Document generated on 07/19/2025 6:31 a.m.

Scientia Canadensis
Canadian Journal of the History of Science, Technology and Medicine
Revue canadienne d'histoire des sciences, des techniques et de la médecine

De la physique des plasmas à la fusion nucléaire
Émergence et développement d'une spécialité

Michel Trépanier

Volume 16, Number 1 (42), 1992

URI: https://id.erudit.org/iderudit/800341ar
DOI: https://doi.org/10.7202/800341ar

See table of contents

Publisher(s)

CSTHA/AHSTC

ISSN

0829-2507 (print)
1918-7750 (digital)

Explore this journal

Cite this article

Trépanier, M. (1992). De la physique des plasmas à la fusion nucléaire : émergence et développement d'une spécialité. *Scientia Canadensis*, *16*(1), 25–59. https://doi.org/10.7202/800341ar

Article abstract

This paper traces the emergence and development of Canadian research activities in nuclear fusion between 1960 and 1972. Strongly linked to the development of plasma physics, the history of the setting up of research groups in fusion and of the fate of their first propositions aimed at launching a national fusion program clearly show that the development process of a specific scientific activity is not only the result of progress in knowledge but also a product of interactions between institutional, political, economic and social factors.

Copyright © Canadian Science and Technology Historical Association / Association pour l'histoire de la science et de la technologie au Canada, 1992

This document is protected by copyright law. Use of the services of Érudit (including reproduction) is subject to its terms and conditions, which can be viewed online.

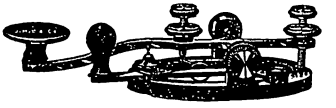
https://apropos.erudit.org/en/users/policy-on-use/

This article is disseminated and preserved by Érudit.

Érudit is a non-profit inter-university consortium of the Université de Montréal, Université Laval, and the Université du Québec à Montréal. Its mission is to promote and disseminate research.

https://www.erudit.org/en/

De la physique des plasmas à la fusion nucléaire: Émergence et développement d'une spécialité



MICHEL TRÉPANIER
INRS-Urbanisation

RÉSUMÉ

Cet article retrace l'émergence et le développement, au Canada et au Québec, des activités de recherche sur la fusion thermonucléaire au cours de la période 1960-1972. Intimement liés au développement de la physique des plasmas, l'histoire de la mise sur pied des principaux groupes de recherche intéressés à la fusion et le sort réservé aux premières tentatives visant à mettre en oeuvre un programme de recherche sur la fusion montrent bien comment des facteurs institutionnels, intellectuels, politiques, économiques et sociaux affectent le rythme de croissance et l'orientation de l'activité scientifique.

ABSTRACT

This paper traces the emergence and development of Canadian research activities in nuclear fusion between 1960 and 1972. Strongly linked to the development of plasma physics, the history of the setting up of research groups in fusion and of the fate of their first propositions aimed at launching a national fusion program clearly show that the development process of a specific scientific activity is not only the result of progress in knowledge but also a product of interactions between institutional, political, economic and social factors

Au Canada et au Québec, c'est au cours des années 1960 que les principaux groupes de recherches intéressés à la physique des plasmas débutèrent leurs activités. D'abord spécialisés dans l'étude des plasmas cosmiques et géophysiques, les quelques groupes canadiens de physique des plasmas s'intéressèrent de plus en plus au domaine en émergence que constituait alors la recherche sur la fusion nucléaire. C'est donc au cours de cette période que l'on assiste aux premiers efforts visant la mise sur pied d'un programme de recherche sur la fusion thermonucléaire. Cette période de gestation et d'études sans lendemain voit la naissance et le développement de groupes et d'institutions qui, au début des années 1970, seront devenues assez importantes pour obtenir du gouvernement fédéral un engagement à étudier la possibilité de mettre sur pied un programme canadien de fusion thermonucléaire contrôlée.

Dans le présent article, je veux étudier l'émergence de la recherche sur la fusion au Canada en montrant comment la naissance et le développement de cette spécialité sont les produits de forces et de facteurs (institutionnels, économiques, politiques, sociologiques et intellectuels) très divers.

Sur la scène nationale, l'expansion rapide du système universitaire canadien et la croissance des activités de recherche, tant au sein des gouvernements que dans les universités, constituent deux facteurs qui permettent aux groupes de physique des plasmas de se développer. Dans leurs efforts pour mettre sur pied un programme national de recherche sur la fusion, ces groupes seront aussi confrontés à l'important programme canadien de fission nucléaire et au réacteur CANDU, deux programmes qui sont au coeur des initiatives fédérales en matière énergétique.

Par ailleurs, les événements qui ont lieu sur la scène canadienne évoluent aussi en fonction de ce qui se passe sur la scène internationale de la fusion. Le développement des programmes de fusion dans les pays industrialisés et les progrès scientifiques les plus importants réalisés au cours de la période 1960-1972 constituent le contexte (international) qui incitera des canadiens à s'intéresser à la fusion et qui, subséquemment, favorisera, ou défavorisera, selon les conjonctures, les différents groupes de chercheurs dans leurs efforts visant à mettre sur pied un programme canadien de fusion.

DES PROGRAMMES IMPORTANTS, MAIS SECRETS, AUX ÉTATS-UNIS, AU ROYAUME-UNI ET EN UNION SOVIÉTIQUE

Lorsque les recherches sur la fusion nucléaire s'amorcèrent au début des années 1950 aux États-Unis, au Royaume-Uni et en Union Soviétique, les physiciens envisageaient un succès rapide et estimaient qu'un prototype de réacteur à fusion opérationnel serait disponible dans un délai de dix ans. Pour eux, le problème à résoudre pour obtenir des réactions de fusion était «relativement» simple. Il fallait créer sur terre un système ayant les mêmes caractéristiques que le soleil; c'est-à-dire un système permettant de contrôler un gaz extrêmement chaud, complètement ionisé, appelé *plasma*.

Le premier obstacle auquel furent confrontés les physiciens était qu'aucun matériau ne pouvait supporter les cent millions de degrés requis pour obtenir une réaction de fusion sans se désagréger rapidement[1]. La solution retenue pour contourner cet obstacle fut l'utilisation de champs magnétiques. Le plasma peu dense, mais très chaud, est confiné par des champs magnétiques élevés pendant un temps

suffisamment long, supérieur à la seconde, pour permettre la réalisation de réactions de fusion. Dans les années 1950, les chercheurs allaient mettre au point différents types de «bouteilles magnétiques» dans le but de confiner le plasma : les stellarators, les machines à miroirs, les multipoles, les machines à striction axiale ou azimuthale.

À cette époque, les travaux des chercheurs américains, soviétiques et britanniques étaient gardés secrets. Leurs recherches portaient sur des réactions de type nucléaire et les gouvernements de ces pays n'étaient pas prêts à partager avec d'autres des informations pouvant avoir un potentiel militaire important. Les États-Unis achevaient la mise au point d'une bombe à hydrogène qui mettait en jeu des réactions de fusion et d'autres pays y travaillaient. La recherche sur la fusion avait donc un caractère stratégique.

LES ANNÉES 1960 : UNE CONJONCTURE DIFFICILE

En 1958, les difficultés rencontrées dans les laboratoires américains, soviétiques et britanniques finirent par convaincre les gouvernements que les chercheurs avaient grand besoin de pouvoir échanger leurs informations et que la recherche sur la fusion en était à un stade de développement tellement rudimentaire qu'il y avait peu d'intérêt à garder secret ce qui était connu[2]. La levée du secret permis l'entrée en scène de nouveaux pays : la France, le Japon, l'Allemagne de l'Ouest, etc. Dès le début des années 1960, la plupart des pays industrialisés finançaient d'importants programmes de recherche sur la fusion. Au potentiel militaire qui avait motivé le démarrage des recherches se substituait de plus en plus un intérêt marqué des gouvernements pour le potentiel énergétique de la fusion. À la même époque, le Canada, non seulement n'avait pas de programme coordonné dans ce domaine mais, en plus, les activités de recherche en physique des plasmas, la spécialité qui est à la base de la recherche sur la fusion, y étaient très peu développées.

C'est en 1958 que débutèrent, dans les laboratoires du Centre de recherches pour la défense de Valcartier (CRDV) et dans ceux de RCA Victor à Montréal, les premières recherches en physique des plasmas[3]. Les chercheurs du CRDV s'intéressaient aux plasmas dans le cadre de leurs travaux sur les missiles balistiques et on peut dire que c'est en quelque sorte les progrès techniques réalisés dans ce domaine qui les obligèrent à se préoccuper de physique des plasmas : les missiles voyageant à des hauteurs de plus en plus grandes, leur retour dans l'atmosphère (tout comme celui des vaisseaux spatiaux) posait des problèmes d'échauffement qui entraînaient la création de plasmas.

Quant aux chercheurs de RCA, ils étudiaient surtout l'interaction des ondes électromagnétiques avec les plasmas dans le cadre d'un programme de recherche sur les satellites et les télécommunications. Dans des secteurs de recherche connexes aux activités des chercheurs de RCA vinrent s'ajouter, en 1959, les travaux d'un groupe de chercheurs du University of Toronto Institute of Aerospace Studies Research (UTIAS) et ceux de chercheurs de l'Université de Western Ontario en 1960. De façon générale, on peut dire qu'au cours des années 1960, les travaux des chercheurs de ces trois groupes sur les plasmas cosmiques et géophysiques constituaient un des secteurs de recherche les plus développés en physique des plasmas au Canada. Pertinente en regard des efforts canadiens dans le domaine des satellites, leur compétence dans la simulation en laboratoire de phénomènes cosmiques et géophysiques était en plus reconnue sur la scène internationale[4].

Dans les années 1960, les études des interactions laser-plasma et la mise au point de méthodes de diagnostic constituaient les deux autres domaines de recherche où un petit noyau d'experts commencait à se développer Puisqu'ils visent essentiellement à développer des méthodes et des appareils servant à mesurer les principaux paramètres[5] d'un plasma, ces travaux sont donc utilisés dans tous les secteurs de la physique des plasmas, y compris dans celui de la recherche sur la fusion. Au Canada, ce fut par ce biais que débutèrent en 1959 à l'Université de la Saskatchewan et en 1960 à l'Université de la Colombie-Britannique (UBC) des travaux rattachés au domaine de la fusion nucléaire[6].

Les chercheurs de l'Université de la Saskatchewan se consacraient surtout à l'étude des propriétés des plasmas chauds. Le groupe de UBC, mis sur pied grâce à une subvention d'infrastructure de la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) visant spécifiquement le développement de la recherche fondamentale en physique des plasmas, était à cette époque le groupe canadien le plus important et le mieux équipé[7]. Les chercheurs utilisaient des plasmas chauds produits au moyen de machines à striction (axiale ou azimuthale) pour mettre au point des appareils de diagnostic et pour analyser le développement d'instabilités dans ce type de configuration. À ces travaux vinrent s'ajouter en 1962 ceux de chercheurs de la division de physique du Conseil national de recherches du Canada (CNRC) qui s'intéressaient alors à l'interaction laser-plasma, à la création de plasmas chauds au moyen de lasers, aux propriétés de ces plasmas et à la mise au point d'appareils de diagnostic utilisant le laser[8].

