en informatique avait commencé d'élaborer un code appelé d'abord LASNIX (nom changé quelque temps plus tard en LASNEX pour d'obscures raisons). Très détaillé, bidimensionnel, incluant beaucoup de physique, ce code aux sorties graphiques spectaculaires pour l'époque permit d'obtenir des films d'animation décrivant comment des impulsions lasers judicieusement programmées dans le temps conduisaient, en impactant directement des micro-sphères de deutérium-tritium, aux conditions de la combustion thermonucléaire. Les performances demandées au laser étaient en accord avec des avancées prévisibles de la technologie. Nuckolls milita dès lors avec succès pour le lancement d'un projet expérimental ambitieux qui devait démarrer en 1972 sous la direction musclée de John Emmett.

Lors de la visite de celui-ci à Limeil, une levée partielle du secret, « *déclassification* » en jargon professionnel, était en cours à Livermore sous le contrôle sourcilieux de l'AEC. Gloria Lubkin, toujours bien informée, avait reconstitué dans le numéro d'août 1972 de *Physics Today*, la chronologie, étalée sur quelques mois, de ces révélations.

Elles commencèrent en novembre 1971 lorsque Robert L. Hirsch, alors à la division « Recherche » de l'AEC, déclara publiquement devant le *Joint Congressional Committee on Atomic Energy* qu'en plus de chauffer un plasma, le laser pouvait aussi servir à provoquer une implosion. À peu près en même temps, lors de la réunion annuelle de la division Plasma de l'APS, John Nuckolls et Lowell Wood présentaient une communication de dernière minute (« *post deadline paper* »). Elle ne figurait donc pas au programme, diffusé à l'avance, de cette conférence. Du coup, il est difficile d'en trouver la trace dans les documents publiés par la société. Tout aussi discrète autant qu'avare de détails une seconde présentation, plus philosophique et à laquelle correspondait le manuscrit que j'avais entre les mains, fut faite à la toute fin décembre dans le cadre d'un symposium de

l'American Association for the Advancement of Science. Une version du texte, expurgée et englobée dans un cadre plus général, apparut l'année suivante sous le titre « *Fusion Power* » dans la revue *Environment*. Difficile de mieux faire subrepticement pendant que selon Nuckolls (ICF : HAP) des tractations étaient en cours entre physiciens et représentants de l'AEC pour déterminer ce qui était publiable et comment.

Sur le moment, cette communication en sourdine passa complètement inaperçue. Aucune information ne me parvint à l'automne de 1971, alors qu'à l'invitation de la Société japonaise pour la promotion de la science, je séjournais pour quelques mois à l'université d'Osaka dans le laboratoire de Chiyoe Yamanaka. Mes interlocuteurs japonais, pourtant à l'affût de tout ce qui venait des États-Unis, n'étaient pas plus au courant.

La succession des événements reprit en avril 1972. Brueckner alors vice-président de KMS-Fusion, exposa, avec l'assentiment de l'AEC mais sans grand tapage semble-t-il, le résultat de ses calculs au cours d'un séminaire tenu devant l'université du Michigan à Ann Arbor.

C'est à la Conférence internationale d'électronique quantique, organisée en mai 1972 à Montréal, que furent dévoilés, plus officiellement et en grande pompe, les principes et les résultats de calculs numériques d'implosion de microsphères de DT soumises directement à l'impact d'impulsions laser optimisées, configuration qui ne trahissait aucun secret d'État. Ainsi une couronne de plasma absorbant l'énergie laser se trouve être le siège de hautes pressions entraînant la compression du cœur de la cible à la faveur d'un effet fusée.

Edward Teller en personne avait fait le déplacement. Il avait présenté un exposé introductif très général, reprenant avec juste raison la comparaison de cette conception de la fusion nucléaire par laser avec le fonctionnement d'un moteur à combustion interne, ouvrant quelques perspectives pour la fusion nucléaire et la propulsion spatiale et laissant à d'autres le soin d'entrer dans plus de détails. Ce que firent Nuckolls et Wood ainsi que Georges Zimmerman,

créateur du code numérique appelé alors LASNIX, et Ron Thiessen autre spécialiste de la simulation sur ordinateur. Ray Kidder qui présidait la séance en livre dans son interview à l'AIP un récit assez confus mais où de vieilles rancunes remontent à la surface. Il eut en effet le sentiment de s'être fait piéger. Nuckolls et ses collaborateurs s'étaient bien gardés de lui communiquer à l'avance la substance de leurs communications. En plus de l'aspect Barnum, il fut effaré par une physique de l'interaction irréaliste faisant complètement abstraction d'effets délétères sur lesquels il avait travaillé pendant des années. Mais il se retint de contrer publiquement ses collègues, surtout en présence de Teller dont ils étaient les affidés.

Il est possible que la version critiquable présentée par Nuckolls et ses coauteurs (cf. **chapitre 7**) ait été retenue à la fois pour ne pas pousser la déclassification jusqu'à des révélations sur des sujets par trop sensibles et pour ne pas effrayer les investisseurs fussent-ils, dans ce cas, publics. Annoncer 2 mégajoules d'énergie de fusion obtenus à partir de 50 kilojoules seulement d'énergie laser avait en effet de quoi séduire les décideurs. La fusion contrôlée par laser semblait à portée d'un effort de développement raisonnable sur le plan technique comme sur le plan financier. En marge de la conférence, il y eut un point presse, histoire de donner un peu de retentissement médiatique à l'événement. De solides articles scientifiques appelés à faire date et servir de référence parurent dans la foulée.

Les circonstances avaient précipité la déclassification car des querelles de priorité menaçaient de survenir. D'abord, vu de l'extérieur, on avait la quasi-certitude que Brueckner et KMS-Fusion avaient dans leurs cartons des projets élaborés à partir d'idées de base semblables à celles de Livermore. Rendus publics, ils ne manqueraient pas de soulever des problèmes de paternité en plus d'éventuelles entorses au secret. Cette compétition interne aux États-Unis fait l'objet de l'analyse d'Alex Wellerstein qui insiste sur l'affrontement entre scientifiques et entrepreneurs d'une part et gardiens du temple de la raison d'État d'autre part.

Ensuite et surtout, le monde n'était pas encore sorti de la guerre froide : une alerte était venue d'une présentation faite par Nicolai Basov en Grande-Bretagne à Hull en septembre 1971 dans le cadre d'une conférence européenne. D'après le compte rendu paru en 1972 dans les *JETP Letters* et repris dans les LIRPP (volume 3B, cf. **paragraphe 32**) il y était explicitement question de neutrons détectés lors d'expériences d'irradiation de billes de polyéthylène deutéré en géométrie sphérique. Les faisceaux laser étaient au nombre de 9 obtenus par des divisions successives à partir d'un tronc commun dans une configuration assez complexe pour égaliser les temps de transit de façon à obtenir une arrivée simultanée des impulsions sur la cible. On comprend que trois tirs seulement ont produit des neutrons observés par des scintillateurs placés à diverses distances de la cible pour une confirmation par les temps de vol. Leur nombre évalué au moyen de plaques photographiques recouvertes d'émulsions sensibles aux protons de recul était au total de l'ordre de 10^7 , soit $3 \cdot 10^6$ par tir. Mais les auteurs insistaient sur le caractère peu reproductible de leurs essais. Ils faisaient aussi état d'un soupçon de compression. C'était suffisant pour sonner l'alarme outre-Atlantique. Kidder (ICF : HAP) cite cet extrait de Newsweek du 31 janvier 1972 qui a tout d'une fuite calculée : « *D'après Lowell Wood et John Nuckolls du Lawrence Livermore Laboratory, l'équipe de Basov va probablement atteindre dans l'année qui vient ce qu'on appelle le point de "break-even" légèrement avant les Américains* ». Le point de parité énergétique en question est obtenu lorsque les réactions de fusion restituent une énergie égale à celle utilisée pour les provoquer, en l'occurrence celle de l'impulsion laser. Les optimistes de l'époque situaient cette énergie aux environs du kilojoule.

Le sujet de la compression n'était pas tabou, il avait fait l'objet de publications de Daiber et Hertzberg (université de l'État de Washington en 1966) et même de Kidder en 1968, mais c'était de la théorie qui n'allait pas très loin. Sur le plan expérimental, n'y avait-il pas un risque de voir les Soviétiques doubler les Américains dans

la course à la fusion par laser comme ils l'avaient fait à la fin des années 1950 dans la mise sur orbite de satellites artificiels ?

Keith Brueckner a également fait le récit de la façon dont il est parvenu au concept de micro-implosion jusqu'à des densités excessivement élevées. Ce fut un résultat, pour lui plutôt inattendu, de ses expériences numériques. Celles-ci consistaient à soumettre directement une sphérule de DT à l'impact d'une impulsion laser irradiant uniformément la surface extérieure. Elles dupliquaient sans le savoir des calculs effectués à Livermore et qui seront finalement publiés en 1972. Au cours de son interview à l'AIP, Brueckner dit explicitement : « *nous ne savions vraiment pas ce qui allait se passer quand le faisceau laser interagissait avec le DT* ». En fait, il s'attendait à ce que le rayonnement laser soit absorbé dans la couronne de plasma selon le schéma qui sera examiné au **paragraphe 33** pour en élever la température jusqu'à obtenir des réactions de fusion. Ce propos recoupe la teneur d'une conversation que j'avais eue avec Peter Hammerling à Washington en 1970. Lorsque je lui demandais à tout hasard si les projets de KMS utilisaient les structures d'écoulement de plasma que nous avons déterminées à Limeil, il m'avait répondu par l'affirmative sans faire la moindre allusion au fait que les calculs monodimensionnels en géométrie sphérique avaient déjà montré autre chose. Comme le dit Brueckner, « *bien que la surface du DT soit évaporée et que se forme un gaz dilué, la pression avait augmenté à la surface atteinte par le faisceau laser et cette impulsion de pression implosait la sphère* ». Cette implosion provoquait la libération d'une énergie de fusion très supérieure à l'énergie laser ayant servi à la compression.

Les calculs de Nuckolls et de Brueckner conduisaient au même résultat : avec des impulsions laser de 60 kJ, convenablement programmées dans le temps, il serait possible d'atteindre une masse volumique supérieure à $1\ 000\ \text{g/cm}^3$ avec, au moins localement, une température suffisante pour déclencher la micro-explosion. 10 μg de DT pourraient ainsi libérer une énergie de fusion voisine de deux mégajoules.

L'importance prise par la compression du DT obligeait de reformuler le critère relatif à la fusion qualifiée depuis d'inertielle, troisième élément de la trilogie de Jean Robieux. Bien que souvent invoqué dans l'argumentaire des publications, le critère de Lawson cédait en réalité la place à la condition sur le produit ρR de la masse volumique par le rayon qui doit dépasser 2 gcm^{-2} .

Le schéma dévoilé par Nuckolls et ses collègues en 1972, tout appuyé qu'il fut par le code LASNEX en version bidimensionnelle, péchait par optimisme et aussi par un certain irréalisme, relevé *in petto* pour ne le dire que quarante-cinq ans plus tard par Kidder.

29. DES LABOS ET DES HOMMES (DONT QUELQUES FEMMES)

Au début des années 1970 la communauté internationale de l'interaction laser plasma et de la fusion que l'on n'appelait pas encore inertielle allait prendre sa configuration de croisière. Elle comptait de grandes figures dont l'indispensable Nicolai Basov, le précurseur. D'autres scientifiques de l'Institut Lebedev comme Oleg Krokhin et Gleb Sklizkov côté Basov, Vladlen Korobkin et Pavel Pashinin côté Prokhorov, étaient membres à part entière de la communauté bien que leur participation aux rencontres ait été rendue problématique par les aléas de la politique étrangère soviétique.

Un autre représentant des pays de l'Est, le polonais Sylvester Kaliski, fit un passage éclair. Sa carte de visite portait les mentions « général-de-brigade-professeur-docteur-ingénieur ». Très expansif, haut personnage sans doute dans son pays, il dirigeait un institut de recherches et publiait en tant que seul signataire, dans une revue dont il était rédacteur en chef, des articles tournant autour de la dynamique des implosions. La vie de cette personnalité incontrôlable, s'acheva en septembre 1978. Dans mon souvenir, c'était sur une route déserte des confins polono-russo-lithuaniens : accident, selon le communiqué officiel.

Parmi les indispensables, il y avait John Dawson, alors à Princeton avant de rejoindre l'université de Californie à Los Angeles (UCLA) en

1973, qui fut précurseur aussi dans la simulation numérique particulière des plasmas (méthodes PIC pour *Particles In Cell*). Il avait acquis, à peine quadragénaire, un statut de référence incontournable en matière de théorie des plasmas.

Les initiateurs de séries de conférences ont eu évidemment un rôle moteur. Heinrich Hora venait d'Allemagne. Il avait commencé sa carrière de chercheur en RDA par des travaux sur les semi-conducteurs (doctorat à Iena et recherche en milieu industriel). Après être passé à l'Ouest, il rejoignit l'Institut de physique des plasmas de Garching en 1962. Il y fut un théoricien autonome, une sorte d'électron libre, travaillant sur l'interaction laser plasma avec pour sujet de prédilection la force non linéaire, que d'autres appellent pondéromotrice, associée aux fortes densités d'énergie radiative. Dans le même centre de recherches, il existait un groupe dirigé par Siegbert Witkowski, Richard Sigel étant responsable des expériences.

Aux États-Unis, Hora avait noué des contacts utiles avec d'autres scientifiques d'origine allemande comme Helmut Schwarz avec qui furent créés les LIRPP, Fred Schwirtzke (*Naval post graduate school*, Monterey Californie), ou à un moindre degré Friedwardt Winterberg (université du Nevada, Reno), autre électron libre mais d'une nature notoirement incontrôlable.

L'importance des grands laboratoires consacrés à l'énergie nucléaire, dont la quête de la fusion, conférait à leurs représentants un poids particulier dans la communauté. Livermore y était sous-représenté jusqu'en 1972, la partie visible, avec Kidder, demeurant restreinte. Ce fut complètement différent lorsque fut lancé avec Emmett pour la partie laser un grand programme visant à la démonstration de la fusion par compression de microsphères. Une intense campagne de recrutement attira vers la Californie une foule de scientifiques de haut niveau. Certains étaient déjà confirmés comme Harlow Ahlstrom en physique des plasmas, Alexander Glass et John Trenholme dans le domaine des lasers. D'autres étaient de jeunes docteurs tout juste

couronnés par de grandes ou de moins grandes universités. Aux États-Unis, les embauches se font sur interview sans accorder un poids démesuré à l'origine du diplôme. Il y avait parmi ces nouveaux arrivants Bill Kruer et John Lindl, anciens thésards de John Dawson à Princeton en physique des plasmas, John Holzhrichter, David Atwood, Kent Estabrook, le Norvégien Erik Storm... Vinrent aussi quelques jeunes femmes comme Claire Ellen Max qui avait obtenu à Princeton un doctorat en astrophysique, Barbara Lasinski, spécialiste de la simulation particulière des plasmas, et la franco-américaine Viviane Rupert passée par Sup Aéro et le Caltech (*California Institute of Technology*).

Toutes ces recrues contribuèrent à établir une atmosphère stimulante de grande qualité scientifique avec en contrepartie les tensions inhérentes à toute assemblée d'intellectuels en milieu semi-fermé. D'après Alexander Glass (AIP), les conflits étaient monnaie courante à Livermore et la transition qui affecta en 1972 le programme expérimental de fusion par laser fut l'occasion d'un affrontement particulièrement violent entre John Emmett et Ray Kidder. Celui-ci, de son point de vue d'excellent physicien, préconisait une démarche pas à pas destinée à résoudre les unes après les autres les questions de physique qui allaient se poser. Emmett disait au contraire que toute cette science n'avait qu'un intérêt limité dans la perspective de la construction d'un laser suffisamment puissant pour la fusion nucléaire. Avec le concours de John Trenholme qui avait développé des codes numériques pour analyser les performances des lasers à milieu actif solide et de quelques autres spécialistes il pouvait prouver avoir les moyens de ses ambitions. Malgré l'invention de l'amplificateur à disques, Kidder était moins bien armé en matière de compétences dans le domaine des lasers. Entre les deux protagonistes l'affaire fut réglée selon Glass après une confrontation pour le moins animée dans le bureau de Teller qui trancha en faveur d'Emmett. En conséquence, Kidder et son équipe furent marginalisés. Par la suite, j'eus l'impression qu'Emmett et Kidder s'ignorèrent superbement.

Ayant maintenu de bonnes relations avec chacun d'eux, je les ai toujours rencontrés séparément.

Teller avait peu d'affinités avec Kidder. Sa décision n'avait rien de surprenant non plus pour qui connaît aussi le caractère bien trempé de John Emmett et son « *fighting spirit* » hérité d'ancêtres irlandais. Sa façon énergique d'aller droit au but constitua un atout pour Livermore dans le développement des lasers de puissance à verre au néodyme. Cette activité prit sur place une importance considérable, jusqu'à constituer une sorte d'État dans l'État. S'il en fallait une preuve, Bruce Tarter qui fut directeur du centre de 1994 à 2002 a rédigé un historique¹⁸, depuis l'origine en 1952 jusqu'à nos jours, dont il a intitulé la deuxième partie : « Lasers, lasers, rien que des lasers, 1971-1988 ». Il y fait l'éloge d'individualités marquantes comme Emmett et Wood, sans occulter quelques traits de caractère moins flatteurs dont l'influence pouvait peser, en bien comme en regrettable, sur la vie du laboratoire.

L'histoire de la fusion par laser au centre historique de recherches sur l'énergie nucléaire de Los Alamos passa par des étapes différentes. À ma connaissance, contrairement à Livermore, on n'y avait pas développé pendant les années 1960 de programme sur des micro-explosions thermonucléaires. D'après Brueckner, on y dénigrait même ce qu'on savait des idées de fusion par laser nées chez le rival de toujours. Cela n'empêchait pas une certaine diversification des activités avec, sur le site parmi bien d'autres, des travaux sur la fusion par confinement magnétique qui avaient, dans les années 1950, contribué au lancement du projet Sherwood, et sur la propulsion nucléaire dans l'espace, projet Space Rover. C'est d'abord dans ce dernier cadre qu'à Los Alamos, on s'intéressa au laser. Keith Boyer (1915-2009) était alors responsable de ces programmes qui impliquaient des collaborations avec d'autres organismes travaillant dans le spatial. Les liens étaient assez étroits avec les laboratoires AVCO-Everett et leur fondateur Arthur Kantrowitz, spécialisés dans la dynamique des fluides.

18. *The American Lab*, John Hopkins University Press (2018).

La détente d'un gaz chaud peut geler des états excités des molécules constituant ainsi une méthode de pompage pour ce que l'on appelle les « *gas dynamic lasers* ».

Los Alamos n'entra dans la course à la fusion par laser qu'à la fin des années 1960. Boyer fut chargé de superviser tout ce qui concernait les lasers et leurs applications. Un effort particulier porta sur l'étude de lasers de puissance dont le matériau actif (CO₂, KrF) et la méthode de pompage (par des électrons) permettaient d'obtenir des rendements très supérieurs à celui du verre au néodyme pompé par flash. Pour cette activité comme pour les expériences d'interaction et la théorie de la fusion par micro-implosions, le laboratoire lança une campagne de recrutement à la fois interne et externe. C'est ainsi que le théoricien des plasmas Richard Morse vint des recherches conduites localement sur le confinement magnétique pour procéder à des calculs numériques et se poser rapidement en rival de John Nuckolls. Les relations entre les deux furent d'emblée exécrables. J'en ai fait l'expérience, ayant eu à modérer en tant que président de séance, lors d'une LIRPP, une discussion particulièrement rude.

Autre gros centre de recherches à vocation militaire, le NRL comporte une division de physique des plasmas, dirigée pendant les années 1960 par Alan C. Kolb (1929-2006) qui participa ensuite à la création de la compagnie privée Maxwell où il occupa des postes de direction. L'interaction laser plasma y eut tout de suite sa place mais aucun programme de fusion nucléaire n'y fut lancé. Ce laboratoire fut le premier acheteur américain d'un laser CGE. On y trouvait de bons expérimentateurs et aussi quelques théoriciens. L'un d'entre eux, Steve Bodner, fit au début des années 1970 un aller-retour entre le NRL et Livermore où il passa au moins une année. Il en revint plein de ressentiment et consacra une partie de ses présentations et de ses publications ultérieures à expliquer pourquoi on n'y arriverait jamais à l'ignition. Beau joueur et maintenant retraité, il a salué les récents succès obtenus à Livermore auprès de la *National Ignition Facility* (NIF), cf. **paragraphe 45**.

De l'autre côté de l'Atlantique, l'établissement nucléaire d'Aldermaston, spécialisé dans les programmes militaires de la Grande-Bretagne, eut aussi une activité laser. Menée discrètement, elle fut cependant intense et foisonnante pendant toute la période pionnière selon l'article de revue collectif *History of high-power laser research and development in the UK* publié en 2021 dans *High Power Laser Science and Engineering*.

30. QUAND DES UNIVERSITÉS S'EN MÊLENT

Dès l'invention des lasers, l'interaction avec la matière a tout de suite suscité l'intérêt de nombreux universitaires. Mais faute de moyens ou préférant se cantonner à ce qui est accessible à des équipes réduites, peu se sont lancés dans des programmes impliquant de grands instruments comme le firent aux États-Unis l'université de Rochester, et au Japon l'université d'Osaka. Dans ces deux exemples, une forte personnalité fut à l'initiative et présida au développement d'un programme d'envergure visant la fusion nucléaire par laser.

L'Institut d'optique de l'université de Rochester jouit d'une solide réputation acquise et entretenue avec l'appui d'une puissante industrie locale : Bausch and Lomb, Eastman Kodak, Xerox... Avec le laser vint une évolution de l'institut vers l'optique quantique. En marge de ce courant bien ancré dans la tradition académique, la création de plasmas par laser suscita l'intérêt d'un jeune maître de conférences du département des sciences mécaniques et aérospatiales, Moshe J. Lubin (1938-1993). Celui-ci était venu d'Israël pour acquérir un doctorat en ingénierie aéronautique à l'université Cornell. À Rochester, il fut séduit par le potentiel des lasers à verre ou à rubis dans la création de plasmas de haute densité d'énergie. Il fut le fondateur en 1970 du *Laboratory for Laser Energetics* (LLE) porteur d'un programme ambitieux de lasers de puissance pour étudier l'interaction laser-plasma. Les financements initiaux vinrent de différentes sources : la *National Science Foundation*, l'*Air Force Office of Scientific Research* et l'État de New York en plus de l'université de Rochester.

Les premiers équipements furent donnés par Eastman Kodak après l'abandon de recherches sur les applications médicales des lasers.

Passer de la haute densité d'énergie à la fusion nucléaire est une démarche assez naturelle. Le pas fut franchi vers 1970, allant jusqu'à la conception de réacteurs dans un article coécrit par Moshe Lubin et Arthur Fraas, un chercheur du Laboratoire national d'Oak Ridge, pour le magazine *Scientific American*. Les années 1971-1975 furent consacrées à la construction et à l'exploitation d'un laser à verre au néodyme d'une énergie de 1 kJ en quatre faisceaux. Les expériences d'interactions étaient conduites par Len Goldman, scientifique confirmé détaché par *General Electric*, et John Soures, un des premiers docteurs diplômés par le laboratoire qui en même temps recruta une équipe très internationale avec le Français Jacques Delettrez, l'Autrichien Wolf Seka ou encore, l'Israélien Baruk Yaakobi. Comme dans le cas de KMS-Fusion dont il sera question plus loin le financement de ce programme de recherches provenait essentiellement de fonds privés. Les gros contributeurs étaient Exxon et General Electric bientôt rejoints par *Northeast Utilities* et d'autres compagnies du secteur de l'énergie exerçant aux États-Unis ou au Canada.

