

INTRO DUC TION

UNE
INTRODUCTION
À

LA FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

Jean-Louis Bobin



Collection « Une Introduction à »
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

La fusion thermonucléaire contrôlée

Jean-Louis Bobin

Université Pierre et Marie Curie



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur
<http://www.edition-sciences.com>

Imprimé en France.

© 2011, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN 978-2-7598-0573-0

Vj ku'r̥ ci g'kpvgpvkpcm̥ 'ighv'dn̥pm̥



Jean-Louis Bobin, ancien élève de l'École Polytechnique, docteur ès sciences, est professeur à l'université Pierre et Marie Curie (Paris 6) depuis 1981, après avoir été ingénieur de recherches au Commissariat à l'Énergie Atomique. Spécialiste de l'interaction laser-plasma : fusion inertielle induite par laser, effets non linéaires appliqués au diagnostic des plasmas et à l'accélération des électrons, il s'est aussi intéressé aux problèmes associant l'énergie et la société. Il est auteur ou coauteur d'ouvrages sur l'énergie, la fusion ou encore la relativité ainsi que de nombreuses publications dans des revues spécialisées. Professeur émérite depuis 2002, il est rattaché au laboratoire de Physique Atomique des Plasmas Denses (PAPD), antenne parisienne du Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI) de l'École Polytechnique.

Vj ku'r̥ ci g'kpvgpvkpcm̥ 'ighv'dn̥pm̥

Remerciements

Ce livre a été écrit à l'initiative de la commission Énergie et Environnement de la Société Française de Physique. Mes remerciements vont à :

- Daniel Heuer son président et Élisabeth Huffer, membre de la commission, qui ont relu le manuscrit et suggéré de multiples améliorations ;
- Stephan Weber (CELIA, Centre Lasers Intenses et Applications de l'université de Bordeaux) pour les passages consacrés aux hybrides fusion-fission ;
- Gilbert Payan (consultant) qui a attiré mon attention sur les travaux et les réalisations de Robert W. Bussard.

La version finale doit beaucoup aux critiques constructives de Michel Le Bellac et Michèle Leduc, directeurs attentifs et rigoureux de la collection « Une introduction à... » aux éditions EDP Sciences.

Enfin je remercie Jean Jacquinot qui a bien voulu écrire la préface et a lui aussi contribué à l'amélioration du texte.

Vj ku'r̥ ci g'kpvgpvkpcm̥ 'ighv'dn̥pm̥

Table des matières

Remerciements	1
Préface	7
Unités	11
Avant-propos	13
1 Un peu de physique de base	17
1.1 Atomes	17
1.2 Noyaux	19
1.3 Réactions nucléaires	21
Bibliographie	23
2 Réactions thermonucléaires	25
2.1 Réactions nucléaires de fusion	25
2.2 L'hydrogène, combustible du Soleil et des autres étoiles	27
2.3 Les réactions du deutérium	28
2.4 Régime thermonucléaire	31
2.5 Allumage et entretien de la réaction thermonucléaire	33
2.6 Le régime stationnaire : critère de Lawson	37
2.7 Le régime explosif	38
Bibliographie	40
3 Plasmas	43
3.1 L'état de plasma	43
3.2 Collisions coulombiennes dans un plasma	46
3.3 Création de plasmas	48
3.4 Le plasma magnétisé	48
3.5 Diffusion des particules chargées à travers un champ magnétique	51

