

Ser
Q1
C212s1
no.4

ANALYZED

SECRETARIAT DES SCIENCES



La proposition d'un générateur de flux neutroniques intenses

Évaluation scientifique et économique

Étude préparatoire exécutée

par

un Comité du Conseil des Sciences du Canada

LA PROPOSITION D'UN GÉNÉRATEUR DE FLUX
NEUTRONIQUES INTENSES

ÉVALUATION SCIENTIFIQUE ET ÉCONOMIQUE

ANALYZED

**La proposition
d'un générateur de flux
neutroniques intenses**

**Évaluation scientifique
et économique**

Étude préparatoire exécutée
par
un Comité du Conseil des sciences du Canada

**Étude spéciale n° 4
décembre 1967**

ANALYZED

Ce document contient des informations destinées à être étudiées par le Conseil des sciences du Canada. À ce titre, il ne doit pas être considéré comme reflétant les vues officielles du Secrétariat des sciences, du Conseil des sciences du Canada, ou du Gouvernement du Canada.

SECRÉTARIAT DES SCIENCES
BUREAU DU CONSEIL PRIVÉ
OTTAWA

© Droits de la Couronne réservés

En vente chez l'Imprimeur de la Reine à Ottawa,
et dans les librairies du Gouvernement fédéral
dont voici les adresses:

HALIFAX
1735, rue Barrington

MONTRÉAL
Édifice Æterna-Vie, 1182 ouest, rue Ste-Catherine

OTTAWA
Édifice Daly, angle Mackenzie et Rideau

TORONTO
221, rue Yonge

WINNIPEG
Édifice Mall Center, 499, avenue Portage

VANCOUVER
657, rue Granville

ou chez votre libraire.

Prix: \$2.00 N° de catalogue SS21-1/4F

Prix sujet à changement sans avis préalable

ROGER DUHAMEL, M.S.R.C.
Imprimeur de la Reine et Contrôleur de la Papeterie
Ottawa, Canada
1968

AVANT-PROPOS

La proposition de construire un Générateur de Flux Neutroniques Intenses, présentée par l'Énergie Atomique du Canada Limitée, a soulevé dans le public un intérêt considérable. Le Premier Ministre a, en conséquence, autorisé la publication du rapport présenté par le Conseil des sciences du Canada au Ministre de l'Énergie, des Mines et des Ressources, ainsi que des études préliminaires exécutées, en vue de la préparation de ce rapport, par le Comité du Conseil des sciences chargé de donner un avis sur le Générateur de Flux Neutroniques Intenses.

Le rapport du Conseil des sciences a déjà été publié*. Préparé par le Comité avec l'assistance des agents du Secrétariat des sciences, le présent rapport a fourni les éléments sur lesquels le Conseil des sciences a basé ses conclusions et recommandations. A la demande du Conseil des sciences, il est publié sous forme d'Étude Spéciale du Secrétariat des sciences.

J.R. Weir,
Directeur,
Secrétariat des sciences.

*Rapport No. 2 du Conseil des sciences du Canada, Proposition pour un Générateur de Flux Neutroniques Intenses, Évaluation et Recommandations.

Les membres du Comité étaient:

- *M. J.D. Houlding (Président),
Président, RCA Victor Company Limited, Montréal,
- *M. O.M. Solandt (Membre de droit),
Président, Conseil des sciences du Canada,
- *M. W.M. Armstrong,
Doyen, Faculté des Sciences appliquées,
Université de la Colombie-Britannique,
- M. J.L. Couillard,
Conseil économique du Canada,
- *M. Leon Katz,
Directeur, Laboratoire de l'accélérateur,
Université de la Saskatchewan,
- *M. F.C. MacIntosh,
Professeur de Physiologie (Chaire Drake),
Université McGill, Montréal,
- M. H.G. Thode,
Président, Université McMaster,
- *M. D. Wermenlinger,
Cartier, Côté, Piette, Boulva, Wermenlinger et Associés
(Ingénieurs-conseils).

Messieurs R.W. Jackson et D.W. Henderson qui font partie du personnel du Secrétariat des sciences ont participé activement aux travaux du Comité.

*Membres du Conseil des sciences.

PRÉFACE

Par une lettre du 22 septembre 1966, le Ministre de l'Énergie, des Mines et des Ressources (alors Mines Relevés Techniques) a prié le Conseil des sciences du Canada d'examiner la proposition présentée par l'Énergie Atomique du Canada Limitée en vue de la construction d'un Générateur de Flux Neutroniques Intenses devant constituer une institution de base permettant des recherches de grande envergure dans le cadre du programme de l'énergie atomique. Le Ministre invitait le Conseil à lui soumettre une opinion sur la valeur de la proposition.

Le Conseil fut saisi de cette demande lors de sa séance du 4 octobre 1966. Un Comité compétent fut formé. Il fut invité à étudier la proposition d'une manière détaillée et à présenter un rapport dans un délai approximatif de six mois.

Parmi les cinq réunions du Comité, une fut tenue à Chalk River en collaboration avec les agents des Laboratoires Nucléaires de Chalk River. Le personnel scientifique de l'ÉACL avait préparé une documentation complète qui, jointe aux données fournies par ÉACL en réponse à des questions posées sur certains sujets particuliers, fut d'une grande assistance au Comité. Les services du Dr. R.E. Taylor, du Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, Californie, et du Dr. J.P. Blewett, du Brookhaven National Laboratory, Upton, N.Y., avaient été retenus au titre d'experts-conseils. Ils soumièrent des opinions indépendantes concernant les possibilités techniques de réalisation et le prix de revient estimatif du Générateur de Flux Neutroniques Intenses. Des hauts fonctionnaires du Ministère de l'Industrie fournirent des analyses relatives aux incidences du projet sur l'industrie canadienne à la fois dans l'immédiat et à long terme. Le Secrétariat des sciences fut de plus en mesure d'émettre des prévisions concernant les tendances possibles du soutien financier devant être apporté dans l'avenir aux recherches par le Gouvernement Fédéral. Tous les renseignements énumérés ci-dessus présentaient une importance vitale pour les travaux du Comité.

Le Comité présenta ses conclusions et recommandations au Conseil des sciences sous forme condensée lors de la séance du 17 mars 1967. Après discussion approfondie et introduction de quelques modifications mineures, le Conseil des sciences endossa les conclusions

et recommandations du Comité et les incorpora dans le rapport soumis au Ministre par le Conseil des sciences. Le Ministre ayant désiré recevoir à bref délai communication des conclusions, le rapport lui fut transmis le 31 mars. Le rapport complet du Comité devait lui être remis ultérieurement à titre de documentation justificative.

Les conseillers techniques retenus par le Comité étaient:

Dr. John Paul Blewett, Brookhaven National Laboratory

Né à Toronto, Ontario. B.S. (1932) et M.A. (1933) de l'Université de Toronto; Procter Fellow à l'Université de Princeton (1935); Ph. D. en physique (1936) de l'Université de Princeton. Fellow de la Société Royale du Canada à l'Université de Cambridge (1936-37); Physicien de recherche, General Electric Company (1937-46); agent scientifique (1947-53), agent scientifique senior (1953-60) et Vice-Président, Département de l'Accélérateur (1960-) au Brookhaven National Laboratory. Membre de la Physical Society, Membre de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers, Membre de la New York Academy of Sciences. Le Dr. Blewett a publié un grand nombre de communications sur l'analyse des cristaux aux rayons X, le spectrographie de masse, la physique nucléaire, les cathodes à revêtement d'oxydes, les micro-ondes, et la construction d'accélérateurs à haute énergie pour électrons et protons. Il est le co-auteur (avec M.S. Livingston) du livre "Particle Accelerators" (McGraw-Hill, 1962).

Dr. Richard E. Taylor, Stanford Linear Accelerator Center

Né à Medicine Hat, Alberta. B.Sc. (1950) et M.Sc. (1952) de l'Université d'Alberta; Ph. D. en Physique (1962) de Stanford University; Boursier Louis de Broglie (1958-61) à l'École Normale Supérieure, Paris. Physicien, Lawrence Radiation Laboratory (1961-62); chef de groupe, Stanford Linear Accelerator Center (1962-). Le Dr. Taylor a publié un grand nombre de communications sur la physique des électrons et des photons et sur la conception et la construction des installations expérimentales au Stanford Linear Accelerator Center.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	v
PRÉFACE	vii
RÉSUMÉ DE L'APPRÉCIATION DU COMITÉ SUR LA PROPOSITION	xi
PREMIÈRE PARTIE -- LA PROPOSITION ET SA JUSTIFICATION	
1.1 HISTOIRE DE LA PROPOSITION DE L'ÉACL ET DU COMITÉ DU CONSEIL DES SCIENCES	3
1.2 EXAMEN DE LA SITUATION ACTUELLE DU CANADA DANS LES DOMAINES DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRES	5
1.3 LA PROPOSITION ING	22
DEUXIEME PARTIE -- ÉVALUATION	
2.1 IMPORTANCE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE L'ING	39
(a) Importance pour l'ÉACL	39
(b) Importance pour la communauté scientifique	42
(c) Importance pour les universités	54
(d) Importance pour l'industrie	59
(e) Importance pour le pays et le public	72
2.2 POSSIBILITÉS DE RÉALISATION TECHNIQUE	74
(a) Les divergences accidentelles du faisceau	74
(b) L'accélérateur	75
(c) Le générateur à haute-fréquence	79
(d) La source d'ions et l'injecteur	81
(e) La cible	83
(f) Autres modèles d'accélérateurs de protons	84
(g) Conclusions sur les possibilités de réalisation	85
2.3 CONSIDÉRATIONS SUR LE PERSONNEL	87
(a) Besoins en Personnel	87
(b) Rôle joué par la formation d'un personnel scientifique et technique qualifié	97
2.4 ESTIMATION DES DÉPENSES	99
(a) Frais de développement technique, de génie et de planification	99
(b) Frais de construction	101
(c) Frais d'exploitation et d'entretien	104

	Page
(c) Frais d'exploitation pour la recherche	106
(e) Revenus	107
(f) Résumé des estimations de dépenses	107
(g) Frais supplémentaires à envisager	109
2.5 QUESTIONS CONCERNANT LES IMPLICATIONS FINANCIÈRES	109
(a) Prévisions des Dépenses Nationales en R&D	109
(b) Dépenses concernant l'ING en relation avec le programme de l'ÉACL	124
(c) Dépenses en relation avec les objectifs de la société ...	125
2.6 ORGANISATION	127
(a) Relations avec l'ÉACL	127
(b) Relations avec les universités	129
(c) Relations avec les groupes de l'ÉACL s'occupant d'applications industrielles, et avec l'industrie	130
2.7 EMLACEMENT	132
(a) Raisons en faveur de l'emplacement de Chalk River	132
(b) Raisons en faveur d'un autre emplacement	135
2.8 PROPOSITIONS AUTRES QU'UN GÉNÉRATEUR DE FLUX NEUTRONIQUES INTENSES	140
APPENDICES	151
APPENDICE I "L'Étude de la machine ING" par G.A. Bartholomew et P.R. Tunnicliffe, article reproduit de Physique au Canada, 22:5 Hiver 1966	155
APPENDICE II Rapports des Experts-Conseils	165
APPENDICE III Rapport du Ministère de l'industrie	183
SOMMAIRE	185

RÉSUMÉ DE L'APPRÉCIATION DU COMITÉ SUR LA PROPOSITION

Le Comité a trouvé la proposition, autant qu'il peut en juger, bien conçue et bien imaginée. Les avantages éventuels du projet se répartiront sur une grande variété de domaines de la science et de la technologie. L'un de ses attraits, c'est qu'il réunirait dans une entreprise commune des scientifiques et des ingénieurs du gouvernement, des universités et des industries.