L'étape suivante impliquait un changement d'échelle et l'intervention des autorités fédérales pour aboutir à l'installation Oméga (10 kJ en 24 faisceaux). La concurrence fut rude avec KMS-Fusion et donna lieu à de vigoureuses empoignades verbales entre représentants des deux camps. Un mot cependant au sujet de Moshe Lubin, rencontré à de nombreuses reprises et dont j'avais pu apprécier le charisme. Au début des années 1980, il quitta le LLE pour prendre la direction du centre de recherches de la Standard Oil of Ohio. Il fonda ensuite sa propre compagnie dans le domaine des microprocesseurs, *Hampshire Instruments*, qui connut de graves ennuis au point qu'il finit par se donner la mort en 1993, triste destinée pour l'un des pionniers de l'interaction laser-plasma.

De l'autre côté des Grands Lacs, au Canada, le Centre National de Recherche (CNR) d'Ottawa, institution fédérale, eut avec l'Écossais

John Alcock et ses collaborateurs une activité soutenue sur l'interaction laser-matière. Un peu plus à l'est, la toute jeune université du Québec, fondée en 1968, se dota immédiatement d'un Institut national de la recherche scientifique dont la branche « Énergie » fut implantée à Varennes dans la banlieue de Montréal, d'abord dans les locaux du Centre de recherches de l'hydro Québec puis dans son propre bâtiment juste à côté. Là, Henri Pépin initia un programme de recherches sur l'interaction laser plasma avec le concours de Jacques Martineau venu de France au titre du Service national dans la coopération et qui prolongea son séjour avant de revenir à Limeil où je l'avais recruté après son doctorat de troisième cycle. Il n'y eut pas dans ce laboratoire de grand projet orienté vers la fusion nucléaire mais la physique de l'interaction laser-plasma y fut un thème majeur, avec à partir de 1973, le renfort du théoricien Tudor Johnston. Henri Pépin maintint une collaboration transatlantique assez étroite avec Édouard Fabre et son groupe à l'École polytechnique.

L'autre entreprise d'ampleur menée au sein d'une grande université en vue de la fusion par laser se situe au Japon. Pour fonder l'*Institute of Laser Engineering* (ILE) de l'université d'Osaka, Chiyoe Yamanaka (1923-2017) avait dû bousculer une organisation par tradition très dispersée de la recherche, à base de petites cellules autonomes : un professeur très chevronné entouré de deux enseignants-chercheurs confirmés, eux-mêmes assistés chacun de deux équivalents de nos jeunes maîtres de conférences, le tout flanqué d'un nombre variable de doctorants corvéables à merci.

Lorsque j'y séjournai en 1971, le personnel scientifique était déjà beaucoup plus nombreux et des lits superposés permettaient aux thésards de passer la nuit au laboratoire, signe parmi d'autres d'une activité fébrile. Les expérimentateurs disposaient alors d'une installation laser comparable à celle de Limeil, génération L-5. C. Yamanaka et quelques membres de son équipe nous avaient rendu visite à Limeil l'année précédente. Ils avaient aussi été reçus à Marcoussis. Ils avaient bien observé nos matériels et avaient su les reproduire

en les améliorant. Les amplificateurs avaient gagné en compacité. Le verre au néodyme était fourni par un industriel local, Hoya, qui ne tarda pas à se placer sur le marché mondial de ce verre particulier en faisant des offres à toutes les institutions importantes susceptibles d'acheter ses produits. Limeil fit venir quelques barreaux, rigoureusement contrôlés par Jean de Metz qui reçut la consigne de renvoyer, sans autre forme de procès, ceux qui n'étaient pas conformes, histoire de montrer notre sérieux.

Après les révélations des physiciens de Livermore à Montréal en 1972, l'ILE eut son grand projet de fusion inertielle concrétisé par le laser GEKKO-XII (20 kJ en 12 faisceaux). Afin de justifier un programme d'ampleur inhabituelle dans un cadre universitaire nippon et pour maintenir la cadence de l'avancée des recherches, des échanges d'informations avec les Américains furent organisés sous la forme de réunions bilatérales tenues alternativement au Japon et aux États-Unis les *Japan-US Seminars*. Mais pendant quelques années autour de 1980, les Japonais, libres sur ce plan de toute contrainte, furent seuls à publier des résultats d'interaction laser-plasma et d'implosions qui dans d'autres institutions devaient rester confidentiels. Cet état de fait provoqua quelques récriminations finalement éteintes par la déclassification de l'attaque indirecte.

En Europe aussi, des universitaires entreprirent des recherches sur l'interaction laser plasma plus ou moins orientées vers la fusion nucléaire. Mais l'organisation des travaux passa plutôt par le rassemblement de chercheurs d'origines diverses bénéficiant tout à tour de l'accès à un grand instrument. En Grande-Bretagne, on institua un comité formé de professeurs d'université, présidé par le dynamique Dan Bradley de la *Queen's University* de Belfast et comprenant Stuart Ramsden, devenu professeur de l'université de Hull après être passé par le CNR d'Ottawa, pour discuter de l'opportunité de construire un laser de puissance doté d'un statut national et choisir le lieu d'implantation. Bradley milita en faveur de son université mais sa proposition ne fut pas retenue en raison des conflits politico-religieux qui

ensanglantaient alors l'Irlande du Nord. La décision se fit en faveur du laboratoire Rutherford, voisin immédiat du Centre nucléaire de Harwell, qui en plus de posséder un sérieux potentiel d'ingénierie et de support technique savait déjà gérer la mise à disposition de grands instruments, en l'occurrence des accélérateurs de particules, pour de petites équipes universitaires. Ainsi naquit l'entité connue sous le nom de *Central Laser Facility*.

En France, dans le même esprit, le CNRS créa un Groupement de Recherches Coordonnées (GRECO) autour du laboratoire de l'École polytechnique qui pouvait disposer de lasers de puissance après le déménagement depuis le 5^e arrondissement de Paris vers Palaiseau au milieu des années 1970. Édouard Fabre en fut longtemps le directeur. Le CEA exerça un certain droit de regard sur les activités de ce GRECO (devenu LULI) par crainte sans doute qu'elles dérapent vers des sujets sensibles.

31. LA SAGA KMS-FUSION

Les États-Unis d'Amérique passent pour être le paradis de l'esprit d'entreprise. On y célèbre la réussite de multiples audacieux qui, partis de rien ou presque, sont devenus des stars du monde des affaires et de la technologie. Mais toutes les histoires ne se terminent pas en apothéose. Il en est qui finissent mal. L'invention des lasers a suscité un grand nombre de vocations d'entrepreneur. Or le marché s'est révélé étroit pour la plupart des applications. Il était même inexistant autour de 1970 dans le cas de la fusion par laser, car trop futuriste.

Y aurait-il un signe indien dans la fascination qu'exerce le laser sur tout un chacun ? On pourrait le penser en évoquant le souvenir de KMS-Fusion.

L'histoire avait commencé par un voyage de Keith Brueckner (1924-2014) en URSS. En août 1968, l'AIEA avait organisé sa conférence périodique sur la fusion nucléaire (consacrée majoritairement au confinement magnétique) à Novosibirsk, en plein milieu de la Sibérie. Cette réunion est restée dans l'histoire pour la divulgation qui y fut

faite par les Soviétiques des premiers résultats encourageants obtenus au moyen de machines appelées « *Tokamak* » (acronyme à la russe pour tore à confinement magnétique) expérimentées au sein de l'Institut Kourtchatov de Moscou et dont, toutes choses égales par ailleurs, les temps de confinement du plasma dépassaient de loin ceux des autres configurations.

Théoricien connu et respecté dans le domaine de la physique statistique, Brueckner participait à de nombreux comités et jouait un rôle de conseil auprès de l'*Atomic Energy Commission* (AEC). Dans le passé, il avait été en 1953 consultant auprès du laboratoire de Los Alamos. Il connaissait de ce fait le rôle de la compression dans les systèmes thermonucléaires à usage militaire. À Novosibirsk, il constata que l'idée de la compression radiative n'avait pas pénétré la communauté de la fusion par laser dont les représentants présents à la conférence n'envisageaient que le chauffage du plasma.

De retour aux États-Unis, et sans avoir été informé du contenu des travaux théoriques menés depuis près de dix ans à Livermore, Brueckner suivit une démarche inspirée en partie par les connaissances acquises à Los Alamos pendant les années 1950. Comme on a pu le lire dans le **paragraphe 28**, ses simulations numériques produisirent des résultats qu'il n'attendait pas. Fort de résultats spectaculaires, il n'eut pas grand mal à convaincre Keeve M. (« Kip ») Siegel, un autre universitaire (de l'université du Michigan) devenu un entrepreneur renommé pour son audace et ses réussites. Celui-ci avait fondé KMS-Industries, holding regroupant de multiples filiales. C'est ainsi que Brueckner, Siegel et Henry Gomberg, un autre professeur de l'université du Michigan, spécialiste d'engineering nucléaire, s'associèrent pour créer, au sein du groupe, une nouvelle compagnie destinée à développer un projet visant à la commercialisation de la fusion par laser. Ainsi naquit KMS-Fusion à la fin des années 1960.

Brueckner savait pertinemment qu'un tel projet avait un côté sensible et ne pouvait être mené à bien sans un feu vert de l'AEC. Il y fut semble-t-il fraîchement reçu. Les enjeux étaient importants.

L'AEC était soucieuse de garantir la confidentialité relative aux explosions thermonucléaires à usage militaire et de préserver les intérêts de Livermore dont les travaux étaient alors couverts par un secret rigoureux. Brueckner lui-même n'était pas informé de ce qu'avaient obtenu Nuckolls et ses co-auteurs sur les micro-explosions. Il s'imaginait détenir le monopole de l'idée de la fusion par implosion laser. Se posait aussi un épineux problème de brevets d'invention.

Les fondateurs de KMS-Fusion avaient la certitude, appuyée sur les calculs de Brueckner, de pouvoir mettre sur le marché à bref délai des générateurs d'électricité de taille comparativement modeste basés sur la fusion. C'était à l'époque une illusion très partagée dans la communauté de l'interaction laser. Je me souviens de Moshe Lubin disant, *off the record*, que chacun pourrait avoir un tel générateur dans son garage.

Il y eut de longues et complexes tractations, détaillées dans l'ouvrage d'Alex Wellerstein¹⁹. Dans son interview pour l'AIP, Brueckner se souvient :

« J'avais rendu visite au quartier général de l'AEC, et fait état de nouveaux résultats devant le Directeur de la classification. Il me répondit que si tel était le cas, il faudrait déposer des demandes de brevets pour protéger notre position. Ce que fit KMS²⁰, mais l'AEC était toujours réticente pour valider le lancement d'expériences. Lors d'une réunion présidée par Glenn Seaborg²¹, celui-ci décida que mes propositions avec KMS valaient la peine d'autoriser la poursuite des travaux. »

Finalement, un accord fut conclu selon lequel l'AEC, dans sa grande mansuétude, permettait à la société KMS-Fusion de poursuivre ses travaux et lui apportait un soutien sans financement tout en

19. A. Wellerstein, *op. cit.*, pp. 310 et suivantes.

20. P. ex. "Fuel Pellets for Controlled Nuclear Fusion", US Patent n° 4, 297, 165 (demande déposée le 13 juillet 1970, brevet accordé le 27 octobre 1981).

21. Prix Nobel de chimie pour ses découvertes relatives aux transuraniens.

gardant bien entendu la haute main sur une éventuelle levée du secret. On lit dans le rapport annuel de la maison mère, KMS-Industries, pour 1971 :

« Le programme de KMS-Fusion... fut officialisé le 11 mai 1971. Cela faisait suite à la signature, le 3 février 1971, d'un contrat entre l'AEC et KMS-Industries selon lequel pour la première fois une entreprise privée était autorisée à poursuivre son programme secret de fusion par laser en vue de commercialiser un réacteur générateur d'électricité.

[...] Comme certains aspects de la fusion par laser sont susceptibles d'avoir des applications dans le domaine de la défense, nos activités se déroulent selon des règles de sécurité imposées par le gouvernement ce qui, on peut le comprendre, nous empêche de présenter à nos actionnaires les développements scientifiques en cours à KMS-Fusion autrement qu'en termes très généraux. »

KMS-Fusion put se développer grâce à la fortune de Kip Siegel qui revendit la plupart de ses compagnies et réunit à Ann Harbor une équipe de chercheurs d'excellent niveau. En plus, il comptait parmi ses conseillers le prix Nobel de physique Robert Hofstadter (professeur de l'université Stanford). Cette personnalité attachante, venue de la physique la plus fondamentale, avait vu dans la fusion nucléaire par laser une opportunité d'utiliser son talent et ses connaissances pour le bien de la société. Il joua un rôle déterminant sur le plan scientifique par la mise en œuvre de la détection des neutrons au moyen d'émulsions sensibles à ces particules, tandis que sur un autre plan, il consacrait du temps à des actions de lobbying auprès du Congrès en faveur de KMS.

Au passage, la levée partielle du secret s'imposait qui donna lieu à la séquence d'événements relatée par Gloria Lubkin. KMS lança dans la foulée une intense campagne de communication. Ainsi en 1972, Brueckner était présent à Grenoble lors d'une conférence de l'AIEA sur la fusion contrôlée où je me trouvais aussi et fis sa connaissance

à cette occasion. Il me remit un exemplaire d'une brochure à la diffusion de laquelle il participait activement. Édité, avec le concours de H. Hora, par le bureau d'études suisse Doublekay, elle était intitulée : « *A documentation and interpretation of laser and electron beam nuclear fusion* ». Cette compilation assez disparate contenait des reproductions de manuscrits ou d'articles de Brueckner, Nuckolls et Wood, Winterberg... ainsi que de mémos ou d'extraits de presse, le tout destiné à valoriser le concept de ce que l'on n'appelait pas encore confinement inertiel.

Toujours au chapitre de la communication, les seuls chiffres apparaissant dans une page de publicité insérée en 1974 par KMS-Fusion dans la célèbre revue britannique *Nature* étaient en dollars. La même année parut un long article de Brueckner et Jorna dans *Reviews of Modern Physics*, qui aurait pu être fondateur si la publication n'avait pas été retardée, d'ordre supérieur, pour laisser la priorité à Nuckolls et ses co-auteurs.

La qualité des physiciens et des techniciens engagés par KMS associée à la souplesse et à l'efficacité d'une firme privée eut sa traduction dans les résultats. Comme disait à peu près Kip Siegel : « *Dans les laboratoires nationaux, on étudie les phénomènes, dans le privé on recherche le produit* ». En 1974, à une conférence de l'AIEA, Georges Charatis, Roy R. Johnson et leurs collaborateurs purent annoncer les premières émissions de neutrons obtenus par implosion d'une coquille de verre contenant un mélange deutérium-tritium sous pression (cf. **paragraphe 39**). L'expérience avait été menée avec un laser dont la base venue de la CGE était complétée par des amplificateurs à disques et avait été munie d'un filtrage spatial pour améliorer la qualité du faisceau.

Selon l'AEC, « *la démonstration de KMS représentait un petit pas, mais significatif, sur la voie de la fusion contrôlée* », une déclaration minimaliste, citée par le *New York Times*, et en retrait par rapport à l'optimisme de KMS dont le communiqué annonçait des applications commerciales pour le début des années 1990.

Tirant parti de cette réussite, Kip Siegel entreprit de rechercher des financements auprès des organismes officiels, dure épreuve étant données les réticences de l'AEC et la concurrence apportée par l'université de Rochester avec l'appui de grands groupes industriels. Lors d'une audition à Washington DC devant le Congrès en mars 1975, il fut victime d'une crise cardiaque. Souffrant notoirement d'obésité à 52 ans, il n'y survécut pas.

Entre-temps, en 1974, Brueckner fut sommé par son université de revenir au bercail après trois années passées en détachement. L'intéressé, ne souhaitant pas poursuivre sans parachute une aventure à l'issue incertaine, s'exécuta. Son départ n'eut pas de conséquence sur les travaux expérimentaux de KMS menés par une équipe nombreuse et compétente. Outre le succès des implosions de microballons, KMS pouvait se prévaloir d'une expertise très tôt reconnue dans le domaine de la fabrication de cibles d'architecture complexe.

Après le décès de Siegel précédé de quelques mois par le retrait de Brueckner, la société KMS-Fusion poursuivit son activité sous la houlette du troisième homme, Henry Gomberg. Elle était enfin financée par des contrats de l'AEC devenue ERDA (*Energy Research and Development Administration*) puis DOE (*Department of Energy*), mais pour mener des recherches en parallèle avec le programme et sous le contrôle de Livermore qui délégua sur place un représentant permanent de haut niveau. Alexander Glass occupa quelque temps ce poste. Cette situation perdura une quinzaine d'années avant la fermeture définitive pour cause de gestion calamiteuse après la revente de l'entreprise à des investisseurs canadiens, dans un climat de dénigrement extérieur et de querelles internes. Parmi les vautours qui se partagèrent les dépouilles, General Atomic récupéra une bonne partie de l'équipe de fabrication des cibles avec son matériel. Le laser prit le chemin de Los Alamos où en 2010, sous un nom de code différent, il était toujours en service.

Pour couronner le tout, à la déconfiture succéda un oubli orwellien à peine troublé au XXI^e siècle par quelques articles vengeurs dans

un blog tenu par Charles J. Armentrout, un ancien de KMS-Fusion, sous le titre *The Last Tech Age*, et les recherches historiques d'Alex Wellerstein. L'histoire de KMS a cependant trouvé une place dans la littérature. Elle a inspiré à l'écrivain David H. Spiegelberg, la trame de son roman d'anticipation *On Deception Watch*, Xlibris, 2010.

Tel fut le pitoyable épilogue d'une aventure au cours de laquelle la disparition tragique de Kip Siegel marqua de façon symbolique la fin du temps des pionniers. Vint ensuite l'ère des grands projets bien planifiés dont KMS-Fusion, d'abord marginalisée, fut rapidement exclue. Livermore avait pris, pour ne plus la lâcher, la tête de la course à la fusion par laser.

6

La science de l'interaction laser plasma au temps des pionniers

32. DES RÉUNIONS STIMULANTES

L'exploration d'un nouveau domaine de recherches comporte deux phases. La première est de découverte. On essaie, on tâtonne, des idées préconçues sont mises à rude épreuve. C'est le temps des pionniers qui peut être assez court. Dans le cas de l'interaction laser, il a duré une bonne dizaine d'années, guère plus. Puis vient la seconde phase qui parfois se prolonge indéfiniment. Si l'on reste dans le domaine strictement scientifique, c'est l'époque de la précision qui n'exclut pas de nouvelles découvertes. Dans le cas de la fusion nucléaire par laser, c'est la période des grands projets que l'on souhaite voir aboutir dans des temps raisonnables tout en cultivant la précision.

Peut-on dire qu'après la période charnière 1971-1975, tout était connu dans le domaine de l'interaction laser-matière ? Certainement pas mais du point de vue de la physique on en savait déjà beaucoup, comme va le montrer la suite de ce chapitre consacré à une

revue rapide de mécanismes en jeu. En revanche, du point de vue de la fusion nucléaire, des éléments importants n'avaient été révélés qu'avec parcimonie à la communauté scientifique comme au public. Le concept de compression indirecte, longtemps tenu sous le sceau du secret (mais pour certains, de Polichinelle), n'apparaîtra au grand jour que bien plus tard alors qu'à Livermore, il était dans les cartons depuis le début.

On peut suivre le progrès des connaissances grâce aux conférences générales ou spécialisées qui ont jalonné la période et dont pour certaines les actes ont été publiés. Les Conférences internationales d'électronique quantique, on le rappelle ici, ont participé à cette histoire. En 1963 à Paris, c'était, grâce à Basov et Krohin, le coup d'envoi officiel des recherches sur la fusion par laser. En 1968 à Miami, la CGE avait présenté sa chaîne laser de 500 joules, une session entière était consacrée à la picoseconde, Basov avait fait état de soupçons de neutrons et j'avais montré les ondes de claquage observées à Limeil. Charles Townes était là aussi pour, en séance plénière, décrire un grand maser dans le ciel ou comment dans les nuages moléculaires cosmiques sont réunies les conditions pour que s'instaure l'amplification des ondes électromagnétiques par émission stimulée. En 1972 à Montréal, c'était au tour des physiciens de Livermore qui, sous la houlette d'Edward Teller, exhibaient concepts et simulations numériques conduisant au lancement d'un programme ambitieux de lasers de puissance en vue de la fusion.

Autant les Conférences d'électronique quantique ont été accueillantes, autant les conférences périodiques de l'AIEA sur la fusion, au niveau européen comme au niveau mondial, ont été chiches pour traiter d'autre chose que du confinement magnétique. La communauté de l'interaction laser n'y participait pas en nombre. Les exposés généraux comme ceux que j'avais été invité à présenter à Madison (Wisconsin) en 1971 et à Grenoble en 1972 étaient plutôt destinés à informer le monde de la fusion magnétique des avancées en cours dans un domaine voisin, ressenti peut être comme

concurrent et dans lequel la diffusion de l'information était soumise à certaines contraintes. L'AIEA étant une émanation de l'ONU, de telles conférences doivent en principe respecter un cadre formel dont les dispositions sont appliquées avec plus ou moins de rigueur. À Madison, des huiles de la délégation française m'avaient imposé au dernier moment une communication en français, langue officielle des Nations unies que j'étais tenu d'employer alors que j'avais tout préparé en anglais. Cette démonstration d'exception française fut un exercice d'équilibriste dont je ne suis pas certain qu'il ait servi la francophonie. J'é mets le vœu que la traduction simultanée ait aidé à faire passer le message. Une séance informelle réunissant, à mon initiative un soir après le dîner, les représentants de la communauté de la fusion par laser fut certainement, de ce point de vue, plus efficace.

Les réunions spécialisées ont été des plus importantes à la fois pour souder une communauté et pour établir un socle de connaissances à peu près consensuel.

Les *Gordon Research Conferences* sont organisées depuis 1937 par la fondation éponyme. Elles sont internationales et rassemblent durant une petite semaine un nombre limité de chercheurs venus échanger de façon informelle sur des sujets de pointe. Elles se tiennent dans des lieux isolés comme souvent, pendant leurs vacances, des internats du New Hampshire pour jeunes ados de familles fortunées. Les domaines concernés sont la physique, la chimie, la biologie et la médecine ainsi que depuis peu, les sciences de l'éducation. Afin que les participants puissent s'exprimer librement et pour préserver l'esprit d'une science en train de se faire, il n'y a pas de publication associée et aucun moyen d'enregistrement, aucune référence à ce qui s'y est dit, ne sont autorisés. Le seul document issu d'une session est la photo de groupe, facultative. Les sujets sont à l'initiative de scientifiques qui les soumettent à la fondation pour être inclus en cas d'approbation dans le planning des quelque deux cents réunions annuelles.

Une première conférence Gordon de pure physique eut une suite qui sous le nom d'« *Anomalous absorption conference* » perdure jusqu'à aujourd'hui avec une périodicité annuelle.

De son côté, un grand promoteur d'idées nouvelles, Abraham Hertzberg, professeur de l'université de l'État de Washington à Seattle, assisté de John Dawson et de Ray Kidder, proposa de consacrer une conférence Gordon à la fusion par laser. Elle se déroula pendant l'été de 1969 dans un site particulièrement bien choisi : un pensionnat pour jeunes filles tenu par des religieuses au milieu de nulle part, plus précisément en pleine forêt à quelques dizaines de miles à l'est de Seattle. Ces demoiselles étant en vacances, les sœurs assuraient l'intendance et jouaient les utilités. Parmi elles, Sister Sharleen la projectionniste tenait un rôle essentiel. Les présentations Powerpoint n'existaient évidemment pas et chaque orateur venait avec une série de diapositives 24×36 destinées à illustrer son exposé. Indifférente aux propos scientifiques, cette religieuse avait des lectures pieuses à portée de la main et s'était ménagé une discrète zone éclairée. Elle s'attira le respect unanime des participants, toutes confessions ou absence de confession confondues, en ne commettant pas la moindre erreur dans le passage des figures : un miracle de professionnalisme !