3.6	Oscillations	52
3.7	Ondes non linéaires et turbulences	54
3.8	Les plasmas naturels et les plasmas de fusion	55
	Bibliographie	57
4	Quelques aspects du confinement magnétique	59
4.1	Principe	59
4.2	Plasmas parcourus par un courant	60
4.3	Stabilité	62
4.4	Configurations fermées	64
4.5	Équilibre et stabilité d'un anneau de plasma porteur de courant	66
4.6	Trajectoires des particules chargées dans un anneau de plasma parcouru par un courant	69
4.7	Autres instabilités du tore	70
4.8	Les tores compacts	72
4.9	Stellarators	72
	Bibliographie	74
5	La filière tokamak	77
5.1	Description et mise en œuvre d'un tokamak	77
5.2	Les raisons d'une course au volume	79
5.3	Chaussages auxiliaires	81
5.4	Trois générations de tokamaks	86
5.5	Bilan	91
	Bibliographie	93
6	ITER et programmes annexes	95
6.1	Un projet fédérateur	95
6.2	La machine ITER	98
6.3	ITER et la sûreté	102
6.4	La question des matériaux	102
6.5	IFMIF (<i>International Fusion Material Irradiation Facility</i>)	107
6.6	Controverses	108
	Bibliographie	109
7	Quelques aspects du confinement inertiel. Le rôle des lasers	111
7.1	Contrôle d'une micro-explosion	111
7.2	Dynamique de la compression	113
7.3	Interaction laser cible solide	116
7.4	Instabilités	119
7.5	L'attaque indirecte	120

7.6	Architecture des cibles	122
7.7	Expériences de compression	125
	Bibliographie	128
8	Les grands instruments de la fusion inertielle	129
8.1	Énergie laser et gain thermonucléaire : l'étape du mégajoule	129
8.2	Lasers de puissance	131
8.3	Lasers mégajoule	137
8.4	Du faisceau à la cible	140
8.5	Allumage spontané ou provoqué ?	143
8.6	Une autre solution : les faisceaux de particules	146
8.7	Le retour du « Z-pinch »	148
	Bibliographie	153
9	Hors des sentiers battus	155
9.1	Les hybrides fusion-fission	155
9.2	Hybrides à confinement magnétique ou inertiel	157
9.3	Fusion froide : catalyse par les muons	162
9.4	Au-delà du mélange deutérium-tritium	164
	Bibliographie	167
10	Le réacteur à fusion	169
10.1	Le lièvre et la tortue	169
10.2	Conditions pour un générateur d'électricité	170
10.3	Cycles énergétiques	175
10.4	Une place dans le cycle des combustibles nucléaires [4]	179
10.5	Vues d'avenir	182
10.6	Quelques considérations économiques	184
10.7	Régénération du tritium et ressources	186
	Bibliographie	188
	Épilogue	189
	Bibliographie générale sur la fusion	191
	Glossaire	193
	Sigles	201
	Index	203

N.B. : les * renvoient au glossaire ; les ** à la liste des sigles.

Vj ku'r̥ ci g'kpvgpvkpcm̥ 'ighv'dn̥pm̥

Préface

La société prend conscience chaque jour davantage de l'importance de l'énergie. C'est le nerf de son développement dans tous les domaines et par la même un enjeu majeur pour la paix dans le monde. Bien plus d'un milliard d'habitants de la planète n'ont pas l'électricité ; la population continue de croître et ce déficit ne fait que grandir et, avec lui, toujours plus de demandes en énergie. L'urgence est particulièrement forte dans les pays en voie de développement. Malgré un effort important dans le domaine des énergies renouvelables, cette demande supplémentaire est, à l'échelle mondiale, satisfaite dans une très large mesure par toujours plus de recours aux hydrocarboneés et, cela fait frémir, par un retour massif de l'utilisation du charbon. Tous ceux qui ont voyagé en Chine ou en Inde ont pu en apprécier les conséquences sur la qualité de l'air. Les climatologues, de leur côté, lancent des cris d'alarme sur les effets probables du réchauffement climatique. C'est l'un des défis majeurs de ce siècle que de concilier la croissance inévitable de la consommation énergétique mondiale avec l'inéluctable épuisement des ressources fossiles (elles assurent 85 % de la consommation actuelle) et le respect de notre environnement. Pour y parvenir, la seule approche envisageable est d'économiser davantage l'énergie et d'accentuer l'effort de recherche et développement pour un usage, optimisé et combiné, des ressources renouvelables et des ressources nucléaires disponibles et sûres.