Finalement, un groupe de recherche s'intéressant lui aussi à la mise au point de méthodes de diagnostic fut mis sur pied à l'Université de Montréal en 1963 par Gilles Cloutier[9].

Malgré quelques percées intéressantes dans le domaine des diagnostics et de l'étude des plasmas cosmiques et géophysiques, la physique canadienne des plasmas des années 1960 était très fragile : mis à part le groupe de RCA Victor et celui de UBC, les groupes ne dépassaient jamais quatre chercheurs et la totalité du support financier dont ils bénéficiaient en 1966 atteignait à peine 1,4 millions de dollars, soit 1,5 % de l'effort américain de 1963[10]. Présentées dans le rapport final de l'étude du Conseil des sciences du Canada sur l'état de la physique canadienne, ces constatations amenèrent leurs auteurs, M.P. Bachynski, S.A. Ramsden et H.M. Skarsgard, à conclure que la physique des plasmas se portait plutôt mal. Ces trois physiciens des plasmas soulignaient que l'effort canadien était à toutes fins pratiques inexistant, que les chercheurs ne disposaient d'aucun équipement majeur et que leurs travaux étaient trop diversifiés pour avoir un impact. Selon eux, la physique des plasmas reposait essentiellement sur les efforts de quelques scientifiques très compétents et, faute de leur offrir des moyens et des équipements adéquats, le Canada était sur le point de les perdre au profit d'autres pays[11].

Pour ce qui est de la recherche portant spécifiquement sur la fusion, le constat de Bachynski, Ramsden et Skarsgard était encore plus percutant : il n'existait aucun effort particulier dans ce domaine[12]. En fait, leur conclusion n'était pas nouvelle. En mai 1966, soit à peine un an auparavant, A.J. Barnard et S.A. Ramsden (le même qui participa peu de temps après à l'enquête sur la physique au Canada) en étaient arrivés à la même conclusion au terme d'une étude réalisée pour le compte du Comité associé du CNRC sur la physique des plasmas[13]. Ainsi, pendant que les autres pays industrialisés investissaient des sommes importantes dans leurs programmes de recherche sur la fusion[14], le Canada en était toujours au point zéro.

Il est toutefois important de noter qu'il existait déjà, à cette époque, un noyau de scientifiques intéressés par les recherches sur la fusion et possédant une expertise dans ce domaine. L'indicateur le plus sûr de cet intérêt est sans doute les travaux que poursuivaient des chercheurs de RCA, de l'Université de la Saskatchewan, de UBC, du CNRC et de l'Université de Montréal. Bien que ces travaux n'avaient pas pour objet de solutionner ou comprendre les principaux problèmes posés par la mise au point d'un réacteur à fusion, ils permettaient néanmoins aux chercheurs de garder un contact avec ce

domaine de recherche. Ce sont ces quelques chercheurs qui, plus tard, seront à l'origine des premiers efforts visant la mise sur pied d'un programme canadien de recherche sur la fusion.

Cependant, même en tenant compte de ces travaux, on peut dire sans se tromper qu'il n'y avait toujours pas, en 1968, de recherches canadiennes liées directement au secteur de la fusion nucléaire. Plusieurs facteurs permettent d'expliquer cette situation.

Dans plusieurs pays, et en particulier aux États-Unis, ce sont des motivations militaires qui furent à l'origine des recherches sur la fusion. Dans les années 1950, les éventuels réacteurs à fusion présentaient un potentiel militaire très intéressant : l'on pensait que les neutrons produits lors des réactions de fusion pourraient être utilisés pour fabriquer de la matière fissile, et que le tritium produit par les réactions de fusion pourrait être utilisé dans les bombes à hydrogène (thermonucléaire). Aux États-Unis, par exemple, la seule évocation de ces possibilités exerçait une pression très forte sur les autorités responsables à Washington et ces dernières se sentirent presque contraintes de répondre positivement aux demandes visant la mise sur pied d'un programme de fusion[15].

Le Canada n'ayant pas de programme d'armement nucléaire ou thermonucléaire, les possibilités de la fusion à cet égard ne pouvaient exercer sur le gouvernement fédéral aucune forme de pression susceptible d'encourager le développement d'un programme de recherche dans ce domaine. Les motifs militaires qui avaient servi de bougies d'allumage dans plusieurs pays n'existaient pas au Canada.

Par ailleurs, l'isolement et la faiblesse des groupes de recherche, autant en termes d'effectifs et que de ressources financières, firent en sorte qu'il leur était à peu près impossible de préparer des projets d'envergure. Pour reprendre la terminologie utilisée en sociologie des sciences, on peut dire qu'il n'existait pas encore de réseau canadien de recherche sur la fusion. Il n'est donc pas étonnant qu'à cette époque, aucun groupe ne formula de propositions visant à entreprendre un important programme de recherche sur la fusion. En fait, il faut attendre le milieu des années 1960 pour que la communauté canadienne des physiciens des plasmas commence à manifester sa présence et à demander un accroissement des efforts consacrés à la spécialité.

Comme nous l'avons vu, il faut attendre le milieu des années 1960 pour voir un réseau plus important et mieux structuré se constituer. Ainsi, c'est suite aux pressions exercées par l'Association canadienne des physiciens (ACP) que le CNRC accepta de créer un Comité associé sur la physique des plasmas. Composé de représentants des institutions canadiennes les plus actives dans la recherche sur les plasmas[16],

le Comité associé avait pour tâche de promouvoir la spécialité et de suggérer les avenues particulières qui devraient être empruntées advenant un développement des activités. Les travaux que le Comité réalisa au cours de 1966 constituèrent les premières ébauches d'un plan de développement pour la physique des plasmas au Canada. Il fallut néanmoins attendre 1967, dans l'étude *La physique au Canada*, pour que soit élaborée une proposition concrète de développement des activités en physique des plasmas et, encore là, le plan suggéré ne contenait aucune proposition spécifique visant la mise sur pied d'un programme canadien de recherche sur la fusion[17].

Finalement, le climat de pessimisme qui s'était installé dans la communauté internationale des spécialistes en fusion suite aux problèmes posés par le développement des instabilités dans les plasmas, était peu propice au démarrage d'un programme de recherche dans ce domaine.

Au début des années 1950, l'américain Lyman Spitzer, croyait que dans un appareil à configuration de champ magnétique fermée, les particules chargées resteraient piégées sur les lignes de champ magnétique, ce qui les empêcherait de s'échapper vers les parois froides de l'enceinte à vide dans laquelle est formé le plasma. Dès le début des travaux sur leur Stellarator, lui et ses collaborateurs durent se rendre à l'évidence que cette situation idéale n'était malheureusement pas vraie : les collisions entre particules provoquent une diffusion à travers les lignes de champ et des effets anormaux liés à la turbulence produisent également des «fuites» dans la bouteille parfaite[18]. Les machines britanniques et les soviétiques souffraient des mêmes problèmes.

En 1960, aux États-Unis et ailleurs, l'espoir fut brièvement ranimé par les machines à miroirs. On croyait que ces machines allaient permettre de démontrer la faisabilité scientifique (conditions minimales de température, densité et temps de confinement) de la fusion dès le milieu des années 1960. Cet optimisme s'appuyait pour une large part sur la production d'un plasma stable dans les machines à miroirs Table Top et Toy Top du Lawrence Livermore National Laboratory.

Compte tenu des attentes, la déception fut très grande lorsqu'en septembre 1961, à la 1e conférence de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) sur la fusion, les chercheurs de Livermore annoncèrent que le temps de confinement du plasma obtenu lors de l'expérience Toy Top III (version améliorée de l'expérience Toy Top) était dix fois plus court que celui obtenu avec le Toy Top. Lors de la même conférence, M.S. Ioffe, un chercheur travaillant sur des machines à miroirs à l'Institut Kurchatov de Moscou, présenta des résultats qui montraient que, contrairement à ce que les américains

avaient cru suite à l'expérience Toy Top, des macroinstabilités (mouvements collectifs par lesquels le plasma parvient à s'échapper. du champ magnétique) se développaient dans les machines à miroirs. Les résultats de Ioffe étaient d'ailleurs en accord avec les résultats de l'expérience Toy Top III[19].

De plus, les travaux présentés à la conférence internationale de 1961 et les expériences réalisées subséquemment sur des versions améliorées des machines à miroirs[20] indiquaient tous le développement d'une grande variété de microinstabilités qui avaient des effets négatifs très importants sur les paramètres du plasma.

Les difficultés posées par les instabilités, quelles soient du type macro ou micro, étaient tellement importantes que les chercheurs abandonnèrent l'idée de travailler sur des problèmes technologiques et se remirent à des études fondamentales de physique des plasmas. Ils se consacrèrent à l'étude du comportement des plasmas chauds soumis à un champ magnétique et ils travaillèrent à mettre au point de nouvelles configurations de champs magnétiques susceptibles de contrer les instabilités et produire un plasma stable confiné pendant un temps suffisamment long[21].

Le Congrès américain n'apprécia pas beaucoup cette réorientation des activités de recherche et le début des années 1960 fut marqué par d'importantes coupures budgétaires. Pour les membres du Congrès, les chercheurs n'avaient pas tenu les promesses faites au début des années 1950. La faisabilité scientifique de la fusion n'avait toujours pas été démontrée et les chercheurs étaient encore très loin du prototype de réacteur qu'ils avaient pourtant promis pour le début ou le milieu des années 1960.

Pour bien des politiciens, la recherche sur la fusion reculait au lieu d'avancer. Selon eux, la meilleure preuve en était que les chercheurs poursuivaient une très grande variété d'approches et que les machines utilisées n'étaient plus du tout envisagées comme des réacteurs éventuels mais plutôt comme des appareils de recherche fondamentale en physique des plasmas. Le Congrès trouva que la recherche fondamentale dans ce domaine coûtait très cher et avait un avenir plutôt sombre. Il décida donc de réduire les budgets consacrés à la fusion[22].

Au milieu des années 1960, le programme américain de recherche sur la fusion était donc au creux de la vague et le moral des chercheurs était au plus bas : les coupures budgétaires avaient entraîné des mises à pied de personnel et l'annulation de certains projets, plusieurs chercheurs étaient découragés parce que même si au plan scientifique la recherche avait progressé on était encore loin d'un réacteur et, finalement, la fusion avait très peu de supporteurs à l'Atomic Energy Commission et au Congrès[23].

Devant autant d'incertitudes quant à la possibilité de mettre au point des réacteurs à fusion capables de produire de l'énergie à un coût acceptable, il aurait été très difficile pour les physiciens canadiens de justifier auprès du gouvernement fédéral les dépenses de plusieurs millions de dollars nécessaires à la mise en oeuvre d'un programme de fusion. D'ailleurs, ces millions auraient été d'autant plus difficiles à obtenir que le Canada était, à cette époque, très engagé dans le développement d'un réacteur nucléaire, le CANDU, sur lequel on comptait beaucoup pour satisfaire la demande énergétique future du pays. Au plan énergétique donc, il aurait été à peu près impossible de justifier auprès des autorités fédérales, le démarrage d'un programme de fusion. Au Canada, le potentiel énergétique de la fusion avait peu d'attrait.

Les résultats scientifiques obtenus à la fin des années 1960 et le climat politique du début des années 1970, transformèrent considérablement le contexte que nous venons d'évoquer et contribuèrent à créer un climat beaucoup plus favorable à la mise en oeuvre de recherches sur la fusion.