Le coût du projet serait considérable et, au stade actuel, il n'est pas encore complètement fixé, bien que les estimations semblent bien fondées dans l'état actuel de nos connaissances. Quelques réactions initiales, selon lesquelles les exigences d'argent et de main-d'oeuvre seraient exorbitantes pour l'économie canadienne, n'ont pas été confirmées par l'analyse. Il a bien fallu se rendre compte que le générateur ING ne serait pas en marche avant sept ou huit ans et que l'installation tout entière ne fonctionnerait qu'aux environs de 1980. Par ailleurs, les extrapolations de la main-d'oeuvre technique disponible et des dépenses probables de l'État pour la recherche et le développement, sur cette période de temps, ne montrent pas que les demandes soient excessives. Le coût, cependant, est assez élevé pour qu'une augmentation considérable des dépenses, comme il pourrait s'en produire à la suite de graves problèmes imprévus, puisse causer quelque inquiétude et entraîner une allocation excessive de ressources aux secteurs qui sont appelés à bénéficier du projet.

Il a été difficile d'évaluer la portée économique et industrielle de ce projet. Les principales conséquences à brève échéance pour l'industrie, au cours de la période de développement et de construction, semblent être un accroissement des capacités techniques de l'industrie canadienne dans un assez grand nombre de domaines comme l'électronique, l'électricité, la chimie industrielle et la métallurgie. A l'heure actuelle, il est impossible de prédire les débouchés commerciaux qui pourraient résulter à plus longue échéance des recherches et des développements effectués à l'aide de cette machine, mais on peut prévoir avec confiance qu'il y en aura puisque le projet se rattache de très près à des intérêts industriels et technologiques. On peut s'attendre que ces débouchés se présenteront surtout dans les domaines apparentés à la technologie avancée de l'énergie (par exemple, la production d'électricité, les supraconducteurs, les réacteurs

nucléaires, les réacteurs "surrégénérateurs", la fusion thermonucléaire) ainsi qu'aux radioisotopes et à leurs applications. L'importance croissante de ces secteurs pour l'économie canadienne, comme en témoignent les revenus annuels de la production électrique, les investissements dans les usines et les marchés possibles, justifie probablement des dépenses au domaine de la recherche et du développement qui pourraient atteindre les niveaux proposés pour le programme de l'ÉACL et pour le projet ING. Cela suppose que, dans la mesure où le projet servira aux recherches fondamentales dans les universités, une partie de son coût sera portée au compte des subventions de l'État à l'enseignement supérieur plutôt qu'entièrement à celui du programme de l'ÉACL lui-même.

La principale préoccupation est celle de savoir si le projet est réalisable, notamment dans les limites de coût prévues. A l'heure actuelle, les experts sont optimistes mais il faudra de nouveaux essais et des expériences plus poussées, surtout au domaine de l'alimentation HF, de la durée de vie de la source d'ions, de la sûreté de fonctionnement et du contrôle du système ainsi que du type de cible à métal liquide, pour faire disparaître les doutes quant à la possibilité de réaliser le projet. Ces études devraient être assez avancées pour permettre des estimations précises avant qu'on puisse songer à entreprendre la construction proprement dite. Il faudra, croit-on, environ deux ans pour en arriver là.

Pour qu'on puisse retirer le plus d'avantages possibles de la collaboration des universités et des débouchés industriels, il faudra remanier l'organisation à certains égards et, probablement, trouver un emplacement plus facile d'accès que Chalk River. Pour sauvegarder les intérêts des universités et des industries, on recommande de modifier immédiatement l'organigramme du projet et, plus précisément, de créer un conseil supérieur de gestion qui comprendrait des représentants des universités et de l'industrie. D'autres problèmes, comme celui de l'emplacement, pourraient alors être étudiés en détail durant la période d'essais préliminaires.

Lorsque les études sur la possibilité de réalisation seront près d'être terminées, on recommande de faire une revue complète de la question. Si le projet semble encore réalisable dans les limites du coût prévu et que les objectifs proposés ne s'écartent pas sensiblement des estimations du comité, nous recommandons que le projet soit alors approuvé pour qu'on procède à la construction.

Première Partie

LA PROPOSITION ET SA JUSTIFICATION

PREMIÈRE PARTIE

LA PROPOSITION ET SA JUSTIFICATION

1.1 HISTOIRE DE LA PROPOSITION DE L'ÉACL ET DU COMITÉ DU CONSEIL DES SCIENCES

À l'automne de 1963 eut lieu aux Laboratoires Nucléaires de Chalk River (CRNL) une série de réunions non officielles auxquelles participèrent des membres du personnel. Elles avaient pour objet l'étude des nouveaux domaines de recherche que l'ÉACL pourrait raisonnablement explorer. Il ne s'agissait pas d'imaginer de simples extensions des programmes alors en cours d'exécution concernant les réacteurs ou autres programmes de recherche. L'opinion généralement admise fut que le total des travaux de recherches susceptibles d'être exécutées sur le réacteur CANDU, ou des améliorations dont pourrait bénéficier le réacteur, serait probablement épuisé dans un délai de 10 ou 15 ans. Aussi parût-il raisonnable d'entreprendre l'exécution d'un nouveau programme d'importance majeure, comportant la recherche de données fondamentales nouvelles. Ainsi pourrait-on procurer à l'ÉACL pendant une longue durée la possibilité d'effectuer des travaux fructueux dans le domaine de la science nucléaire.

On forma sept sous-comités. Chacun avait pour mission de préparer un rapport de travail sur un sujet susceptible de présenter un intérêt majeur. On trouvera ci-dessous la liste des sujets étudiés et les noms des présidents de chaque sous-comité.

- (1) Fusion – E.W. Vogt
- (2) Réacteurs rapides – E. Critoph
- (3) Générateur de flux neutroniques intenses – G.A. Bartholomew
- (4) Transmission d'énergie à grande distance – W.A. Wolfe
- (5) Piles à combustible – R.H. Betts
- (6) Magnétohydrodynamique – G.E. Lee-Whiting
- (7) Phénomènes thermoioniques et thermoélectriques –
J.A.L. Robertson

Parmi les précédents sujets (dont on trouvera une étude au chapitre 2.8 du présent rapport), les dirigeants scientifiques choisirent le

générateur de flux neutroniques intenses comme ouvrant les horizons les plus prometteurs. Ils estimèrent qu'au prix d'un effort n'excédant pas les possibilités du Canada l'ÉACL pourrait occuper dans le monde la première place dans le domaine couvrant l'étude et la réalisation de flux intenses de neutrons produits par spallation.

Sous la direction du Dr. W.B. Lewis, Vice-Président senior de l'ÉACL, certains scientifiques de cet organisme entreprirent une étude détaillée d'une telle installation. Ce travail aboutit aux plans actuels provisoires de la machine ING. On peut trouver dans la publication EACL-2600¹, parue en juillet 1966, de nombreux détails techniques concernant cette machine. La publication précitée décrit l'accélérateur prévu, en se rapportant au Cyclotron à orbites séparées (SOC) et, avec moins de détails, aux modèles d'Accélérateurs linéaires (LINAC) préférés actuellement. Elle contient de nombreuses informations concernant tous les points susceptibles d'être discutés au sujet de la machine ING.

Pendant que les grandes lignes de la machine ING se dessinaient peu à peu, le CRNL invita certains professeurs des universités canadiennes intéressés à la question à former un comité consultatif pour l'étude de l'ING. Le rôle de ce comité devait consister à assurer la liaison entre les spécialistes travaillant sur le projet ING d'une part, et, d'autre part, les départements ou facultés des universités susceptibles de s'intéresser au projet. Il devait également faire bénéficier le CRNL de ses suggestions dans divers domaines ou les membres du comité se qualifiaient comme experts. Le comité se réunit sept fois entre novembre 1965 et février 1967. Les échanges d'informations entre les agents du CRNL et le comité furent très utiles aux deux parties.

Le 25 août 1966, le Dr. Lewis et ses collaborateurs présentèrent la proposition ING au Comité du Conseil Privé et à d'autres représentants du Gouvernement. Ce fut la première présentation officielle à un organisme gouvernemental des éléments qui constituent essentiellement la proposition actuelle.

En mai 1966, le Parlement avait passé l'Acte du Conseil des sciences du Canada. Ce Conseil fut formé peu après. En septembre 1966, M. J.L. Pépin, Ministre des Mines et Relevés Techniques (aujourd'hui Énergie, Mines et Ressources) dont les attributions comprennent l'ÉACL, invita le Conseil des sciences à examiner la proposition ING et à lui présenter des recommandations en vue de l'adoption

¹ "L'Étude ÉACL sur un Générateur de Flux Neutroniques Intenses - Détails Techniques" Publication EACL No. 2600 - Juillet 1966.

ou du rejet de la proposition par le Gouvernement. Le Conseil des sciences accepta d'entreprendre cette tâche et, lors de la séance des 3 et 4 octobre 1966, le Comité ING du Conseil des sciences fut formé.

Assisté par le Secrétariat des sciences, le Comité tint un grand nombre de séances et se rendit à Chalk River pour discuter le projet avec le Dr. Lewis et ses collaborateurs. En vue d'obtenir sur ING une gamme d'opinions variées, le Comité engagea comme conseillers des scientifiques étrangers et sollicita des opinions et suggestions de la part des membres de la communauté scientifique intéressés par la proposition. D'une manière générale il s'efforça de réunir un ensemble de rapports sur l'importance scientifique et technologique de la machine ING pour le Canada, pour l'ÉACL, les universités, la communauté scientifique et l'industrie. Le Comité examina en même temps avec une extrême attention les implications financières de la machine et les exigences en personnel que sa mise en service entraînerait.

Le présent rapport est le résultat de plusieurs mois d'études sur la proposition ING exécutées par le Comité du Conseil des sciences. Il exprime les opinions et les conclusions auxquelles est parvenu le Comité à la suite de ses délibérations.

1.2 EXAMEN DE LA SITUATION ACTUELLE DU CANADA DANS LES DOMAINES DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRES

Le fait que le Canada représente une puissance dans la science et la technologie nucléaires est à lui seul remarquable. À la fin de la seconde guerre mondiale, un grand nombre d'établissements industriels construits en vue de l'effort de guerre furent démobilisés. Beaucoup estimaient alors que ces établissements dirigerait leurs activités vers des domaines similaires à ceux du temps de paix d'avant-guerre. Comme il eut été normal pour un petit pays dont la population ne comprenait que 12 millions d'habitants, le Canada aurait pu décider de fermer les laboratoires embryonnaires de Chalk River et se contenter de continuer à jouer le rôle d'un fournisseur de matériaux bruts – les minerais d'uranium – en vue de satisfaire les besoins du programme des É.U. dans le domaine de l'énergie atomique.

Le Canada s'était mérité le rang d'associé avec les É.U. et le Royaume-Uni dans le travail urgent de recherche ayant abouti à la

bombe atomique. Il décida de se maintenir dans cette position, termina en 1947 la construction du réacteur NRX, et entreprit un programme de recherches qui, pour le Canada, était d'une envergure, d'une complexité et d'un coût sans précédents. Personne ne savait au juste où cette décision allait conduire le pays. Certains estimaient que l'ère de l'énergie atomique n'était pas éloignée; d'autres croyaient à la probabilité d'utilisations plus importantes des isotopes radioactifs. Tous reconnaissaient d'ailleurs que la libération de l'énergie contenue dans le noyau atomique constituait un pas en avant d'une portée majeure. Le Canada avait donc la chance d'être présent au début d'un progrès scientifique qui s'avérait peut-être le plus important du siècle. Il convenait de ne pas négliger une occasion semblable.