Le professeur Jean-Louis Bobin est l'auteur de plusieurs livres qui font autorité sur le problème de l'énergie. On a pu admirer à cette occasion son ouverture d'esprit, l'équilibre de ses jugements et son talent de pédagogue. Mais avant d'en arriver là, il s'est très tôt intéressé aux problèmes scientifiques de la fusion nucléaire. Comment en effet, un jeune chercheur peut-il ne pas se passionner pour cette source d'énergie qui alimente si bien les étoiles et qui, si on pouvait la réaliser sur la Terre de manière contrôlée, offrirait une source d'énergie pratiquement illimitée avec des avantages indéniables liés à l'absence à la fois d'emballement possible et de déchets radioactifs à très long terme.

Domestiquer la fusion passe par la compréhension de l'état « plasma », ce 4 état que la matière prend aux très hautes températures. Les plasmas, qui pourtant dominent largement la matière visible de l'Univers, étaient très mal connus au milieu

du dernier siècle. Leur comportement est étrange et passionnant. Sa compréhension fait appel aux derniers développements de la physique des effets collectifs macroscopiques. Jean-Louis Bobin fait partie de ces hommes de science qui ont contribué à défricher cette terre nouvelle. Sa carrière scientifique comporte des contributions importantes dans le domaine de la fusion dite « inertielle » et sa grande culture scientifique lui permet d'appréhender tous les secteurs de cette science aux aspects extrêmement variés.

Devenu professeur d'université, Jean-Louis Bobin a su conjuguer recherche et enseignement supérieur, deux pôles dont on ne soulignera jamais assez la complémentarité. Ce livre en est une bien belle illustration. On y trouve les bases scientifiques essentielles de la science des plasmas. Les « premiers principes » sont exposés de façon lumineuse puis viennent les chapitres sur les filières prometteuses pour la fusion ainsi que leurs principaux résultats et, sans aucune concession, les défis qui restent à relever.

Sept grands partenaires réunissant 34 pays comptant ensemble plus de la moitié de la population mondiale ont choisi un site français, Cadarache, pour la construction d'ITER. Ce grand instrument scientifique est une étape majeure pour la démonstration de la fusion par confinement magnétique. L'aventure, à la préparation de laquelle j'ai eu l'honneur d'être associé, comporte des développements scientifiques extraordinaires qui passionnent déjà physiciens et ingénieurs. Cet engouement devrait aller croissant pendant les deux décennies à venir. Ce livre fournit les bases précises pour en comprendre la conception. Il sera en particulier un outil très précieux pour mettre à l'étrier toute une nouvelle génération de scientifiques amenée à contribuer à l'exploitation de l'instrument et à en tirer la quintessence.

Le sol français est aussi le site de construction du LMJ (Laser Méga Joule), autre grand instrument scientifique financé pour les besoins de la défense nationale avec un volet important pour une application civile de la fusion inertielle. Ce livre dont l'auteur est un scientifique réputé du domaine fournit les mêmes bases que nous avons soulignées pour ITER.

L'auteur offre ensuite une discussion originale sur des filières non conventionnelles. Les neutrons de grande énergie, 14 MeV, que produisent les réactions de fusion possèdent des propriétés sans équivalent qui pourront être exploitées après la réussite du développement actuel. Le mérite du livre est de les exposer sans idées préconçues. Il apparaît clairement qu'il y a toujours de la place pour l'innovation dans ce domaine et qu'il convient de l'encourager en association avec les grands programmes qui viennent d'être mis en place.

La France est donc devenue le siège d'un pôle mondial d'une ampleur exceptionnelle en recherches sur la fusion contrôlée. À terme, l'enjeu est, comme le conclut l'auteur, de disposer d'une ressource illimitée pour répondre à la demande en énergie électrique de l'humanité. Nul doute que ce livre extrêmement complet et didactique

soit appelé à devenir un précieux sésame pour scientifiques et ingénieurs qui exploiteront ces merveilleux instruments d'exploration scientifiques que deviendront ITER et le LMJ lorsque leurs constructions auront été menées à bien. Je ne peux que souhaiter au lecteur de prendre le même plaisir que moi-même à sa lecture.