Les organisateurs et animateurs étaient Harlow Ahlstrom, un jeune collègue d'Abe Hertzberg, et Pete Avizonis des laboratoires de l'*US Air force* à Albuquerque. Sur le plan scientifique, on eut l'habituel passage en revue des progrès en matière de technique laser, de physique de l'interaction et de maîtrise dans la fabrication de cibles cryogéniques. On avait commencé d'établir les lois quantitatives reliant la température du plasma d'interaction à l'intensité lumineuse incidente. Devant présenter les expériences en cours à Limeil sur l'irradiation de glaçons de deutérium et qui étaient à l'époque à la pointe de la physique et de la technique, je respectais à la lettre l'embargo sur la détection de réactions thermonucléaires DD aisément identifiables grâce aux neutrons. Des rumeurs couraient cependant à ce sujet impliquant Limeil et l'université de Rochester, les Russes étant absents. Je dus répondre par la

négative à une question posée par Stuart Ramsden. Un autre participant, le très britannique James Tuck, grande figure du centre de Los Alamos qui cultivait avec humour son personnage d'officier de l'armée des Indes égaré au Far West, avait tenté de tempérer les enthousiasmes naissants en proclamant qu'il lui suffirait de frotter du tritium sur le fond de son short (de coupe militaire) pour obtenir des neutrons.

Rétrospectivement, on assista pendant cette réunion à un magnifique concours de non-dits. Les neutrons de Limeil étaient sous embargo et les résultats encourageants des plus récentes simulations numériques de Livermore relevaient toujours du secret le plus absolu. Aucun des représentants de ce laboratoire, Ray Kidder ou James Shearer n'en souffla le moindre mot.

Cette conférence Gordon fut la première d'une série récurrente à la fréquence d'une tous les deux ans. À partir de 1973, elles se tinrent à Tilton, petite bourgade du New Hampshire, en quelque sorte un retour au bercail.

Une autre série de réunions sous le titre « *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena* » (LIRPP), s'adressait à la même communauté internationale. Selon leur initiateur, Heinrich Hora qui était alors chez Westinghouse à Pittsburg, l'idée émergea en 1968 lors d'une rencontre avec le vice-président de l'Institut polytechnique Rensselaer où de telles conférences pourraient être hébergées dans de nouvelles infrastructures en cours d'édification sur le campus de Troy (État de New York). Helmut Schwarz, professeur dans cette institution se proposa pour participer à l'organisation. La tonalité générale devait être celle des conférences Gordon à ceci près que la parole était moins libre, les présentations étant appelées à figurer sous forme d'articles dans des actes pour la diffusion desquels l'éditeur newyorkais Plenum press avait manifesté un intérêt qui se traduisit par la publication d'une collection de forts volumes édités sous la responsabilité de Schwartz et Hora.

La première LIRPP eut lieu en juin 1969, Francis Floux y représentait Limeil. Il respecta l'embargo sur les neutrons, mais pour la

publication des comptes rendus (diffusés ordinairement après un délai d'un à deux ans), Schwarz et Hora lui demandèrent de compléter sa contribution par un appendice décrivant celles de ses expériences qui avaient produit des neutrons de façon contrôlée.

Les conférences Gordon comme les LIRPP contribuèrent puissamment à cimenter la première génération de chercheurs engagés dans l'interaction laser en vue de la fusion nucléaire. On y croisait aussi des observateurs venus aux nouvelles comme des représentants de l'AEC ou de la Rand Corporation. Plus... exotique était la présence de Charles B. Stevens de la *Fusion Energy Foundation*, organisation à la réputation douteuse associée au non moins sulfureux Lyndon LaRouche.

D'étendue géographique seulement continentale d'autres rencontres périodiques ont également joué un rôle. C'est le cas en Amérique du Nord de la réunion annuelle de la division de physique des plasmas de l'« *American Physical Society* » (APS). C'est l'occasion pour les physiciens des plasmas d'outre-Atlantique de faire valoir leurs travaux. C'est une sorte de compte rendu d'activité auquel contribuent plus de mille participants. Elle s'accompagne d'un marché de l'emploi pour les jeunes diplômés, sortant des universités, venus exposer oralement ou par affiches la substance de leurs thèses. L'interaction laser-plasma sous toutes ses formes et la fusion inertielle y tiennent la place importante que justifient les crédits qui, aux États-Unis, leur sont consacrés. La communauté américaine, étendue au Canada, s'y retrouve chaque automne.

On a déjà mentionné (cf. *supra* **paragraphe 30**) la succession de rencontres bilatérales qui sous le nom de *US Japan Seminar*, ont réuni des chercheurs des deux pays à partir de 1972.

Sur le plan européen, on a eu et on a toujours les ECLIM (*European Conference on Laser Interaction with Matter*). Elles ont commencé modestement avec une dizaine de participants à Frascati en 1966. Après une courte période où l'assistance était limitée à un représentant par labo, on est revenu à des formats plus traditionnels.

Vers 1970, une multitude d'institutions étaient représentées dans ces réunions dont la périodicité rythmait la vie des laboratoires. On y retrouvait, autour de projets de fusion par laser ou de physique d'interaction plus fondamentale, des représentants de remarquables équipes de chercheurs dont une majorité de jeunes. Cette génération manifesta une belle vitalité qui déboucha sur une compétition intense mesurable par l'abondance et la qualité des publications, dans les revues à comité de lecture comme dans les comptes rendus de conférences. De nombreuses portes furent ouvertes à la recherche dans un domaine qui, des décennies plus tard, paraît inépuisable.

33. TOP MODEL

L'interaction d'un faisceau laser de forte intensité avec une cible, que ce soit un gaz, un diélectrique solide ou une surface métallique, met en jeu une grande variété de mécanismes physiques. Un problème posé à la réflexion théorique est de les intégrer dans un ensemble cohérent qui ait un réel pouvoir prédictif tout en s'accordant aux expériences et guidé par elles.

On a vu que le claquage des gaz met en jeu une détonation radiative et présente donc une certaine analogie avec des propriétés de la dynamique des explosifs. Et ce n'est pas un hasard si un spécialiste de la détonique, Claude Fauquignon, venu en 1967 à Limeil en provenance d'un autre centre du CEA situé lui aussi sur les défenses de l'est de Paris, le fort de Vaujours, a pris une part active aux innombrables séances de remue-méninges auxquelles j'ai participé de la fin des années 1960 aux débuts des années 1970.

Pour l'écoulement de plasma obtenu par l'impact d'un faisceau laser focalisé à la surface d'un solide, le but était de décrypter les mécanismes en jeu aussi bien dans l'absorption de la lumière que dans l'écoulement du plasma. Chacun avait sa petite idée sur la question et sur la façon de la mettre en œuvre par le calcul. Mais en ces temps d'informatique centralisée, les procédures d'accès aux codes et

aux ordinateurs, qui dépendaient d'autres services, étaient compliquées et nos études n'étaient pas prioritaires.

Après de multiples discussions informelles que j'eus avec Claude Fauquignon, Francis Floux et Gianfranco Tonon complétées par un recours minimal au calcul sur ordinateur, nous sommes arrivés à construire un modèle cohérent que l'on pouvait confronter à l'expérience. Il fit l'objet entre autres de deux articles complémentaires parus dans *Physics of Fluids* au début des années 1970, l'un signé par Fauquignon et Floux, l'autre dont je suis l'unique auteur.

Notre démarche théorique était différente de l'approche par l'expérimentation numérique systématiquement pratiquée outre-Atlantique par les équipes de Livermore et de KMS. Une hypothèse facilita notre travail : que la lumière soit absorbée à la densité critique de coupure, c'est-à-dire lorsque la fréquence de l'onde laser est égale à la fréquence de plasma locale dans le gradient de densité de l'onde de détente par laquelle le plasma se répand dans le vide. La lumière laser ne va pas au-delà. On retrouve ici le volet résonance et chauffage de la trilogie de Robieux. Alors des grandeurs importantes deviennent calculables, sans passer par l'ordinateur, dans un schéma où se succèdent depuis le solide, un front de choc, une zone sous choc où la matière est à forte densité mais compressible, un front d'ablation là où commence la détente, et dans une couronne à la densité décroissante, une zone de conduction jusqu'à la région d'absorption à la coupure (**figure 43**).

MODÈLE DE L'IMPACT D'UN RAYONNEMENT LASER SUR UNE SURFACE SOLIDE

Dans la détente, les vitesses particulières sont dirigées vers l'extérieur et doivent être compensées, loi de la conservation de la quantité de mouvement oblige, par de la matière se dirigeant en sens inverse. Les pressions appliquées lors de cet *effet fusée* sont telles qu'une onde de choc se dirige vers l'intérieur du solide. Le front de choc est un saut de densité, de température et surtout de pression celle-ci pouvant

varier d'un nombre respectable d'ordres de grandeur sur une très courte distance. L'onde de choc produit un changement d'état créant un fluide dense et compressible mais à température inférieure à celle de la couronne pour respecter la continuité de la pression à l'endroit du front d'ablation, là où s'amorce la détente sous forme d'un plasma de plus en plus chaud et rapide et de moins en moins dense au fur et à mesure qu'il s'éloigne du solide non perturbé.

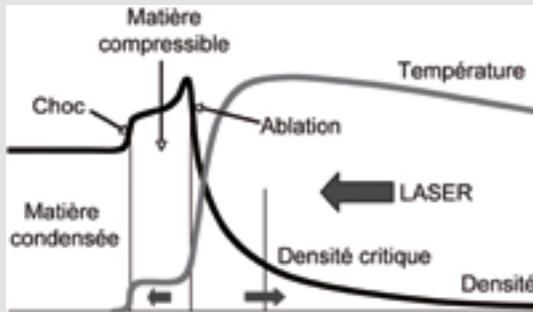


Figure 43 | Profils de température (en gris) et de densité (en noir) résultant de l'impact d'un faisceau laser de grande intensité sur la surface d'un solide. La couronne de plasma est à droite à partir du front d'ablation. Le rayonnement laser ne se propage pas au-delà de la densité critique. La matière contenue entre onde de choc et front d'ablation et celle qui est emportée dans l'onde de détente se déplacent dans des directions opposées (flèches) : *effet fusée*.

Dans le cas où l'absorption du rayonnement laser se fait préférentiellement au voisinage de la densité critique, point sonique de l'écoulement de plasma, un résultat important est que la température de la couronne chaude varie comme la puissance $2/3$ du produit $I\lambda^2$ de l'intensité par le carré de la longueur d'onde laser, grandeur appelée plus tard *paramètre d'interaction* pour des raisons qui apparaîtront dans le paragraphe suivant. Cette dépendance peut se déduire directement de considérations dimensionnelles. En prolongeant le raisonnement, on trouve que la pression, proportionnelle au produit de la température par la densité, varie comme la puissance $2/3$ du quotient I/λ . On tient là un précieux indicateur qui montre l'intérêt pour la fusion de rayonnements lasers de longueur d'onde aussi courte que possible.

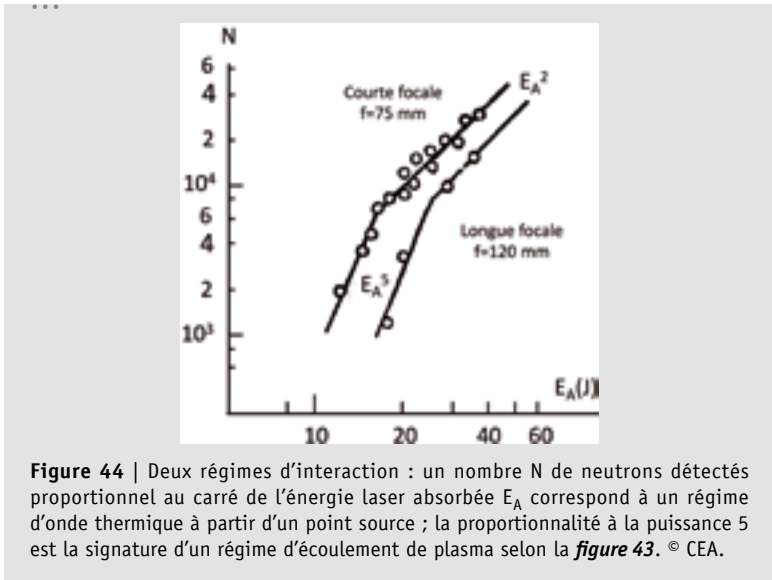
...
 La structure de la zone entre le front d'ablation et la densité critique est déterminée par la conduction thermique des électrons du plasma et, en régime stationnaire, j'avais pu montrer qu'elle se prête au calcul analytique. En raison de la non-linéarité du coefficient de conduction thermique, le profil de température est remarquablement raide au voisinage du front d'ablation. C'est la preuve que les échanges de chaleur avec le matériau sous choc sont minimes ce qui ouvre la voie à la compression adiabatique.

Mais ce modèle qui rencontra un large consensus ne peut exister que si certaines conditions sont réunies. D'abord, l'écoulement qu'il décrit doit être raisonnablement plan. Il faut aussi qu'il ait eu le temps de s'établir. Or les intensités élevées sont le plus souvent atteintes en concentrant le rayonnement laser sur une surface focale aussi petite que possible et les impulsions sont courtes. C'est ainsi qu'à Limeil, dans les expériences qui ont donné lieu à des réactions de fusion nucléaire, on avait mis en évidence deux régimes dans la façon dont l'émission neutronique dépend de l'énergie absorbée (**figure 44**).

ÉMISSION NEUTRONIQUE SELON LE RÉGIME D'INTERACTION

Lorsque le faisceau laser est concentré sur une très petite tache focale à la surface d'un solide, l'échauffement initial ne concerne qu'un volume réduit à partir duquel une onde thermique sphérique se propage. Si la température est suffisamment élevée pour que des réactions thermonucléaires se produisent dans l'onde thermique, le calcul montre que leur nombre est proportionnel au carré de l'énergie absorbée. C'est bien ce qui a été observé en utilisant une courte focale. En revanche, avec une longue focale l'éventail des angles d'incidence est moins ouvert et si l'on réduit l'intensité en éloignant le foyer de la surface, on obtient une proportionnalité avec la puissance 5 de l'énergie absorbée. Dans ces conditions, l'écoulement de plasma se rapproche du cas plan idéal représenté par le modèle et les réactions se produisent dans la zone chaude autour de la densité critique. Alors, la théorie restitue la puissance 5.

...



Restriction supplémentaire, le modèle ne vaut en réalité que pour un intervalle étroit de variation du paramètre d'interaction $I\lambda^2$: un facteur 20 à 30 tout au plus, alors que les intensités appliquées sur des cibles s'étagent sur au moins quinze ordres de grandeur. Cette limitation sera discutée dans le paragraphe suivant.

Les quelques cas passés sur ordinateur laissaient entrevoir des comportements bizarres dans le traitement des discontinuités lorsqu'une impulsion laser donc une intensité variable dans le temps était appliquée à la cible. Comme souvent, ils avaient pour origine des propriétés physiques mal appréciées sur le moment mais comprises à retardement. En fait lors de la montée de l'impulsion, nous avions affaire à des amorces de processus adiabatiques qui en y prêtant plus d'attention, auraient pu nous mettre sur la voie des fortes compressions avant que l'information nous parvienne de Livermore et de KMS. On peut au moins tirer de ce constat une leçon : l'expérimentation numérique, semblable à l'autre en cela, demande une interprétation basée sur de solides connaissances en physique.

Je dois dire à notre décharge que les sorties graphiques dont Limeil disposait à l'époque (autour de 1970), lorsqu'elles existaient, étaient rudimentaires. La plupart du temps, il fallait dépouiller des listings, en prenant bien garde à ne pas se tromper de colonne, pour reporter des chiffres sur du papier millimétré et tracer des courbes à la main, fastidieux travail qui ne facilitait pas l'usage de l'outil informatique. Sur ce point, Livermore avait des années d'avance et pouvait présenter dès 1972 de spectaculaires animations bidimensionnelles en couleurs sur film 16 mm qui ne devaient rien à la main de l'artiste (cf. **paragraphe 39**).

Pour utiliser au mieux l'interaction en vue des applications thermonucléaires, il convient de se placer, en jouant sur la longueur d'onde et l'intensité, dans les conditions les plus favorables. Ainsi une pression inversement proportionnelle à λ , impose d'aller vers les longueurs d'onde les plus courtes tout en restant dans la plage où prévaut la dépendance en puissance $2/3$ du paramètre d'interaction. En cela, le modèle a gardé longtemps une part d'actualité bien qu'il fût assez tôt dépassé en raison de la complexité des architectures de cibles imposée par la nécessité de contourner un certain nombre d'effets nuisibles dans le couplage laser cible.

34. CHOIX D'UN PARAMÈTRE D'INTERACTION

Lorsqu'avec un laser donné, on fait des expériences d'interaction avec une cible, la grandeur importante pour des études paramétriques est l'intensité du rayonnement laser là où le rayonnement rencontre la matière. Ce peut être au point focal d'une lentille ou d'un miroir ou encore à l'intersection du faisceau avec la surface d'un solide. Mais il existe des lasers de puissance émettant sur des longueurs d'onde différentes. À Limeil, comme dans bien d'autres laboratoires, on pratiquait des interactions aussi bien avec des lasers à verre au néodyme de longueur d'onde 1 mm qu'avec des lasers moléculaires à CO_2 à une longueur d'onde dix fois plus grande.

Dans le paragraphe précédent, il a été fait état de relations d'échelles impliquant la longueur d'onde dans l'interaction laser-cible. Elles

sont différentes pour la température du plasma d'interaction, fonction du produit $I\lambda^2$, et pour la pression qui varie comme I/λ . Or en appliquant les lois de l'électromagnétisme, on trouve que l'effet d'un champ électrique oscillant calculable par une intégration est proportionnel au quotient de la grandeur du champ par la fréquence ou si l'on préfère au produit de la valeur du champ par la longueur d'onde. L'intensité étant elle-même proportionnelle au carré du champ, il apparaît naturel de prendre pour *paramètre d'interaction* le produit $I\lambda^2$ de façon à pouvoir disposer d'une grandeur de référence applicable à toutes sortes de lasers. Une justification supplémentaire est que la température du plasma se prête à des mesures directes, ce qui n'est pas le cas de la pression. L'accumulation des résultats expérimentaux obtenus dans une multitude de laboratoires consolida ce point de vue.

La loi d'échelle pour la température est bien corroborée par l'expérience comme on le voit en utilisant une méthode chère aux astronomes : rassembler des données d'observation sur un diagramme aux coordonnées judicieusement choisies pour faire apparaître une tendance. Dans le cas de l'interaction laser-plasma, le choix s'imposait de lui-même : en portant sur des échelles logarithmiques, en abscisses le paramètre d'interaction et en ordonnées la température électronique mesurée, les points expérimentaux de Limeil auxquels on ajoutait les chiffres publiés par les nombreux autres laboratoires étaient assez bien regroupés le long d'une ligne brisée (**figure 45**). Aux intensités les plus courantes à l'époque, les points se répartissaient autour d'un segment de droite de pente $2/3$, un début d'organisation significatif car il renvoyait au *top model*.

En dessous de $10^{12} \text{ W}\mu^2/\text{cm}^2$, l'hypothèse de l'absorption pelliculaire à la coupure ne tient plus. L'absorption se fait en volume dans l'onde de détente à des densités inférieures à la valeur de coupure. C'est une complication qui rend illusoire la recherche d'une formulation analytique aisément maniable. Mais la loi empirique vérifiée sur six ou sept ordres de grandeur garde une simplicité de bon

loi : la température varie à peu près comme la puissance $1/3$ du paramètre d'interaction.

Aux intensités les plus élevées, de nombreux processus non linéaires entrent en jeu. Le seuil se situe aux environs de $10^{13} \text{ W}\mu^2/\text{cm}^2$. C'est la porte ouverte à une physique fascinante, mais cela entraîne une conséquence grave : l'énergie apportée par l'onde laser ne sert plus seulement à chauffer du plasma ; une partie va être transférée à celui-ci sous forme d'oscillations. C'est évidemment nuisible à la pression appliquée au milieu sous choc à l'endroit du front d'ablation, comme à l'émission de rayonnement thermique. Cependant, les expériences menées à Limeil s'accordaient avec une distribution électronique à deux températures dont seule la plus haute suivait la dépendance en puissance $2/3$ jusque vers $10^{15} \text{ W}\mu^2/\text{cm}^2$. Au-delà de cette valeur, le modèle ne tient plus en raison de la prépondérance des non-linéarités et l'on retrouve empiriquement une loi en puissance $1/3$. Les lasers d'avant 1975 ne permettaient guère de dépasser quelque $10^{16} \text{ W}\mu^2/\text{cm}^2$.

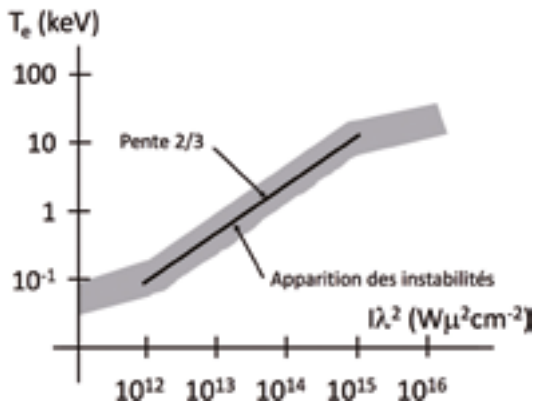


Figure 45 | En prenant pour paramètre d'interaction le produit $I\lambda^2$, les mesures de température électronique se situent majoritairement dans la zone en grisé de ce graphique. Entre 10^{12} et $10^{15} \text{ W}\mu^2/\text{cm}^2$, la pente est $2/3$ en accord avec le modèle d'interaction du **paragraphe 33**.

35. NON LINÉARITÉS

Norman Zabusky fut un grand théoricien des effets non linéaires autant qu'un expert en simulations numériques. Selon lui : « *Un plasma dépourvu de non-linéarités est comme un zoo sans éléphants* ». Ce propos, émis bien avant que l'on déclare écologiquement incorrecte la présence de certains animaux sauvages dans les parcs d'attractions et les cirques, reflète la réalité d'une physique à la complexité inépuisable.

La cohérence associée à l'intensité du rayonnement laser avait et aura toujours de quoi susciter l'intérêt des physiciens de toute la planète, attirés par l'infinie variété des effets associés aux interactions non linéaires entre ondes électromagnétiques intenses et milieux ionisés. C'est un immense domaine ouvert à la recherche.

On peut distinguer les effets liés à la densité d'énergie du champ électromagnétique de ceux dus aux couplages entre ondes. Dès le milieu des années 1960, les théoriciens ont commencé de les répertorier et de les étudier. On se limitera dans ce paragraphe à quelques exemples reconnus comme importants.

FORCE PONDÉROMOTRICE

La concentration d'un faisceau laser de grande intensité produit localement une densité d'énergie électromagnétique excessivement élevée, proportionnelle au carré de l'amplitude du champ électrique de l'onde. Lors de l'interaction avec un plasma cette densité d'énergie se comporte comme une pression dont la variation spatiale représente une force qui s'exerce d'abord sur les électrons puis, par le jeu de la séparation des charges, sur l'ensemble du milieu. Cet effet se renforce lorsque le plasma présente un gradient de densité. Tel est le cas dans le panache résultant de l'impact d'un faisceau focalisé sur une surface solide. Alors, les ondes ne peuvent pénétrer au-delà de la densité critique. Elles sont réfléchies donnant naissance à un système d'ondes stationnaires. Lorsque l'intensité s'accroît, la force pondéromotrice modifie le profil de densité dans le sens d'un raidissement (**figure 46**).