Les circonstances exigeaient des É.U. une concentration maximale de leurs efforts en vue de la mise au point d'armes atomiques. Cette situation conduisit à un accord² aux termes duquel le Canada devait se spécialiser dans des recherches complémentaires concernant les réacteurs atomiques. L'eau lourde devait être utilisée comme modérateur de l'énergie des neutrons tandis que les É.U. concentraient leurs efforts sur des dispositifs utilisant comme modérateurs le graphite ou l'eau (légère) ordinaire. Il semble que ce choix ait été heureux pour le Canada. Dans le petit nombre de matériaux utilisables pour "modérer" ou ralentir les neutrons provenant de la fission des atomes d'uranium en vue d'augmenter la probabilité de capture des neutrons par d'autres atomes d'uranium, l'eau lourde est en effet l'élément le plus "économique en neutrons". En d'autres termes, elle procure le ralentissement avec une perte minimale de neutrons conduisant à ses propres transmutations. Cette situation a provoqué la mise au point d'une série de réacteurs possédant un rendement exceptionnel eu égard au combustible consommé et capables de fonctionner avec de l'uranium naturel non enrichi. Le président de l'ÉACL³ s'est exprimé dans les termes suivants:

"Nous pensons avoir de bonnes raisons pour nous limiter au champ d'action assez étroit constitué par les dispositifs modérés à l'eau lourde, refroidis à l'eau et capables de brûler effectivement de l'uranium naturel avec un bon rendement. Des scientifiques et des ingénieurs ont consacré beaucoup d'efforts en vue d'obtenir l'utilisation maximale des neutrons engendrés par ces dispositifs; le résultat

² Les détails de cette histoire des débuts de l'ère atomique peuvent être trouvés dans "Canada's Nuclear Story" par W. Eggleston, publié par Clarke, Irwin and Company Ltd., Toronto, 1965.

³ J.L. Gray "The Future of Nuclear Power in Canada", adresse au Forum Atomique Industriel du Japon, Tokyo, 19 septembre 1965. Publication EACL No. 2293.

de cette politique est qu'aujourd'hui les générateurs canadiens conçus et construits en vue de buts commerciaux constituent les "convertisseurs avancés" les meilleurs du monde. Les réacteurs de ce type, procurant une économie de neutrons, présentent des cycles de combustion d'une extrême flexibilité. Ils peuvent se prêter à des améliorations en tant que convertisseurs d'uranium; ils offrent en outre d'excellentes perspectives de succès pour l'utilisation des réacteurs comme quasi-surrégénérateurs dans le cycle du thorium".

Le monde se trouvant aujourd'hui au seuil de l'emploi généralisé de réacteurs atomiques comme source économique d'énergie électrique⁴, le Canada se trouve en forte position dans les domaines de la science, du génie et de l'industrie pour établir des plans de réacteurs capables de lutter contre la concurrence commerciale⁵. On ne saurait d'ailleurs considérer que le fait de soutenir la lutte avec les usines consommant de l'énergie hydraulique ou brûlant des combustibles fossiles constitue le point final du progrès. Dans le monde entier, on met actuellement au point des systèmes à rendement constamment accru et la concurrence est serrée. L'ÉACL considère le CANDU-BLW (réacteur à eau lourde refroidi à l'eau légère bouillante) en cours d'étude actuellement pour l'Hydro-Québec à Gentilly comme le premier stade faisant suite à celui des types très satisfaisants CANDU (refroidissement à l'eau lourde) installés à Douglas Point, Ontario, et en construction à Pickering, Ontario, de même qu'en Inde et au Pakistan.

On s'attend à ce que le prochain progrès important dans le domaine considéré soit un réacteur "surrégénérateur". Cette question est l'objet d'un travail particulièrement intense aux É.U., au Royaume-Uni, en Russie et en France. Le principe du "surrégénérateur" consiste à utiliser des réactions mettant en jeu des neutrons rapides ou non ralentis en vue de convertir une forte proportion de l'isotope

⁴ Le Royaume Uni, incité dès les débuts, par la crise de Suez, à s'intéresser aux usines génératrices nucléaires, possède actuellement en usines de ce type une plus grande puissance installée que le reste du monde dans son entier, mais est rapidement dépassé. Aux É.U., 60% de toutes les installations génératrices commandées en 1966 jusqu'en octobre 1966, consistaient en usines nucléaires (Time Magazine, 14 octobre 1966, p. 88) et la France "cessera pratiquement dès 1973 de construire des usines alimentées au charbon; elle utilisera à cette date presque uniquement l'énergie nucléaire" (J.O. Holt, 1966, voir référence 7).

⁵ Les trois principaux types entrant en concurrence et dont les coûts ont été comparés par le Dr. G.T. Seaborg, Président de la U.S. Atomic Energy Commission dans une adresse destinée à la British Nuclear Energy Society, Londres, 24 octobre 1966 ("Nuclear Power, Two Years after Geneva") étaient le Réacteur à Eau Légère (principalement mis au point aux E.U.), CANDU (Canada), et le Advanced Gas Reactor (Royaume-Uni). Chaque type présente des avantages qui dépendent des circonstances, telles que les investissements initiaux de capital, l'inventaire du combustible disponible, le coût de l'uranium, etc.

Uranium 238 qui se trouve en abondance dans l'uranium naturel en isotopes fissiles de plutonium. En même temps qu'en vue de produire une réaction en chaîne il brûle une petite fraction de l'isotope fissile d'Uranium 235 contenu dans le combustible original, le surrégénérateur engendre plus de matériaux fissiles qu'il n'en consomme. Les quantités d'uranium brut servant de combustible sont ainsi grandement réduites, ce qui pour l'avenir simplifie le problème d'approvisionnement en uranium. Certains problèmes techniques difficiles restent cependant encore sans solution. Ils sont essentiellement liés aux températures élevées et aux dommages matériels engendrés par les flux intenses de neutrons énergétiques. Les caractéristiques économiques du système ne pourront être connues avant que ces problèmes ne soient résolus sur des prototypes satisfaisants. Ce sont ces caractéristiques qui permettront de juger si les "surrégénérateurs" constitueront le "meilleur achat" pour la décennie de 1980 sinon pour de nombreuses décennies.

L'ÉACL a jusqu'à maintenant préféré ne pas entrer en concurrence directe avec les organismes qui étudient des "surrégénérateurs". Cela tient à ce que le rendement en neutrons qui caractérise les modèles à eau lourde les place déjà dans la catégorie des "convertisseurs avancés" ou des "quasi-surrégénérateurs", de sorte que leurs frais d'exploitation dépendent beaucoup moins du prix de l'uranium que dans le cas des autres types. Comme l'expose une analyse extraite des publications de l'OECD⁶:

"Leur aptitude à utiliser des cycles donnant directement une production élevée de plutonium les classe comme de bons partenaires pour un programme de réacteurs rapides".

Il est naturellement essentiel que l'ÉACL reste en contact étroit avec les progrès des autres pays de manière à pouvoir modifier son programme si les circonstances l'exigent.

La situation actuelle dans le monde subissant des changements rapides, il est difficile de prédire l'avenir de l'énergie atomique et la

⁶ "Power Reactor Characteristics", European Nuclear Energy Agency, OECD, Paris, septembre 1966. Même si les surrégénérateurs se révèlent un jour économiques, les divers types de convertisseurs seront toujours nécessaires pour leur fournir les charges initiales de combustible. Etant donnée l'augmentation constante de la demande mondiale en énergie électrique, les deux types pourront rester indéfiniment complémentaires l'un de l'autre. Le rapport entre les besoins respectifs de l'un et l'autre type dépendra du rendement du surrégénérateur ou de la "duplication de temps" réalisée par les types surrégénérateurs. Le Dr. W.B. Lewis a soutenu que l'uranium est disponible en quantités suffisantes, de sorte que les surrégénérateurs ne seront en fait pas justifiés économiquement pendant encore quelques siècles; la fusion thermonucléaire sera sans doute entre temps devenue une réalité.

politique que le Canada suivra ou devrait suivre. Dix ans à peine se sont écoulés depuis la mise en service de la première usine génératrice d'électricité utilisant l'énergie nucléaire (Calder Hall, Royaume-Uni). C'est d'autre part seulement au cours des deux dernières années que l'étude des caractéristiques économiques de l'énergie nucléaire a abouti dans le monde à des progrès substantiels⁷. La figure 1 reproduite d'après le rapport de 1966 de la Commission de l'Énergie Atomiques des É.U.⁸ (p. 32) met en évidence la nature transitoire de la période actuelle aux É.U. Ce fait permet de considérer comme probables les mêmes taux de croissance dans le monde: peut-être ces taux seront-ils atteints plus lentement ou seront-ils eux-mêmes abaissés, suivant la vitesse à laquelle d'autres pays atteindront le stade où leurs réseaux électriques pourront utiliser des usines nucléaires assez importantes pour être économiquement viables. Le même rapport⁸ (p. 273) présente une estimation du mode de croissance de la capacité de production d'énergie nucléaire dans le reste du monde libre.

Capacité cumulée la plus probable de Production d'Énergie Nucléaire en Service (en milliers de megawatts)⁸

Année finissant	Monde libre étranger*
1970	14
1975	51
1980	130
1985	280

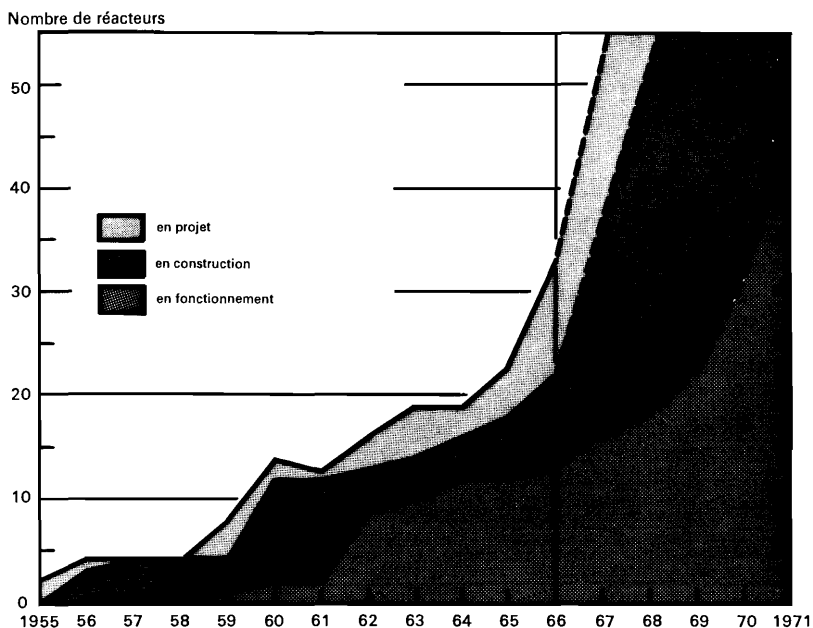
* hors des É.U.