LE DÉBUT DES ANNÉES 1970 : UN NOUVEL OPTIMISME

Sur la scène internationale, le début des années 1970 fut marqué par un renouveau d'intérêt dans le domaine de la recherche sur la fusion. Les résultats spectaculaires obtenus sur les tokamaks soviétiques et présentés en août 1968 à Novosibirsk lors de la troisième conférence internationale sur la physique des plasmas et la fusion thermonucléaire contrôlée redonnèrent espoir et confiance aux chercheurs. Sur leurs tokamaks, les soviétiques avaient obtenu des températures excédant 10 millions de degrés centigrades. Avant ces expériences, les meilleures températures obtenues à partir de machines toroïdales étaient de 1 million de degrés centigrades.

Suite à ces résultats, le pessimisme du milieu des années 1960 fit place à un bel optimisme[24]. L'importance des travaux soviétiques fut telle que les américains délaissèrent leurs propres machines toroïdales, les stellarators, et réorientèrent leur programme de recherche vers la construction de machines de type tokamak[25]. Le même effet se fit sentir dans les pays européens qui, eux aussi, entreprirent rapidement la construction de tokamaks[26]. En 1972, il y avait cinq tokamaks en construction aux États-Unis et autant en Europe[27].

C'est aussi à la fin des années 1960 que l'on assista à l'émergence et aux premiers succès de la recherche dans le domaine de la fusion par lasers haute puissance. Dans la fusion par confinement inertiel, des

faisceaux de lasers haute puissance sont utilisés pour comprimer brutalement une pastille de deutérium-tritium et provoquer des réactions de fusion.

Pendant longtemps, la fusion par lasers était apparue irréalisable étant donné l'écart considérable qui existait entre la puissance des lasers disponibles (quelques dizaines de joules) et celle théoriquement requise (10^7-10^9 joules) pour faire de la fusion par confinement inertiel. Toutefois les résultats obtenus en 1968 en France et en Union Soviétique (production de neutrons à partir de cibles de deutérium irradiées par des lasers) et une revision à la baisse de la puissance théoriquement requise allaient modifier le paysage et contribuer à établir la pertinence et la «nécessité» de poursuivre la recherche dans ce secteur[28].

À la fin de 1969, des chercheurs de KMS Inc., une entreprise privée américaine, affirmèrent être en mesure de prouver la faisabilité scientifique de la fusion par lasers dans les 18 prochains mois et de produire de l'énergie grâce à cette méthode dans un délai de quelques années. L'enthousiasme de KMS était bien entendu démesuré et les problèmes liés à la fusion par lasers bien trop importants pour être résolus dans un temps aussi court. Mais, malgré ceci, l'annonce de KMS augmenta le support accordé à la fusion dans le public en général. Si une entreprise privée acceptait d'y investir ses propres ressources c'était un signe que la fusion constituait une option énergétique sérieuse[29]. Cet intérêt du public, les chercheurs en avaient bien besoin pour appuyer leur demande pour des budgets plus importants.

L'appui public dont bénéficia à cette époque le programme américain de fusion était aussi lié au mouvement de protection de l'environnement. La prise de conscience des dommages causés à l'environnement avait débuté au milieu des années 1960 et entraîné l'adoption de projets de lois ainsi que la création de nouvelles institutions gouvernementales ayant pour objectif la protection de l'environnement : le National Environmental Policy Act fut adopté en 1969, le Clean Air Act, en 1970 et, finalement, la très importante Environmental Protection Agency fut créée à la fin de 1970. Parallèlement à cette préoccupation pour l'environnement, on commença aussi à s'inquiéter de la croissance rapide de la consommation d'énergie et de la possibilité que la demande excède l'offre. Dans ce contexte, la «nécessité» de produire davantage d'électricité entrait en conflit avec la «nécessité» de nettoyer l'atmosphère et les cours d'eau. En réponse à ce problème, le gouvernement américain décréta que la production d'énergie en quantités illimitées à partir de technologies ayant un minimum d'impact sur l'environnement constituait maintenant un objectif prioritaire[30].

Dans cette course, le surgénérateur était la technologie privilégiée par l'Atomic Energy Commission. Pour les représentants de la Commission, les réacteurs nucléaires à fission étaient déjà moins polluants que les centrales thermiques traditionnelles et le problème des déchets radioactifs, bien que sérieux, ne leur apparaissait pas insoluble. Toutefois, les citoyens en général et les écologistes en particulier, déjà méfiants à l'égard des centrales à fission, de leurs dispositifs de sécurité et de leurs déchets ne se laissaient pas facilement convaincre. Lorsqu'en mai 1971 le *Scientists' Institute for Public Information* déclara que le plutonium utilisé comme carburant dans le surgénérateur était un produit toxique et hautement radioactif, toute la technologie de ce type de réacteur devint rapidement et irrémédiablement l'objet des attaques du mouvement écologiste américain[31].

Dès l'été 1972, le contexte fut donc largement favorable aux dirigeants et chercheurs du programme américain de fusion. Au plan scientifique, les paramètres atteints sur les tokamaks dépassaient de loin les résultats obtenus sur d'autres machines toroïdales (multipoles, Astron, Scyllac, stellarators, etc.) et permettaient, à nouveau, d'envisager la mise au point de réacteurs de fusion.

Au plan politique, les préoccupations écologistes et la recherche de méthodes «douces» de production d'énergie placèrent la fusion à l'avant-scène des débats sur ces questions. Perçue comme une énergie «propre» et «sécuritaire», l'énergie de fusion s'attira un important soutien populaire. Dans la mouvance de la crise pétrolière de 1973, s'ajouta avec une accuité jamais atteinte auparavant la prise de conscience de la nécessité de mettre au point de nouvelles méthodes de production d'énergie afin de faire face à une demande toujours croissante. À cet égard, la fusion était pleine de promesses. Elle pouvait être présentée comme la solution finale au problème énergétique puisqu'elle utilise de l'hydrogène comme carburant, un produit constitutif de l'eau, considérée alors comme une ressource illimitée. Enfin, la volonté politique américaine de ne pas se laisser damer le pion par les soviétiques dans cet important domaine de recherche constitua elle aussi un facteur militant fortement en faveur d'une augmentation de l'effort de recherche.

À la faveur de ce contexte, les budgets de recherche consacrés à la fusion augmentèrent rapidement et d'importants programmes de recherche sur des machines de type tokamak furent lancés. Le budget annuel du programme américain de fusion passa ainsi de 33 millions de dollars en 1972 à 300 millions de dollars en 1977. Misant sur les projets PLT (Princeton Large Torus) et TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) on fixa 1980 comme l'année au cours de laquelle devrait être faite la preuve de la faisabilité scientifique de la fusion.

En Europe aussi le début des années 1970 fut caractérisé par un développement rapide de la recherche sur la fusion. En 1970, l'Euratom adopta, pour une période de cinq ans, un plan de financement dans lequel on prévoyait doubler les dépenses effectuées au cours de la période 1963-1967. Dans ce climat d'optimisme, on prévoyait déjà que pour le plan quinquennal débutant en 1975 on pourrait multiplier par sept les dépenses destinées aux activités normales du programme et, en plus, débloquer des fonds supplémentaires pour le projet JET (Joint European Torus) ainsi que pour un projet sur la technologie des réacteurs. À lui seul le JET allait coûter plus de 1 milliard de dollars.

L'effort européen allait surtout porter sur des machines de type tokamak et on accorda peu d'attention à la recherche sur la fusion par lasers. Le projet JET constituait le fer de lance du programme européen. Au moment où le projet fut mis en branle, en 1973, les dimensions, les équipements et le programme scientifique du JET en faisaient un des tokamaks les plus importants sur la scène internationale.

PREMIÈRE PROPOSITION DE PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LA FUSION POUR LE CANADA

Au fil des événements que nous venons de relater, le contexte de la recherche sur la fusion s'était considérablement transformé. La fusion était redevenue le domaine de recherche prometteur qu'il avait été à la fin des années 1950. Les prédictions étaient plus prudentes qu'à cette époque mais les chercheurs étaient à nouveau optimistes.

Au Canada, c'est à la faveur de cette conjoncture que fut présentée, en juin 1969, la première proposition visant la mise sur pied d'un programme de recherche sur la fusion. C'est le Comité associé du CNRC sur la physique des plasmas qui avait eu l'initiative de cette démarche. Il avait créé un sous-comité sur la fusion nucléaire composé de représentants des institutions canadiennes les plus impliquées dans la recherche sur la fusion : le président, H. Skarsgard de l'Université de la Saskatchewan, poursuivait depuis 1959 des recherches sur les plasmas chauds, L. Schott, de la même université, étudiait la propagation des ondes dans les plasmas, J. Alcock, B. Kronast et P. Savic, tous trois affiliés au CNRC, travaillaient dans le domaine de l'interaction laser-plasma, I.P. Shkarofsky de RCA Limitée possédait une vaste expertise en théorie des plasmas. Ainsi composé, le sous-comité ne comprenait aucun francophone et un seul de ses membres appartenait à une institution québécoise.

Le mandat du sous-comité était simple : élaborer un programme canadien de recherche sur la fusion. Dans la réalisation de sa tâche, le sous-comité allait utiliser tous les éléments du nouveau contexte international de la recherche sur la fusion dans le but de convaincre les autorités canadiennes de la pertinence et de la nécessité de mettre sur pied, dans les plus brefs délais, un tel programme.

Dès le premier paragraphe de son Rapport, le sous-comité faisait mention du nouveau climat prometteur dans lequel s'inscrivait alors la recherche sur la fusion. Selon les auteurs, les travaux récents démontraient que seulement quelques-unes des instabilités connues constituaient des menaces réelles au confinement d'un plasma par un champ magnétique. Ils ajoutaient que dans la mesure où des remèdes avaient été trouvés à certaines des instabilités les plus dommageables, il était permis de croire qu'elles pourraient toutes être éliminées[32].

Ce nouveau contexte scientifique permit aux membres du sous-comité d'affirmer qu'il était à peu près certain que des réacteurs à fusion capables de produire de l'énergie à un coût acceptable seraient mis au point et que, par conséquent, la recherche sur la fusion constituait un investissement intéressant. En plaçant son Rapport dans ce nouveau contexte, le sous-comité était en mesure d'attaquer une opinion fort répandue au cours des années 1960 et selon laquelle les investissements dans la recherche sur la fusion n'étaient rien de plus que des paris sur un cheval perdant[33].

Outre cet argument d'ordre général, les auteurs disposaient aussi d'un argument d'ordre économique : des études de l'époque comparant le coût hypothétique du KWh d'énergie produit par un réacteur à fusion avec celui produit par un réacteur à fission concluaient que l'énergie de fusion ne serait pas plus chère que l'énergie de fission et qu'elle avait même un léger avantage sur cette dernière puisque les coûts d'immobilisation (réacteur et appareils auxiliaires) allaient être moins grands que ceux d'un surgénérateur. S'appuyant sur ces études, les auteurs du Rapport étaient donc en mesure d'affirmer qu'au plan économique la production d'énergie par fusion constituerait une alternative valable[34].