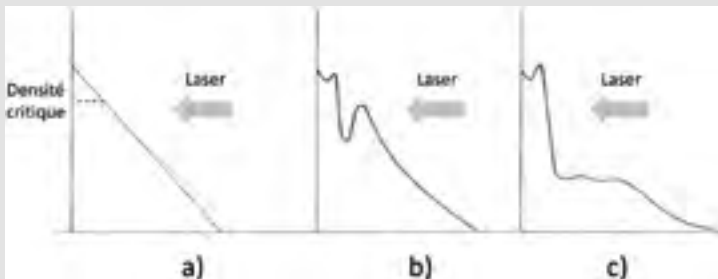


Figure 46 | Évolution d'un profil de densité sous l'effet de la force pondéromotrice : a) une onde laser incidente se réfléchit à la densité critique dans le gradient de densité initial ; b) une cavité se forme au voisinage de la densité critique ; c) raidissement.

En incidence oblique, la force pondéromotrice produit une modulation de la densité de plasma parallèlement à la surface. En quelque sorte, le faisceau laser interagissant avec un fluide ionisé construit son propre réseau de diffraction.

Tout plasma est le siège d'oscillations qui peuvent se propager de façon organisée ou au contraire désordonnée (turbulence). Les plus courantes sont les ondes de plasma électroniques dans lesquelles, comme leur nom l'indique, les électrons oscillent. Elles sont longitudinales et s'accompagnent de variations périodiques d'écart à la neutralité électrique. La fréquence propre d'oscillation des électrons, bien déterminée et proportionnelle à leur densité, est une des grandeurs caractéristiques des plasmas. Cette *fréquence de plasma* intervient dans la relation de dispersion de ces ondes comme dans le cas des ondes électromagnétiques. Elle est à la fois fréquence de coupure et fréquence de résonance.

Les ondes acoustiques ioniques, appelées aussi pseudos sonores, sont une autre catégorie importante d'oscillation dans les plasmas. Électrons et ions oscillent ensemble. Leur fréquence est très inférieure à la fréquence de plasma et leur vitesse de propagation dépend de la température électronique et de la masse des ions.

Le catalogue des ondes susceptibles de parcourir un plasma est assez fourni, surtout en présence d'un champ magnétique dont les lignes de force traversent le milieu. Ces ondes naissent spontanément ou sous l'effet d'une sollicitation extérieure, transposition au plasma du cas classique d'un oscillateur forcé.

Une onde laser incidente sur un plasma présentant un gradient de densité, rencontre principalement deux zones favorables à la croissance d'oscillations de plasma. La première est à la densité critique alors, la fréquence du laser est localement égale à la fréquence propre d'oscillation des électrons du plasma ce qui est un cas bien connu de résonance dans toutes les situations d'oscillateur forcé. Un second effet de résonance intervient à l'endroit où la densité a le quart de sa valeur critique. La fréquence laser est alors double de celle de plasma. Lord Rayleigh en son temps et hors de tout exemple pratique avait étudié par le calcul la dynamique de cet effet. Dans l'une et l'autre zone, de l'énergie du faisceau laser est transférée à de l'énergie d'oscillation à l'intérieur du panache de plasma au détriment de l'énergie thermique. On est en présence d'instabilités en raison de la croissance de modes indésirables. Encore plus défavorables sont les rétrodiffusions qui renvoient d'où elle vient la lumière laser.

AU ZOO DES COUPLAGES D'ONDES

Les oscillations dans un plasma sont diverses et interagissent entre elles et avec les ondes électromagnétiques qui le parcourent. Celles-ci ou bien disparaissent en donnant naissance à des ondes de plasma ou bien sont diffusées avec changement de fréquence. Le zoo des divers mécanismes pouvant intervenir est très peuplé : instabilité paramétrique (avec apparition simultanée d'ondes pseudos sonores), instabilité double faisceau oscillante, transformation linéaire, diffusion Raman, instabilité à deux plasmons...

Les couplages non linéaires de base entre ces modes relient au moins trois ondes dont l'une voit son intensité s'atténuer pour nourrir la croissance des deux autres. Les zones de résonance favorisent certains

de ces comportements instables. Les règles de sélection découlent de la composition des fréquences (conservation de l'énergie) et des vecteurs d'onde (conservation de la quantité de mouvement). Des cas significatifs sont présentés dans le tableau suivant.

Effet	Localisation		
Instabilité paramétrique	Densité critique ρ_c	Onde électromagnétique ω_L Onde de plasma électronique ω_e Onde acoustique ionique ω_s	$\omega_L = \omega_e + \omega_s$
Instabilité à 2 plasmons	$\rho_c/4$	Onde électromagnétique ω_L Deux ondes de plasma électronique ω_e	$\omega_L = 2\omega_e$
Diffusion Raman*	$\rho \leq \rho_c/4$	Onde électromagnétique ω_L Onde de plasma électronique ω_e Onde diffusée ω_D	$\omega_D = \omega_L - \omega_e$
Diffusion Brillouin*	$\rho \leq \rho_c$	Onde électromagnétique ω_L Onde acoustique ionique ω_s Onde diffusée ω_D	$\omega_D = \omega_L - \omega_s$

* Les diffusions Raman et Brillouin sont ainsi nommées par analogie avec la diffusion sur les cortèges électroniques des molécules et les modes acoustiques des solides, respectivement.

Ces effets ne sont pas spécifiques aux plasmas d'interaction laser. Mais la probabilité de leur occurrence augmente avec l'intensité de ce rayonnement. Le travail des théoriciens qui se sont intéressés à ces couplages entre ondes a été de déterminer, par le calcul, des seuils d'instabilité ainsi que la dynamique des modes produits.

36. LES SUITES D'UN EFFET VISITEUR

Les expériences d'interaction laser-matière menées en vue de la fusion nucléaire ont d'abord été de force brute. On compte sur l'intensité à l'impact du faisceau laser pour obtenir des écoulements de plasma intéressants. Mais le laser c'est aussi de l'optique, branche de la physique aux multiples raffinements. L'interaction laser-plasma en fait partie comme on eut l'occasion de s'en apercevoir à Limeil.

Il est bien connu que la présence de visiteurs dans un laboratoire ajoute à la perversité naturelle des objets inanimés mis en place dans des montages plus ou moins complexes. Sans aller jusqu'au légendaire effet Pauli qui veut que le passage d'un grand théoricien se traduise par un inévitable désastre matériel, qui n'a pas subi, en présence de tiers, un de ces ratages qui comptent dans la vie d'un chercheur ? Il arrive, plus rarement, qu'un « innocent » voie, sinon le roi nu, du moins des choses échappant aux professionnels dont il ne partage pas les présupposés. En ces temps d'avant les salles blanches et la climatisation au dixième de degré, collègues scientifiques, généraux, ministres, journalistes ou enfants des écoles voisines étaient admis dans les salles d'expériences et pouvaient assister de près à un tir laser. De telles visites se produisaient quelques fois dans l'année, plus fréquemment depuis septembre 1969. Souvent, dans les commentaires *a posteriori*, on entendit ce propos : « *c'est curieux, j'ai eu l'impression de voir de la lumière verte* ».

Le « *rayon vert* » fut d'abord un objet de plaisanterie. Mais il était assez facile d'aller voir. Cela se fit indirectement. Outil normal de diagnostic des plasmas chauds, la spectroscopie donne accès à une multitude d'informations : fond continu, positions et profils de raies d'émission, d'absorption ou diffusées. Fin 1972, Michel Decroisette était en charge auprès du laser L-5 d'un programme de diffusion Thomson sur lequel travaillaient Bernard Meyer et un scientifique du contingent, Yves Vitel, que je devais retrouver plus tard dans mon laboratoire universitaire.

Or après avoir mis en place un montage spectroscopique à haute résolution et large bande, ils avaient eu quelques surprises : la première était l'apparition d'une raie inattendue dont la fréquence était les 3/2 de la fréquence incidente ; cette raie était de plus élargie uniquement du côté des basses fréquences. Ces expériences montraient aussi que la fréquence double, c'est-à-dire le fameux rayon vert, était bien là ! Les visiteurs avaient eu raison, rien de surprenant donc. Mais l'analyse de la raie correspondante, avec la même instrumentation, révéla une structure également élargie de façon asymétrique vers les basses

fréquences. Cela força l'interprétation en termes d'effets non linéaires qui jusque-là étaient d'abord une affaire de théoriciens. Le dernier élément de ces observations en grande partie imprévues était une raie à la fréquence moitié (sous-harmonique).

Ces résultats (**figure 47**) auxquels j'avais apporté un début d'interprétation théorique furent rapidement publiés dans les *Physical Review Letters* (manuscrit reçu le 30 janvier 1973, article paru le 26 mars de la même année... les temps ont bien changé). Si l'existence des raies harmoniques avait été immédiatement confirmée par les autres laboratoires étudiant l'interaction, il n'en alla pas de même pour le sous-harmonique. C'était inquiétant et cela nous mettait mal à l'aise. Étions-nous sûrs d'avoir vu un effet réel ? Ce souci mis à part, les raies harmoniques apportaient de toute évidence des informations sur la physique non linéaire de l'interaction. Il paraissait important d'en développer l'étude.

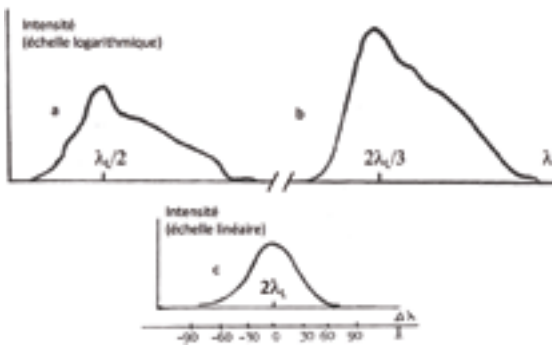


Figure 47 | Profils des raies harmoniques observés pour la première fois à Limeil. a) Harmonique 2 élargi du côté des basses fréquences ; b) harmonique 3/2 élargi également du côté des basses fréquences ; c) sous-harmonique. Les profils ont été relevés par densitométrie de spectres recueillis par voie photographique. λ_l est la longueur d'onde du laser. © CEA.

ORIGINE DES RAIES HARMONIQUES

Elles sont multiples. Déjà l'action d'une onde électromagnétique sur un électron provoque sous l'effet de la composante magnétique des

oscillations de la particule selon les harmoniques de la fréquence incidente. Il en va de même de la population d'électrons d'un plasma présentant un gradient de densité : miroir oscillant. Ce sont autant de sources pour la génération d'harmoniques.

Les ondes de plasma jouent également un rôle important. Elles peuvent se recombinaison avec les ondes laser incidentes pour donner naissance à des fréquences harmoniques par diffusion Raman anti-Stokes, c'est ainsi que l'on appelle un déplacement spectral vers les hautes fréquences. Cet effet se produit dans les zones de résonance d'un gradient de densité. Il dépend de la présence d'ondes électroniques créées par des instabilités décrites dans le paragraphe précédent (tableau).

Zone de résonance	Fréquence des ondes de plasma	Fréquence électromagnétique produite
À la densité critique ρ_c	$\omega_e = \omega_L - \omega_s$	$\omega_{AS} = 2\omega_L - \omega_s$
A $\rho_c/4$	$\omega_e = \omega_L/2$	$\omega_{AS} = 3\omega_L/2$

En ce qui concerne l'harmonique 3/2, le couplage de cette recombinaison avec l'effet paramétrique à deux plasmons est le mécanisme le plus probable. Le spectre de la raie harmonique dépend de la direction d'observation. On interprète facilement un dédoublement de la raie rétrodiffusée mais pour le reste, la situation demeure assez confuse malgré les nombreuses études menées dans tous les laboratoires de la planète.

Le cas de l'harmonique 2 pose des problèmes différents. L'élargissement asymétrique de la raie s'interprète bien à partir de l'instabilité paramétrique. La structure contient des informations relatives au spectre des ondes pseudo-sonores ainsi induites. Alain Salères détermina expérimentalement le seuil d'apparition de la raie ainsi que l'évolution de son intensité et de son profil en fonction de l'intensité incidente que la présence de cet harmonique permet d'évaluer avec précision à la coupure. Il prouva qu'au-delà de son caractère intrinsèquement intéressant de phénomène non linéaire complexe, la génération d'har-

moniques est aussi un moyen de diagnostic particulièrement attrayant et toujours en usage.

Une particularité du profil de l'harmonique 2 observé sous certains angles est un satellite du côté des basses fréquences. Lors d'un séjour à l'université de Californie pendant l'été de 1976, j'avais formulé une hypothèse quant à l'origine de ce satellite. En effet, pendant l'interaction, un champ magnétique de quelques mégagauss peut prendre naissance à partir de la partie dissipative de la force pondéromotrice. L'écart en fréquence du satellite par rapport au sommet de la raie correspond à la fréquence cyclotronique des électrons. Cette idée a fait l'objet, au laboratoire de Livermore, d'une étude par simulation numérique (entreprise avec une remarquable absence d'inertie) qui en a confirmé le bien-fondé.

Des effets de cascade sont à l'origine d'harmoniques d'ordre supérieur. Avec Jacques Martineau, nous avons proposé une théorie analytique simple, basée sur le déphasage dû à un chemin optique oscillant. Je montrais au passage comment un développement en fonction de Bessel, un des premiers sinon le premier dans ce contexte, permet de les prévoir ainsi que leurs satellites, et de déterminer leurs intensités relatives. De telles cascades ont fait l'objet, plus tard, d'études approfondies par exemple à Los Alamos ou, en France, au LULI.

Le fascinant problème de l'interaction non linéaire et de la génération des harmoniques est une physique aux ramifications infinies. Elle a fait l'objet d'une présentation dans le numéro de 1979 des *Images de la Physique*, publication du CNRS à laquelle j'avais participé. Je lui ai fait une large place dans l'article de revue sur l'interaction à haute intensité (pour l'époque) publié en 1985 alors que j'étais passé à l'université depuis quelques années.

Et c'est encore de Livermore qu'est venue la confirmation, numérique d'abord, expérimentale ensuite, de l'existence du sous-harmonique. Cette raie a même servi à déterminer la température électronique du plasma.

7

La fusion inertielle au temps des pionniers

37. UN PEU DE THERMODYNAMIQUE

Afin de comprimer une sphère pour obtenir des conditions de fusion, il est nécessaire d'exercer à la surface une pression convenablement programmée dans le temps. Ce peut être le rôle d'un rayonnement laser incident sur du deutérium-tritium à l'état solide comme dans les premières simulations dévoilées en 1971-1972, mais on a su depuis que cette configuration n'était qu'une sorte de leurre, la seule façon autorisée de présenter la compression et qui implique des impulsions laser adaptées.

Laissant de côté pour l'instant toute idée de dynamique, il s'agit d'atteindre une valeur prescrite à l'avance du produit ρR de la masse volumique par le rayon final en comprimant une masse donnée M de matière. En faisant l'hypothèse d'une compression adiabatique, c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur, un calcul de thermodynamique élémentaire fournit, par intégration du travail de la force de pression entre un état initial et l'état final souhaité,

l'énergie E nécessaire à la compression. On trouve ainsi sous des conditions peu restrictives sur l'équation d'état reliant pression, masse volumique et température, que cette énergie varie comme la puissance $2/3$ de la masse à imploser. Plus celle-ci diminue, moins il faudra d'énergie et ce dans d'importantes proportions car E tend vers zéro bien plus rapidement que M . Les petites masses sont de ce point de vue avantageuses. Mais on verra plus loin qu'il existe des limites à la compression et qu'il n'est pas possible en pratique d'avoir affaire à des masses aussi minimales qu'on le veut. À cet égard, les simulations numériques monodimensionnelles se sont révélées porteuses d'un optimisme trompeur.

En ce qui concerne la puissance maximale demandée à la source d'énergie produisant la compression, on la trouve indépendante de la masse. Pour les ρR visés, elle est supérieure à 100 térawatts (valeur 1 000 fois supérieure à la puissance électrique installée en France). Elle varie comme le carré de ρR .

Dans le paragraphe suivant, il sera question de simulations numériques. Elles sont indispensables étant donnée la complexité des problèmes à traiter. Mais il est toujours utile de pouvoir en contrôler les résultats en abordant le problème de l'implosion de manière analytique. J'ai pour ma part eu recours à deux approches différentes de la dynamique unidimensionnelle de l'implosion.

APPROCHES ANALYTIQUES DE LA COMPRESSION DE CIBLES SPHÉRIQUES

La première consiste à rechercher des solutions auto-semblables en remplaçant dans les équations le rayon et le temps par une seule variable qui est une combinaison sans dimensions. On obtient ainsi des profils de densité, de pression, de vitesse matérielle et de température à l'arrière un front de choc centripète et qui s'étendent jusqu'à l'infini. Le choc accélère au fur et à mesure de sa progression vers l'intérieur. Appliquée à un granule fini en compression, une telle solution qui avait fait l'objet d'un rapport interne est peu réaliste et

...
ne conduit pas directement aux fortes compressions requises par la fusion nucléaire.

Les bases de la seconde méthode, plus physique, avaient été posées par Ray Kidder. Elles sont sans doute le reflet d'une longue pratique de l'hydrodynamique lagrangienne sur ordinateur. L'idée de départ est que lors de la compression adiabatique, toutes les couches concentriques d'une microsphère (on reste unidimensionnel pour les raisonnements) suivent la même trajectoire isentropique. On revient ainsi à une approche thermodynamique. Alors le déroulement temporel et les variations selon le rayon sont traités séparément. Cela permet de dégager des lois de pression en fonction du temps qui toutes ont la propriété de diverger au bout d'une durée déterminée (**figure 48**). J'en avais donné une analyse assez complète qui fit partie d'un article soumis en 1975 à la *Revue de physique Appliquée* et paru un an plus tard. J'y avais pour co-auteur Jean-Marie Reisse qui avait supervisé des simulations numériques apportant d'utiles éléments de comparaison.

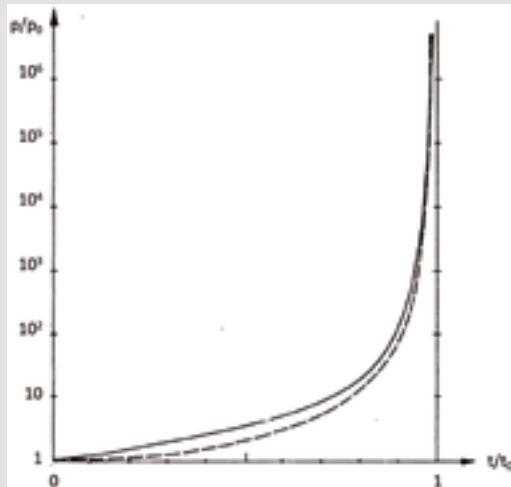


Figure 48 | Deux évolutions temporelles de la pression p rapportée à une valeur initiale p_0 (échelle logarithmique) au cours de la compression isentropique d'une sphère. Toutes deux présentent une divergence pour un temps de focalisation t_0 (pôle).

...
 Les variations en fonction du rayon de la densité, de la température et de la pression se caractérisent par une forte croissance, au moins parabolique, du centre vers la périphérie où s'applique la loi de pression déterminée indépendamment. Étant isentropique, ce modèle ne comporte pas d'onde de choc.

Malgré une part d'irréalisme, la compression isentropique homogène permet d'accéder à une description satisfaisante de la dynamique de l'implosion d'une microsphère de combustible thermonucléaire initialement à l'état solide. À chaque instant, le profil de densité, par exemple, affecte la forme illustrée par la **figure 49**. Une onde de choc centripète introduit de l'entropie et transforme le solide non perturbé en un fluide compressible au cours du temps suivant une loi de pression de la forme présentée sur la **figure 48** avec un profil de densité également représentatif de la compression isentropique homogène. La densité peut localement, près de la limite extérieure, devenir extrêmement élevée. Évidemment, cette vision ne tient plus après l'arrivée du choc au centre.

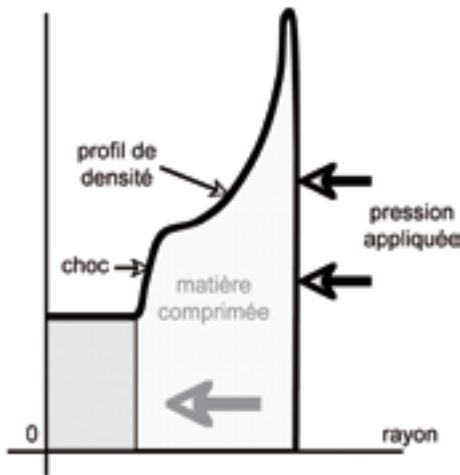


Figure 49 | Profil de densité combinant un front de choc et la compression isentropique homogène en amont de celui-ci.

Alors les processus cessent d'être en partie isentropiques et la suite n'est guère accessible qu'à la simulation numérique. On peut toutefois imaginer quelques conséquences de l'arrivée au centre des ondes de choc. Si la symétrie sphérique est rigoureusement respectée, un front de choc réfléchi va se propager vers l'extérieur dans la matière comprimée, atteindre la surface et si la pression appliquée continue de croître va s'y réfléchir à nouveau et le cycle peut recommencer. Une simulation monodimensionnelle confirme cette succession d'événements.

Au cours d'une telle série de rebonds, la température s'élève, la densité s'uniformise et le mouvement de la surface externe ralentit progressivement. De l'énergie cinétique a ainsi été convertie en énergie thermique de façon à atteindre au moins localement, au voisinage du centre, les conditions de température nécessaires à l'amorçage de la réaction de fusion. Grâce à une onde de chaleur qui se propagera alentour, toute la masse comprimée finira par réagir et si le ρR final est suffisant, le gain peut s'avérer considérable. Cet *allumage par point chaud central* implique une symétrie sphérique longtemps préservée au cours du processus d'implosion, hypothèse optimiste. Il était semble-t-il depuis longtemps dans les cartons de Livermore et n'était pas inconnu d'autres centres de recherches.

Mais quels que soient les écarts à la symétrie, la matière entraînée par le choc est animée d'une vitesse élevée et son énergie cinétique sera transformée d'une façon ou d'une autre en énergie thermique au voisinage du centre. Les simulations numériques bidimensionnelles montrent que des conditions d'allumage par point chaud central peuvent ainsi être toujours atteintes (cf. **paragraphe 40**). Dans tous les cas, le paramètre important pour ce processus est la vitesse d'implosion, des centaines de kilomètres par seconde, qu'il convient de communiquer à la matière sur un trajet de l'ordre du millimètre parcouru en quelques nanosecondes.

L'ordre de grandeur des vitesses à communiquer sur de courtes distances est un indicateur de la violence du procédé de mise en condition du combustible thermonucléaire. Un processus brutal est

par nature difficile à maîtriser. En dilatant le temps, la simulation numérique adoucit la dynamique.

38. QUAND LA FUSION PAR LASER MARCHE... SUR ORDINATEUR

L'expérimentation numérique a joué dès le départ un rôle capital dans le développement des projets de fusion nucléaire par laser. L'exemple de l'évolution des idées de Keith Brueckner (cf. *supra* **paragraphe 28**) montre même un effet de sérendipité par l'apparition, lors du dépouillement des sorties d'ordinateur, d'un résultat qu'il n'attendait pas.

Les résultats présentés en 1972 à Montréal et repris dans l'article paru la même année dans *Nature*, étaient l'aboutissement d'années de travail poursuivi dans le secret à Livermore. Grâce à George Zimmerman, le code numérique utilisé pour calculer les implosions induites par laser était déjà très perfectionné. Appelé LASNIX, nom modifié un peu plus tard, je ne sais pourquoi, en LASNEX, il comportait environ 5 000 instructions impliquant à l'époque autant de cartes perforées selon le vénérable système Hollerith. Il incorporait une multitude de phénomènes physiques dans une formulation lagrangienne où la matière est divisée en cellules, chacune étant un système thermodynamique particulier, bien déterminé, échangeant de l'énergie avec ses voisines à travers leurs interfaces communes. Les cellules sont des couches sphériques concentriques en géométrie monodimensionnelle, des tores à section quadrangulaire emboîtés en géométrie bidimensionnelle avec symétrie de révolution. Il est ainsi possible de traiter l'interaction du rayonnement laser avec la couronne de plasma qui provoque l'implosion du cœur de la cible (**figure 50**), aussi bien que l'amorçage des réactions thermonucléaires et la combustion étendue à l'ensemble de la masse comprimée.