Les prédictions concernant le futur de l'énergie atomique sur des durées encore plus longues ne peuvent qu'être encore moins précises. On peut cependant raisonnablement prédire qu'une concurrence aigue continuera à régner; on s'efforcera d'augmenter l'économie d'exploitation, la commodité et la sécurité. Pour améliorer les conditions économiques, on fera un plus grand usage des chaleurs perdues, qui serviront à chauffer des bâtiments, de la pulpe de bois, des viviers à poissons, à fondre de la glace, à dessaler l'eau de mer, etc. Dans le domaine de la commodité, on généralisera l'emploi des systèmes automatiques de commande et de contrôle. Le Dr. W.B. Lewis de l'ÉACL

⁷ J.O. Holt "L'énergie nucléaire est compétitive" *Engineering Journal*, 49, pp 25-30, octobre 1966.

⁸ "Major Activities in the Atomic Energy Program", janvier-décembre 1966, United States Atomic Energy Commission, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

suggère la possibilité de modifier ou de régler les caractéristiques des réacteurs en leur fournissant de faibles quantités de neutrons additionnels engendrés par des dispositifs électriques. En Angleterre, trois ingénieurs suggèrent qu'un rendement meilleur pourrait être obtenu en éliminant le stade du générateur rotatif à turbine à vapeur, et en créant de l'énergie électrique directement par processus magnétohydrodynamique dans des gaz chauds⁹.



Tendances de l'octroi des permis. A la fin de 1966, 12 centrales électronucléaires étaient autorisées à fonctionner, 10 en étaient à divers stades de construction, 16 grands projets avaient fait l'objet de demandes de permis de construction et on avait tout lieu de croire que le nombre des demandes de ce type serait tout aussi élevé en 1967. En plus des données relatives aux années écoulées de 1955 à 1966, les courbes du graphique ci-dessus indiquent les prévisions pour les demandes de permis de construction en 1967 et pour le nombre total de réacteurs de puissance qui seront opérationnels en 1971 si toutes les demandes de permis de construction sont approuvées. Une fois approuvés les réacteurs font l'objet, durant toute leur existence, d'un contrôle de la Commission de l'énergie atomique des USA (USAEC).

Figure 1 TENDANCES DE L'OCTROI DES PERMIS POUR LES CENTRALES ÉLECTRONUCLÉAIRES AUX ÉTATS-UNIS DE 1955-1971.

Extrait de "Major Activities in the Atomic Energy Programs", Jan.-Déc. 1966 (USAEC) Government Printing Office, Washington, D.C. P. 32.

⁹ "MHD in a Nuclear Gas-Turbine Cycle", *Engineering*, 10 Février 1967, pp. 209-211.

Aux É.U., en URSS, au Royaume-Uni et en d'autres pays on poursuit des recherches ayant pour objet l'obtention d'énergie électrique à partir de la fusion thermonucléaire. On espère que, dès la solution découverte, le programme de l'approvisionnement en combustible ne se présentera plus et que de même les difficultés concernant les déchets radioactifs diminueront grandement en acuité. Ces possibilités futures présentent toutes un trait commun: elles semblent révéler l'existence d'une tendance à évoluer en sens opposé des conceptions de machines rotatives thermiques à chaudières; on viserait au contraire à une fusion plus étroite des techniques électriques et électromagnétiques avec les réactions thermiques et nucléaires elles-mêmes. Tout programme de recherche nettement orienté vers les systèmes futurs de production d'énergie électrique, doit évidemment prendre garde de se spécialiser à l'excès ou de construire sur des bases étroites.

La production d'énergie électrique ne constitue cependant pas le seul résultat important auquel peuvent conduire, dans les domaines de l'industrie et du commerce, les recherches concernant les noyaux atomiques. Les applications des isotopes radioactifs et les techniques d'instrumentation nucléaire ont acquis de l'importance dans presque toutes les autres sciences ou technologies; traceurs radioactifs en recherche biologique, processus chimiques, études sur la corrosion et l'usure, diagnostics médicaux, construction de pipelines, jauges d'épaisseur et de niveau, analyse chimique au moyen de méthodes d'activation; datation des découvertes archéologiques; traitements des aliments; radiographie industrielle; sources de chaleur et générateurs portatifs d'électricité alimentés par isotopes; prospection; irradiation en vue de la pasteurisation, de la stérilisation ou de la polymérisation; traitements médicaux et autres usages¹⁰.

Il y a plus de dix ans, le Commissaire Willard Libby de l'USAEC faisait la déclaration suivante¹¹:

“Les isotopes se sont déjà révélés comme très bénéfiques pour l'humanité; il est clair qu'ils nous dédommageront à eux seuls de tous les efforts et dépenses entrepris à ce jour en vue de la réalisation de notre gigantesque programme concernant l'énergie atomique. Même dans le cas où ni la production d'énergie atomique ni les autres applications pacifiques ne pourraient être réalisées, et même dans le cas où aucune utilisation pour fins militaires ne serait possible, nous pourrions encore estimer que les bénéfices provenant des isotopes

¹⁰ Les applications commerciales des isotopes sont exposées d'une manière assez détaillée dans "Major Activities in the Atomic Energy Programs, janvier-décembre 1966", U.S. Atomic Energy Commission, janvier 1967.

¹¹ W. Eggleston, "Canada's Nuclear Story", Clarke, Irwin & Co., 1965, p. 282.

constitueraient une rémunération suffisante des dollars investis par nous''.

L'USAEC jugerait possible, pour l'économie des É.U. dès 1962, une économie annuelle en dollars s'élevant à \$5 milliards. Ces bénéfices sont, il va de soi, répartis en de multiples postes, et par suite difficiles à traduire en dollars. L'Organisation Internationale de l'Énergie Atomique a cependant récemment tenté de fournir une estimation chiffrée¹². En appliquant des résultats figurant dans l'étude de l'OIEA au cas de l'économie industrielle canadienne, l'ÉACL a obtenu le résultat suivant: évalués en dollars, les bénéfices apportés en 1966 aux industries canadiennes atteignaient presque \$28 millions correspondant pour ces industries à un prix coûtant de \$2.2 millions¹³. Un tel chiffre ne prétend naturellement pas attribuer une valeur numérique aux connaissances nouvelles résultant des recherches fondamentales ni aux vies humaines sauvées ou prolongées par l'emploi médical des isotopes en vue de diagnostics ou d'irradiations thérapeutiques. R.F. Errington, des Produits Commerciaux de l'ÉACL, a récemment estimé que 100,000 années supplémentaires de vie de malades auront été acquises au Canada en 1966 du fait de l'emploi thérapeutique des radioisotopes¹⁴.

La Division des Produits Commerciaux de l'ÉACL a été créée en vue d'exploiter commercialement les isotopes radioactifs qui constituent un sous-produit des réacteurs de recherche de Chalk River. Au cours des dix dernières années, les ventes de la Division se sont régulièrement accrues de 21% par an en moyenne; leur montant actuel est d'environ \$8 millions par an, dont plus de 90% constituent des exportations. La majeure partie des ventes consiste en équipement de téléthérapie au cobalt-60. A ce jour, entre 2000 et 3000 appareils de téléthérapie au cobalt-60 sont en service dans le monde. Plus de 600 d'entre eux proviennent de l'ÉACL¹⁵. Si ce taux de croissance se maintient, le montant annuel des ventes de la Division pourrait atteindre \$100 millions dès 1980. La Division des Produits Commerciaux de l'ÉACL est également active dans d'autres domaines d'application des isotopes. Les taux actuels de croissance dans ces domaines sont¹⁶:

¹² OIEA "Industrial Radioisotope Economics", Technical Report Series No. 40.

¹³ ÉACL, Bulletin des Produits Commerciaux No. 48.

¹⁴ R. F. Errington, "Perspective on the Scale of Future Radioisotope Programs", Onzième Symposium EACL sur l'Énergie Atomique, Toronto, 13-14 octobre 1966, AECL 2486, pp. 118-120.

¹⁵ Canadian Nuclear Technology, janvier-février 1967, pp. 14-16.

¹⁶ Bulletin des Produits Commerciaux de l'ÉACL, No. 54.

Unités thérapeutiques au cobalt-60	(monde entier)	17% par an
Radioisotopes	(É.U.)	16% par an
Jauges à radioisotopes	(É.U.)	39% par an
Applications des traceurs	(monde entier)	33% par an
Analyse d'activation des neutrons	(monde entier)	52% par an

Il est peut-être superflu de remarquer qu'au point de vue de la politique de la science, les nouvelles industries actuellement en "état de croissance" laissent au moins espérer l'établissement de nouvelles industries secondaires canadiennes dont les maisons-mères seraient situées au Canada. Ce fait constituerait une orientation nouvelle, la structure actuelle des industries manufacturières au Canada contenant une proportion importante de succursales d'industries étrangères.

Certains domaines qui offrent de grandes possibilités de croissance n'ont subi qu'un minime début d'exploitation. C'est le cas, par exemple, pour les applications des radiations à la conservation des aliments. Ce domaine est actuellement l'objet d'essais intensifs en vue de déterminer la valeur du procédé¹⁷. C'est aussi le cas de la chimie des radiations, en d'autres termes la chimie des molécules excitées ou ionisées, les radiations nucléaires produisant l'excitation¹⁸.

Parmi les autres conséquences économiques du programme nucléaire canadien, on peut mentionner:

(a) La fondation d'une industrie de l'eau lourde. Des usines sont en construction en Nouvelle-Écosse et la première d'entre elles atteindra prochainement le stade de la production. Il y a environ un an, le Comité de planification économique de l'Association nucléaire canadienne a exécuté une étude détaillée de la demande et de l'offre mondiales en eau lourde¹⁹. On s'attend, pour la période de 1965 à 1970, à une demande moyenne de 600 tonnes par an. Cette demande devrait s'élever à 1250 tonnes par an pour la période 1970-75, à 4300 tonnes par an pour la période 1975-80 et à 6750 tonnes par an pour la période 1980-85. Au taux de \$20 la livre, ces chiffres signifient qu'il existerait après 1980 un marché mondial total supérieur à \$280 millions par an. La demande excèdera probablement l'offre au moins jusqu'en

¹⁷ A.B. Lillie, "Programs in Food and Industrial Irradiation". Onzième symposium ÉACL sur l'Énergie Atomique, Toronto, 13-14 octobre 1966, EACL 2486, pp. 94-105.

¹⁸ W.F. Libby, "Radiation-Born Chemistry", International Science and Technology, octobre 1966, pp. 34-43.

¹⁹ CNA Economic Planning Committee "Le rôle de l'Eau Lourde et la Demande sur ce produit au Canada et dans le Monde". Communication No. 66 - CNA-301, Canadian Nuclear Association Conference, Winnipeg, mai 1966.

1985. La proportion dans laquelle l'industrie canadienne profitera de cette situation dépendra des entreprises canadiennes elles-mêmes. Il faut naturellement inclure dans ces prévisions un certain risque dû au fait que d'autres pays pourraient décider, même pour des raisons étrangères aux considérations économiques, de prendre part à la concurrence commerciale.