Jean JACQUINOT

Conseiller scientifique auprès de la haut Commissaire à l'énergie atomique

Vj ku'r̥ ci g'kpvgpvkpcm̥ 'ighv'dn̥pm̥

Unités

Il sera beaucoup question d'énergie, grandeur évaluée au moyen d'unités adaptées aux différents cas qui se présentent en pratique. L'unité légale est le *joule*, (J), travail d'une force de 1 newton dont le point d'application s'est déplacé de 1 m dans le sens de la force. On utilise couramment :

1 kilojoule (KJ) = 10^3 joules

1 megajoule (MJ) = 10^6 joules

1 gigaJoule (GJ) = 10^9 joules

L'unité de puissance est le watt : 1 Watt = 1 joule/seconde.

1 kilowatt (KJ) = 10^3 watts

1 mégawatt (MW) = 10^6 watts

1 gigawatt = 10^9 watts

1 terawatt (TW) = 10^{12} watts

Les physiciens atomistes, nucléaires et des particules utilisent des unités spécifiques :

1 électron-volt, eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule

1 kilo-électron-volt, keV = $1,6 \cdot 10^{-16}$ J

1 méga-électron-volt, MeV = $1,6 \cdot 10^{-13}$ J

etc.

Énergie et température

Dans un gaz à l'équilibre *thermodynamique**, la température est proportionnelle à la moyenne de l'énergie cinétique des constituants élémentaires. Le coefficient de

proportionnalité est la constante de Boltzmann : $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$. La correspondance approximative (à 10 % près) entre l'électron-volt, unité d'énergie des physiciens nucléaires, et l'unité usuelle de température est :

$$1 \text{ eV} \Leftrightarrow 10^4 \text{ }^\circ\text{K}.$$

Ainsi, des températures élevées à notre échelle correspondent à des énergies ridiculement basses à l'échelle subatomique. Dans la suite, les températures seront souvent évaluées en unités d'énergie.

Avant-propos

La fusion nucléaire est la source d'énergie des étoiles. Sera-t-on, un jour, capable de reproduire sur Terre ce que la nature fait si bien au centre du Soleil ? En 1933, Lord Rutherford avait jugé que l'utilisation de l'énergie nucléaire était du domaine du rêve : « *Anyone who looks for a source of power in the transformation of the atom is talking moonshine.* » (quiconque prétend chercher une source d'énergie dans les transformations de l'atome raconte des sornettes). Il avait en tête la fusion dans des configurations projectile cible qui effectivement, comme on le verra plus loin, ne pourraient pas conduire à une source d'énergie. Relever ce vieux défi fera-t-il de la fusion thermonucléaire contrôlée, tirant sa puissance d'un combustible inépuisable, une source d'énergie « propre » et fiable ? On en rêve pour l'avenir de l'espèce humaine.

La volonté de concrétiser ce rêve a lancé une entreprise comme on n'en avait jamais vu dans toute l'histoire des sources d'énergie. En effet, la machine à vapeur par exemple qui a permis la première révolution industrielle était l'aboutissement d'une démarche totalement empirique, étalée sur plusieurs siècles et progressant d'initiative individuelle en initiative individuelle. La science (la thermodynamique) vint après coup pour accompagner en les expliquant les triomphes de la technique et en guider les perfectionnements. En dehors des lignes de chemin de fer, concessions de service public accordées par les états suivant des règles plus ou moins strictes, le développement des technologies fut laissé à l'initiative privée. Le cas de l'électricité apparaît différent. Les résultats de la recherche fondamentale précédèrent et inspirèrent les réalisations des inventeurs et des industriels. Mais là encore aucune planification ne présida au devenir de ce vecteur énergétique. Nul n'aurait eu au XIX^e siècle l'idée saugrenue d'instituer un Commissariat à l'Énergie Électrique.