Avant la convergence des chocs, la partie interaction simulée reproduit des profils conformes à la **figure 43** Mais pour obtenir une croissance de la pression proche de celle qui est représentée sur la **figure 48** les chercheurs de Livermore avaient imaginé une puissance s'élevant par paliers suivant le schéma présenté sur la **figure 51a**.

C'était une pure construction théorique sans rapport avec une quelconque réalité de l'époque en matière de technologie laser.

IMPULSIONS LASER APPLIQUÉES À LA CIBLE DANS LES SIMULATIONS LASNEX DE 1972

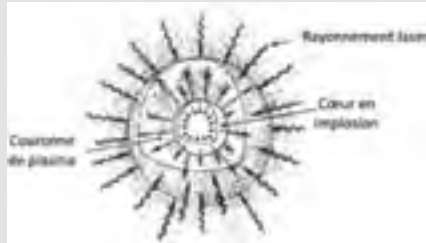


Figure 50 | Schéma général de la phase de compression. Une multitude de faisceaux laser interagissent avec la couronne du plasma et provoquent l'implosion du cœur.

Ces simulations utilisaient une succession totalement artificielle (**figure 51a**) d'impulsions laser. Énergie, puissance et fréquence croissent d'une impulsion à la suivante tandis que leur durée diminue.

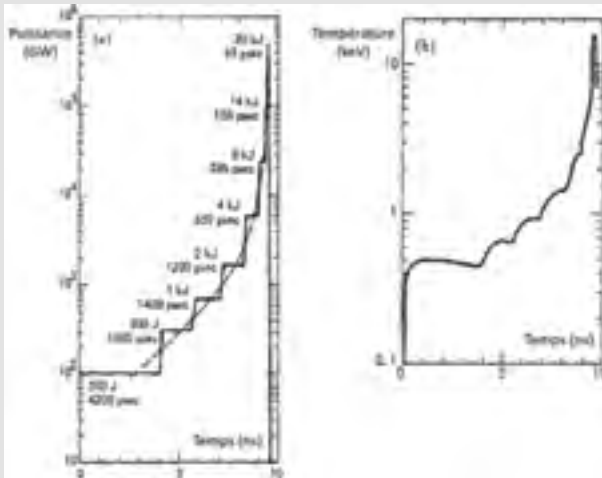


Figure 51 | (a) Exemple de succession d'impulsions de plus en plus courtes mais d'énergie et de puissance croissantes afin de suivre au plus près l'idéal représenté par la courbe en tirets ; (b) température électronique au niveau de la densité critique.

Cette partie interaction laser plasma était sujette à caution comme l'avait immédiatement décelé Kidder à Montréal. En revanche, le traitement de la compression et de la réaction thermonucléaire était nettement plus sérieux et peut encore servir de référence cinquante ans plus tard.

IMPLOSION SELON LASNEX

Ne retenant que l'évolution de la masse comprimée, on voit sur un exemple détaillé dans les publications de Nuckolls et collaborateurs (**figure 52**) qu'en moins de 7 nanosecondes, la pression augmente de près de 3 ordres de grandeur tandis que la vitesse d'implosion s'accroît jusqu'à dépasser les 100 km/s.

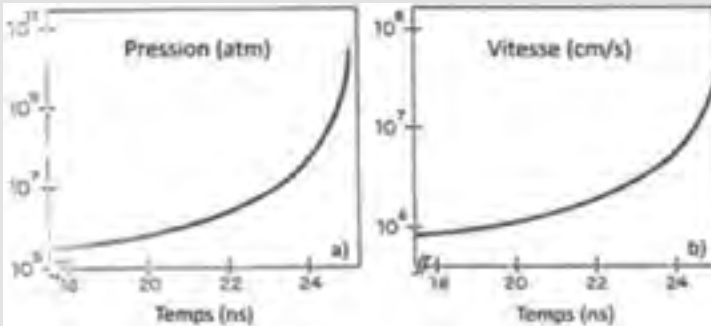


Figure 52 | Évolutions temporelles obtenus avec le code LASNEX : a) pression ; b) vitesse d'implosion.

On peut aussi suivre les trajectoires thermodynamiques des zones centrale et périphérique en portant sur un graphique la température ionique en fonction de la masse volumique (**figure 53**). Dans ce diagramme aux coordonnées logarithmiques, les adiabatiques sont représentées par des droites de pente $2/3$ lorsque l'équation d'état est du type gaz parfait monoatomique ou gaz de Fermi dégénéré. Cette dernière correspond au deutérium-tritium comprimé dans les couches périphériques.

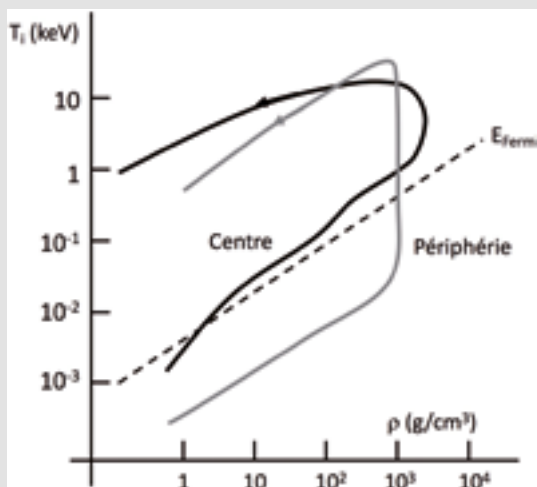


Figure 53 | Trajectoires thermodynamiques d'après le code LASNEX.

La zone centrale subit des échauffements reliés à l'arrivée d'ondes de choc qui portent la température jusqu'à des valeurs permettant l'amorçage de réactions thermonucléaires. La couche périphérique suit une isentropique (pente 2/3) jusqu'à l'instant où elle est atteinte par l'onde thermique issue de la zone centrale et participe à son tour à la réaction.

RÉACTION THERMONUCLÉAIRE

La **figure 54a** montre les profils de densité et de température ionique en fin de phase d'implosion. Au voisinage du centre de la sphérule, les conditions sont très favorables à l'amorçage de réactions thermonucléaires avec une température ionique supérieure à 10 keV. Et comme on le voit sur la **figure 54b**, en quelque 5 picosecondes la réaction s'étend à tout le milieu comprimé pour libérer une énergie de fusion 20 fois supérieure à l'énergie laser mise en œuvre pour la provoquer.

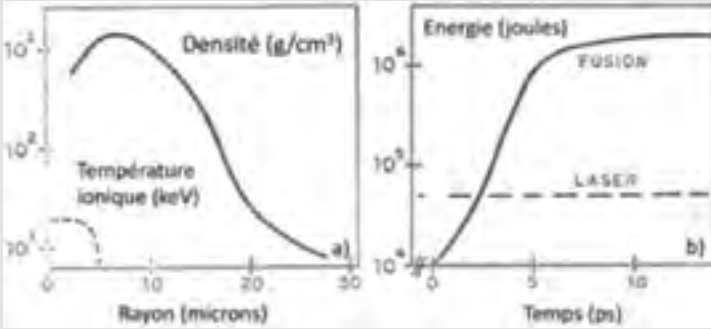


Figure 54 | (a) Profils de densité et de température ionique à l'instant de l'amorçage des réactions de fusion ; (b) énergie de fusion libérée au cours du temps.

En 1972 à Livermore, les sorties graphiques étaient déjà suffisamment avancées pour être assemblées en un film d'animation correspondant à un cas « canonique » d'une impulsion laser de 54 kJ. La **figure 55** montre deux images de simulation bidimensionnelle relatives à la phase de combustion qui ne dure que quelques picosecondes.

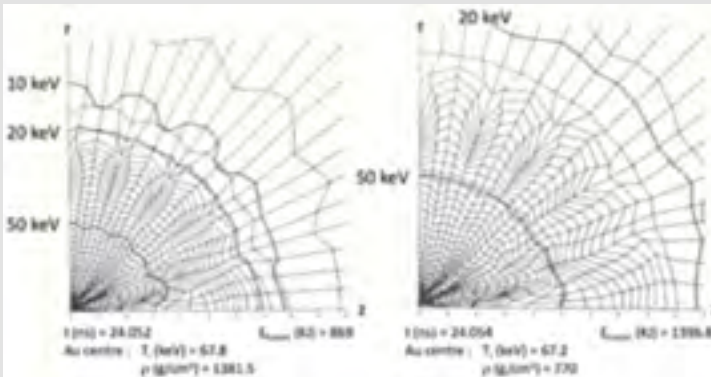


Figure 55 | Deux images extraites d'un film d'animation réalisées à l'aide du code LASNEX en 1972. Évolution du maillage bidimensionnel (détente) et progression des isothermes (température ionique, traits gras) entre deux instants séparés par deux picosecondes seulement. Le champ visualisé est de 25 μm par 25 μm. Pour suivre la combustion, le pas en temps était divisé par 1 000 par rapport à la phase de compression.

Visualiser en deux dimensions, l'évolution de la cible révèle des écarts à la symétrie sphérique. L'amorçage de la réaction thermonucléaire se produit en deux temps au centre de la configuration. Après un faux départ, une deuxième élévation de la température au centre provoque une onde de chaleur qui s'étend à l'ensemble de la masse comprimée ainsi amenée à réagir.

La simulation numérique a une double finalité : modéliser aussi fidèlement que possible les phases d'implosion et de combustion thermonucléaire ; procéder à des études paramétriques. Pour la fusion inertielle, elles ont été relatives soit à des cas où l'ensemble de la boule comprimée réagit en même temps, soit à des cas d'allumage par point chaud central et propagation de la réaction dans toute la masse comprimée. Les résultats de ces derniers sont résumés en un graphique (**figure 56**). Le gain est ici le rapport entre l'énergie libérée par les réactions de fusion et l'énergie de l'impulsion laser ayant servi à comprimer la cible. Les courbes de gain en fonction de la compression mesurée par rapport au DT liquide sont tracées en coordonnées logarithmiques une fois spécifiée l'énergie laser.

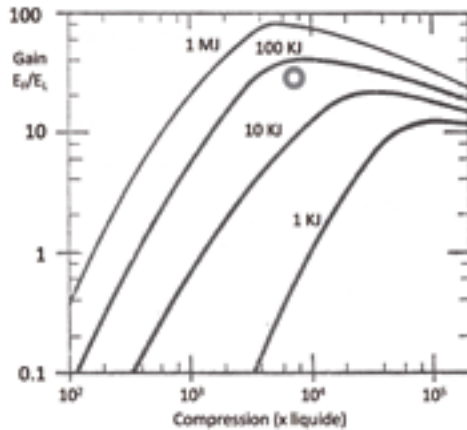


Figure 56 | Gain en fonction de la compression à énergie laser donnée pour des cas où l'allumage se produit dans un point chaud central. Le cercle correspond aux conditions du film d'animation qui sont proches d'un optimum.

La figure montre qu'à énergie laser donnée, le gain passe par un maximum au-delà duquel l'énergie nécessaire à la compression devient trop importante et pèse de plus en plus lourd sur le bilan final. La valeur optimale de la compression est d'autant plus élevée que l'énergie laser est faible, ce qui souligne la difficulté d'obtenir un gain supérieur à l'unité dans ces conditions et met à mal l'idée d'un « *break even* » à peu de frais. En 1972 apparaissait déjà clairement l'intérêt d'aller vers le mégajoule.

39. MICROBALLONS ET L'ART DE LES IRRADIER UNIFORMÉMENT SELON KMS

Il existe bien des palliatifs à l'irréalisme de l'interaction laser appliquée directement à un granule solide à des températures proches du zéro absolu. Le premier du genre a été mis en pratique par KMS-Fusion. Il s'agit de microballons de verre emplis d'un mélange deutérium tritium sous haute pression.

Au départ il y avait un produit industriel. Par soufflage à travers un bain de verre fondu, on obtient une multitude de bulles dont l'ordre de grandeur du diamètre est le dixième de millimètre mais la dispersion est très grande. On en remplit des flacons mis dans le commerce en vue de divers usages.

Pour servir de cible dans des expériences de fusion par laser, des opérations de tri, automatisées dans la mesure du possible, sont nécessaires afin de sélectionner les bulles de verre qui présentent toutes les bonnes caractéristiques de taille, d'étanchéité, de sphéricité... autant de procédés mis au point par KMS. L'étape suivante est le remplissage en deutérium tritium qui se fait par diffusion à travers la paroi de verre dans une enceinte portée à une température suffisante. La condensation du DT sur la paroi en une couche solide d'épaisseur uniforme a été le dernier stade dans la préparation de certaines cibles.

Le microballon, collé sur un piédestal (**figure 57**), était finalement mis en place dans la chambre d'interaction pour être soumis au rayonnement laser.



Figure 57 | Microballon monté sur son piédestal dans la chambre d'interaction. Son diamètre est d'environ 0,1 mm. L'épaisseur de la paroi est d'un micromètre. © KMS-Fusion.

Un problème qui se posait à KMS-Fusion était d'obtenir un éclairage aussi uniforme que possible à la surface du microballon alors que l'entreprise ne disposait que de deux chaînes d'amplification des impulsions laser. Il fallait donc concevoir et réaliser des optiques à grande ouverture. Ce fut le dispositif DBIS (« *Double Bounce Illuminating System* »), combinant lentilles de focalisation et miroirs ellipsoïdaux, dont deux versions furent construites et utilisées dans les expériences de fusion nucléaire.

ILLUMINATION D'UN MICROBALLON PAR DEUX FAISCEAUX LASER, SYSTÈME DBIS

La **figure 58** est un schéma de principe du dispositif catadioptrique de KMS-Fusion (**figure 59**) destiné à produire un éclairage aussi uniforme que possible à la surface d'un microballon.

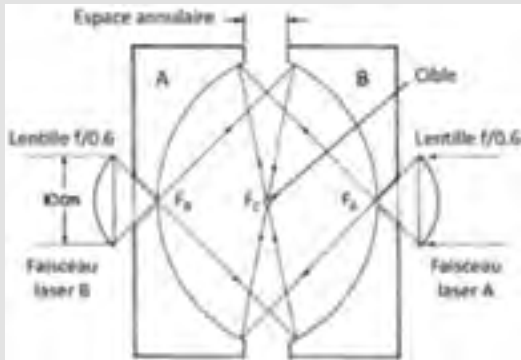


Figure 58 | Système de focalisation à grande ouverture DBIS pour deux faisceaux laser (première version). F_C est le foyer commun aux deux miroirs ellipsoïdaux A et B. F_A et F_C sont les deux foyers de l'ellipsoïde A, F_B et F_C ceux de l'ellipsoïde B. L'espace annulaire entre les deux miroirs servait aux diagnostics et aux observations. © KMS-Fusion.



Figure 59 | Kent Moncur et DBIS-1. © KMS-Fusion.

Des clichés en rayons X pris à l'aide d'une caméra à sténopé (**figure 60**) confirmaient que l'impact des faisceaux laser conduisait bien à l'implosion que prévoyaient les simulations numériques pour de tels cas, le verre du microballon soumis au

rayonnement servant de piston. C'est ainsi qu'en 1974, KMS-Fusion obtint les premières réactions de fusion nucléaire par implosion de cibles de petite taille : de l'ordre de 50 μm de diamètre. La récolte de neutrons était assez abondante.

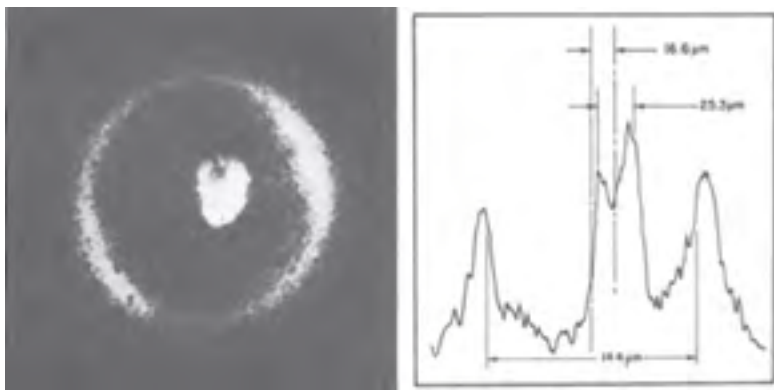


Figure 60 | Implosion d'un microballon (KMS-1974). À gauche : sténopé en rayons X intégré dans le temps ; à droite : densitométrie suivant un diamètre. On distingue l'émission due à l'interaction du rayonnement laser avec la surface externe du microballon et l'émission plus tardive associée à la concentration de matière accompagnée d'un chauffage intense. Ce diagnostic met en évidence des écarts à la symétrie sphérique : décentrement et déformation. © KMS-Fusion.

Ces résultats furent cependant contestés par les chercheurs de Livermore qui demandèrent à visiter les installations d'Ann Harbor afin de procéder sur place à une revue de détail de l'expérience pour le compte de l'AEC. Il n'était pas question de refuser mais selon des anciens de KMS-Fusion, le système catadioptrique de focalisation DBIS-1, déclaré pour l'occasion secret industriel (cette qualification devait se prolonger quelque temps), fut soustrait au regard des visiteurs. On le mit à l'abri dans un lieu clos avec un gardien en uniforme devant la porte !

DBIS-1 et 2 auraient pu finir exposés dans un musée des technologies. Après la déconfiture de KMS, une proposition fut en effet de les donner à la Smithsonian Institution. Les pourparlers n'aboutirent pas.

Les microballons irradiés sur toute leur surface par le rayonnement laser étaient un premier pas vers les architectures de cibles complexes rendues nécessaires pour contribuer à optimiser les implosions. Le succès de KMS en 1974 était très loin des conditions de fusion. Ce n'était qu'un petit pas selon la remarque acerbe mais juste de l'AEC. Cependant, on peut le considérer comme un autre marqueur, côté neutronique cette fois, de la fin de l'ère des pionniers.

Étapes neutroniques du temps des pionniers

Année	1968	1969	1971	1974
Institution	Institut Lebedev (Moscou)	CEA-Limeil	Institut Lebedev (Moscou)	KMS-Fusion (Ann Harbor)
Nombre de faisceaux	1	1	9	2
Impulsion	Picoseconde 20 J	Nanoseconde 100 J	Nanoseconde 200 J	Subnanoseconde 790 J
Cible	DLi	Bâtonnet D ₂ solide	Microsphère en (CD ₂) _n	Microballon empli de DT
Neutrons/tir	?	500–5.10 ⁴	10 ⁷ *	10 ⁷
Détecteur	Scintillateur	Scintillateur + compteur BF ₃	Émulsion	Émulsion
	Émission sporadique	Reproductible, contrôlable	*Total de trois tirs	Reproductible

40. LIMITES À LA COMPRESSION

Que ce soit par le raisonnement, le calcul ou la simulation numérique, il est manifeste que la compression est l'élément déterminant pour la réussite de tout projet de fusion inertielle. Il en va ainsi dans la Nature : les étoiles naissent de la concentration de vastes nuages de gaz, essentiellement de l'hydrogène, dont la masse est suffisante pour que la force de gravitation attire la matière de façon à constituer une boule qui se contracte. En même temps, elle s'échauffe. Il arrive un moment où les conditions sont réunies pour qu' autour du

centre s'amorcent des réactions thermonucléaires. Le chauffage qui en résulte crée une pression qui s'oppose à la gravité. Dans le meilleur des cas, un régime permanent est atteint qui peut durer des milliards d'années comme cela se passe dans le Soleil. Au cœur d'un tel astre l'hydrogène se transforme lentement en hélium au sein d'un milieu dont la densité atteint des milliers de fois celle de l'état liquide.

Dans la fusion inertielle, on se propose d'obtenir des compressions comparables à celles mises en jeu dans les astres par l'action d'une force extérieure. Avant toute chose, il est donc important d'une part, de savoir jusqu'à quelle densité il serait possible de parvenir étant données la puissance et l'énergie laser disponibles et d'autre part, de définir la manière dont on transfère cette puissance et cette énergie à la sphère de DT. Il convient aussi d'évaluer le rendement de cette opération. Sur le premier point, les relations établies dans le **paragraphe 37** à partir de considérations thermodynamiques simples permettent de répondre. Mais il reste une incertitude sur l'état initial qu'un éventuel préchauffage pourrait altérer. Quant au second point, toute la physique de l'interaction et l'architecture des cibles y contribuent. C'était, jusqu'au tournant des années 1970, l'ouverture progressive d'un vaste domaine de recherches et d'innovations aux contours indéfinis.

On aura compris, avec l'allumage par point chaud, que le succès repose aussi sur les merveilleuses propriétés du centre dont il convient de s'approcher au plus près sans trop s'écarter de la symétrie sphérique. Sous cette condition, idéalement, la compression isentropique homogène serait en mesure d'atteindre des densités et des températures aussi élevées qu'on le désire. Or la confrontation avec le réel introduit des limitations dont il faut s'accommoder à défaut de pouvoir s'en affranchir.

Pour être crédible, la modélisation de l'implosion d'une sphérule de deutérium-tritium oblige de prendre en compte tout le savoir acquis dans une multitude de domaines relevant de la physique comme des méthodes numériques. Le problème est que certains phénomènes

ne sont pas intégrés dans les simulations soit par ignorance, soit par incompatibilité avec les représentations adoptées.

Ainsi, certains savaient déjà et d'autres avaient (re)découvert qu'au cours d'un processus d'implosion, l'objet à comprimer subit des déformations par amplification des défauts, d'où qu'ils viennent : les imperfections de la sphère initiale, fussent-elles minimales, comme les irrégularités de l'éclairement auquel est soumise la surface externe. Ces effets se sont manifestés très tôt aussi bien dans les expériences (**figure 60**) que dans les simulations bidimensionnelles (**figure 55** près de l'axe).

À Livermore, on avait semble-t-il une grande confiance dans les résultats fournis par ce fameux code LASNEX que Brueckner, par dérision, avait appelé « l'Oracle ». À deux dimensions, la rigidité due à l'existence du maillage a pour effet d'amortir la croissance des écarts à la sphéricité. La taille des cellules, commandée par la capacité des ordinateurs et le temps de calcul disponible, impose une limite inférieure à l'étendue des inhomogénéités. Il en résulte une surestimation de la compression, préalable à tout événement thermonucléaire. Ce point clé est aussi – jusqu'à quand ? – le point noir de la fusion inertielle.

41. CE QUI NE POUVAIT PAS MARCHER

Les implosions numériques de 1972, en provenance de Livermore comme de KMS, concernaient une boule de DT initialement à l'état solide et soumise directement à l'impact d'un rayonnement laser, convenablement programmé. Pour de multiples raisons, c'était irréaliste. On vient d'en voir un exemple avec des écarts à la sphéricité manifestement sous-évalués.

Dans les codes numériques, l'interaction laser cible était régie par une absorption linéaire du rayonnement selon des coefficients trouvés dans la littérature consacrée à la physique des plasmas. Or en suivant l'évolution de la puissance selon la **figure 51a**, l'intensité appliquée à la couronne prend rapidement et dépasse des valeurs correspondant à l'apparition de diverses non linéarités qui vont affecter le transfert

vers l'énergie thermique du plasma au détriment de la pression appliquée. Un autre effet délétère est l'accélération d'électrons susceptibles d'aller provoquer, au cœur de la cible, un préchauffage nuisible à la compression.