(b) Le déve loppement d'une industrie des combustibles nucléaires. Après une période de sous-production et d'usines inactives, les producteurs d'uranium se trouvent subitement placés dans une situation de forte demande. Il est impératif pour eux d'entreprendre immédiatement des recherches de minerais; certaines ont d'ailleurs déjà débuté. Au cours des deux dernières années, les évaluations des besoins mondiaux ont subi de continuelles révisions dans le sens de la hausse. Un chiffre récemment avancé (W.M. Gilchrist, Eldorado) situe la demande mondiale en U_3O_8 à environ 85,000 tonnes par an dès 1980 ce qui suppose un marché supérieur à \$2.5 milliards. Possédant plus d'un tiers des réserves connues d'uranium dans le monde occidental, le Canada devrait couvrir une large part de ce marché. Une grande partie de cette industrie aurait d'ailleurs existé que le Canada ait eu, ou non, son propre programme de recherche nucléaire. Mais l'existence de la recherche nucléaire et du programme de mise au point de réacteurs a aidé l'industrie de l'uranium à s'orienter d'une manière sage, et à prévoir dès les premiers stades les demandes du marché; elle a ainsi exploité ses avantages et ses connaissances scientifiques en progressant davantage dans le domaine des procédés et fabrications secondaires, au lieu de rester plus ou moins à la merci de ses clients. Le chiffre mentionné ci-dessus concernant le marché ou la part probable du Canada dans ce marché ne tient compte d'aucune "valeur ajoutée" substantielle due à la fabrication d'éléments combustibles finis, pour lesquels une capacité considérable de production est en cours de création dans l'industrie canadienne. Il est inutile d'ajouter qu'un accroissement du chiffre total exporté, dû au traitements secondaires et aux fabrications réalisées au Canada, constitue un objectif souhaitable pour toutes les industries basées sur les ressources naturelles.

(c) L'émulation prenant naissance dans l'industrie secondaire canadienne et l'accroissement concomitant de qualité. Les difficiles problèmes de génie qui se sont posés à propos de la conception et de la construction de réacteurs ont contraint les industries canadiennes à étendre leurs possibilités sur un large front et à prendre pied dans de nouveaux domaines de production. Les demandes en pompes, canalisations, soupapes, contrôles, etc. d'une qualité et d'une sûreté

de fonctionnement accrue, ainsi que les demandes en constructions métalliques ou céramiques, ont engendré une amélioration des possibilités de l'industrie canadienne. Les domaines intéressés sont le génie, la construction, et la fourniture de pièces séparées pour de nombreuses industries mettant en oeuvre des processus fondamentaux pour lesquels une extrême sûreté de fonctionnement et la possibilité d'un contrôle sans défaillance deviennent de plus en plus vitales. Les pièces séparées et la capacité de mener à bien les travaux de génie constituent autant de produits qui peuvent être aussi bien exploités sur les marchés mondiaux que les réacteurs atomiques complets.

(d) La création de ressources en personnel compétent dans les domaines précités. Le Canada a pris de bonne heure son départ et a établi un programme de recherches fondamentales. Aussi un corps important de personnel scientifique dans les domaines de la physique nucléaire, de la radiochimie, et des disciplines connexes a-t-il été formé à la fois dans les Laboratoires nucléaires de Chalk River et et dans les universités canadiennes. Ce corps de scientifiques et d'ingénieurs de grande expérience, joint à l'existence de centres d'éducation et d'entraînement construits sur une période de 20 ans, présente maintenant les caractéristiques d'une ressource nationale. La physique nucléaire a été la première discipline stimulée à un degré élevé par le programme d'énergie atomique. Le programme de recherche de l'ÉACL a évolué; la mise au point de réacteurs a révélé des difficultés réelles dans le domaine du génie, et a souligné un manque de connaissances dans d'autres domaines. Par exemple, des disciplines telles que la physique de l'état solide, la métallurgie, la céramique, les systèmes de contrôle, ont été stimulées dans les universités et l'industrie, à la fois par les besoins de l'ÉACL et par le personnel expérimenté qui se dirige vers l'enseignement ou vers de nouveaux postes de responsabilité.

Un élément clef dans le succès du programme canadien a consisté dans la construction, audacieuse à un certain degré, d'installations de recherches fondamentales avancées pour leur époque, et offrant des possibilités introuvables ailleurs. C'est ainsi que le flux exceptionnellement élevé de neutrons des réacteurs de recherche NRX et NRU a attiré des scientifiques des É.U. et d'autres pays qui ont procédé à des expériences ayant conduit à des échanges d'informations de grande valeur. Les flux élevés et les commodités matérielles offertes ont également rendu possible la production d'isotopes aux activités particulièrement élevées, créant ainsi pour une grande part la base de succès des éléments irradiants de cobalt 60 vendus par les Produits Commerciaux de l'ÉACL. L'établissement des plans de

NRU a cependant commencé en 1949, il y a environ 18 ans, et cette installation est entrée en service en 1957. Les Laboratoires nucléaires de Chalk River se sont depuis lors affirmés comme des pionniers dans certaines réalisations telles que les séries Tandem d'accélérateurs Van de Graaf et la mise au point de détecteurs aux silicones et au germanium pour radiations nucléaires. Le réacteur NRU a cependant constitué la dernière installation importante consacrée à la recherche et construite par l'ÉACL en quelque sorte "à l'échelle d'un laboratoire national". C'est la prise de conscience de ce fait qui en 1963 a conduit la Division des Recherches de l'ÉACL à examiner ce qui pourrait être un programme à longue portée. Il s'agissait de fixer des points précis sur lesquels concentrer les efforts, de justifier la prolongation d'existence de l'Établissement en tant que grand laboratoire organisé, et, en vue d'un programme de travaux couvrant une longue durée, d'assurer une continuité de direction permettant de préparer bien à l'avance des spécialistes de haut calibre.

Si l'on considère le domaine nucléaire dans sa généralité, on constate que sans aucun doute l'importance des applications auxquelles il conduit et les bénéfices élevés qui peuvent en découler n'ont pas été perdus à d'autres pays. Le Canada est certes toujours considéré comme une des cinq puissances nucléaires de tête; mais presque tous les autres pays bénéficiant d'un développement industriel suffisant ont, au cours des 20 dernières années, avec raison ou non, entrepris des programmes de recherches nucléaires. Certains de ces pays ont mis en commun leurs efforts. Tel est le cas pour le CERN à Genève consacré à la physique nucléaire fondamentale, ou l'ENEA consacré sous l'égide de l'OECD à la réalisation de l'énergie atomique*. Des pays dont les ingénieurs possèdent une tradition de produits de haute qualité dans le domaine des constructions lourdes tels que l'Allemagne, la Suède, la Suisse, considèrent qu'ils ne peuvent se permettre de ne pas participer à un genre d'affaires dont la croissance est rapide. Dans un effort héroïque visant à regagner le terrain perdu et à se reclasser parmi les grandes puissances, la France dépense pour la science nucléaire, l'énergie atomique et les armes atomiques presque 1% de son produit national brut. Le Japon s'est tracé un programme de recherches fondamentales dont l'importance croît rapidement. Ce programme vise à permettre à ce pays d'entreprendre des réalisations à partir de 1970 environ au fur et à mesure que croîtront ses besoins en énergie nucléaire. Le tableau 1 présente certains chiffres comparatifs concernant plusieurs pays.

* Également Euratom, de la Communauté Economique Européenne et OIÉA dépendant des N. U.

Les chiffres du tableau 1 ne doivent pas être interprétés sans réserve. Les applications des matériaux radioactifs se ramifient largement aujourd'hui dans les technologies chimiques, médicales, électroniques et autres. Aussi n'est-il plus possible d'obtenir des chiffres précis concernant les dépenses nationales totales figurant dans cette classification. Dans plusieurs pays, cependant, la majorité des recherches et des réalisations dans ce domaine est financée par le Gouvernement. Dans ce cas, un organisme unique, chargé de l'Énergie atomique, commande l'ensemble, de sorte que les budgets donnent au moins une idée des activités nationales.

Les comparaisons sont cependant loin d'être simples à cause de l'existence, dans plusieurs pays, d'applications militaires de grande envergure. Aux É.U., le budget correspondant est noyé dans le budget total de l'AEC tandis qu'au Royaume-Uni il n'est pas révélé. Lorsqu'on se propose d'établir des comparaisons, on ne devrait pas compter dans leur totalité les dépenses militaires, car une grande part d'entre elles peut concerner les productions habituelles d'armes atomiques ne présentant que peu de rapport avec l'industrie civile. On ne saurait, d'un autre côté, les ignorer, car elles contribuent largement aux bases industrielles et technologiques concurrencées par l'industrie civile. C'est ainsi que les É.U. ont pratiqué d'immenses investissements (militaires) dans des usines d'enrichissement d'isotopes qui maintenant approvisionnent l'industrie civile des réacteurs; beaucoup de petites unités productrices d'énergie atomique actuellement en service sur des bateaux de guerre, des sous-marins, et des satellites spatiaux peuvent être en outre utilisées dans des applications civiles.

Les services publics et l'industrie de la plupart des pays absorbent une proportion croissante d'activité technologique nucléaire, y compris les recherches et développements techniques.

Sous ces réserves, les chiffres réunis dans le tableau 1 montrent que, sur les sept pays mentionnés - É.U., Royaume-Uni, France, Allemagne de l'Ouest, Japon, Canada et Suède, - le Canada se classe cinquième pour l'importance brute des dépenses gouvernementales en science et technologie nucléaires et sixième pour les dépenses relatives au produit national brut. Si l'on tenait compte du niveau beaucoup plus bas des coûts de la recherche au Japon, les chiffres concernant le rang du Canada deviendraient en fait respectivement le sixième et le dernier.

Si l'on admet que les politiques d'autres pays peuvent dans une certaine mesure servir de guide, ces comparaisons suggèrent qu'à l'époque actuelle le Canada ne dépense pas d'une manière excessive

Tableau 10 DÉPENSES GOUVERNEMENTALES EN SCIENCE ET TECHNOLOGIE NUCLÉAIRES†

PAYS	Population exprimée en millions	Produit national brut * Millions de dollars canadiens	Dépenses brutes en Recherches et Développements exprimées en % du Produit national brut	DÉPENSES CIVILES			DÉPENSES MILITAIRES			TOTAL		RÉFS	
				Millions de dollars canadiens	Dollars canadiens par tête	Pourcent du Produit national brut	Millions de dollars canadiens	Dollars canadiens par tête	Pourcent du Produit national brut	Millions de dollars canadiens	Dollars canadiens par tête		Pourcent du Produit national brut
É.U. (1964)	192	684,000	3.2	(est.) (1,632)	(8.3)	(0.22)	(est.) (1,553)	(8.0)	(0.20)	3,176	16.3	0.42	a,b,c,i
(1965)	194.6	747,700	(3.2) (est.)	(1,682)	(8.8)	(0.24)	1,683	(8.8)	(0.24)	3,365	17.6	0.48	
R.U. (1964-65)	54.2	91,800	2.3	300	5.5	0.30	non disponible			(450)	(8.2)	(0.45)	a,d
France (est. 1966)	49	100,000	1.7	471	9.6	0.46	supposer la moitié des dépenses civiles			1,034	21	1.0	a,e
R.F. Allemande	56.8	120,000	2.0	146	2.6	0.12	--	--	--	146	2.6	0.12	a,f
Japon* (1964)	97	82,500	1.5	31.5	0.32	0.04	--	--	--	31.5	0.32	0.04	a,g
Canada (1965)	19.6	52,000	1.2	59.8†	3.1	0.115	--	--	--	59.8	3.1	0.115	a,h
Suède (1965)	7.7	20,400	1.7	29.0	3.75	0.14	--	--	--	29.0	3.75	0.14	a,f
			(1962)										

‡ Les méthodes employées pour réunir les chiffres figurant dans le tableau ci-dessus et provenant d'autres pays sont inconnues. Aussi ces chiffres doivent-ils être considérés comme indicatifs plutôt qu'exactes.