Les auteurs soulignèrent aussi que les avantages de la fusion sur la fission n'étaient pas seulement de nature économique. Le réacteur à fusion était selon eux beaucoup plus sécuritaire puisque le moindre problème technique allait entraîner une diminution de la température et, par conséquent, éteindre la réaction nucléaire[35]. Parce qu'il allait produire moins de déchets radioactifs que le réacteur à fission, le réacteur à fusion apparaissait aussi plus intéressant au plan environnemental. Les auteurs ne manquèrent pas d'indiquer qu'avec la prise

de conscience du public concernant la sécurité et l'impact environmental des centrales, ces aspects prendraient dans l'avenir une importance de plus en plus grande dans le choix du type de réacteurs et de leur emplacement[36].

Pour le sous-comité, les perspectives ouvertes par les résultats scientifiques de l'époque, combinées aux avantages de la fusion au plan de la rentabilité économique, de la sécurité et de la protection de l'environnement, étaient importantes au point qu'aucun pays industrialisé ne pourrait ignorer la fusion comme méthode de production d'énergie et que, conséquemment, le Canada se devait de développer le plus rapidement possible une expertise scientifique et technologique dans un domaine qui semblait destiné à révolutionner le monde de l'énergie[37].

Le sous-comité estima aussi qu'un programme de recherche sur la fusion constituait le prolongement le plus intéressant pour les activités canadiennes dans le domaine de la fission. Étant donné qu'une large part de la technologie développée pour les réacteurs à fission pourrait être utilisée dans le développement des réacteurs à fusion, les auteurs affirmèrent qu'un programme de fusion permettrait au Canada de conserver la place de leader qu'il occupait dans le domaine de l'énergie nucléaire grâce au programme CANDU[38].

De plus, la fusion étant un secteur de recherche qui implique non seulement des travaux de physique fondamentale mais aussi le développement de technologies sophistiquées (techniques du vide, matériaux supraconducteurs, électrotechnique de haute puissance, techniques de contrôle, informatique, électronique, etc.) les auteurs mentionnèrent qu'un programme de recherche sur la fusion présentait des avantages économiques à court terme étant donné ses retombées industrielles et technologiques[39].

Enfin, les membres du sous-comité utilisèrent à leur avantage les développements scientifiques les plus récents. Suite aux résultats obtenus par les différents groupes de chercheurs américains, européens et soviétiques, il y avait eu une reformulation des problèmes de recherche sur lesquels la communauté devait se concentrer. Les chercheurs ayant trouvé des solutions aux problèmes posés par les macroinstabilités, leur intérêt se porta sur la compréhension et le contrôle des microinstabilités. Tirant profit de cette situation, les auteurs du Rapport indiquèrent que les nouvelles préoccupations de la communauté internationale seraient abordées sur des appareils de taille moyenne et cette conjoncture offrait au Canada la chance exceptionnelle de participer de manière significative au développement de la fusion sans être contraint de construire de gros appareils et d'y investir des sommes colossales[40].

Suivant cette orientation, le programme de recherche que proposait le sous-comité était composé de trois projets expérimentaux flexibles et de dimension moyenne : expériences sur des «multipoles» (faible-ß), développement de méthodes de production et de chauffage de plasmas, expériences sur des machines à striction du type «Theta-pinch» (ß-élevé)[41].

Au printemps 1969, lorsque le sous-comité élabora son programme, le raz-de-marée «tokamak» n'était pas encore commencé[42] et, aux États-Unis, les machines qui suscitaient le plus d'intérêt étaient précisément les multipoles et les machines à striction (Theta-pinch).

Le troisième volet du programme proposé par le sous-comité, le développement de méthodes de production et de chauffage d'un plasma, était en quelque sorte complémentaire aux deux autres volets : les éventuels réacteurs à fusion allaient nécessiter des plasmas plus chauds et plus denses que ceux qui étaient produits à l'époque. Dans ce domaine, le sous-comité proposa que les chercheurs canadiens se concentrent surtout sur l'utilisation des lasers et que l'on mise ainsi sur l'expertise canadienne dans le domaine des lasers haute puissance et de l'interaction laser-plasma[43].

Pour la mise en oeuvre du programme qu'il proposait, le sous-comité demandait la création d'un laboratoire unique; un Centre national de recherche sur la fusion. Les trois volets nécessitant à peu de choses près le même équipement technique (équipements informatique, ateliers, etc.), le sous-comité jugea plus économique de centraliser toutes les activités dans un seul laboratoire[44].

Selon les estimations du sous-comité, la réalisation des programmes de recherche envisagés allait exiger un personnel composé de 31 scientifiques, 12 ingénieurs et 78 techniciens. Au plan financier, le sous-comité prévoyait des coûts annuels d'opération de 4,3 millions de dollars auxquels viendraient s'ajouter 2 millions de dollars par année au cours des deux premières années pour l'achat des équipements de base[45].

Déposée en juin 1969, la proposition du sous-comité n'eut pas de suite. Elle ne fut apparemment pas discutée au CNRC et ne fut jamais transmise aux ministères ou organismes fédéraux concernés. Le sort qui lui fut réservé peut en partie s'expliquer par le fait qu'à peine avait-elle été déposée que le programme de recherche suggéré était déjà désuet au regard de la situation internationale. Les machines envisagées dans le programme du sous-comité furent déclassées dès l'automne 1969 par le tokamak : les résultats scientifiques obtenus sur cet appareil étaient supérieurs et son potentiel en tant que réacteur était plus grand. Aux États-Unis, en particulier, la réorientation du

programme de fusion qui, au début des années 1970, se traduisit par des investissements massifs dans la construction de tokamaks, mit un frein brutal au développement et aux travaux sur les autres machines toroïdales telles que les multipoles et les Scyllacs[46]. Compte tenu de ceci, les physiciens canadiens intéressés à la fusion n'étaient plus disposés à soutenir le programme proposé par le sous-comité et à travailler pour son approbation.

UNE DEUXIÈME TENTATIVE

Presqu'un an après le dépôt de la proposition de programme du sous-comité, le dossier «fusion» n'avait toujours pas bougé. Ce fut l'Association canadienne de physique (ACP) qui, au printemps 1970, relança à nouveau le dossier en soumettant au CNRC une proposition visant à réaliser une enquête sur l'état de la physique des plasmas au Canada.

Dans la demande initiale de l'ACP, l'enquête couvrait essentiellement la recherche fondamentale. Jugeant que le projet adoptait une perspective trop limitée, le CNRC refusa de le financer tel quel et suggéra que l'étude soit élargie de façon à aussi inclure un examen des technologies liées à l'utilisation des plasmas[47].

La version remaniée de la proposition fut acceptée par le CNRC lors de sa réunion des 16 et 17 juin 1970. Faisant suite à cette décision, le CNRC approuva aussi la création d'un Comité ad hoc sur la physique et la technologie des plasmas auquel il confia le mandat de faire l'inventaire des activités canadiennes (universités, laboratoires industriels et gouvernementaux) de recherche et développement en physique des plasmas et d'identifier, en ordre de priorité et en tenant compte de l'expertise et des moyens limités du pays, les domaines spécifiques dans lesquels concentrer un éventuel programme canadien[48].

Le comité chargé de réaliser l'enquête fut finalement créé en octobre 1970 sous le nom de Comité ad hoc sur la physique des plasmas et ses applications. Il était composé de dix membres provenant de différentes institutions canadiennes intéressées par la physique des plasmas : le président, H. Duckworth (Université de Winnipeg), M. Bachynski (RCA Limitée), M. Cheesman (président de Westinghouse du Canada), G. Cloutier (Institut de Recherche d'Hydro-Québec), J. Convey (Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources), J. de Leeuw (University of Toronto Institute for Aerospace Studies), D. Hurst (président de la Commission de contrôle de l'énergie atomique), W.B. Lewis (Énergie atomique du Canada Limitée), J. Parent

(Université du Québec à Trois-Rivières), P. Smy (président de la section de physique des plasmas à l'ACP) et le secrétaire J. Alcock (CNRC). Comparé au Comité associé du CNRC, la présence québécoise et francophone au sein de ce nouveau comité était beaucoup plus marquée puisqu'il comprenait trois représentants d'institutions québécoises dont deux étaient francophones. Il comptait aussi parmi ses membres plusieurs chercheurs intéressés par la fusion, notamment M. Bachnski, G. Cloutier, J. de Leeuw et J. Alcock. En fait, la composition du nouveau comité illustrait bien l'émergence, à cette époque, de deux tendances qui n'allaient que s'amplifier: la présence d'institutions québécoises et l'intérêt porté à la fusion au sein de la communauté canadienne de physique des plasmas.

Le Comité Duckworth déposa son rapport en novembre 1971. Les résultats de son enquête lui permirent de conclure que, dans l'ensemble, la situation de la recherche en physique des plasmas s'était améliorée en comparaison avec ce qu'elle était lors de la publication de l'étude *La physique au Canada* en 1967. Le nombre de chercheurs était passé de 56 en 1966 à 202 en 1970 et les sommes investies dans la recherche étaient passées de 1,4 millions de dollars en 1966 à près de 7 millions de dollars en 1970[49].

Par ailleurs, l'importance relative de chacun des secteurs de recherche était restée à peu près la même. À l'instar de Bachynski, Ramsden et Skarsgard quatre ans plus tôt, le Comité Duckworth remarqua que les études fondamentales de la production et du comportement des plasmas ainsi que l'étude des plasmas cosmiques et atmosphériques constituaient les deux secteurs les plus développés (62 % des dépenses de recherche en physique des plasmas en 1970). Comme ses prédécesseurs, le Comité constata que la recherche ayant la fusion comme préoccupation spécifique était à toute fin pratique inexistante[50].

Estimant que la recherche fondamentale avait atteint un niveau de développement satisfaisant et qu'elle était d'excellente qualité, le Comité mit donc l'emphase sur les applications potentielles de la physique des plasmas et recommanda qu'advenant une expansion de la recherche, les nouvelles activités soient orientées vers un programme de développement technologique[51]. Suivant cette perspective, le Comité Duckworth souhaitait aussi que les projets soient entrepris dans un contexte pouvant subséquemment favoriser leur exploitation industrielle. Il recommanda que les projets impliquent à la fois les universités, les gouvernements et les industries et qu'au moins 25 % des fonds de recherche soient consacrés à la participation des dernières[52].

Au plan organisationnel, le Comité Duckworth recommanda que le CNRC mette sur pied un Comité sur la physique des plasmas qui aurait la responsabilité de voir à la mise en oeuvre et au financement de projets majeurs de développement technologique[53]. Ce nouveau Comité aurait aussi pour tâche de conseiller les autres organismes fédéraux impliqués dans le financement de la R&D en physique des plasmas et serait ainsi responsable de la coordination des activités fédérales dans ce domaine[54].

Doté d'un budget particulier, du pouvoir exécutif lui permettant de faire démarrer des projets et d'un droit de regard sur les dépenses des autres organismes fédéraux dans le domaine de la physique des plasmas, le Comité proposé dans le Rapport Duckworth constituait un instrument de développement de la physique des plasmas beaucoup plus puissant que le Comité Associé qui existait à l'époque et dont le rôle était essentiellement consultatif.