Or cette physique nouvelle de l'interaction laser plasma sous haute intensité, qui serait à bref délai mise en évidence par l'expérience (cf. *supra* **paragraphe 36**), commençait d'être étudiée par la fine fleur des théoriciens des plasmas qui sur tous les continents publiaient leurs premiers résultats. Ray Kidder était évidemment du nombre. À Livermore même, il ne resta pas longtemps seul sur ce créneau. Il y fut bientôt concurrencé par de nouveaux arrivants. Bill Krueer, Kent Estabrook et J. J. Thomson, avec le concours de Jonathan Katz thésard de John De Groot à l'université de Californie (sur le campus de Davis), apportèrent des contributions destinées à être intégrées à la partie interaction du code LASNEX. Mais au cours de cette période encore pionnière, la modélisation ne prenait en compte que le renforcement de la queue de distribution des électrons du côté des hautes énergies réduisant ainsi l'énergie thermique du plasma. En revanche, les rétrodiffusions étaient passées sous silence, faute peut être de pouvoir quantifier leur bien plus grande nocivité. Quant aux irrégularités d'éclairement indissociables de la cohérence du rayonnement laser, elles étaient minimisées et représentées par une simple ondulation azimutale.

Rétrospectivement, la façon de traiter l'interaction dans les premières publications sur la fusion par implosion apparaît discutable. Sa valeur n'était guère supérieure à celle qu'on attribue d'ordinaire à un exercice académique. À ce titre, la simulation numérique d'un procédé peu réaliste pouvait servir d'artifice pour obtenir une loi de pression propre à mettre en condition le cœur comprimé. Cela n'allait pas au-delà d'une démonstration de principe, suffisante cependant pour marquer durablement les esprits.

Sur le moment, cela pouvait passer, sauf aux yeux de Kidder qui gardait le silence. Mais très vite apparurent les premiers dessins de

cibles visant à minimiser les effets nuisibles de l'interaction laser plasma tout en conservant le concept de l'attaque directe. Elles étaient constituées de couches concentriques. On y trouvait par exemple de l'extérieur vers l'intérieur : un ablateur fait d'un composé hydrogéné, une mince coquille en métal lourd servant à la fois de pousseur et de barrière thermique, enfin le mélange deutérium-tritium sous forme gazeuse ou condensée. L'étude de telles architectures participait au lancement de l'ère des grands projets.

42. IL MANQUAIT UNE PIÈCE AU PUZZLE

Dans la fusion inertielle selon les schémas précédents, l'énergie de multiples faisceaux laser est absorbée par une couronne de plasma. Elle en élève la température produisant ainsi la pression nécessaire à la compression du cœur. L'intensité de ce rayonnement est un atout mais sa cohérence induit, on l'a vu, des pertes sous des formes diverses qui réduisent le transfert vers l'énergie thermique dans la couronne.

Pour être débarrassés de la cohérence, les opticiens savent décorréler la phase, au départ bien déterminée, des ondes lumineuses. Mais la solution adoptée dès l'origine à Livermore est connue sous le nom d'attaque indirecte. L'idée consiste à utiliser un rayonnement thermique produit par l'impact laser sur la surface d'un métal lourd et confiné à l'intérieur d'une enceinte appelée « *hohlraum* » terme germanique réservé à ce type de cavité (**figure 61**). Cette disposition garantit une bien meilleure uniformité d'éclairement à la surface de la cible que l'on se propose d'imploser.

L'irradiation d'un métal par un faisceau laser convenablement focalisé produit un panache de plasma dense, riche en ions multichargés (cf. *supra* **paragraphe 15**) et qui émet un rayonnement intense dans le domaine X. C'est l'effet des hautes températures (quelques centaines d'eV soit quelques millions de degrés K) atteintes. Ce type d'expérience était abondamment pratiqué dans les laboratoires ayant fait les premiers pas dans le domaine de l'interaction laser corps solide.

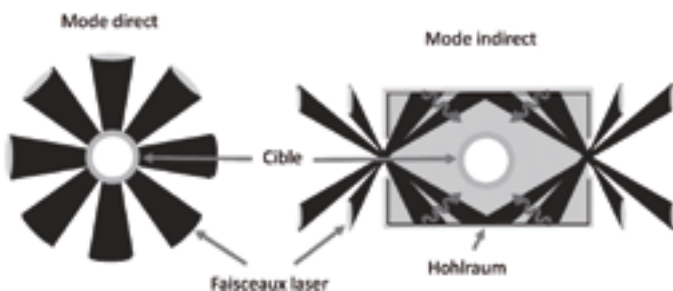


Figure 61 | Schéma de principe des deux modes d'irradiation, direct et indirect, en vue de réaliser l'implosion d'une microsphère. Dans le mode indirect, les faisceaux laser, répartis en deux groupes, sont concentrés sur des ouvertures axiales ménagées aux deux extrémités d'une enceinte cylindrique de façon à irradier la surface interne. Le rayonnement secondaire, thermique, émis dans cette interaction reste piégé dans la cavité et peut à son tour agir sur la cible. © CEA.

L'application du rayonnement secondaire à la compression de cibles sphériques figurait dès le début dans les programmes proposés par John Nuckolls. Elle fut tenue secrète par les autorités gérant les centres d'études nucléaires jusqu'à la déclassification de la toute fin des années 1980. Entre-temps mais bien après l'époque des pionniers, les Japonais de l'*Institute of Laser Engineering* d'Osaka ne manquèrent pas de publier les résultats de leurs études sur des configurations d'attaque indirecte appelées « *cannonball* ». Travaillant dans un cadre universitaire où ils n'étaient tenus par aucune clause de confidentialité pendant que d'autres étaient contraints au silence, ils furent les premiers à pouvoir présenter une telle option au grand jour.

43. LASÉROLOGIE COMPARÉE

Le développement des lasers était un thème majeur pour la communauté scientifique embarquée dans l'aventure de la fusion par laser. Dans chaque volume de la collection des LIRPP, c'est le sujet du chapitre introductif. Technologie et physique y ont leur place. Dans ce domaine, Arthur Guenther et Alexander Glass, qui avait quitté le NRL pour l'université Wayne State de Detroit avant de venir à Livermore en même temps qu'Emmett, furent particulièrement

actifs. Ils avaient focalisé leur activité sur la tenue au flux des matériaux et plus généralement les effets non linéaires de la propagation des faisceaux laser dans tous les milieux qu'ils traversent. Ils furent à l'origine d'une série de conférences annuelles qui se prolonge jusqu'à aujourd'hui sur le thème inépuisable : *Laser-induced Damage in Optical Materials*.

En dehors de cet aspect important de la tenue au flux, le choix d'une technologie laser en vue de la fusion par compression de cibles dépend de multiples critères : les lois d'échelle pour la longueur d'onde, la méthode de pompage pour le rendement énergétique, l'état solide, liquide ou gazeux du matériau actif pour les propriétés optiques, la facilité de mise en forme des impulsions, la répétitivité, les possibilités d'extrapolation vers des puissances et des énergies élevées...

Les idées se sont précisées au fur et à mesure du progrès des connaissances acquises sur la physique de l'interaction. Les courtes longueurs d'onde sont favorables pour la pression (attaque directe) comme pour l'émission de rayonnement en attaque indirecte. Dans ce cas, en raison de la plus grande densité du panache de plasma, le rayonnement se rapproche du corps noir. Il faut en outre pouvoir focaliser aisément. L'ultra-violet proche (autour de $0,3 \mu\text{m}$) est, de ce double point de vue, idéal.

Dès l'origine, on s'est préoccupé de définir le meilleur laser. C'est ainsi que dans leur article de *Physics Today* paru en août 1973, Nuckolls Emmett et Wood, présentaient un tableau comparatif entre performances du moment et valeurs souhaitées et détaillaient les avantages et les faiblesses de chaque source de rayonnement envisagée : deux déjà bien connues, CO_2 et verre au néodyme ; deux plus récentes, eximers de Xénon et Iode.

CO_2 et Xénon étaient attrayants par leur rendement énergétique élevé, mais le premier était handicapé par sa longueur d'onde, $10,6 \mu\text{m}$, ce qui n'était pas le cas du second, $0,17 \mu\text{m}$, mais l'avenir de celui-ci reposait sur trop d'inconnues. L'iode, longueur d'onde

1,32 μm , pompage par flashes, était également un nouveau venu, mis en œuvre dans le laboratoire de Garching en Allemagne.

À l'époque, la technologie du laser à verre au néodyme était de loin la plus avancée avec des perspectives intéressantes de mise en forme et d'extrapolation vers les grandes puissances. Pour des expériences de démonstration à relativement court terme, ce type de laser était annoncé comme la meilleure solution malgré un rendement notablement modeste, 0,5 à 1 %, et des cadences de répétition qui diminuent fortement avec la puissance.

Un autre avantage du verre au néodyme réside dans la facilité relative avec laquelle on peut convertir en fréquence son rayonnement, passant ainsi de l'infrarouge au vert, multiplication par deux, ou à l'ultraviolet, multiplication par trois. Le doublement est un phénomène d'optique non linéaire qui se produit si l'intensité dépasse le seuil d'excitation de polarisations d'ordre supérieur lorsque le faisceau traverse un cristal biréfringent convenablement orienté. L'harmonique deux peut lui-même être combiné avec le fondamental, toujours dans un cristal non linéaire, pour obtenir le triplement de fréquence, toutes ces conversions bénéficiant d'un rendement d'autant meilleur que l'intensité est plus élevée.

Au milieu des années 1960, alors que ces effets commençaient d'être étudiés par les chercheurs, les journalistes parlaient poétiquement de « laser aux yeux bleus ». Plus tard, je me souviens de la surprise de Jean de Metz constatant un taux de conversion supérieur à 50 % dans un cristal de KDP (*potassium dihydrogen phosphate* KH_2PO_4) lors de premiers essais effectués à Limeil avec les impulsions nanoseconde produites par un laser CGE.

Il y avait donc d'excellentes raisons pour développer de préférence les lasers à verre au néodyme, ce que firent au cours des décennies suivantes tous les grands laboratoires intéressés par la fusion nucléaire. Livermore, sous l'impulsion vigoureuse de John Emmett jusque dans les années 1980, a été le leader incontesté de ce mouvement.

La **figure 62** montre comment, au cours du temps, s'est accrue l'énergie par impulsion extraite de telles machines. On y voit que l'élan initial, le fameux saut quantique de zéro à un tant vanté par Peter Thiel²², co-fondateur de PayPal, est venu de la CGE. C'est en effet dans les laboratoires de Marcoussis que sont nées les premières chaînes de puissance en 1967. La suite se passe selon une croissance exponentielle, un facteur 10 tous les dix ans, qui conduit aux lasers de la classe mégajoule du début du XXI^e siècle. Cette évolution doit au moins autant à la multiplication du nombre de bras en parallèle qu'à l'accroissement de l'énergie extraite de chaque chaîne d'amplificateurs.

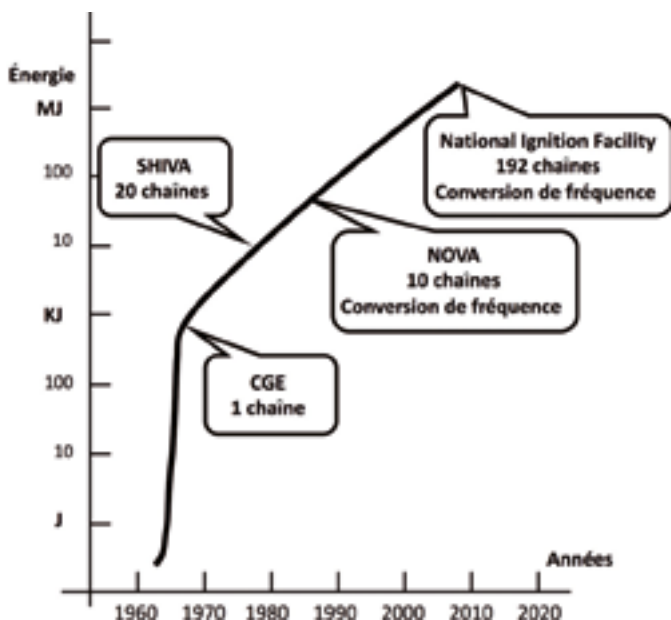


Figure 62 | Évolution, au cours des années, de l'énergie des lasers de puissance à verre au néodyme en régime nanoseconde. Après le coup d'envoi de la CGE, les points d'étape sont relatifs à trois générations de grands instruments conçus, construits puis exploités à Livermore.

22. Peter Thiel, *Zero to One*, Crown business (2014).

Le développement, en vue de la fusion nucléaire, de deux autres systèmes de la liste de 1974, eximers ou CO₂, a été stoppé après des tentatives peu convaincantes étalées sur deux décennies. Quant au laser à iode, exploité à Garching jusque vers la fin du siècle dernier, il a été transféré à Prague où sous le nom de PALS (*Prague Asterix Laser System*), après bien des améliorations, il continue de servir à des expériences d'interaction.

8

Postérité

44. LE PÉRILLEUX PASSAGE D'UN MONDE NUMÉRIQUE AU MONDE RÉEL

Au cours de la longue décennie des pionniers, les avancées de la fusion nucléaire par laser se sont produites dans deux contextes bien différents, même si les progrès dans l'un d'eux devaient servir à l'autre. D'une certaine façon, deux univers parallèles existaient simultanément : le réel dans les laboratoires avec de vrais instruments agissant sur un objet ou mesurant ce qui s'y passe ; et le virtuel porté par des armoires bourrées de circuits électriques. Le second faisait miroiter des succès à portée de budget, espoir qui allait se fracasser sur la dure matérialité du premier.

L'interaction laser matière ouvrait certes un nouveau domaine de la physique mais exploré alors de manière traditionnelle par des expériences sans processeurs en ligne, de la théorie analytique et un peu de calcul ; en quelque sorte, un ancien monde de la science expérimentale.

En même temps et longtemps occultée, la simulation numérique apportait des solutions pour élaborer des projets de fusion inertielle.

Elle signifiait aussi l'entrée dans un nouveau monde régi par l'informatique. Celle-ci n'avait pas encore pénétré la vie courante. En revanche, bien avant la miniaturisation des équipements, elle commençait de régner dans les entreprises et surtout dans les laboratoires de recherche où les codes spécifiques proliféraient, substituant à la pénibilité des calculs, celle de la programmation.

En ces temps héroïques de l'informatique, les ordinateurs étaient des ensembles imposants de baies électroniques, trônant dans des salles climatisées et servis par un personnel nombreux. La capacité, en volume de données comme en rapidité de traitement, était limitée. Pour simuler la dynamique de systèmes complexe, il fallait faire preuve de compétences très pointues. La création de codes destinés à des usages bien précis et pouvant être mis à la disposition de collègues était et reste une spécialité rare et très prisée. Le rôle éminent tenu par George Zimmerman dans la fusion par confinement inertiel tient à l'élaboration par ses soins de LASNEX.

En 1972, les prédictions de cet « oracle » étaient contestables par bien des aspects. Elles avaient cependant l'avantage de montrer clairement l'objectif à atteindre. On pouvait considérer comme acquis le rôle et l'importance de densités excessivement élevées, au moins 10^4 fois le liquide, pour mettre le combustible thermonucléaire en conditions de réagir. La dynamique nécessaire pour obtenir cet état de la matière était bien comprise. On avait aussi identifié des points délicats sinon noirs : la nécessité de maintenir une symétrie sphérique tout au long du processus d'implosion ; le rendement du procédé par lequel, partant d'une certaine impulsion laser, on parvient à soumettre la boule à imploser aux pressions susceptibles de conduire à bonne fin la compression. En revanche, à l'examen des sorties d'ordinateur, rien ne s'imposait vraiment quant à la façon de remédier aux difficultés qu'elles laissaient entrevoir.

La déformation à la compression des objets sphériques était une vieille connaissance, sauf à l'échelle de cibles minuscules, soumises à de violentes contraintes, telles qu'elles sont envisagées pour la fusion

inertielle. Avec les moyens de calcul de l'époque, l'expérimentation numérique s'avérait mal armée pour traiter efficacement ce problème dont on pressentait l'importance, impression renforcée sous l'effet des visualisations obtenues lors des premiers essais effectués à KMS-Fusion (cf. *supra* **figure 60**).

45. APRÈS LES ILLUSIONS DU DÉBUT, LES CHANGEMENTS D'ÉCHELLE

Dans l'article, destiné à un assez large public, paru en 1972 dans *Environment : Science and Policy for Sustainable Development*, Lowell Wood et John Nuckolls écrivaient :

« Si le soutien accordé par le gouvernement continue de croître fortement, nous espérons atteindre dans le courant de 1973 le point de “breakeven” dans des expériences de micro-explosions produisant des quantités d'énergie thermonucléaire comparables à l'énergie laser investie. Si tel est le cas et que le soutien gouvernemental au développement des lasers pulsés de grande énergie continue d'accélérer au rythme actuel, un système de fusion par laser, générateur d'électricité avec un bilan positif, pourrait devenir opérationnel autour de 1975. »

Et dans l'article fondateur paru la même année dans *Nature* avec pour coauteurs Albert Thiessen et George Zimmerman, ils affirmaient :

« Moins d'un kilojoule d'énergie lumineuse, si elle est mise en œuvre de façon optimale, suffit pour produire cette même quantité d'énergie thermonucléaire. »

Ils se référaient pour cela aux courbes de la **figure 56** tirée de cette publication. Tous les espoirs étaient donc permis en vue d'une expérience de démonstration. Les performances des meilleurs lasers de l'époque (CGE et Institut Lebedev) l'autorisaient. La date proposée pour cette étape décisive reflétait le sentiment qu'il fallait faire vite

en raison de la compétition avec les Soviétiques. Brueckner et KMS partageaient ce même optimisme.

Un succès rapide semblait tellement évident que des schémas de réacteurs à fusion basés sur ce principe étaient déjà proposés. Ils impliquaient des énergies laser nettement supérieures. Déjà l'article de Lubin et Fraas, paru dans *Scientific American* en 1971 donc avant les révélations de Livermore sur la compression, situait au minimum à 100 kilojoules l'énergie nécessaire, valeur que l'on retrouve dans les publications scientifiques de Nuckolls, Wood et divers co-auteurs qui parurent à partir de 1972 (*Nature*, *Physics Today*, *Scientific American*). C'était dans le cadre de visions d'avenir concernant d'hypothétiques générateurs d'électricité.

L'AVENIR DE LA FUSION PAR LASER TEL QU'ON LE VOYAIT EN 1974

Dans l'article publié cette année-là dans le numéro de juin du magazine *Scientific American*, Emmett, Nuckolls et Wood, après avoir décrit le procédé de fusion inertielle selon la version présentée au **paragraphe 38**, exposaient le programme de développement qui commençait d'être mis en œuvre à Livermore. Il avait pour objectif à court terme la construction d'un laser de 10 kilojoules en quelques nanosecondes avec 10 ou 20 chaînes en parallèle qui devaient être opérationnelles en 1977. Ce fut Shiva (cf. *supra* **figure 6**), achevé dans les temps. L'avenir plus lointain s'annonçait radieux avec trois générations de réacteurs électrogènes utilisant successivement les réactions de fusion deutérium-tritium (D-T), deutérium-deutérium (D-D) et proton-bore 11 ($p-^{11}\text{B}$), cette dernière produisant trois noyaux d'hélium 4 donc avec l'avantage, du point de vue de la radioactivité induite, d'être a-neutronique. Le tableau suivant, adapté de cette publication, présente l'état attendu de la cible après implosion et les performances demandées au laser auxquelles il convient de rajouter une cadence de répétition de 100 à 1 000 coups par seconde s'il s'agit d'atteindre l'ordre de grandeur du gigawatt.

...

Réaction	Cible comprimée		Laser		
	ρR (g/cm²)	Densité (g/cm³)	Énergie	Impulsion	Rendement
D-T	2-5	10 ³ -4.10 ³	10 ⁵ j	3 ns	≈ 10 %
D-D	10-20	10 ⁴	10 ⁶ j	1 ns	> 10 %
P- ¹¹ B	200	3.10 ⁵	10 ⁸ j	0,3 ns	> 30 %

La présentation de problèmes relatifs au transfert de l'énergie des produits de réaction jusqu'à la génération d'électricité entrain dans les standards de l'ingénierie nucléaire : un projet futuriste de plus. Aucune date n'était avancée pour d'éventuelles réalisations.

Ce qu'avaient imaginé les pionniers de la fusion inertielle a conduit à la mise en œuvre de programmes de grands lasers de puissance à verre au néodyme qui ont culminé au début du XXI^e siècle avec les installations de la classe mégajoule. La course à la puissance a été motivée par le constat que les premières simulations numériques induisaient un optimisme exagéré. En recoupant les enseignements des études paramétriques avec de décevants résultats expérimentaux, une idée générale s'est renforcée selon laquelle, pour avoir des chances de surmonter des difficultés à ne pas sous-estimer, il convenait d'aller vers l'implosion de masses plus élevées donc de construire des lasers de plus en plus puissants.

Telle était la ligne qu'avait réussi à imposer John Emmett peu après son arrivée à Livermore. Fondée d'abord sur l'expérimentation numérique, elle faisait hardiment l'impasse sur toute une physique qu'il restait à explorer plus à fond. Emmett avait vu grand... mais pas assez semble-t-il, contemplé de 2023. Quoi qu'il en soit, le changement d'échelle qu'impliquait sa politique précipitait la transition vers une ère de grands projets rigoureusement planifiés. L'esprit pionnier n'a plus tellement sa place dans ce type d'organisation, qu'elle soit animée par une forte personnalité ou gérée par les apparatchiks d'une bureaucratie envahissante. De plus, il est fréquent dans ce

genre d'entreprise, de voir les délais s'allonger tandis que les coûts s'envolent.

On reconnaît la taille d'un programme de grand équipement au montant du budget qui lui est consacré. Corrélativement, le niveau de décision s'élève dans la hiérarchie des institutions. Il peut même devenir supranational comme dans le cas du projet ITER (*International Toroidal Experimental Reactor*) pour la fusion nucléaire par confinement magnétique. Sans atteindre un tel sommet, l'implosion de cibles par laser en vue de la fusion nucléaire devint une affaire traitée au plus haut des organismes où se poursuivait cette recherche toujours sous le contrôle étroit des autorités gouvernementales. C'est ainsi qu'à Livermore, John Emmett fit partie de la direction du centre de 1974 jusqu'à son départ forcé en 1989 lorsque John Nuckolls accéda au poste de directeur.

Malgré la qualité et l'engagement d'équipes de recherche qui ont effectué un travail en tout point remarquable, la promesse, faite au début des années 1970, d'un « *scientific energy breakeven* » imminent n'a été tenue qu'environ un demi-siècle plus tard à la *National Ignition Facility* (NIF) de Livermore. À l'été 2021, on y était presque, en décembre 2022 on y arrive enfin. Ce sont des expériences en mode indirect où l'on a cherché à optimiser à la fois les impulsions laser et l'architecture des cibles. La longueur d'onde des 192 faisceaux est de 351 nm, radiation ultraviolette plus efficace dans l'interaction avec la matière, obtenus par triplement de la fréquence du verre au néodyme située dans le proche infrarouge. L'essai de 2021 a produit 1,3 mégajoule d'énergie de fusion pour 1,9 d'énergie lumineuse, le meilleur de 2022, 3.15 mégajoules contre 2.05. Plus importante peut-être est la preuve, fournie par de telles expériences, de la combustion thermonucléaire à l'intérieur d'un point chaud²³, premier pas vers une véritable ignition qui serait la propagation de la réaction explosive à l'ensemble de la masse comprimée.

23. *Physical Review Letters* **129**, 075001 (2022).

46. QUELS LASERS OU QUELS AUTRES GRANDS INSTRUMENTS POUR LA FUSION INERTIELLE ?

Est-ce le pouvoir de fascination inégalée que détiennent les lasers, sources lumineuses « plus brillantes qu'un million de soleils », qui leur a donné la priorité ? Les programmes de fusion inertielle ont reposé essentiellement sur la réalisation de grands lasers aux États-Unis (Livermore avec Shiva, Nova puis NIF, et université de Rochester avec Omega...) comme au Japon (université d'Osaka avec Gekko XII), en Russie (Institut Lebedev et centre à vocation militaire de Sarov) et en Europe occidentale dont la France (Phébus et le Laser Mégajoule).