* Le Japon considère ne devoir exécuter que des recherches fondamentales jusqu'en 1970 environ. Ses besoins en énergie atomique et ses activités commenceront à croître à cette époque. Il est remarquable qu'un montant donné de dépenses permette au Japon de former quatre ou cinq fois autant de spécialistes de la recherche qu'au Canada (Analyse effectuée par l'O.C.D.E.)

† Ce chiffre ne comprend pas les prêts relatifs à la construction d'établissements producteurs, eau lourde par exemple, ni les Centrales de Douglas Point ou de Pickering, ni les prêts relatifs à des ventes futures, comme le montant d'environ \$18 millions consacré annuellement à emmagasiner de l'U₃O₈. Les méthodes de comptabilité des autres pays à ce sujet ne sont pas connues. Le chiffre en question comprend une estimation de l'amortissement annuel de Douglas Point.

‡ Ces chiffres, qui comprennent les dépenses affectées aux Recherches et Développements, représentent les budgets totaux des Gouvernements pour la science et la technologie nucléaire y compris les coûts de construction et de fabrication.

a) Bulletin Mensuel de Statistiques des N.U., juillet 1966

b) Commission de l'Énergie Atomique des É.U. "Activités principales dans les programmes d'Énergie atomique", janvier-décembre 1964

c) Analyses spéciales, budget de l'année fiscale des É.U. 1967

d) Commission du Royaume-Uni pour l'Énergie atomique, Onzième rapport annuel, 1964-65

e) Le Progrès Scientifique, octobre 1965, p. 4

f) Atomic Handbook, Vol. 1: Europe, 1965 - éditeur: J.W. Shortall, Morgan Bros. (Publishers) Ltd. London

g) Études sur les politiques nationales concernant la science: Japon, OCDE, Paris 1966

h) Énergie Atomique du Canada Ltée., Rapports annuels 1964-65 et 1965-66

i) Commission de l'Énergie Atomique des É.U., Rapport financier 1965.

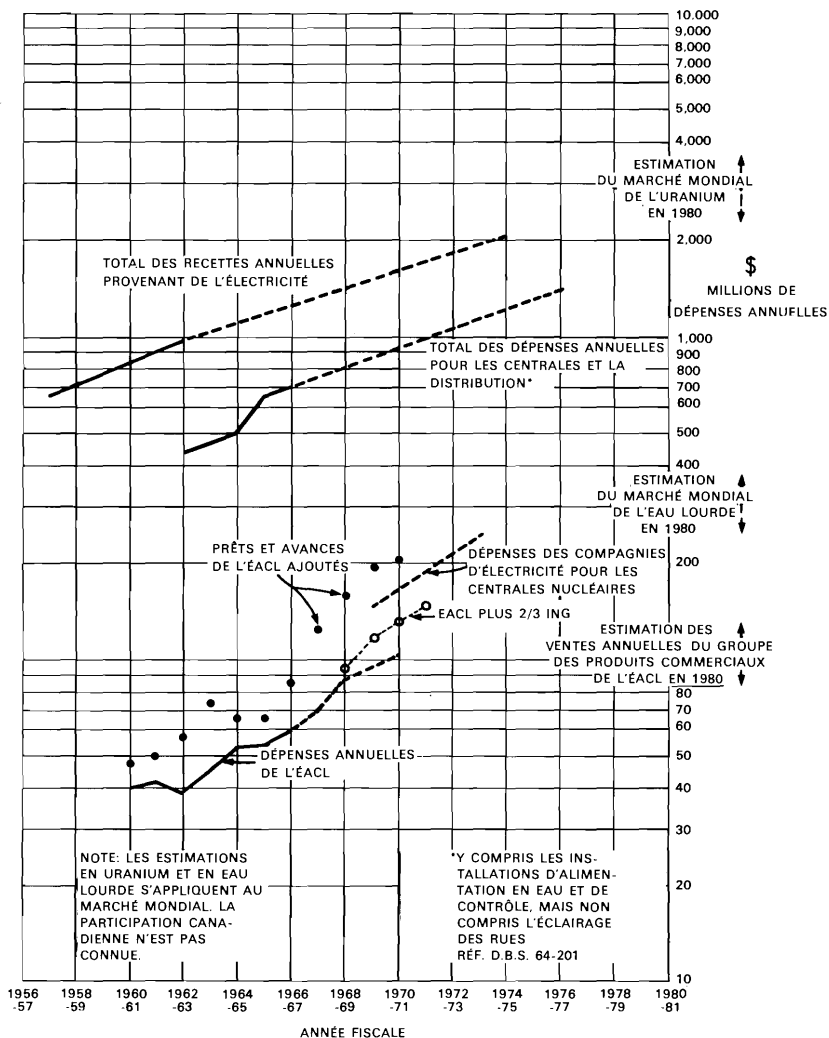


Figure 2 DÉPENSES ANNUELLES DU CANADA POUR SON PROGRAMME D'ÉNERGIE ATOMIQUE.

en recherches et développements techniques dans les domaines de la science et de la technologie nucléaires. Dans le secteur civil seul, les dépenses du Canada en 1965 auraient dû, pour pouvoir être comparées sur une base de pourcentage de produit national brut, s'élever à \$155 millions pour égaler le Royaume-Uni, \$125 millions pour égaler les É.U. et \$240 millions pour égaler la France. Les dépenses du gouvernement canadien en 1965, comprenant les subventions de

recherche aux universités, les budgets d'exploitation de l'ÉACL et d'autres ministères du gouvernement intervenant dans la recherche nucléaire, comprenant également quelques annulations anticipées de prêts et d'avances sur frais de réalisations du réacteur de Douglas Point, se sont en fait élevées à près de \$60 millions; elles se classent ainsi dans le voisinage immédiat des chiffres de l'Allemagne de l'Ouest, du Japon et de la Suède.

Dans le contexte des dépenses annuelles du Canada en énergie électrique et autres secteurs tels que ventes potentielles d'isotopes ÉACL, ou marchés mondiaux totaux pour l'uranium et l'eau lourde, la figure 2 montre les dépenses de l'ÉACL dans le passé, le présent et telles qu'elles peuvent être prévues pour l'avenir. Les besoins canadiens en capacité de production électrique, parallèles à ceux du reste du monde, augmentent et doublent approximativement tous les dix ans. Au Canada la demande pourrait croître encore plus rapidement; elle pourrait être influencée par des facteurs tels que l'introduction sur le marché d'automobiles électriques, un emploi accru du chauffage électrique, la croissance de la population et une baisse de prix de l'énergie. Sur les \$700 millions actuellement investis chaque année dans de nouvelles usines génératrices et dans des installations de distribution, un montant d'environ \$125 millions est dépensé annuellement par les services publics provinciaux et pour des stations d'énergie nucléaire. On s'attend à ce que ces dépenses doublent et au-delà au cours des prochains dix ans. La construction de nouvelles centrales d'énergie nucléaire remplace en effet chaque jour davantage celle de centrales utilisant le charbon, l'huile, ou le gaz.

Si les diverses statistiques précédentes ont été étudiées d'une manière assez détaillée, c'est qu'une partie importante du problème consistant à apprécier le mérite de la proposition ING se réduit à des questions d'échelle. Ce programme sera-t-il trop coûteux, compte tenu des dimensions du Canada ou des bénéfices à en attendre?

Une des difficultés rencontrées par le Comité consiste dans le fait que la politique et les buts du programme nucléaire canadien n'ont jamais été définis très clairement. L'auraient-ils d'ailleurs été, les modifications rapides survenant dans la situation mondiale de l'énergie nucléaire auraient exigé de procéder à nouveau, soit maintenant, soit à bref délai, à un examen de la question. La situation actuelle a conduit le Comité à se baser sur certaines hypothèses de travail.

L'importance des dépenses que le Canada peut raisonnablement envisager pour exécuter un programme de création d'énergie nucléaire dépend de la réponse à la question suivante: le programme vise-t-il

avant tout à satisfaire les besoins canadiens ou à exploiter sur les marchés mondiaux l'avance prise par le Canada et sa solide position actuelle dans le domaine considéré? Le Comité ne peut se permettre d'émettre un jugement sur cette question sans procéder à une large étude des marchés potentiels, de leurs relations avec des facteurs politiques, des capacités de production industrielle et autres données. Même dans le cas où le but poursuivi se limiterait à satisfaire les besoins intérieurs canadiens, les conceptions de réacteurs doivent continuer à pouvoir soutenir la concurrence*. Les pays développés témoignent d'une tendance croissante à couvrir eux-mêmes dans la plus large mesure possible leurs besoins en énergie nucléaire – construction et combustibles – à partir de leur propre industrie et leurs propres ressources. Une orientation différente pourrait aisément engendrer des difficultés de balance des paiements. Les services publics ne doivent pas moins protéger les intérêts de leurs clients; aussi existe-t-il des limites au total d'activités coûteuses qu'eux-mêmes ou l'économie dans son ensemble pourrait supporter.

L'économie canadienne, d'un autre côté, vit ou meurt avec son commerce extérieur. Au fur et à mesure que l'économie croît en importance, une proportion plus grande des exportations doit consister en produits manufacturés. Il en résulte que, dans le cas où une industrie indigène canadienne aurait mis au point un produit ou une méthode de production susceptible de soutenir la concurrence sur les marchés mondiaux, elle serait inexcusable de ne pas exploiter les possibilités commerciales ainsi offertes. Le fait de soutenir la concurrence sur un marché non fermé implique cependant des dépenses. Les bénéfices à retirer, les risques et les questions en jeu, sont tous d'une importance accrue. Les valeurs absolues des dépenses consacrées à la recherche par les pays figurant dans la concurrence, la mise au point et la construction d'usines de fabrication, deviennent des facteurs avec lesquels on doit compter plutôt qu'avec les dépenses relatives au produit national brut. Pour que le Canada puisse soutenir la concurrence dans le domaine entier de la science et de la technologie nucléaires, il conviendrait à peu près certainement que son taux d'investissement dans la recherche et les développements techniques augmente très considérablement. Il ressort du tableau 1 que l'importance des dépenses du Gouvernement canadien dans les domaines de la science et de la technologie nucléaires en 1965 ne

* Il n'est pas indispensable que les plans soient établis au pays. En d'autres termes, le premier objectif du programme canadien doit être d'assurer et maintenir la possibilité de construire des réacteurs dont la construction soit la plus économique étant données les conditions canadiennes, et quelle que soit l'origine des plans.

représentait que 1/18 de celle des É.U., 1/5 de celle du Royaume-Uni, 1/6 de celle de la France, moins de 1/2 de celle de l'Allemagne de l'Ouest, *tous ces chiffres concernant le seul secteur civil*. Le Canada manque en outre de tous les avantages découlant de l'existence d'un programme militaire et soutient la concurrence à partir d'une base industrielle qui, créée progressivement au cours de son évolution, souffre de nombreux défauts. Ce fait ressort de la comparaison avec plusieurs pays technologiquement avancés, disposant de bases plus variées permettant des réalisations audacieuses; ces bases ont pris naissance lors de l'exécution de programmes importants en recherche spatiale, organisation militaire, calculatrices, produits commerciaux industriels, etc.

Les succès que pourrait remporter le Canada sur le marché d'exportation apparaissent clairement comme liés de très près à des qualités d'intelligence, de direction avisée et de choix prudents. Mais il est impossible d'échapper à l'impression que les dépenses du Canada en vue d'établir la base de son industrie future sont excessivement modestes. Cette constatation est valable dans la mesure où la possibilité de soutenir la concurrence par les exportations industrielles en technologie nucléaire constitue ou constituera dans le futur la politique nationale du Canada. Cette conclusion s'impose d'autant plus que le nombre des organismes du Gouvernement canadien ayant fourni un travail effectif en vue de vaincre des difficultés ou apporter à l'industrie, d'une manière suivie, des possibilités orientées vers l'avenir, est extrêmement faible.