Il était aussi suggéré que l'éventuel Comité sur la physique des plasmas ne choisisse pas lui-même, d'entrée de jeu, les projets majeurs qui seraient entrepris. Les auteurs du Rapport recommandaient plutôt d'accepter, dans un premier temps, les suggestions que les groupes intéressés feraient parvenir au Comité et qu'ensuite celui-ci retienne quelques suggestions pour lesquelles seraient réalisées des études de faisabilité détaillées. Suite aux études de faisabilité, le Comité pourrait finalement sélectionner certains projets et, sur la base d'une proposition détaillée émanant des groupes de chercheurs concernés, financer la mise en oeuvre de ces programmes de recherche[55].

Au terme de son examen des différents secteurs de recherche, le Comité Duckworth identifia la fusion comme un des domaines prometteurs[56]. Toutefois, le Comité ne fit aucune sélection parmi les domaines d'application possibles. Tous les domaines «appliqués» se retrouvent dans la liste de secteurs à développer, tandis que tous les domaines «fondamentaux» se retrouvent dans la liste des secteurs dont les activités devraient être maintenues. En refusant de classer les domaines dans un ordre prioritaire le Comité Duckworth passait outre à une dimension centrale de son mandat[57].

Comme les rapports précédents, le Rapport Duckworth n'eut pas de retombées directes en terme de programmes de recherche. Le Conseil du CNRC discuta le Rapport lors de sa réunion des 2 et 3 novembre 1971 et décida que le Comité associé du CNRC sur la physique des plasmas procéderait lui-même à l'identification et à l'évaluation des projets majeurs soumis dans le domaine de la physique et des technologies des plasmas et ferait ensuite des recommandations quant à ceux qui devraient être financés[58]. Contrairement à ce qu'avait préconisé le

Comité Duckworth, le comité du CNRC responsable du dossier «plasma» allait demeurer un comité «associé», c'est-à-dire un comité consultatif sans pouvoir réel quant à la mise en oeuvre concrète de programmes de recherche. Par ailleurs, suivant le souhait du Comité Duckworth et du CNRC d'orienter la recherche vers le développement technologique, le Comité associé fut rebaptisé Comité associé sur la physique et la technologie des plasmas et sa composition fut modifiée afin d'inclure un plus grand nombre de représentants de l'industrie.

En somme, suite aux décisions du CNRC, le démarrage de nouveaux programmes de recherche en physique des plasmas, y compris la mise sur pied d'un programme de recherche sur la fusion, était remis à plus tard. Les chercheurs allaient devoir attendre que le Comité associé ait terminé son examen des propositions de programme.

LA COMMUNAUTÉ CANADIENNE DE RECHERCHE SUR LA FUSION

Même si au début des années 1970, le Canada n'avait toujours pas de programme national de fusion, des activités de recherche s'étaient néanmoins développées dans les universités, les industries et les laboratoires gouvernementaux. Pofitant du développement accéléré du système universitaire canadien et de la croissance des activités de recherche au sein des gouvernements et des universités, les groupes de physiciens des plasmas identifiés par Ramsden, Bachynski et Skarsgard en 1967 avaient, dans la plupart des cas, pris de l'expansion et quelques nouveaux groupes, surtout situés au Québec, avaient été créés. Le réseau d'institutions universitaires, de laboratoires gouvernementaux et industriels grâce aux initiatives duquel la recherche sur les plasmas allait se développer et s'orienter vers le domaine de la fusion nucléaire existait dorénavant.

Pour l'essentiel, ce sont ces goupes qui vont déployer des efforts considérables pour que soit mis sur pied un programme canadien de recherche sur la fusion et qui, par la suite, vont s'affronter pour obtenir que les programmes de recherche et les appareils envisagés soient réalisés chez eux.

En 1966, au moment de l'étude de Ramsden, Bachynski et Skarsgard, le Plasma Physics Group de UBC comprenait six physiciens et constituait le groupe le plus important au Canada. Même s'il était passé à huit membres ce groupe, n'occupait plus, en 1970, cette position privilégiée. Numériquement, les groupes de l'Université de l'Alberta, de l'INRS-Énergie l'avaient devancé et la division des sciences de base à l'IREQ comptait elle aussi huit membres.

À cette époque, la contribution la plus importante du groupe de UBC au développement de la recherche sur la fusion au Canada fut sans nul doute la formation de chercheurs en physique des plasmas. Il assure en quelques sorte la reproduction du réseau de chercheurs et sa croissance démographique. Avec ses 21 étudiants, il était de loin le groupe canadien le plus actif dans ce domaine. De fait, plusieurs des anciens étudiants du Plasma Physics Group poursuivront des carrières de chercheurs dans d'autres institutions canadiennes et travailleront à des recherches sur la fusion. Les activités de recherche du groupe étaient d'ailleurs marquées par sa mission éducative. Les projets, nombreux, y étaient diversifiés et de petite envergure, choisis pour l'intérêt qu'ils soulevaient dans le secteur de la fusion mais aussi en fonction de leur pertinence comme sujet de thèse[59]. Les chercheurs de UBC avaient développé une expertise dont le caractère très fondamental, très général, la rendait pertinente autant dans le domaine du confinement inertiel que dans celui du confinement magnétique.

Créé en 1965 par deux professeurs du Département de génie électrique de l'Université de l'Alberta, le Plasma Research Laboratory comptait déjà neuf chercheurs en 1970. À ce seul titre, il constituait déjà un groupe important. Toutefois, son importance était aussi liée à son expertise scientifique. Au fil des ans, le groupe avait développé une expertise portant essentiellement sur le confinement inertiel au moyen de lasers haute puissance. Les chercheurs se consacraient au développement de lasers haute puissance et de techniques de diagnostic utilisant le laser ainsi qu'à l'étude de l'interaction laser-cible, des techniques de chauffage d'un plasma par laser et des interactions laser-plasma. En fait, les chercheurs du Plasma Research Laboratory travaillaient dans un domaine qui, comme nous l'avons vu précédemment, suscitait de grands espoirs au sein de la communauté internationale. De plus, le large éventail de travaux poursuivis par le groupe et les liens qu'il entretenait, aux États-Unis, avec le Lawrence Livermore National Laboratory en firent rapidement un des groupes canadiens les plus importants dans le domaine du confinement inertiel.

Formé autour de H. Skarsgard, le premier chercheur à s'intéresser aux plasmas chauds, le Plasma Physics Laboratory, du Département de physique de l'Université de la Saskatchewan ne comptait que trois membres en 1970. Malgré son petit nombre de chercheurs, ce laboratoire occupait à cette époque une place centrale dans la communauté canadienne. Le professeur Skarsgard était l'un des rares chercheurs canadiens à poursuivre un programme expérimental sur des machines toroïdales et l'un des seuls à posséder une expertise sur des machines

du type tokamak[60]. Parmi les chercheurs canadiens, Skarsgard était celui qui avait la plus solide réputation scientifique dans le domaine de la fusion par confinement magnétique.

À l'UTIAS, les activités de recherche sur la fusion qui avaient débuté lentement à partir de 1953 par des études sur les tubes de choc s'étaient considérablement développées au cours des années 1960 sous l'impulsion de G.N. Patterson et J.H. de Leeuw. En 1970, les activités du groupe comprenaient la production de plasmas chauds ainsi que l'étude de l'interaction des plasmas avec les champs magnétiques. Au début des années 1970, le groupe réorienta ses activités. Les chercheurs délaissèrent progressivement la physique des plasmas en tant que telle pour s'intéresser plutôt à des problèmes de technologie et d'ingénierie de la fusion. Avec l'engagement, en 1972, des professeurs A.A. Haasz et P.C. Stangeby, les activités du goupe connurent un nouvel essor. Cette période marqua le début d'un programme expérimental majeur visant à tester différents concepts pour la construction d'une source intense de neutrons de 14 MeV destinée à des études de développement de matériaux pour les réacteurs à fusion[61].

Le groupe Laser and Plasma Physics de la division de physique du CNRC avait lui aussi connu une expansion rapide depuis l'étude de Bachynski, Ramsden et Skarsgard : de deux chercheurs en 1966, le groupe était passé à six en 1970. Comme l'indique bien son nom, l'expertise du groupe était presque entièrement concentrée dans l'utilisation des lasers : production de plasmas chauds à l'aide de lasers haute puissance, techniques de diagnostic par laser, étude de l'interaction laser-plasma[62]. En ce qui concerne les lasers, le groupe du CNRC était à cette époque, avec le Centre de recherche pour la défense de Valcartier (CRDV), un des groupes canadiens les mieux équipés[63]. Le groupe du CNRC était, avec le Plasma Research Laboratory de l'Université de l'Alberta et un groupe de chercheurs de l'INRS-Énergie, un des principaux centres canadiens d'expertise en matière de fusion par confinement inertiel à l'aide de lasers haute puissance.

C'est toutefois au Québec que la croissance des activités de recherches sur la fusion fut la plus importante à la fin des années 1960 et au début des années 1970. Pour l'essentiel, c'est la création, en 1967, de l'Institut de recherche de l'Hydro-Québec (IREQ) et celle du Centre de l'Énergie (CREN), en juin 1970, qui expliquent cette augmentation subite du nombre de chercheurs et des activités de recherche[64]. Ces deux nouvelles institutions allaient bien entendu renforcer la communauté canadienne de recherche sur la fusion, mais, de par leur importance, elles allaient aussi modifier l'équilibre des forces au sein de ce réseau.

L'IREQ fut créé dans le but de mettre au point des techniques et des méthodes susceptibles d'améliorer la qualité de la distribution d'électricité tout en minimisant le coût et on y développa donc des activités dans cinq domaines de recherche en électricité : production, transport, distribution, exploitation du réseau et utilisation de la puissance[65].

Les chercheurs de la division des sciences de base, dans le cadre d'activités de recherches liées à la mise au point de nouvelles méthodes de production d'électricité, s'intéressèrent à la fusion. À peine trois ans après sa création, ce groupe comprenait déjà huit chercheurs et, à ce titre, devenait un des groupes canadiens les plus importants dans ce domaine. Sous la direction de Gilles Cloutier, celui-là même qui avait mis sur pied le groupe de physique des plasmas à l'Université de Montréal en 1963, la division se vit confier le mandat de suivre les progrès réalisés à travers le monde dans le domaine de la fusion.

Dans ce contexte, les chercheurs de la division initièrent un programme de recherche portant sur le chauffage d'un plasma dense par un laser haute puissance : produit par une machine à striction (theta-pinch), le plasma était ensuite chauffé par une impulsion laser produite par un laser TEA-CO^2 [66]. Ce projet amena les chercheurs à étudier l'interaction laser-plasma et à développer des techniques de diagnostic utilisant le laser. En collaboration avec les scientifiques du CREN, les chercheurs de la division s'intéressaient aussi à l'étude de l'interaction laser-cible solide.

Par ailleurs, au moment où la division des sciences de base mettait sur pied ses activités de recherche sur la fusion, Charles E. Beaulieu directeur de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), Louis Berlinguet, vice-président à la recherche de la même institution et Lionel Boulet, directeur de l'IREQ, discutaient la création d'un centre universitaire qui puisse collaborer avec l'IREQ. Le contexte de l'époque était propice à de telles discussions.