Malgré leur faible rendement et l'impossibilité de fonctionner en cadence au niveau d'énergie requis, les lasers à verre au néodyme ont été partout retenus pour la course à la démonstration de principe de la fusion par implosion. Cette étape capitale peut en effet s'accommoder de rares essais une fois construites les installations adéquates. Elle va bien au-delà du simple « *breakeven* ». La preuve doit être faite de l'allumage central et de la propagation de la réaction à partir de ce point chaud. Il est raisonnable de penser qu'elle arrivera un jour prochain sans pouvoir en préciser la date.

Les implosions en mode indirect ouvrent la fusion inertielle à d'autres technologies capables de créer de puissantes sources de rayonnement thermique : impact de faisceaux de particules chargées sur des cibles, concentrations d'énergie électromagnétique par des décharges pulsées de forte intensité (Z machines)...

La question d'une voie concurrente à celle des lasers en vue de la fusion inertielle s'était en réalité déjà posée au temps des pionniers. Avatar de la technologie des accélérateurs de particules, on a construit des générateurs de faisceaux pulsés intenses d'électrons relativistes. Contrairement aux lasers à verre, ces machines ont un excellent rendement. Des propositions pour provoquer la fusion nucléaire avec de tels faisceaux ont été émises vers la fin des années 1960. L'intérêt s'en est trouvé renforcé lorsqu'à peu près en même temps on réussissait à les focaliser de façon à obtenir de grandes densités de courant.

La brochure diffusée par Doublekay en 1972 pour faire la promotion de la fusion inertielle contenait une contribution de F. Winterberg, reproduite de la revue *Nuclear Fusion*, présentant un système thermonucléaire dans lequel un faisceau d'électrons est focalisé sur du DT contenu dans une capsule en métal lourd. L'article était accompagné d'une recension très critique de Brueckner et d'une réponse de Winterberg assortie d'une attaque en règle visant la possibilité d'atteindre les compressions affichées par Livermore et KMS.

À Limeil aussi, la comparaison entre faisceaux laser et faisceaux d'électrons relativistes faisait l'objet de débats. Il y eut même un séminaire interne sur la question. J'y présentais les avantages et les inconvénients de diverses solutions à base de lasers ou de faisceaux d'électrons en vue de la fusion inertielle. Je rédigeais à partir de cet exposé un article de revue paru en 1974 dans *Nuclear Fusion*. J'entrevois en conclusion un grand avenir pour les lasers à excimères : mauvaise pioche ! Les voies d'améliorations que j'esquissais pour les électrons relativistes n'ont pas non plus abouti.

Dans le cadre de la fusion inertielle, les faisceaux d'électrons n'ont pas eu d'avenir en raison de la difficulté d'obtenir de grandes densités d'énergie lorsqu'ils pénètrent dans la matière. Ce n'est pas le cas de faisceaux d'ions lourds qui, transportés dans un état une fois ionisé pour minimiser les effets de charge d'espace, perdent tous leurs électrons en entrant dans une cible solide. Les distances d'arrêt sont alors très courtes rendant le chauffage particulièrement efficace. Cela permet d'obtenir des sources de rayonnement bien adaptées à des implosions en mode indirect. Après 1975, les recherches sur les faisceaux de particules en vue de la fusion ont été conduites préférentiellement avec des ions lourds.

Les générateurs électromagnétiques de haute puissance pulsée sont d'autres candidats intéressants pour initier la fusion inertielle. Ils permettent de concentrer dans un petit volume de grandes quantités d'énergie électromagnétique susceptibles de rassembler, de comprimer et de porter à de hautes températures (jusqu'à 2.10^9 K) la matière

de nappes de fils métalliques. On obtient ainsi une source intense de rayonnement X convenant au mode indirect. Les recherches se poursuivent aux États-Unis, par exemple dans les laboratoires Sandia avec le concours de spécialistes venus de Russie après la chute de l'URSS, comme en France au centre de Gramat (rattaché depuis peu au CEA).

Avec ou sans laser, la quête du Graal continue.

ANNEXES

1. BREVET CGE DÉPOSÉ LE 26 AVRIL 1963

REPUBLIQUE FRANÇAISE
 ———
 MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE
 ———
 SERVICE
 de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

BREVET D'INVENTION

P. V. n° 932.815

N° 1.533.155

Classification internationale : H 05 h // G 21 b

Dispositif de fusion thermonucléaire commandée.

Société anonyme dite : COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ résidant
France (Seine).Demandé le 26 avril 1963, à 14^h 26^m, à Paris.

Délivré par arrêté du 10 juin 1968.

(Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 29 du 19 juillet 1968.)

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7,
de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

L'invention concerne un dispositif permettant de produire en succession des réactions de fusion thermonucléaire portant sur de faibles quantités de matière, à des cadences pouvant s'échelonner entre environ une par seconde et quelques dizaines par seconde.

Les différents dispositifs de réaction thermonucléaire qui ont été essayés ou décrits utilisent un plasma formé à partir d'un gaz. L'étude théorique des conditions de la fusion fait apparaître la nécessité d'opérer sur un plasma à haute densité (de l'ordre de 10^{20} particules par mètre cube) dont l'obtention est délicate.

La présente invention permet de remédier à cet inconvénient en empruntant à l'état solide de la matière « fusible » les conditions de confinement nécessaires.

Par ailleurs, l'étude théorique montre encore que, pour amorcer une réaction de fusion thermonucléaire, il faut porter la matière à une température de l'ordre de 10^8 °K en un temps assez court pour que le confinement soit conservé au moment où la température est atteinte. Ce temps est de l'ordre de 10^{-8} s, limite supérieure admissible, et de préférence plus court. On sait également que l'on distingue, dans les états de plasma, les plasmas froids où la température est de l'ordre de $10\ 000$ °K et les plasmas chauds où la température est supérieure à $100\ 000$ °K.

Le moyen adopté pour amener une petite bille de matière solide à l'état de plasma dense et très chaud est l'absorption du rayonnement d'un ou de plusieurs lasers de grande puissance. D'une part les faisceaux lasers exercent sur la matière une pression considérable pouvant dépasser $1 \cdot 10^{10}$ kg/cm², qui maintient le confinement, d'autre part l'énergie absorbée par le plasma est suffisante pour produire au moins en surface l'élévation de température à la valeur de 10^8 °K.

Dans l'exemple de réalisation de l'invention

dont la description va suivre, la matière fusible utilisée est de préférence un mélange deutérium-tritium en proportions égales, mais il est bien évident que le dispositif selon l'invention s'applique au déclenchement de réactions de fusion thermonucléaire de toute autre matière ou mélange de matière. Les conditions de confinement, pendant un temps de l'ordre de 10^{-8} s et de température (T peu différent de 10^8 °K) étant remplies, la réaction indiquée ci-dessous :



dans laquelle n est un neutron, se trouve déclenchée en libérant l'importante quantité d'énergie de fusion indiquée par la relation (1).

L'effet des lasers peut être multiple :

1. Liquéfaction de la « bille » de deutérium-tritium (D-T) solide.
2. Vaporisation à l'état de gaz.
3. Ionisation du gaz à l'état de plasma froid.
4. Échauffement du plasma froid à l'état de plasma chaud.

Le passage par les états intermédiaires 1 et 2 pourra toutefois se trouver omis.

Toutes ces opérations étant effectuées sous l'effet de l'absorption des radiations fournies par les lasers, le fonctionnement du dispositif est favorisé si les spectres d'absorption du mélange D-T aux états solide, liquide et gazeux, coïncident au moins partiellement avec le spectre d'émission des lasers. C'est précisément le cas, ainsi qu'il ressort de l'examen de la bande fondamentale de l'hydrogène induite par des forces intermoléculaires, dans l'infrarouge, dont une représentation est donnée figure 1. Sur cette figure, les abscisses représentent le nombre d'ondes, et les ordonnées représentant le logarithme du rapport $\frac{W}{W_0}$ où W est la puissance

absorbée et W_0 la puissance appliquée.

Sur cette figure, (1), (2) et (3) sont respec-

1 23924 1

[1.533.155]

tivement les bandes fondamentales de l'hydrogène aux états solide, liquide et gazeux, et correspondant respectivement à des températures de 16 °K, 18 °K et 298 °K, on voit en particulier que les raies S_1 et Q_3 du solide et du liquide correspondent également à des niveaux élevés d'absorption pour le gaz.

A titre d'exemple, il est indiqué que pour une bille d'un diamètre de 10 à 100 microns, la puissance de crête à donner aux lasers pour réaliser les conditions d'échauffement voulues est de l'ordre de 10^9 à 10^{12} W. Bien entendu, cette puissance est à diviser par le nombre de lasers utilisés. Ces valeurs représentent des quantités actuellement réalisables. Il est possible, compte tenu de la cohérence de l'onde produite, de concentrer l'énergie dans un volume de cette dimension. Pour un volume de l'ordre de 100 microns³, l'énergie produite par fusion est de l'ordre de quelques Mégajoules. Elle est donc d'un ordre de grandeur supérieur à l'énergie, de l'ordre de quelques dizaines de kilojoules, nécessaire pour produire l'onde laser. Cette dimension doit donc être considérée comme optimale car une plus petite dimension ne permettrait que de produire des énergies de l'ordre nécessaire à l'excitation, et une dimension plus grande conduirait à des ordres de grandeur d'énergie libérée ou d'énergie d'excitation dépassant les limites admissibles.

L'invention concerne essentiellement un dispositif de fusion thermonucléaire de puissance moyenne réglable dans lequel il est prévu des moyens permettant de faire varier à volonté le nombre moyen de réactions par seconde. Ces moyens comportent :

1° Un dispositif d'alimentation de type invariable;

2° Un dispositif de déclenchement à cadence réglable.

1° Le dispositif d'alimentation est constitué par un récipient en forme d'entonnoir contenant un grand nombre de billes, laissant échapper par gravité, par son ouverture inférieure, un « train » de billes, l'une derrière l'autre. L'entonnoir est agité d'une légère vibration assurant une descente des billes à peu près régulière. Des solutions de ce genre sont d'un emploi courant pour des objets de plus grande dimension. Les constantes du système sont de telle sorte que le nombre de billes éjectées par seconde varie peu autour d'une valeur moyenne, par exemple :

$$N = 125 \pm 20$$

2° Le dispositif de déclenchement comporte une détection du passage des billes au voisinage du point de focalisation des lasers par un système photoélectrique qui produit une variation impulsive de courant électrique au passage de chaque bille. Cette variation impulsive est ensuite dirigée vers une porte ET, laquelle est

d'une part ouverte par les dites impulsions, d'autre part par un train de crêteaux d'une durée telle qu'il y ait toujours au moins un passage de bille pendant cette durée, la durée du crêteaux étant, par exemple, de dix millisecondes. La première impulsion de détection d'une bille survenant pendant l'ouverture d'un crêteaux déclenche l'émission des lasers, au bout d'un retard convenable prédéterminé. S'il survient une deuxième impulsion de détection de passage de bille pendant l'ouverture du même crêteaux, un dispositif de sécurité referme ladite porte ET sous l'effet de la première impulsion, pendant un temps de longueur adéquate, par exemple pendant deux millisecondes, de façon à empêcher tout déclenchement non désiré des lasers.

Le dispositif de fusion commandé admet donc une limite inférieure de cadence aussi lente qu'en veut, et une limite supérieure de quelques dizaines de coups par seconde. Bien entendu, les chiffres indiqués ci-dessus ne sont donnés qu'à titre d'exemple.

L'invention comporte également une variante dans laquelle le passage de la bille de deutérium-tritium solide à l'état de plasma « froid » est effectué par un arc électrique, l'effet des lasers étant alors uniquement d'amener ce plasma froid à l'état de plasma très chaud, l'intervalle de temps séparant les deux effets étant suffisamment court pour que la condition de confinement soit conservée. Dans ce cas le déclenchement décrit ci-dessus se déroule en deux temps : déclenchement de l'arc électrique suivi, par exemple 10^{-8} s plus tard, du déclenchement des lasers.

Selon l'invention, une réaction thermonucléaire est déclenchée par l'effet de plusieurs lasers puissants concentrant sur une bille de mélange deutérium-tritium solide un rayonnement absorbable par ladite substance.

Selon une caractéristique de l'invention la bille est amenée de l'état solide à l'état de plasma froid par un arc électrique, les lasers ayant pour effet d'amener ensuite ce plasma froid à l'état de plasma chaud.

Le dispositif selon l'invention est avantageusement constitué de la façon suivante : les billes de mélange deutérium-tritium solide descendent par gravité, et chaque bille déclenche le processus d'irradiation par la formation d'une impulsion électrique causée par son passage devant un dispositif photoélectrique de détection de passage, cette impulsion servant au déclenchement du laser si elle se produit pendant l'ouverture d'une porte ET, qui est ouverte à chaque ouverture sous l'effet de crêteaux dont la durée est telle qu'il ne passe en moyenne qu'une seule impulsion de détection de passage, la cadence de répétition desdits crêteaux étant à la disposition de l'opérateur par exemple au

moyen d'un générateur de signaux rectangulaires à fréquence variable.

On trouvera ci-après, à titre illustratif et nullement limitatif de l'invention, un mode de réalisation préféré décrit en détails à l'aide des dessins annexés.

Comme il a été dit précédemment, la figure 1 représente la bande fondamentale du rayonnement de l'hydrogène dans ses trois états : solide, liquide et gazeux.

La figure 2 montre schématiquement la disposition générale de l'appareillage. La figure 3 représente le système de détection de passage de la bille et le dispositif de circuits logiques de déclenchement.

Dans la figure 2, 11 représente une enceinte maintenue à environ 15 °K. L'enceinte 12 contient une provision de « billes » de deutérium-tritium solide de 10 à 100 microns de diamètre. Cet entonnoir est animé d'une légère vibration dans un plan horizontal, symbolisée par la flèche 14. Les billes descendent par la goulotte 13 dans la chambre d'ionisation 15. Deux lasers L_1 et L_2 sont représentés à gauche et à droite de la chambre d'ionisation, chacun équipé de son dispositif d'alimentation et de déclenchement, D1 et D2 respectivement. Le rayonnement de chaque laser pénètre respectivement dans la chambre d'ionisation 15 par des fentes en quarts, F1 et F2. On n'a montré que deux lasers pour ne pas surcharger la figure, mais en général il y en aura au moins six, placés en symétrie sphérique autour de la chambre d'ionisation afin d'obtenir l'état de confinement le plus efficace. La chambre d'ionisation est tout d'abord amenée à un vide de l'ordre de quelques dix millièmes de millimètres de mercure au début de l'opération, au moyen de la pompe 16. Les billes de D-T en excès dans la chambre d'ionisation fondent et se vaporisent. Le mélange gazeux est alors extrait par la pompe 16 et récupéré.

Dans la figure 3, 21 est une source lumineuse. Le faisceau lumineux est concentré par l'optique 22 en une tache 23 ayant environ 50 microns de diamètre, un peu au-dessus de l'emplacement de focalisation des lasers. La lentille 24 transforme le faisceau lumineux derrière la tache en un faisceau parallèle reçu par le tube photomultiplicateur 25. Le courant de sortie du tube 25 est amplifié dans l'amplificateur 26. L'apparition d'une bille de D-T solide à l'emplacement de la tache lumineuse 23 produit une variation du courant de sortie de l'amplificateur 26. Cette variation est utilisée pour faire déclencher par la bascule de Schmidt 17 une impulsion, qui, après passage dans la ligne de retard ajustable 18 (retard τ_1) est appliquée par la porte ET 29 aux dispositifs de déclenchement des lasers D1 ... D6. L'impulsion sortant de la porte ET 29 est appliquée

également à la bascule monostable 30, qui revient au zéro après un délai τ_2 . Le signal de sortie de la bascule monostable 30 est appliqué en inhibition à la porte ET 29, après un retard τ_3 fourni par le circuit 31. A la porte ET 29 sont appliqués les crêteaux d'ouverture d'une durée, par exemple, de dix millisecondes, fournis par le générateur 22. Ces crêteaux, d'une largeur fixe, sont délivrés par le générateur 32 à une cadence qui peut varier, par exemple entre une par seconde et cinquante par seconde. La chute des billes s'effectuant à la cadence de cent cinq à cent quarante-cinq par seconde, dans un crêteau de dix millisecondes, il y aura toujours passage d'une bille au moins, et parfois de deux billes. Lorsque la première bille passe, il en résulte une impulsion qui, allongée par la bascule monostable 30, bloque la porte ET 29 pendant un temps τ_4 par exemple de douze millisecondes. Ce crêteaux de blocage est appliqué à la porte 30 à travers un circuit à constante de temps $\tau_5 = 1$ ms par exemple, ceci afin que la porte 30 reste ouverte pendant toute la durée de l'impulsion de déclenchement. Pour obtenir une énergie par fusion beaucoup plus grande que l'énergie nécessaire à l'excitation il convient d'utiliser des diamètres de bille compris entre 10 et 100 microns. Il leur correspondra des énergies de fusion comprises entre quelques kilojoules et quelques mégajoules.

Bien entendu, l'invention n'est nullement limitée aux modes de réalisation plus spécialement décrits et représentés, qui n'ont été donnés qu'à titre d'exemples.

RÉSUMÉ

A. Dispositif de déclenchement de réactions de fusion thermonucléaire à des cadences variables, de matières ou mélange de matières quelconques se trouvant avant ledit déclenchement à l'état solide, caractérisé par le fait que le moyen de déclenchement utilisé est l'absorption du rayonnement d'au moins un faisceau laser, et pouvant comporter une ou plusieurs des caractéristiques ci-après, prises isolément ou en toutes combinaisons possibles :

1° Le dispositif comporte un système d'alimentation de la matière dont on désire assurer la fusion et qui se trouve avantageusement sous forme de billes, et un dispositif de déclenchement des rayonnements de faisceaux lasers, dimensionnés de façon à obtenir simultanément l'élévation de température nécessaire et à réaliser la condition de confinement du plasma ainsi réalisé;

2° Le dispositif d'alimentation est constitué par un entonnoir contenant les billes de matière fusible, situés dans une enceinte thermostatique, et agité d'un mouvement vibratoire assurant une descente régulière par gravité desdites billes dans une chambre d'ionisation comportant

[1.533.155]

— 4 —

autant de fenêtres qu'il y a de faisceaux lasers, et dans laquelle un vide poussé a été fait;

3° Le dispositif de déclenchement des faisceaux lasers comporte un faisceau lumineux auquel est associé un système optique focalisant ledit faisceau en une tache située à proximité immédiate de l'emplacement de focalisation des lasers, ledit faisceau étant ensuite transféré au moyen d'une lentille en un faisceau parallèle reçu par un tube photomultiplicateur connecté à un amplificateur à la sortie duquel se trouve une bascule;

4° Le passage d'une bille de matière solide dans la tache de focalisation du faisceau lumineux provoque une variation du courant de sortie de l'amplificateur déclenchant, par l'intermédiaire de la bascule, une impulsion, laquelle, après passage dans une ligne à retard ajustable, est appliquée à une porte ET;

5° Des crêneaux d'ouverture sont appliqués à la porte ET, à une cadence telle que le passage

d'au moins une bille de matière fusible a lieu pendant la durée d'un crêneau;

6° Le signal de sortie délivré par la porte ET pour chaque impulsion émise par l'amplificateur, déclenche le rayonnement des faisceaux lasers.

B. Dispositif de déclenchement de réactions de fusion thermonucléaire selon A, caractérisé par le fait que la matière dont on désire effectuer la fusion passe de l'état solide à l'état de plasma froid au moyen d'un arc électrique, le passage de l'état plasma froid à l'état de plasma chaud s'effectuant par l'absorption du rayonnement de faisceaux lasers au moyen du dispositif selon A.

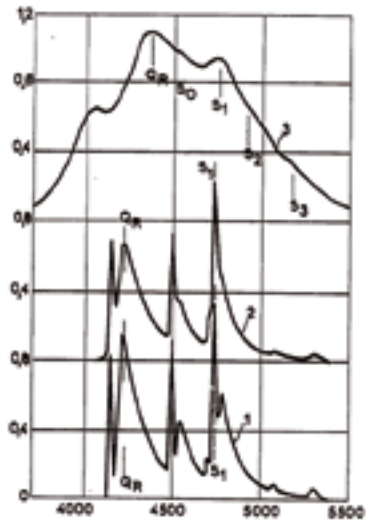
Société anonyme dite :
COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ
Par procuration :
F. PAVIA

N° 1.523.155

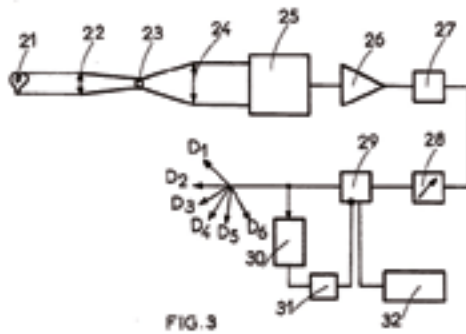
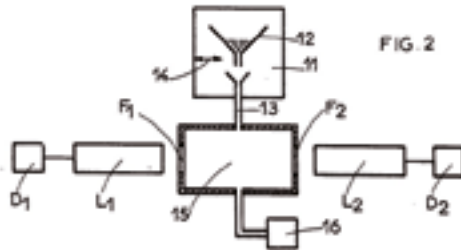
Société Anonyme dite :
Compagnie Générale d'Electricité

2 planches. - Pl. I

FIG.1



N° 1.833.155

Société Anonyme dite : 2 planches. - Pl. II
Compagnie Générale d'Électricité

2. BREVET CGE DÉPOSÉ LE 11 JUIN 1963

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
 ———
 MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE
 ———
 SERVICE
 de la PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

BREVET D'INVENTION

P. V. n° 937.653

N° 1.533.156

Classification internationale : C 21 b // H 05 h

Dispositif de fusion thermonucléaire commandée. (Invention : Jean ROSEUX et Raymond ROCHEROLLES.)

Société anonyme dite : COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ résidant
 France (Seine).

Demandé le 11 juin 1963, à 14^h 7^m, à Paris.

Délivré par arrêté du 10 juin 1963.

(Bulletin officiel de la Propriété industrielle, n° 29 du 19 juillet 1963.)

(Brevet d'invention dont la délivrance a été ajournée en exécution de l'article 11, § 7, de la loi du 5 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1962.)



On sait que, pour amorcer la fusion thermonucléaire d'un échantillon de matière ou mélange de matières quelconques, il faut porter à une température très élevée ledit échantillon se trouvant à l'état de plasma de très forte densité, cette forte densité étant maintenue au moins pendant tout le temps où le plasma est soumis à la température intense. Il est connu, pour réaliser ces conditions, dites « conditions de confinement », d'utiliser un plasma dilué fermé à partir d'un gaz puis de faire subir à ce plasma une compression, et enfin d'effectuer la réaction de fusion thermonucléaire lorsque les conditions de confinement sont satisfaisantes.

Or, on sait que, pour réaliser une fusion thermonucléaire, il est avantageux d'opérer sur un échantillon de matière dans son état solide pour lequel les conditions de confinement sont réalisées. C'est ainsi qu'il est connu d'utiliser un mélange solide de deutérium-tritium sous forme de bille, et d'en réaliser la fusion thermonucléaire au moyen de l'absorption du rayonnement de faisceaux lasers.

La présente invention a pour objet un dispositif de fusion thermonucléaire commandée d'un échantillon de matière ou mélange de matières quelconques à l'état solide, caractérisé par le fait que ledit échantillon étant sous forme de fil est successivement soumis au passage d'un courant électrique intense, puis au rayonnement d'un ou plusieurs faisceaux lasers.

On trouvera ci-après, à titre illustratif et nullement limitatif de l'invention, un mode de réalisation préféré, décrit en se référant aux dessins annexés.