1.3 LA PROPOSITION ING

La proposition^{20, 21, 22} consiste à construire une machine qui donnera naissance à un flux de neutrons thermiques de 10^6 neutrons/cm²/sec., accessible aux tubes à faisceaux expérimentaux. On obtiendra ce résultat en accélérant jusqu'à un niveau de 1000 MeV un faisceau intense de 65 milliampères de protons, puis dirigeant ceux-ci sur une cible de métal liquide en circulation, consistant en un alliage

Les détails techniques et les descriptions complètes à jour en juillet 1966 peuvent être trouvés dans les documents suivants:

²⁰ EACL-2600 "Étude ÉACL pour un Générateur de Flux neutroniques intenses", juillet 1966.

²¹ EACL-FSD/ING-67 "Étude ÉACL pour un Générateur de Flux neutroniques intenses - Recommandations et Prix de Revient", août 1966.

²² Appendice II - G.A. Bartholomew, P.R. Tunnicliffe, "L'Étude ING", la Physique au Canada - 22:5, Hiver 1966.

de plomb et de bismuth. Le modèle d'accélérateur de protons proposé actuellement appartient au type "accélérateur linéaire", constitué par un tube à vide d'environ 5000 pieds de long, muni sur toute sa longueur d'une structure périodique de champs électriques, la partie principale étant commandée par quelque 150 tubes amplitrans à vide, émettant chacun une puissance de 500 kilowatts à 800 ou 900 mégahertz.

Le principe de réalisation du flux intense de neutrons réside dans la réaction de spallation, dont l'effet consiste à "expulser par ébullition", en une fois, un grand nombre de neutrons hors du noyau d'un atome lourd, lorsque celui-ci absorbe l'énergie de choc due à une particule à très haute énergie.

Ce processus est tout-à-fait distinct du processus de fission suivant lequel fonctionnent jusqu'à maintenant tous les réacteurs nucléaires. Dans le cas de la fission, un isotope particulier d'un élément lourd tel que l'uranium, le plutonium ou le thorium, peut absorber un neutron supplémentaire, devenir instable, puis se briser, libérant alors une quantité considérable d'énergie; des neutrons supplémentaires sont aussi d'ordinaire mis en liberté et expulsés dans les fragments. Les études et expériences entreprises par les physiciens de Chalk River ont montré que, si l'on élève l'énergie de la particule provoquant le choc jusqu'au niveau de 1000 MeV ou au-delà, le rendement de la réaction de spallation augmente; pour une quantité donnée d'énergie libérée ou dépensée, elle procure un nombre plus grand de neutrons que n'en libère le processus de réaction en chaîne basé sur la fission. L'intensité des flux de neutrons pratiquement réalisables n'est limitée que par la vitesse à laquelle on peut extraire la chaleur du volume où s'opère la réaction. La production accrue de neutrons permet ainsi de nouveaux niveaux d'intensité, supérieurs à ceux que permettraient des perfectionnements ultérieurs des réacteurs de fission.

Tandis que la plupart des autres accélérateurs émettent des particules par pulsations, la machine ING émettra un faisceau continu. Deux raisons principales justifient cette exigence. Certaines des expériences nouvelles, ou certaines expériences connues mais perfectionnées qui deviendraient possibles, dépendent du flux total de neutrons pendant une durée donnée plutôt que des valeurs de pointe du flux; c'est ainsi qu'une des importantes utilisations de la machine consisterait à produire économiquement des isotopes et cette production dépend, elle aussi, du temps total d'exposition. La puissance continue exigible est par suite très importante – savoir 65 mégawatts dans le faisceau de protons lui-même (dont la plus grande partie doit

être dissipée dans la cible) et environ 140 mégawatts pour la machine dans son ensemble. Bien qu'inférieur de beaucoup à l'énergie consommée dans certaines puissantes installations industrielles, ce chiffre représente une énergie suffisante pour satisfaire aux besoins normaux d'une ville de 100,000 habitants. A cause de l'importante consommation de puissance, la possibilité de produire des isotopes assez économiquement pour soutenir la concurrence dépend de l'obtention de rendements plus élevés dans la génération de grande puissance HF à fréquence très élevée, jointe à une grande sécurité de marche. De redoutables problèmes techniques sont ainsi posés: ils seront discutés plus en détail au chapitre 2.2.

On estime que la réalisation des plans et la construction de la machine dureront sept ou huit ans, entraînant une dépense totale d'environ \$155 millions (dollars 1966). Cette somme comprend non seulement les dépenses capitales de construction, mais les frais d'entretien d'une forte équipe de scientifiques et d'ingénieurs, à la vaste expérience desquels il sera d'ailleurs encore fait appel pendant le stade d'exploitation. A ce moment, dès 1975 ou 1980 le budget annuel d'exploitation de la machine atteindra \$15 ou \$20 millions (voir chapitre 2.4).

L'ensemble de l'Établissement exigera en 1974, pour le service de la machine de base, un total d'environ 700 personnes; ce nombre s'élèvera à 900 ou 1000 lorsque l'installation sera entièrement terminée, c'est-à-dire vers 1980. Le dernier chiffre comprend environ 150 attachés de recherche (pour détails voir le chapitre 2.3).

A cause de l'importance du projet, l'ÉACL propose que la faculté d'utiliser l'installation ne soit pas limitée à son personnel. Cette organisation devrait acquérir le caractère de laboratoire national, avec forte participation des scientifiques des universités. Elle constituerait alors un pôle d'attraction permettant d'intensifier, à l'avantage des deux parties, la collaboration entre l'ÉACL et les universités. On considère que l'échelle du projet, et l'intérêt qu'il soulèvera chez les spécialistes en génie, suffiront à stimuler pendant longtemps dans l'industrie et les universités les efforts d'un important ensemble de spécialistes de haute valeur dans les domaines de la technologie et du génie.

Usages de l'Installation

On trouvera ci-après un résumé des usages auxquels on destine l'installation. Il convient, lorsqu'on énonce de telles prévisions, de ne pas perdre de vue que l'importance et le degré d'actualité de

certaines utilisations auront certainement changé lors de l'entrée en service de la machine. La recherche scientifique aura progressé; il est d'autre part hors de doute qu'on aura imaginé entre temps de nouvelles et intéressantes expériences réalisables avec la machine. Le critère principal applicable dans le cas présent consiste dans le fait que le projet devrait représenter une large et prometteuse percée dans le domaine des possibilités expérimentales, ouvrant des perspectives sur maintes suggestions scientifiques et technologiques. On trouvera sous les références^{20, 21,} et ²³ l'exposé et l'examen de nombreuses propositions d'expériences. Les lignes suivantes contiennent maints emprunts à ces documents.

Physique de l'état solide

Les neutrons thermiques (énergie 0,025 eV, longueur d'onde 1,8 Å) constituent des outils puissants pour les recherches sur les solides et les liquides. Ils permettent d'étudier la structure des matériaux, en particulier de déterminer avec précision l'emplacement des atomes d'hydrogène et l'agencement des atomes magnétiques dans les cristaux. Ils peuvent aussi révéler les mouvements des atomes et les moments magnétiques dans les cristaux. Les neutrons fournissent dans ces domaines les informations les plus détaillées et, grâce aux résultats expérimentaux qu'ils peuvent seuls apporter, permettent une confrontation directe avec les théories modernes d'excitation collective dans les cristaux. Parmi les phénomènes actuellement à l'étude figurent: les vibrations des réseaux (phonons), les vibrations magnétiques (magnons), les excitations électroniques, et les interactions des éléments précédents entre eux. Les neutrons permettent également l'étude des liquides. Parmi les expériences dont la portée peut être considérable figure un examen détaillé de la dispersion des neutrons à partir de l'hélium-4 et de l'hélium-3 liquides. Une étude de cette nature contribuerait à une compréhension des interactions fondamentales dans les systèmes quantiques; ces interactions constituent la base d'une théorie générale de toute la matière condensée. Beaucoup d'observations de ce genre ont déjà permis une compréhension très améliorée de propriétés physiques macroscopiques familières telles que chaleur spécifique, dilatation thermique, conductivités thermique et électrique, susceptibilités magnétique et diélectrique, ferroélectricité, magnétisme, superfluidité. Des faisceaux de neutrons "froids" (longueur d'onde 10 Å) produits par le passage de neutrons à travers un modérateur froid (20°K par exemple), peuvent

²³ G. A. Bartholomew — Réaffirmation du besoin en Flux Intenses de Neutrons Thermiques. 8 décembre 1966.

être avantageusement utilisés dans de nombreuses expériences. Les flux de neutrons froids peuvent être substantiellement intensifiés en les dirigeant vers le lieu de l'expérience par réflexion totale dans des tubulures de cuivre ou de nickel polies intérieurement. Parmi les expériences qui bénéficieraient de l'emploi de ces neutrons on peut citer: études de structure au voisinage des phases de transition dans les cristaux, études de structure magnétique sur des matériaux ferromagnétiques ou antiferromagnétiques dans le voisinage des phases de transition, études de groupements atomiques dans des solutions liquides ou solides en état de non-équilibre, études des défauts produits par les impuretés des matériaux magnétiques, études de groupements defectueux, dislocations, etc. dans les métaux travaillés à froid et les matériaux irradiés, études de l'ensemble de filaments de flux magnétiques qui s'établissent dans certains supraconducteurs du genre utilisés dans les aimants à supraconduction (l'espacement de ces filaments est de l'ordre de 1000 \AA). Les expériences utilisant des neutrons dont l'énergie dépasse le domaine thermique (énergie supérieure à $0,1 \text{ eV}$, longueur d'onde inférieure à $0,9 \text{ \AA}$) offrent également un intérêt considérable et pourraient être exécutées avec des neutrons modérés par un bloc chaud (par exemple 2000°C) de béryllium dans un tube à faisceau ou avec des neutrons peu modérés émis par une source pulsatoire telle que l'anneau de magasinage envisagé comme adjonction ultérieure à la machine ING. Ces dispositifs permettraient une étude plus approfondie des vibrations intramoléculaires, des excitations magnétiques dans les matériaux ferromagnétiques, et des vibrations à haute fréquence de réseaux. Ce genre d'étude est aujourd'hui limité par les températures admissibles pour les modérateurs actuels des réacteurs. Des faisceaux de neutrons polarisés (neutrons dont les spins sont alignés sur une seule direction) peuvent être produits par réflexion à partir de miroirs Co-Fe; on a d'autre part suggéré une méthode permettant d'engendrer un faisceau de neutrons polarisés froids suivant laquelle un champ magnétique est appliqué au tube-guide des neutrons. Ce genre de faisceau est utile pour l'étude de la structure et la dynamique des matériaux magnétiques, et pour la mesure des interactions nucléaires magnétiques hyperfines dans les matériaux magnétiques. Beaucoup des expériences de dispersion de neutrons sont tout juste possibles avec les flux et techniques disponibles aujourd'hui. Des expériences exécutées avec des flux plus puissants provenant de la machine ING conduiraient sans aucun doute à des conceptions nouvelles concernant la théorie des solides et des liquides, et à la création de matériaux nouveaux présentant un intérêt technologique. Des flux de neutrons voisins de $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ne s'approchent à aucun degré assez près de la limite

nécessaire pour une investigation complète du domaine précédent et d'autres problèmes de la physique de l'état solide. On peut facilement imaginer des applications exigeant des flux de l'ordre de 10^{17} à 10^{18} ou supérieurs. Tel est le cas pour l'étude des cristaux organiques et des molécules biologiques. L'exploitation de la machine ING au voisinage de 10^{16} cm^{-2} sec^{-1} procurera d'intéressants résultats pendant un grand nombre d'années. On pourra entre temps imaginer des techniques compatibles avec les décharges intenses émises par un anneau d'emmagasinage pulsant au taux de 10^{17} neutrons thermiques/ cm^2/sec et même avec les flux continus encore plus puissants que pourront produire la machine ING lors des perfectionnements qui lui seront apportés.