L'IREQ avait de nombreuses raisons d'encourager la création d'un centre universitaire oeuvrant dans le domaine de la recherche énergétique. Au plan scientifique, la collaboration avec les chercheurs du centre universitaire allait assurer une croissance et une diversification plus grandes et plus rapides des activités de recherche. De ce point de vue, le bassin de chercheurs et d'activités ainsi créé avait plus de chances de devenir significatif à l'échelle canadienne et internationale. Au plan de l'enseignement, la création d'un centre universitaire permettrait aux chercheurs de l'IREQ de contribuer à la formation d'étudiants en donnant des cours et en dirigeant des thèses. De plus, cette activité allait, d'une part, fournir aux chercheurs des assistants de bon calibre et, d'autre part, assurer la formation d'une main-d'oeuvre

qui, en plus d'avoir une formation dans le domaine de la R&D énergétique, serait spécialisée dans l'analyse et la solution des problèmes particuliers se posant à l'IREQ et, de manière plus générale, à l'Hydro-Québec.

L'INRS, quant à lui, en était encore à ses débuts et se trouvait en pleine période de développement. Les subventions données à l'Université du Québec par le ministère de l'Éducation étaient généreuses et l'INRS pouvait donc se permettre de créer de nouvelles institutions. L'éventail des domaines dans lesquels l'INRS aurait pu établir un centre de recherche était toutefois très large et quand vint le moment d'arrêter le choix sur un domaine particulier, l'intérêt de l'IREQ pour un centre sur l'énergie exerça beaucoup d'influence sur les dirigeants de l'INRS. Comme les dirigeants de l'IREQ, ceux de l'INRS réalisaient très bien les avantages d'une collaboration scientifique entre ses chercheurs et ceux de l'IREQ. En ce qui concerne les équipements, par exemple, la possibilité que les chercheurs et les étudiants du centre puissent utiliser les laboratoires et les appareils de l'IREQ était très intéressante. Outre ces considérations particulières, le domaine de l'énergie, à cause de la nature même des problèmes qui y sont traités et des travaux qui y sont poursuivis, avait l'avantage de correspondre parfaitement au mandat de l'INRS qui était de créer des centres multidisciplinaires, articulés au développement économique du Québec.

Le Centre de recherche de l'énergie (CREN) fut créé en juin 1970. Deuxième centre créé par l'INRS, le CREN (rebaptisé plus tard INRS-Énergie) avait pour objectif général l'enseignement et le développement de la recherche dans les domaines de la conversion, de la génération, de la transmission, du contrôle et de la mise en réserve de l'énergie[67].

Dès les premières années d'activité, une collaboration exceptionnelle à bien des égards s'installa entre l'INRS-Énergie et l'IREQ. À ses débuts, l'INRS-Énergie loua ses locaux à l'IREQ. Partageant les mêmes laboratoires et les mêmes équipements, les communications et les collaborations entre les chercheurs des deux institutions étaient faciles et fréquentes. En matière d'enseignement, près de la moitié des premiers diplômés de maîtrise et de doctorat furent dirigés par des chercheurs de l'IREQ[68]. Au plan scientifique, les programmes de recherche des deux institutions étaient dans la plupart des cas complémentaires et ce fut grâce aux commandites de l'IREQ que certains projets des professeurs de l'INRS-Énergie purent être réalisés.

Cette collaboration exceptionnelle ne s'appuyait pas uniquement sur des ententes formelles entre l'INRS et l'IREQ; elle devait aussi beau-

coup aux relations personnelles et professionnelles qu'entretenaient les chercheurs des deux institutions. Par exemple, lorsque vint le temps de nommer le directeur du nouveau centre de recherche, Gilles Cloutier proposa que le poste soit confié à un collègue, Brian C. Gregory [69]. Spécialiste de la physique des plasmas, B.C. Gregory connaissait G. Cloutier depuis plusieurs années et tous deux partageaient un vif intérêt pour la recherche sur la fusion. C'était une des raisons pour lesquelles G. Cloutier avait proposé sa candidature au poste de directeur de l'INRS-Énergie.

Nommé directeur de l'INRS-Énergie dès sa fondation, B.C. Gregory s'attaqua à la tâche d'organiser les activités du centre et d'embaucher les chercheurs. Dans le contexte que nous venons d'évoquer et compte tenu de ses intérêts et compétences, il en orienta le développement vers les aspects de la physique des plasmas liés à la fusion nucléaire.

Dès la première année d'activité, deux projets de recherche furent mis en branle. Le premier visait à explorer les possibilités de fusion par lasers et portait sur les mécanismes d'absorption et de transmission de l'énergie à des plasmas ou à des cibles solides[70]. Dans le cadre de ce projet, les chercheurs utilisaient des lasers TEA-CO^2 du type de ceux développés au CRDV à Valcartier pour étudier l'interaction laser-plasma ainsi que l'interaction laser-cible solide.

Ce projet avait été structuré de manière à être complémentaire au travail des chercheurs de l'IREQ qui, de leur coté, utilisaient le même type de laser pour réaliser des expériences sur le chauffage d'un plasma par laser haute puissance et étudier, dans ce contexte spécifique, l'interaction laser-plasma. Utilisant les mêmes sources (i.e. des lasers TEA-CO^2) les chercheurs des deux institutions pouvaient donc collaborer à ce niveau tout en poursuivant des projets qui, parce qu'ils ne portaient pas sur le même type de cibles, demeuraient différents. Par ailleurs, l'utilisation des lasers TEA-CO^2 mis au point à Valcartier amena les chercheurs de l'IREQ et de l'INRS-Énergie à développer leurs relations avec les chercheurs du CRDV. Pendant près d'un an et demi, le groupe d'Henri Pépin (INRS-Énergie) s'installa à Valcartier avec ses équipements et poursuivi des expériences avec les lasers du CRDV.

Le deuxième projet entrepris par les chercheurs de l'INRS-Énergie portait sur le confinement magnétique électrostatique d'un plasma chaud[71]. Le projet était basé sur une machine ouverte du type miroir à laquelle avait été ajoutées quelques idées nouvelles afin de corriger la fuite du plasma par les bouts.

Le projet KEMP fut mis en oeuvre à une époque où la communauté internationale, suite aux problèmes recontrés par les chercheurs

américains avec leur machines à miroirs, commençait à se désintéresser de ce concept pour plutôt porter son attention sur les tokamaks. Dans ce contexte, les chercheurs de l'INRS-Énergie ont, bien entendu, pensé construire un tokamak. Des considérations à la fois budgétaires et scientifiques les firent opter pour une machine à miroirs[72].

Les moyens financiers dont disposait l'INRS-Énergie n'auraient pas permis autre chose que la construction d'un tout petit tokamak dont les résultats expérimentaux auraient été très peu significatifs sur la scène internationale. À cette époque, les travaux sur les tokamaks visaient exclusivement l'amélioration des paramètres de base du plasma et ce type de recherche exigeait la construction de machines de grande dimension toujours très coûteuses. Sur ce terrain, l'INRS-Énergie ne pouvait évidemment pas concurrencer les laboratoires américains, européens et soviétiques, tous beaucoup plus riches et mieux équipés.

Par ailleurs, les possibilités des machines à miroirs n'avaient pas toutes été épuisées et elles étaient encore intéressantes au plan scientifique. Leur intérêt était d'autant plus grand que la plupart des laboratoires s'apprêtant à les délaisser pour travailler sur des tokamaks, ces possibilités allaient rester inexploitées et que, par conséquent, les chercheurs désirant s'y consacrer avaient le champ totalement libre. De plus, en comparaison avec les tokamaks, les machines à miroirs étaient moins onéreuses et, dans le contexte du début des années 1970, offraient donc la possibilité de réaliser une contribution scientifique significative à un coût qui soit acceptable pour un laboratoire de la taille de l'INRS-Énergie.

Ainsi, sans être un projet à la toute dernière mode, le projet KEMP permettait aux chercheurs de l'INRS-Énergie de s'initier aux problèmes de la recherche sur la fusion et d'acquérir de l'expérience dans l'utilisation des différentes méthodes de diagnostic. Petit à petit, grâce à la diffusion des résultats obtenus sur le système KEMP, les chercheurs de l'INRS-Énergie allaient se faire connaître et se tailler une place dans la communauté internationale de recherche sur la fusion.

Un an après la mise sur pied de ces deux projets, la direction de l'INRS-Énergie décida de lancer un nouveau programme de recherche en sciences appliquées[73]. Deux domaines furent alors envisagés : d'une part, l'électrochimie et, d'autre part, la technologie des réacteurs à fusion, les problèmes de matériaux et de neutronique. Étant donné les activités du centre dans le domaine de la fusion, la décision alla du côté de la technologie des réacteurs à fusion et le programme d'électrochimie fut rejeté. Le nouveau programme allait porter plus spécifiquement sur la neutronique de 14 MeV : étude de l'effet des neutrons

sur les matériaux de l'enceinte d'un réacteur à fusion, production de tritium au moyen des neutrons produits par la fusion, problèmes de blindage, etc.

Pour mettre en oeuvre ce nouveau programme, le centre embaucha trois spécialistes en génie nucléaire : Jacques Martel et Jim Robinson, deux diplômés de MIT, et Bernard Terreault, diplômé de l'Université de l'Illinois. Le plan de développement du programme prévoyait également la construction d'un laboratoire de neutronique au sous-sol du nouveau bâtiment qui était alors envisagé pour abriter les activités de l'INRS-Énergie.

Dès 1970, les scientifiques de l'INRS-Énergie étaient donc actifs dans l'une et l'autre des deux principales filières de la recherche en fusion thermonucléaire : le confinement inertiel (à l'aide de lasers haute puissance) et le confinement magnétique. À ces activités vint s'ajouter, en 1971, un programme de recherche sur la techonologie des matériaux pour les réacteurs à fusion. L'éventail des travaux qui y sont poursuivis font alors de cet institut un des centres canadiens les plus importants dans le domaine de la fusion nucléaire.

LA CROISSANCE RAPIDE DES ACTIVITÉS EN PHYSIQUE DES PLASMAS DANS LES UNIVERSITÉS QUÉBÉCOISES

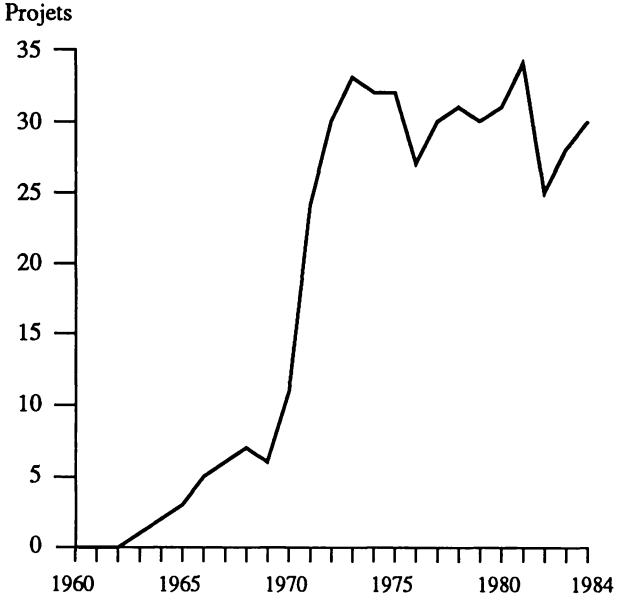
Au Québec, la création de l'IREQ, en 1967, et celle de l'INRS-Énergie (CREN), en 1970, eurent deux effets importants. Dans un premier temps, elles fournirent à la physique des plasmas une base institutionnelle qui permit le développement de deux équipes parmi les plus importantes au Canada. Dans un deuxième temps, l'orientation donnée aux activités scientifiques à l'INRS-Énergie et à l'IREQ permit la consolidation, en physique des plasmas, d'un secteur de recherche jusque là fragile : la fusion thermonucléaire. Le secteur disposait dès lors d'une assise et d'une visibilité dont il n'avait jamais bénéficié auparavant.