Avec l'électronucléaire, l'intervention des États devint prépondérante. Comme pour l'électricité, son développement s'effectue par transfert de la recherche vers les applications. Mais les circonstances particulières de la naissance de l'industrie nucléaire au cours de la seconde guerre mondiale ont eu de lourdes conséquences. Les recherches, qui requièrent des moyens importants, sont menées majoritairement au sein de laboratoires nationaux dont une partie de l'activité, consacrée à l'armement,

est couverte par le secret d'État. Peu après la fin de la guerre, les technologies à usage civil ont été mises dans le domaine public. Mais l'introduction de l'électronucléaire sur le marché, entamée dans l'euphorie des trente glorieuses, a rapidement rencontré ses limites. Les problèmes d'acceptation ne sont pas seuls en cause. Le gigantisme des installations est mal adapté aux marchés peu régulés (encadré 1). En revanche, pays de tradition centralisatrice, la France a pu mener à bien, par l'intermédiaire d'opérateurs publics puissants, un programme au bout duquel 80 % de l'énergie électrique aujourd'hui produite sur son sol est d'origine nucléaire. Ailleurs, l'actuelle et fragile « renaissance » est largement d'initiative régionale.

Encadré 1. Gigantisme électronucléaire.

Un réacteur électronucléaire à fission est d'autant plus intéressant sur le plan économique qu'il est plus puissant. L'évolution de la filière REP** le confirme : la puissance électrique nominale des réacteurs de 2^e génération est passée de 900 à 1300 MW, elle atteindra 1600 MW avec la 3^e génération, celle des EPR**.

Mais cette puissance élevée constitue un handicap. Elle impose de consentir en un temps court un investissement massif. Il convient aussi que la demande s'exprime au même niveau. Ce n'est pas toujours le cas. Aux États-Unis par exemple, les demandes, souvent émises par des collectivités locales, vont plutôt par tranches de 500 MW électriques, puissance à laquelle les centrales à charbon sont mieux adaptées.

L'histoire des technologies de l'énergie est faite de percées où l'on avait exploité des inventions et des découvertes dont la finalité n'était pas affichée. La situation de la fusion est, à cet égard, singulière. Une communauté scientifique internationale, soutenue par les pouvoirs publics des nations les plus riches, s'est fixé pour tâche la réalisation de réacteurs à fusion thermonucléaire producteurs d'électricité. Il s'agit d'une démarche volontariste qui part de l'intuition qu'il est possible d'atteindre cet objectif. Quand ? Comment ? À quel prix ? Autant de questions aux réponses incertaines.

Les recherches ont commencé vers 1950 dans le sillage du développement ultrarapide des applications de la fission. À l'époque, on a beaucoup inventé. Cela se passait dans le secret des grands laboratoires édifiés pendant et juste après la seconde guerre mondiale. En 1958, lors de la seconde conférence de Genève « *Atoms for peace* », eut lieu une déclassification massive. Des exposés et une vaste exposition révélaient la richesse et la diversité des méthodes proposées pour le confinement magnétique. Mais l'optimisme officiel cachait une grande circonspection provoquée par la rencontre de difficultés insoupçonnées. Le *plasma**, milieu ionisé de haute température, support des processus thermonucléaires, était mal connu des physiciens et ne se laissait pas domestiquer facilement. Les astronomes autrefois s'y étaient intéressés, accompagnés à l'occasion par quelques physico-chimistes (Debye, Langmuir) ou des théoriciens (Landau). Faute d'un savoir de base suffisant, la mise en œuvre des

V

verre au néodyme (laser), 40

W

Weizsäcker C.M. von, 27
Wendelstein-7X, 74

Y

Y.A.G., 135

Z

zone de conduction, 117
zone sous-dense, 117
zone surdense, 117