La figure 1 est un graphique indiquant la zone dans laquelle les conditions d'entretien de la réaction de fusion thermonucléaire sont satisfaites. Sur ce graphique ont été portées en abscisses les valeurs en unités logarithmiques du

paramètre τ exprimé en secondes par mètre cube et qui sera défini par la suite, et en ordonnées les valeurs de la température absolue.

La figure 2 est un schéma synoptique du dispositif selon l'invention.

Dans l'exemple de réalisation dont la description va suivre, la matière fusible utilisée est un mélange en proportions égales de deutérium-tritium, mais il est bien évident que l'invention s'applique également à toute matière ou mélange de matières quelconques.

La réaction de fusion thermonucléaire s'effectue sur un fil de mélange deutérium-tritium pouvant avoir un diamètre de quelques centièmes de millimètre et une longueur de quelques millimètres. La réaction se fait en deux temps :

1° On décharge brutalement dans le fil un condensateur, par exemple de 0,1 à 1 microfarad, chargé sous quelques dizaines de kilovolts, le passage du courant ayant lieu en un temps très court, de l'ordre de quelques nanosecondes. Le passage du courant a pour effet de faire passer le fil de deutérium-tritium successivement de l'état solide aux états liquides, gazeux et de plasma froid, c'est-à-dire d'une température avoisinant 10 000 °K. Sous l'effet des actions magnétiques intenses qui s'exercent alors sur le plasma, il se crée un effet de pincement qui conserve audit plasma une densité à peu près constante dans les premières nanosecondes qui suivent le passage dans le fil du courant par sa valeur maximale;

2° Sur le plasma froid énergiquement confiné on fait agir le faisceau d'un ou plusieurs lasers, dont la radiation a la longueur d'onde voulue pour être absorbée par le plasma. Ces faisceaux lasers fournissent l'énergie nécessaire à l'amorçage de la réaction. A titre d'exemple l'énergie globale délivrée peut être de l'ordre de 10¹⁴ W. L'action desdits faisceaux sur le plasma froid

[1.533.156]

— 2 —

est double :

a. Par l'effet de pression de radiation, les conditions de confinement nécessaires à la réaction sont réalisées. Ces conditions s'expriment en fonction du paramètre $\tau = \sigma t$, σ étant le nombre de particules par mètre cube et t la durée du phénomène. La courbe représentée sur la figure 1 délimite une surface à l'intérieur de laquelle doit se trouver le point figuratif de la réaction. Pour maintenir le confinement du fil exposé à la pression de radiation ledit fil sera soumis à l'action de plusieurs lasers, par exemple au nombre de six :

b. L'absorption du rayonnement des faisceaux lasers transforme le plasma froid en plasma chaud dont la température est au moins égale à 10^8 °K.

Le dispositif selon l'invention permet de réaliser successivement les deux étapes précitées de la réaction.

L'énergie électrique nécessaire peut être fournie par exemple par une batterie de condensateurs dont la décharge dans le fil produit, en même temps que le passage de la matière fusible de l'état solide à l'état plasma froid, un éclair lumineux, lequel déclenche les faisceaux lasers par un dispositif approprié, par exemple par voie photoélectrique.

Sur la figure 2, 2 représente le cristal, par exemple de rubis, dont le passage du fonctionnement en non-interféromètre au fonctionnement en interféromètre donne naissance à l'éclair laser, 3 représente une lampe au xénon servant au pompage optique, 11 est une face réfléchissante, 13 une cellule de Kerr, 16 une face semi-réfléchissante, 14 et 15 sont les bornes de la cellule de Kerr, connectées à un dispositif d'alimentation 22 en tension continue, 24 est le dispositif d'alimentation de la lampe au xénon 23, qui est connecté à ladite lampe par l'intermédiaire d'un commutateur 27 à deux plots 25 et 26, mû par un moteur 28. Le passage du commutateur sur le plot 25 ferme le circuit d'alimentation de la lampe 23, tandis que son passage sur le plot 26 ferme le circuit constitué par le condensateur 29, et le fil de deutérium-tritium 17. Enfin une cellule photoélectrique, placée à proximité du fil 17, est connectée à un amplificateur 21, lui-même relié au dispositif d'alimentation 22 de la cellule de Kerr 13.

La figure 3 montre schématiquement en coupe le fil soumis à l'effet de six lasers répartis selon la périphérie.

Le fonctionnement du dispositif est le suivant :

La durée du pompage optique au moyen de la lampe au xénon 23 étant de l'ordre d'une milliseconde et celle de la fusion du fil de deutérium-tritium étant de l'ordre de 10^{-8} seconde, cette fusion doit avoir lieu environ une milliseconde après que la lampe 23 ait été allumée. Le commutateur 27 permet de réaliser cette

opération, la vitesse de rotation du moteur 28 entraînant le commutateur 27 étant telle qu'il s'écoule une milliseconde entre son passage du plot 25 au plot 26, le commutateur se trouvant initialement sur le plot 25. Le dispositif 34 fournit à la lampe 23 l'alimentation nécessaire à son fonctionnement. La cellule de Kerr n'étant pas excitée le régime d'interféromètre ne s'établit pas. Le condensateur 19 se trouve chargé à une tension d'environ 50 kV par un dispositif amorce non représenté ici. Lorsque le commutateur 27 passe sur le plot 26, le condensateur 19 se décharge dans le fil 17, faisant ainsi passer ledit fil de l'état solide à l'état de plasma froid. L'éclair résultant du passage du courant provoque, à la sortie de la cellule photoélectrique 20, la création d'une impulsion qui, amplifiée par l'amplificateur 21, excite l'alimentation 22 de la cellule de Kerr 13. Lorsque la tension continue fournie par l'alimentation 22 est appliquée aux bornes 14 et 15 de la cellule de Kerr, cette cellule établit le fonctionnement en interféromètre du cristal 13 entre les faces réfléchissantes et semi-réfléchissantes 11 et 16 provoquant ainsi l'émission du faisceau laser cohérent. Le faisceau appliqué au fil de deutérium-tritium le fait passer de l'état plasma froid à l'état plasma chaud. Le temps de réponse du circuit composé de la cellule photoélectrique 20, de l'amplificateur 21, et de l'alimentation 22 est tel que le déclenchement de l'effet laser se produit environ 10^{-8} seconde après le début de la décharge du condensateur 19 dans le fil 17.

Bien entendu on peut apporter diverses variantes et modifications au mode de réalisation donné à titre purement illustratif, sans sortir du cadre de la présente invention.

RÉSUMÉ

Dispositif de fusion thermonucléaire commandée d'un échantillon de matière ou mélange de matières quelconques à l'état solide, caractérisé par le fait que ledit échantillon étant sous forme de fil est successivement soumis au passage d'un courant électrique intense, puis au rayonnement d'au moins un faisceau laser, et pouvant en outre comporter une ou plusieurs des caractéristiques ci-après, prises isolément ou en combinaison :

1° Le fil de matière fusible est soumis au passage d'un courant de très forte intensité pendant un temps de l'ordre de quelques nanosecondes, ladite matière passant de l'état solide à l'état de plasma froid, la source d'énergie électrique pouvant être une batterie de condensateurs ou tout autre source;

2° Le rayonnement d'au moins un faisceau laser est appliqué immédiatement après le passage du courant électrique, le déclenchement dedit faisceaux pouvant être réalisé par un dispositif photoélectrique ou tout autre dispositif

approprié;

5° Le faisceau laser est émis par un cristal, par exemple de rubis, dont le pompage optique est assuré par une lampe, par exemple au xénon, le circuit d'alimentation de ladite lampe étant fermé sur le premier temps de fonctionnement d'un commutateur à deux temps de fonctionnement, le passage du cristal de l'état non interféromètre à l'état interféromètre au moyen d'une face réfléchissante et d'une face semi-réfléchissante étant produit par une cellule de Kerr dont l'excitation est commandée par une cellule photoélectrique, les impulsions émises par celle-ci étant délivrées à la cellule de Kerr par l'intermédiaire d'un amplificateur;

4° Un condensateur se décharge dans le fil de deutérium-tritium lorsque ledit commutateur

à deux temps de fonctionnement ferme le circuit composé du condensateur et du fil, ladite fermeture étant assurée environ une milliseconde après que le pompage optique du cristal ait commencé;

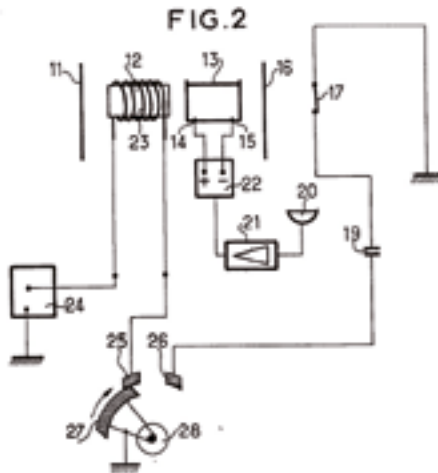
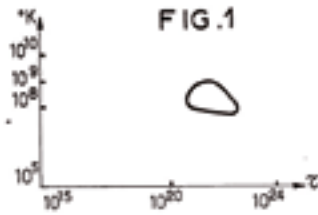
5° L'éclair lumineux résultant du passage du courant produit une impulsion à la sortie de la cellule photoélectrique, ladite impulsion excitant la cellule de Kerr provoquant le déclenchement du faisceau laser environ 10⁻⁸ seconde après le début du passage du courant dans le fil.

Société anonyme dite :
COMPAGNIE GÉNÉRALE D'ÉLECTRICITÉ
Par procuration :
F. PANAU.

N° 1.533.199

Société Anonyme dite :
Compagnie Générale d'Électricité

2 planches. - Pl. I

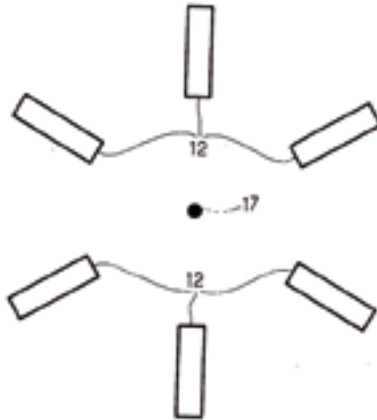


N° 1.533.156

Société Anonyme dite :
Compagnie Générale d'Electricité

2 planches. - Pl.

FIG. 3



3. NOTE D'INFORMATION DU CEA DE SEPTEMBRE 1969 (COMMUNIQUÉ DE PRESSE)

PRODUCTION DE NEUTRONS PAR LASER

Depuis 1964, la création de plasmas de très hautes températures, à l'aide d'un laser, met en compétition de très grands laboratoires aussi bien aux États-Unis, qu'en Union soviétique et en Europe, particulièrement en France. Le laser déclenché permet, en effet, d'irradier la matière par un flux de photons d'une durée extrêmement brève (de 1 à 30 milliardièmes de seconde), mais qui représente une puissance délivrée de plusieurs milliards de watts. En France, les lasers de très grande brillance sont construits par la Compagnie Générale d'Électricité dans ses laboratoires de Marcoussis, pour le compte du Commissariat à l'Énergie Atomique, et tout particulièrement de la Direction des Applications Militaires avec l'aide de la Direction des Recherches et Moyens d'Essais de la Délégation Ministérielle à l'Armement.

Au Centre d'Études de Limeil, où sont menées ces études de plasmas, les physiciens ont pu mettre en évidence, tout récemment, la production de réactions nucléaires directement créées par le faisceau du laser.

Ce faisceau est focalisé sur une cible de deutérium solide à -279°C par l'intermédiaire d'une optique spécialement calculée pour résister au flux très intense de photons, qui les concentre dans un volume d'un millième de millimètre-cube. L'originalité des expériences menées avec succès au Centre d'Études de Limeil réside en deux points qu'on peut schématiser de la façon suivante :

- d'une part, les neutrons (plusieurs centaines) observés par les physiciens français sont émis à chaque expérience avec une très bonne reproductibilité. Ceci a permis, en particulier, d'effectuer un grand nombre d'essais et de préciser la nature et l'origine des neutrons détectés. Lors des expériences menées au Centre de Limeil, le nombre de neutrons de fusion a été suffisant pour que l'on puisse vérifier, par des mesures de temps de vol, qu'il s'agissait bien de neutrons ayant une énergie de 2,45 MeV, donc produits par des réactions de fusion D-D dans le plasma chaud engendré par le flux du laser. La température électronique du plasma qui a pu être mesurée est comprise entre 7 et 10 millions de degrés, ce qui confirme une telle hypothèse ;*
- d'autre part, ce résultat est obtenu avec un laser délivrant une puissance de 4 milliards de watts seulement. Ce chiffre qui peut paraître énorme, est maintenant presque classique dans la réalisation des lasers de puissance ; la technique actuelle est potentiellement capable d'augmenter d'un à deux ordres de grandeurs la valeur de cette puissance.*

Ces premières réactions de fusion réalisées dans le monde par interaction d'un faisceau laser sur du deutérium solide incitent à poursuivre une série d'expériences avec des faisceaux lasers plus puissants et ouvrent la voie à une technique originale de recherche. En effet, en dehors des études sur l'interaction d'un rayonnement intense avec la matière, il n'est pas interdit de penser que cette méthode puisse être employée pour la création in situ de plasmas chauds dans les enceintes magnétiques utilisées dans les recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée.

GLOSSAIRE

Ablateur – Couche d'un matériau, en général léger, qui sous l'impact d'une forte intensité de rayonnement, se transforme en un plasma et se met en mouvement. Il se crée une onde de détente qui à partir d'un front d'ablation entraîne la matière en sens inverse du rayonnement incident.

AEC (*Atomic Energy Commission*) – Organisme administratif chargé, jusqu'en 1975, au niveau du gouvernement fédéral des États-Unis, de superviser les programmes nucléaires.

AIEA – Agence Internationale pour l'Énergie Atomique dont le siège est à Vienne (Autriche) : institution dépendant des Nations unies et chargée du contrôle planétaire des activités nucléaires.

Barrière de potentiel – Représentation à la fois imagée et quantitative de la répulsion entre objets chargés de même signe.

Breakeven – Terme anglais pour désigner un seuil de parité énergétique entre énergie de fusion et énergie des faisceaux laser ayant servi à provoquer la réaction.

Claquage – Phénomène d'ionisation brutale d'un matériau sous l'effet d'une action extérieure : application d'une tension électrique élevée ou d'une onde électromagnétique intense de haute fréquence (laser).

Compression adiabatique – Compression d'un fluide sans échange de chaleur avec le monde extérieur. Un processus adiabatique réversible est dit isentropique.

Confinement magnétique – Procédé consistant à isoler de toute paroi un plasma chaud de faible densité.

Confinement inertiel – Procédé dans lequel le combustible thermonucléaire est très fortement comprimé de façon à induire une réaction violemment explosive avant la dislocation du système.

DAM – Direction des Applications Militaires du commissariat à l'Énergie Atomique (CEA).

Déchets radioactifs – La fusion par elle-même ne laisse comme déchets radioactifs que des matériaux activés par impacts neutrons : isotopes peu actifs et à la vie assez courte.

Densité critique – Un plasma est à la densité critique lorsque la fréquence de plasma électronique est égale à la fréquence électromagnétique incidente. Les ondes électromagnétiques ne se propagent que si la densité électronique est inférieure à la valeur critique qui est donc valeur de coupure.

Effet fusée – Propulsion d'une couche de matière dense en sens inverse du mouvement à grande vitesse de la partie ablatée sous l'effet par exemple d'un rayonnement. C'est une conséquence de la conservation de la quantité de mouvement.

Effet tunnel – En raison de sa nature ondulatoire, une particule chargée d'énergie inférieure à la hauteur d'une barrière de potentiel peut franchir celle-ci avec une probabilité calculable à partir de lois qui s'apparentent à celles de l'optique.

Énergie cinétique – Énergie associée au mouvement d'un objet. En mécanique classique c'est la moitié du produit de la masse par le carré de la vitesse.

Énergie thermique, équilibre thermodynamique – Énergie associée aux mouvements désordonnés et aux vibrations d'un ensemble d'objets élémentaires. Il y a équilibre thermodynamique lorsque cet ensemble n'échange pas de chaleur avec le monde extérieur.

La distribution des énergies individuelles obéit alors à des lois bien précises : la température est en conséquence reliée de façon simple à l'énergie moyenne.

Formule de Planck – L'énergie E d'un quantum de rayonnement électromagnétique est égale au produit de la fréquence par une constante universelle h très petite. $h = 6.625 \cdot 10^{-34}$ en système S.I.

Fréquence de plasma électronique – Pulsation minimale des oscillations du gaz d'électrons dans un plasma. Elle est proportionnelle au nombre n_e d'électrons par unité de volume.

Front d'ablation – Surface de séparation entre un milieu non perturbé et l'écoulement de plasma induit par l'impact d'une forte intensité de rayonnement ou d'un faisceau de particules. Par un effet fusée, la matière non perturbée se déplace dans le même sens que le rayonnement ou les particules.

Front de choc – voir *Onde de choc*

Gain thermonucléaire – Rapport de l'énergie de fusion à celle des faisceaux laser ou de toute autre source servant à provoquer l'implosion du combustible et l'allumage de la réaction.

Hohlraum – Cavité destinée à confiner le rayonnement thermique émis par un plasma créé par interaction d'un faisceau laser ou de particules, ou par toute autre source de puissance pulsée.

ICF : HAP – Référence à l'ouvrage *Inertial Confinement Fusion : A Historical Approach by Its Pioneers*²⁴, Guillermo Velarde et Natividad Carpintero Santamaria.

IDA – *Institute for Defense Analyses*, institution fondée en 1956, qui aux États-Unis, administre des fonds destinés à la recherche.

Ion, ionisé/e – Un atome ou une molécule qui a perdu ou capturé au moins un électron devient un ion chargé positivement ou négativement. L'objet est dit ionisé. Ce qualificatif s'applique aussi à un gaz comportant une forte proportion d'ions et d'électrons que l'on appelle aussi plasma. Un plasma peut être complètement ionisé,

24. Foxwell and Davies, (2007).

absence de particules neutres, sans que les ions, à part ceux des isotopes de l'hydrogène, soient complètement dépouillés de leurs électrons.

Isotope – Les noyaux isotopes appartiennent à une même espèce chimique. À nombre de protons donné (nombre de charge) ils diffèrent par le nombre de neutrons.

ITER – *International Thermonuclear Experimental Reactor* est le projet le plus avancé en matière de confinement magnétique. En construction à Cadarache dans le sud de la France.

JETP – *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, traduction en anglais d'une publication en langue russe, équivalent soviétique de la *Physical Review* américaine.

LIRPP – *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, série de conférences et de volumes de comptes rendus, dirigée par H. Schwarz et H. Hora.

Microballon – Sphère creuse en verre de rayon inférieur ou égal au millimètre. C'est un produit industriel obtenu par soufflage du liquide et solidification du grand nombre de bulles ainsi obtenues. Après calibrage et contrôle d'étanchéité, le remplissage en D-T se fait par diffusion à haute température.

N.I.F. (*National Ignition Facility*) – Laser à 196 faisceaux d'une énergie totale supérieure au mégajoule implanté dans le laboratoire californien de Livermore.

Niveau d'énergie – États d'énergie bien définie qu'occupent les électrons dans un atome ou une molécule, ou encore les assemblages de constituants élémentaires à l'échelle subatomique.

Noyau composé – Objet très instable obtenu par la réunion des partenaires d'une réaction nucléaire dont c'est la première étape. Il se décompose en produits de réaction.

Onde de choc, front de choc – Par l'application d'une forte pression à la surface d'un milieu, la matière est comprimée, chauffée et mise en mouvement. Une discontinuité de pression ou onde de choc parcourt alors le milieu non perturbé et s'il est à l'état liquide ou

solide le transforme en un gaz compressible. La surface de séparation est le front de choc.

Plasma – Quatrième état de la matière dans lequel une partie des constituants élémentaires est faite de particules chargées électriquement ce qui le rend globalement sensible aux forces électromagnétiques.

Point chaud – Dans la masse d'un combustible thermonucléaire comprimé qui doit rester froid par souci d'efficacité énergétique, partie plus chaude au point que peuvent s'y amorcer des réactions nucléaires. La chaleur ainsi dégagée se propage dans le milieu environnant qui réagit à son tour. Le point chaud peut advenir spontanément au voisinage du centre d'une sphère implosée, ou être provoqué par une source d'énergie extérieure.

BIBLIOGRAPHIE

- AIP Oral histories: Laser Fusion <https://www.aip.org/taxonomy/term/3786>
- Paul Bonnet, *La Section atomique de la DEFA in L'histoire de l'armement terrestre dans la période 1945-1975* (1996).
- Keith Boyer, *Memoirs and personal stories*, auto-edition (2008).
- Keith A. Brueckner and Siebe Jorna, *Review of Modern Physics* **46** (1974).
- CEA. *Bulletin d'Informations Scientifiques et Techniques* **160** (1971).
- Colin N. Danson *et al.* *A history of high-power laser research and development in the United Kingdom, High Power Laser Science and Engineering* **9**, e18, doi:10.1017/hpl.2021.5 (2021).
- James Ivey Davis, *My Life and Thoughts*, iUniverse (2011).
- John L. Emmett, John Nuckolls & Lowell Wood, *Fusion Power by Laser Implosion in Scientific American* (1974).
- P. Grivet & Bloembergen N. ed., *Électronique quantique, comptes rendus de la 3^e conférence internationale, Paris 1963*, Dunod (1964).
- N. V. Karlov, O. N. Krokhin & S. G. Lukishova, *History of quantum electronics at the Moscow Lebedev and General Physics Institutes: Nikolaj Basov and Alexander Prokhorov, Applied Optics* **49** (2010).
- H. Anton Keller, *A documentation and interpretation on laser and electron beam induced fusion*, Doublekay (1972).

- Moshe J. Lubin & Arthur P. Fraas, *Fusion by Laser in Scientific American* (1971).
- T. H. Maiman, *The Laser Odyssey*, Laser Press (2000).
- Jean Robieux, *High Power Interactions: Isotopes separation – Nuclear fusion control – Elementary particles selective creation*. Ed. Lavoisier (2000).
- Jean Robieux**, *Vers l'Énergie Abondante Sans Pollution : la fusion nucléaire par laser*, Ed. Louis de Broglie (2008).
- Andrei Sakharov, *Œuvres scientifiques*, Éditions Anthropos, France, (1984).
- Helmut J. Schwarz & Heinrich Hora ed., *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena (LIRPP)*, vol. 1-4, Plenum (1972-1977).
- Sciences et Avenir*, n° spécial : *Le dossier des lasers* (1971).
- C. Bruce Tarter, *The American Lab, an Insider's History of the Lawrence Livermore National Laboratory*, John Hopkins University Press (2018).
- Edward Teller, Wilson K. Talley, Gary H. Higgins & Gerald W. Johnson, *The Constructive Uses of Nuclear Explosions*, McGraw Hill (1968).
- Peter Thiel, *Zero to One*, Crown business (2014).
- UCRL 50021-72-1, *Laser-Fusion Program Semiannual Report – January-June 1972*.
- UCRL 50021-73-1, *Laser-Fusion Program Semiannual Report – January-June 1973*.
- Guillermo Velarde & Natividad Carpintero Santamaria**, *Inertial Confinement Fusion: A Historical Approach by Its Pioneers (ICF : HAP)*, Foxwell and Davies (2007).
- Alex Wellerstein, *Restricted Data, the History of Nuclear Secrecy in the United States*, The University of Chicago Press (2021).
- Lowell Wood & John Nuckolls, *Fusion Power*, in *Environment* (1972).
- Chiyoe Yamanaka ed., *Proceedings of the Japan-US Seminar on Laser Interaction with Matter*, Japan Society for the Promotion of Science (1973).
- Herbert York, *The Advisors*, Freeman (1976).