Sur la scène universitaire québécoise, le développement de la recherche à l'INRS-Énergie eut des effets considérables. Une croissance très rapide des activités de recherche en physique des plasmas s'amorça avec la création de l'INRS-Énergie en 1970. À peu près constant entre 1966 (six projets) et 1969 (sept projets), le nombre annuel de projets en cours dans les universités québécoises passa subitement à 12 projets en 1970, 24 en 1971 et 31 en 1972 (graphique 1). L'INRS-Énergie devint rapidement le goupe universitaire le plus important en physique des plasmas : les chercheurs de l'INRS-Énergie réalisèrent

42,8 % de tous les projets poursuivis entre 1966 et 1975 dans les universités québécoises et 58,3 % de tous les projets poursuivis entre 1976 et 1984 (tableau 1) Cette croissance des activités modifia également la place de la physique des plasmas à l'intérieur de la discipline. Spécialité marginale entre 1956 et 1965, la physique des plasmas devint une des spécialités les plus importantes entre 1966 et 1975 (tableau 2). Huitième spécialité sur onze pour la période 1945-1955, la physique des plasmas passa en troisième position au cours de la période 1966-1975 pour finalement devenir la seconde spécialité en importance au cours de la période 1976-1984 (tableau 2).

Graphique 1

Développement des activités de recherche en physique des plasmas dans les universités québécoises 1960-1984



Sources: Rapports annuels du Conseil national de recherche du Canada; Rapports annuels du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada; Rapports annuels du Fonds FCAC; Rapports annuels du Fonds FCAR; Répertoires de la recherche dans les universités subventionnée par le gouvernement fédéral.

Tableau 1
Projets de recherche (subventionnée) en physique des plasmas dans les universités québécoises (1945-1984)

	Université de Montreal	École Polytechnique	Université Laval	Universiteé de Sherbrooke	UQAM	UQAC	IN$W-Énergie	Concordia University	Total
1956-1965	5 (83,3)*		1 (16,7)						6 (100)
1966-1975	66 (32,8)	7 (3,5)	21 (10,4)	11 (5,5)	1 (0,5)	7 (3,5)	86 (42,8)	2 (1,0)	201 (100)
1976-1984	62 (23,3)	14 (5,3)	20 (7,5)			15 (5,6)	155 (58,3)		266 (100)
Total	133 (28,1)	21 (4,4)	42 (8,9)	11 (2,3)	1 (0,2)	22 (4,7)	241 (51,0)	2 (0,4)	473 (100)

* Le chiffre indique le nombre de projets de recherche (subventionnée) réalisés au cours de la péeriode. Dans le cas des projets s'échelonnant sur plus d'une année, chaque versement annuel a compté pour «un» projet.

Source : Voir graphique 1

Tableau 2
Projets de recherche (subventionnée) dans les différentes spécialités en physique dans les universités québécoises (1945-1984)

	1945-1955	1956-1965	1966-1975	1976-1984	Total
Physique médicale			4 (0,3)*	2 (0,1)	6 (0,2)
Biophysique		1 (0,5)	26 (1,8)	40 (2,0)	67 (1,8)
Météorologie		28 (14,7)	135 (9,2)	226 (11,6)	389 (10,5)
Optique		13 (6,8))	208 (14,2)	265 (13,6)	486 (13,1)
Physique atomique	19 (22,4)	9 (4,8)	130 (8,8)	122 (6,3)	280 (7,6)
Physique nucléaire	48 (56,5)	56 (29,5)	148 (10,0)	223 (11,5)	475 (12,8)
Phys. hautes énergies	11 (12,9)	7 (3,8)	100 (6,8)	132 (6,7)	250 (6,8)
Phys. théorique-maths	4 (4,7)	15 (7,9)	103 (7,0)	133 (6,8)	255 (6,9)
Astrophysique		2 (1,1)	30 (2,1)	145 (7,5)	177 (5,0)
Phys. de l'état solide	3 (3,5)	34 (18,0)	338 (23,0)	366 (18,7)	741 (20,0)
Phys. des plasmas		6 (3,2)	201 (13,7)	266 (13,6)	473 (12,8)
Autres		19 (10,0)	47 (3,2)	36 (1,8)	102 (2,8)
Total	85 (100,0)	190 (100,0)	1470 (100,1)	1956 (100,2)	3701 (100,3)

* Le chiffre indique le nombre de projets de recherche (subventionnée) réalisés au cours de la période. Dans le cas des projets d'échelonnant sur plus d'une année, chaque versement annuel a compté pour «un» projet.

Source : Voir graphique 1.

CONCLUSION

D'un point de vue sociologique plus général, les événements que nous avons décrits montrent bien comment des facteurs institutionnels, intellectuels, politiques, économiques et sociaux affectent le développement et l'orientation de l'activité scientifique[74].

Nul en 1960, le niveau d'activité en recherche sur la fusion au Canada en 1970 était encore très faible comparativement à celui des autres pays industrialisés. Néanmoins, tirant profit du contexte favorable créé suite aux résultats scientifiques spectaculaires obtenus à la fin des années 1960 ainsi que de la forte croissance du système universitaire canadien, quelques groupes de chercheurs en physique des plasmas réussissaient à mettre en oeuvre des projets de recherche sur la fusion nucléaire.

Dans le domaine du confinement inertiel, il y avait au Canada au début des années 1970, trois groupes d'importance à peu près égale : le groupe IREQ-INRS-Énergie, le Plasma Research Laboratory de l'Université de l'Alberta et le groupe Laser and Plasma Physics du CNRC. Les trois groupes avaient en commun d'utiliser le laser haute puissance TEA CO_2 développé au CRDV.

Les activités de recherche dans le domaine du confinement magnétique étaient, à cette époque, moins importantes que celles sur le confinement inertiel. Les deux groupes canadiens qui se consacraient à ce type de travaux étaient de taille modeste : le Plasma Physics Laboratory de l'Université de la Saskatchewan qui ne comprenait que trois chercheurs, travaillait sur une machine toroïdale; le groupe de l'INRS-Énergie, comprenant approximativement trois chercheurs, travaillait sur une machine à miroirs[75].

À la même époque, deux groupes commençaient à s'intéresser à la technologie des réacteurs à fusion et, plus spécifiquement, à l'étude des matériaux des réacteurs et aux effets des neutrons sur ceux-ci : un groupe à l'UTIAS et un autre à l'INRS-Énergie.

Finalement, il faut aussi mentionner que tous les groupes que nous venons de nommer étaient impliqués dans l'utilisation et la mise au point de méthodes de diagnostic. Le Plasma Physics Group de UBC et le Laboratoire de physique des plasmas de l'Université de Montréal étaient particulièrement actifs dans ce domaine.

Au début des années 1970, l'importance de ces groupes et les initiatives qu'ils entreprennent montrent bien que la communauté canadienne de physique des plasmas est au fil des ans devenue une communauté de recherche sur la fusion. Au Canada, comme dans la plupart des pays industrialisés, le développement de la physique des plasmas

se fera d'abord et surtout grâce à la mise sur pied d'activités de recherche dans le domaine de la fusion.

Toutefois, malgré la mise sur pied de ces activités de recherche, le Canada n'avait toujours pas de programme de recherche sur la fusion. Pourtant, l'ACP avait par trois fois fait formuler un plan de développement de la physique des plasmas au Canada : le Rapport sur la physique des plasmas au Canada, réalisé par le Comité associé du CNRC sur la physique des plasmas en 1966, l'étude de Bachynski, Ramsden et Skarsgard parue en 1967 dans l'enquête *Physics in Canada*, le Rapport Duckworth (*Final Report of the ad hoc Committee on Plasma Science and its Applications*) en 1971. En 1969, un sous-comité du Comité associé du CNRC sur la physique des plasmas avait même formulé une proposition visant à instaurer un programme canadien de recherche sur la fusion : *Controlled Fusion Research, The Report of the Sub-committee on Controlled Fusion Research.*

À la différence de ce que laissent croire certains travaux[76] portant sur le développement des spécialités, cette suite d'échecs montre bien que même lorsqu'il s'agit de domaines de recherche très appliqués, tels que la fusion, ce ne sont pas toujours la volonté et les demandes gouvernementales qui sont à l'origine du démarrage et de la croissance de ces spécialités. Dans le cas du Canada, le développement de la recherche sur la fusion n'est pas le produit d'une intervention gouvernementale visant à orienter la croissance de la physique des plasmas en fonction d'objectifs politiques et économiques.

Après trois rapports sans suite et une proposition de programme restée lettre morte, les chercheurs québécois (Université de Montréal, RCA Limitée, INRS-Énergie, IREQ et CRDV), conscients d'occuper une place importante dans la communauté canadienne des chercheurs intéressés par la fusion, allaient tenter leur chance et, en juin 1972, soumettre au ministère d'État chargé des Sciences et de la Technologie (MEST), à Ottawa, une proposition pour une étude visant à définir un programme canadien de fusion contrôlée.

NOTES

* Je remerçie Richard A. Bolton, Paul Dufour, Brian C. Gregory, Paul A. Redhead et Morrell P. Bachynski pour m'avoir donné accès aux documents ayant rapport avec le programme canadien de fusion. Merci également à Yves Gingras, Marcel Fournier et Brian C. Gregory pour avoir lu et critiqué la version préliminaire de ce texte. Ce projet a été réalisé grâce au soutien financier du Conseil de recherches en sciences humaines (C.R.S.H.) du Canada, du Fonds pour la formation de chercheurs et l'aide à la recherche (F.C.A.R.) du Québec et de la Fondation Édouard-Monpetit.

1 Le physicien britannique John Lawson énonça, en 1957, les conditions minimales qui doivent être simultanément satisfaites pour qu'un plasma de deutérium-tritium parvienne au stade de l'ignition (c'est-à-dire que le processus de fusion ait un bilan d'énergie positif): sa température doit atteindre environ 100 millions de degrés Celsius et le produit de la densité (en particules par cm^3) par le temps de confinement doit être plus grand que $10^{14} cm^{-3}$ x 1 seconde.

2 Pour plus de détails sur la levée du secret entourant la recherche sur la fusion, voir J.L. Bromberg, *Fusion : Science, Politics and the Invention of a New Energy Source*, Cambridge, Mass., MIT Press, 1982, chapitres 5 et 6.

3 M.P. Bachynski, S.A. Ramsden, H.M. Skarsgard, «Plasma Physics», *Physics in Canada. Survey and Outlook*, Ottawa, Science Secretariat, 1967, p. 311.

4 *Ibid.*, p. 311, 316 et 319.

5 Principalement la température ionique, la température électronique, la densité, le mouvement des particules, le développpement des instabilités, le transport des impuretés, etc.

6 M.P. Bachynski, S.A. Ramsden, H.M. Skarsgard, «Plasma Physics», *Physics in Canada. Survey and Outlook*, p. 311 et 317-18.

7 A.J. Barnard à P. Redhead, le 7 juillet 1976, p. 1, CNRC, dossier 1491-73-6, vol. 1.

8 M.P. Bachynski, S.A. Ramsden, H.M. Skarsgard, «Plasma Physics», *Physics in Canada. Survey and Outlook*, p. 311 et 320.

9 M.P. Bachynski, «In Profile – Gilles G. Cloutier», *Physics in Canada*, vol. 27, no 7, septembre 1971, p. 97.

10 M.P. Bachynski, S.A. Ramsden, H.M. Skarsgard, «Plasma Physics», *Physics in Canada. Survey and Outlook*, p. 311 et 317-18.

11 *Ibid.*, p. 322.

12 Ils écrivent : «Il y a dans le domaine des secteurs où l'effort de recherche est inexistant ou très faible. La fusion thermonucléaire et la production d'énergie par la magnétohydrodynamique sont deux exemples de tels secteurs», *Ibid.*, p. 318.

13 A.J. Barnard, S.A. Ramsden, «High Temperarure Plasmas Relating to Thermonuclear Research», NRC Associate Committee on Plasma Physics, *Report on Plasma Physics in Canada*, Ottawa, mai 1966, Appendice E, p. E-1.

14 En 1963, les investissements des principaux pays industrialisés dans la recherche sur la fusion s'établissaient comme suit : 8,4 millions de dollars en Angleterre, 6,0 millions de dollars en France, 4,6 millions de dollars en Allemagne de l'Ouest, 23,7 millions de dollars aux États-Unis. M.P. Bachynski, S.A. Ramsden, H.M. Skarsgard, «Plasma Physics», *Physics in Canada. Survey and Outlook*, p. 321.

15 J.L. Bromberg, *Fusion*, p. 18 et 33.
16 En 1966, le Comité associé était composé de S.A. Ramsden (CNRC), M.P. Bachynski (RCA Victor), A.J. Barnard (UBC), A. Lemay (CRDV), I. Shkarofsky (RCA Victor), R. Nicholls (Université York), H.M. Skarsgard (Université de la Saskatchewan), G. Cloutier (Université de Montréal), J. De Leeuw (UTIAS) et P. Savic (CNRC).
17 M.P. Bachynski, S.A. Ramsden, H.M. Skarsgard, «Plasma Physics», *Physics in Canada. Survey and Outlook*, p. 322-326.
18 Pour plus de détails sur les travaux de L. Spitzer et de son équipe, on peut consulter J.L. Bromberg, *Fusion*, chap. 2. Voir aussi R. Herman, *Fusion: The Search for Endless Energy*, Cambridge, Cambridge University Press, 1990, chapitre 1.
19 J.L. Bromberg, *Fusion*, p. 106-111.
20 En 1961, Ioffe et son équipe ne s'étaient pas contentés d'étudier le développement des macroinstabilités; ils y apportaient aussi des solutions. L'ajout de barres conductrices installées à l'horizontale entre les deux bobines des extrémités permettait de créer un «puit magnétique» à l'intérieur duquel le système à miroirs se trouvait alors placé. Cette nouvelle configuration permit aux chercheurs de l'Institut Kurchatov de multiplier par 35 le temps de confinement du plasma. Pour plus de détails sur ces travaux, voir J.L. Bromberg, *Fusion*, p. 111.
21 *Ibid.*, p. 116.
22 *Ibid.*, p. 117-119.
23 *Ibid.*, p. 140.
24 Il faut en plus mentionner que cette nouvelle confiance des chercheurs fut renforcée par la progression continue des paramètres de plasma obtenus sur les tokamaks. Par exemple, trois ans après la Conférence de Novosibirsk, on peut lire dans le compte rendu que font Kadomstev et Shafranov de la Quatrième conférence internationale sur la physique des plasmas et la fusion thermonucléaire contrôlée que les résultats expérimentaux laissent une impression de progrès constants dans les paramètres de plasmas obtenus ainsi que dans la compréhension des comportements du plasma. B.B. Kadomstev, I.V. Shafranov, «Fourth international conference on plasma physics and controlled thermonuclear fusion research. Report on the conference held in Madison, Wisconsin, USA, 17-23 june 1971», *Nuclear Fusion*, 11, 1971, p. 541.
25 J.L. Bromberg, *Fusion*, chap. 9; P. Leprince, «Fusion contrôlée : Tokomak à Fontenay», *La Recherche*, no 16, octobre 1971, p. 866-867.
26 C. Jablon, «Les incertitudes de la fusion thermonucléaire en Europe», *La Recherche*, no 80, juillet-août 1977, p. 676.
27 J.L. Tuck, «L'énergie de fusion», *La Recherche*, no 27, octobre 1972, p. 867.
28 J.L. Bromberg, *Fusion*, p. 184-185; C. Jablon, «Les lasers à l'assaut de la fusion contrôlée», *La Recherche*, no 29, décembre 1972, p. 1092-1094.
29 J.L. Bromberg, *Fusion*, p. 186.
30 *Ibid.*
31 *Ibid.*, p. 176.
32 Sub-Committee on Controlled Fusion Research, *CONTROLLED FUSION RESEARCH. Report of the Sub-Committee on Controlled Fusion Research, NRC Associate Committee on Plasma Physics*, Ottawa, juin 1969, p. 1.
33 J.L. Bromberg, *Fusion*, p. 117.

34 Sub-Committee on Controlled Fusion Research, *CONTROLLED FUSION RESEARCH*, p. 2.
35 On sait que dans le cas d'un réacteur à fission, il peut y avoir «emballement» du réacteur et, éventuellement, explosion advenant une perte accidentelle de contrôle.
36 Sub-Committee on Controlled Fusion Research, *CONTROLLED FUSION RESEARCH*, p. 3.
37 *Ibid.*, p. 128.
38 *Ibid.*, p. 129.
39 *Ibid.*, p. 3.
40 *Ibid.*, p. 128.
41 *Ibid.*, p. 133.
42 Les résultats obtenus sur les tokamaks soviétiques étaient tellement spectaculaires que bien des scientifiques américains et européens doutèrent de l'exactitude des mesures réalisées par les chercheurs soviétiques. La crédibilité des résultats soviétiques fut établie en août 1969 par des chercheurs britanniques qui, après avoir utilisé leurs propres appareils de diagnostic sur les tokamaks soviétiques obtinrent les mêmes paramètres de plasma que ceux présentés auparavant par les chercheurs de l'Institut Kurchatov. Ce n'est qu'après cette date que démarra pour de bon la course aux tokamaks. J.L. Bromberg, *Fusion*, p. 167.
43 *Ibid.*, p. 131.
44 *Ibid.*, p. 134.
45 *Ibid.*, p. 135.
46 J.L. Bromberg, *Fusion*, chap. 9, 10 et 12.
47 B.D. Leddy, «Plasma Science and Technology», Memorandum to the Council, 11 juin 1970, *Minutes of the 243 nd meeting of Council*, NRC, 16-17 juin 1970, Annexe P, p. 1.
48 *Ibid.*
49 NRC, «Final Report of the ad hoc Committee on Plasma Science and its Applications», Ottawa, novembre 1971, in *Minutes of the 248th meeting of the Council*, NRC, 2-3 novembre 1971, Annexe D, p. 7-8.
50 *Ibid.*, p. 9 et 11.
51 *Ibid.*, p. 13.
52 *Ibid.*, p. 13 et 16.
53 *Ibid.*, p. 14.
54 *Ibid.*, p. 17.
55 *Ibid.*, p. 14-15.
56 *Ibid.*, p. 19.
57 *Ibid.*, p. 2.
58 R. Rettie, «Plasma Science and its Applications», Memorandum to the Council, NRC, 27 octobre 1971, in NRC, *Minutes of the 248th Meeting of Council*, 2-3 novembre 1971, Annexe E.
59 En 1976, dans une lettre qu'il adresse à P. Redhead du CNRC, A.J. Barnard, directeur du Département de physique de UBC, souligne que le Plasma Physics Group a, jusqu'à cette date, décerné 39 doctorats et que, mis à part une douzaine qui sont partis dans d'autres pays, ces chercheurs ont pour la plupart trouvé du travail dans des universités canadiennes, des laboratoires gouvernementaux ou industriels. Il ajoute que parmi ces chercheurs, huit poursuivent des travaux en physique des plasmas et sont devenus des

membres importants de la communauté canadienne de recherche dans ce domaine. A.J. Barnard à P. Redhead, 7 juillet 1976, p. 2, CNRC, dossier 1491-73-6, vol. 1.

60 A.R. Demirdache, «Fusion Research in Canada», p. 2, in *Séminaire sur la fusion*, Note de service à A. Beaulnes, 16 novembre 1973, MEST, dossier 1550-2, vol. 1.

61 P.C. Stangeby, *Activities by UTIAS Personnel 1975-80 Advocating that Government Launch a Fusion Energy Program*, p. 1; A. Johnson, «Fusion Related Activities in Ontario», Submission to IPACE Meeting, October 12, 1979, p. 1, in P.C. Stangeby, *Activities by UTIAS Personnel 1975-80 Advocating that Government Launch a Fusion Energy Program*, Document 2.8b.

62 Pour une information technique plus détaillée, voir J. Alcock, M. Richardson, «NRC's Laser and Plasma Physics Section – A Survey of Past and Present Activities», *Physics in Canada*, vol. 34, no 1, 1978, p. 6-13.

63 A.I. Carswell, «Gas Lasers», in NRC, *Final Report of the ad hoc Committee on Plasma Science and its Applications*, p. V-(3).4.

64 Bien que l'Institut fut créé en 1967, les activités de recherche ne débutèrent à proprement parler qu'en 1970 avec l'ouverture des laboratoires de Varennes.

65 M. Drouet, «L'Institut de recherche de Hydro-Québec (IREQ)», *La physique au Canada*, vol. 27, no 3, mai 1971, p. 45.

66 *Ibid.*, p. 46. Voir aussi le tableau 1.

67 J. Martineau, «Le Centre de l'Énergie (CREN)», *La physique au Canada*,

68 *Ibid.*

69 Interview avec B.C. Gregory, Varennes, 24 février 1989.

70 J. Martineau, «Le Centre de l'Énergie (CREN)», *op. cit.*, p. 46.

71 *Ibid.*

72 Interview avec B.C. Gregory, Varennes, 24 février 1989.

73 J. Martineau, «Le Centre de l'Énergie (CREN)», *op. cit.*, p. 46.

74 G. Lemaine, R. Macleod, M. Mulkay et P. Weingart, «Introduction», in G. Lemaine, R. Macleod, M. Mulkay et P. Weingart, (eds.), *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, Paris, Mouton – The Hague, 1976, p. 1-26.

75 Centre de l'Énergie (CREN), *Premier Rapport annuel*, p. 17-18.

76 W. Van Den Daele et P. Weingart, «Resistance and Receptivity of Science to External Direction: the Emergence of New Disciplines under the Impact of Science Policy», in G. Lemaine, R. Macleod, M. Mulkay et P. Weingart, (eds.), *Perspectives on the Emergence of Scientific Disciplines*, Paris, Mouton – The Hague, 1976, p. 247-276.