Physique Nucléaire

Les expériences précédentes impliquent toutes l'emploi de neutrons comme moyen d'étude de la structure des matériaux; c'est ainsi qu'on a utilisé les rayons X pendant plusieurs décennies, sans qu'entre en jeu aucune réaction nucléaire ou transmutation. Si l'on se propose d'étudier des réactions et transformations de particules atomiques (physique nucléaire) on pourra utiliser la machine ING dans un grand nombre de cas. Elle permettra de créer des faisceaux de toutes les particules élémentaires connues (à l'exception des électrons) susceptibles d'être créées à des énergies inférieures à 1100 MeV, "seuil des particules étranges". On pourra les obtenir avec des intensités et des puretés supérieures dans la plupart des cas à celles que permettent toutes les machines existantes (réf. 20 V. 2) ou proposées. On obtiendra des neutrons doués d'énergies variant entre quelques centièmes d'un électron-volt et 1000 MeV, des protons à de nombreux niveaux d'énergie entre 50 et 1000 MeV, plusieurs types de mésons à des énergies échelonnées entre zéro et environ 700 MeV, les quatre types de neutrinos, des faisceaux de rayons gamma monochromatiques, de 1 à 10 MeV et un spectre gamma continu de 0 à 500 MeV (provenant de la désintégration de mésons π^0). On a obtenu beaucoup de renseignements sur la structure nucléaire à partir d'expériences dans lesquelles les matériaux servant de cible étaient bombardés par des neutrons; ceci concerne en particulier les rayons gamma par capture de neutrons et la fission. A mesure que le temps s'écoule, on emploiera sans doute plus souvent des neutrons de résonance (neutrons à énergie fixée avec précision, puis modifiée en vue de découvrir des régions particulières de résonance où la probabilité des réactions est plus élevée); malgré cela, les travaux utilisant des neutrons thermiques seront stimulés par toutes les techniques nouvelles améliorant la sensibilité ou le degré

de résolution. L'augmentation de sensibilité due à des flux plus intenses offrira un intérêt spécial pour les mesures à plusieurs paramètres; l'accumulation de données suffisantes pour une analyse précise de toutes les corrélations possibles entre les paramètres peut en effet exiger un temps considérable. De récents progrès intervenus dans la réalisation de détecteurs à l'état solide pour rayons gamma ont accéléré les études de rayons gamma produits par capture de neutrons thermiques; on a d'autre part récemment mis au point des techniques nouvelles concernant la photo-excitation; elles emploient, comme moyen de contrôle, des radiations gamma à capture de neutrons thermiques et se révèlent utiles pour explorer les états d'excitation des noyaux. Des faisceaux de neutrons provenant de réacteurs ont fourni des informations fondamentales concernant la durée moyenne de vie et les propriétés de désintégration bêta des neutrons libres. Une source émettant un flux élevé procurerait des données plus précises non seulement dans ce domaine particulier, mais dans d'autres secteurs de la physique nucléaire.

Physique des énergies intermédiaires ou physique des mésons

Cette discipline peut être considérée soit comme un secteur, soit comme une extension de la Physique nucléaire. On observe cependant une tendance croissante à la considérer comme limitée au domaine d'investigation dans lequel les particules qui effectuent le bombardement possèdent des énergies d'environ 500 à 1000 MeV, intervalle dans lequel les mésons commencent à apparaître. A environ 1000 MeV, on atteint un autre seuil conduisant au domaine désigné par "Physique des hautes énergies" où l'on voit apparaître un beaucoup plus grand nombre de ces "particules étranges" qui interviennent dans la sous-structure de la matière. Dans leur ardeur à percer le mystère des phénomènes extrêmement intrigants révélés par les accélérateurs à très haute énergie, les physiciens ont été portés à négliger l'étude détaillée du rôle des mésons dans la structure moléculaire; aussi existe-t-il à l'heure actuelle une certaine tendance à reprendre la question en vue de combler les vides. On a proposé en URSS, en Allemagne de l'Ouest, en Suisse, aux E.U. et au Canada (C.B.) de construire des "fabriques de mésons". Ce sont des accélérateurs destinés à engendrer un faisceau relativement intense de particules (ordinairement protons) dans le domaine de 500 à 1000 MeV; en frappant une cible, elles engendrent un nombre de mésons suffisant pour permettre des recherches approfondies concernant leur interaction avec les noyaux. La machine de ce type la plus remarquable actuellement en cours d'étude est probablement la machine

américaine de Los Alamos qui accélérera des impulsions de protons de 20 milliampères jusqu'à environ 800 MeV dans un accélérateur linéaire. La machine ING doit accélérer un débit continu de protons de 65 milliampères et les élever à un niveau d'énergie encore plus élevé. Aussi propose-t-on, en vue d'exploiter au maximum les possibilités de la machine, de séparer une petite fraction du faisceau ING et de la diriger sur une cible spéciale en vue d'engendrer des mésons. Un montant de un pour cent du faisceau ING à demi-énergie libérerait un flux de mésons environ double de la moyenne disponible à la machine de Los Alamos (LAMPF) et égalant 10 à 30 fois le flux de mésons de l'installation proposée en C.B. (TRIUMF). L'installation ING pour étude des mésons offrirait par suite un intérêt considérable pour les physiciens étrangers. La région d'"énergie intermédiaire" constitue la zone de chevauchement des domaines d'intérêt et des techniques des physiciens nucléaires et des physiciens spécialistes des hautes énergies. Les avantages et l'importance de la recherche dans ce secteur ont été discutés et exposés d'une manière convaincante par Lomon²⁴, Rosen²⁵ et dans la proposition TRIUMF²⁶. La nature exacte de l'installation ING pour mésons – c'est-à-dire le niveau d'énergie et les moyens de séparation du faisceau producteur de mésons – sont encore discutés actuellement (avril 1967).

Production d'isotopes

La présente section est une citation intégrale extraite de la réf. 23 "La capture de neutrons par la cible de bismuth de la machine ING permettra, estime-t-on, une production de deux mégacuries de polonium-210 par an (équivalent à 63 kilowatts thermiques). Le polonium-210 est actuellement demandé comme source d'énergie radioisotopique et coûte environ \$4,500/Wt. Les coûts calculés pour l'avenir (vers 1972) s'échelonnent de \$15/Wt à \$190/Wt. La valeur du polonium-210 produit par la machine ING pourrait ainsi atteindre un montant situé entre \$1 et \$12 millions par an, moins les frais inhérents à la fabrication. La production de polonium dans une installation telle que la machine ING offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes classiques de production dans les réacteurs nucléaires. L'avantage principal réside dans le fait que le polonium-210 est disponible en grandes quantités comme sous-produit gratuit prenant naissance sur la cible de bismuth. Il faudrait pour produire la même

²⁴ E. Lomon, *Physique au Canada*, 21, No. 6, 8-11 (Hiver 1965).

²⁵ L. Rosen, *Physics Today*, 19, No. 12, 21-36 (Décembre 1966).

²⁶ "TRIUMF Proposition et Estimation du Prix de Revient", Université de Colombie Britannique, Université Simon Fraser et Université de Victoria, novembre 1966, édité par E.W. Vogt et V.V. Burgerjon.

quantité dans NRU, irradier quelque 30 tonnes de bismuth-209 dans un flux de neutrons thermiques de $10^{14}n/cm^2/sec$. Un autre important avantage résulte du fait que l'alliage utilisé comme cible est liquide et à haute température. Cette situation permet une séparation continue du polonium-210 volatil du métal liquide en écoulement. Le coût des produits fournis par ING devant être moindre que celui des isotopes synthétiques provenant des réacteurs, ces produits devraient immédiatement trouver un marché de vente. Un revenu potentiel supplémentaire résultera de l'irradiation du cobalt dans ING non seulement dans la région à flux élevé (supérieur à $2 \times 10^{15}n/cm^2/sec$.) mais aussi dans les zones de faible flux à l'intérieur du modérateur et de la couverture. On estime que les revenus apportés à ING par la création des produits de cobalt-60 approcheront \$4 millions/an. Les bénéfices bruts pour le Canada seront beaucoup plus élevés. On pourrait également produire, dans des conditions difficilement réalisables dans des réacteurs nucléaires, de nombreux autres isotopes de valeur tels que plutonium-238, curium-242 et curium-244; ces éléments permettraient de satisfaire à la demande croissante de sources portatives d'énergie destinées aux applications spatiales et bio-médicales. Un exemple typique consiste dans la conversion de l'américium-241 en curium-242. La production de curium à partir d'un flux total donné de neutrons peut être multipliée par cinq en faisant croître le flux à partir des valeurs normalement disponibles dans les réacteurs de puissance ($3 \times 10^{13}n/cm^2/sec$.) jusqu'aux valeurs voisines de 10^{15} immédiatement disponibles sur l'ING. D'après les estimations actuelles concernant le prix de revient du plutonium-238 et du curium-242 vers 1972, le revenu brut provenant de la production de ces matériaux par ING pourrait atteindre plusieurs millions de dollars par an."

Données nucléaires relatives au perfectionnement des réacteurs

(Réf. 20, Section V.A., p. 26). "Une source pulsatoire de neutrons créée en vue de mesurer par temps d'envol des sections de capture pourrait fournir les meilleures informations concernant le perfectionnement des réacteurs nucléaires. Il est très difficile de prévoir parmi les très nombreuses données qui interviennent dans la question, celles qui seront insuffisamment connues à la date à laquelle ING entrera en service. Les problèmes offrant un intérêt comprennent les sections de capture par absorption (totales) et radiative des atomes de combustible nucléaire et des matériaux de structure ou autres présents dans les réacteurs, ainsi que l'émission moyenne de neutrons à chaque réaction de fission. Ces quantités varient avec

l'énergie des neutrons, et, particulièrement dans la région de résonance, exigent des mesures à très haute résolution. Un dispositif de mesures par temps d'envol avec une source de neutrons intense à courtes impulsions serait très utile en vue d'études de cette nature. Les tendances récentes concernant les questions à résoudre ressortent de documents rassemblés par EANDC concernant les données actuellement recherchées en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest. Les données fondamentales relatives à la conception de réacteurs tels que CANDU sont actuellement connues d'une manière raisonnablement complète; une précision supérieure n'est désirée que pour un petit nombre de ces données. Il apparaît par contre que la complexité des méthodes utilisées pour créer des types avancés de réacteurs (tels que réacteurs à haute température ou réacteurs rapides) croît constamment, ce qui imposera l'obtention de données additionnelles surtout dans la région de résonance. Il est probable que, pendant une longue période, le programme de mesures se révélera impuissant à fournir toutes les données nécessaires. L'intensité élevée de la machine ING lui permet de faire des mesures jusqu'à de très hautes énergies (100 keV, 1 MeV ou même plus élevées); ses possibilités constituent ainsi un complément du domaine de recherche des accélérateurs Van de Graaf.

Recherches sur les matériaux

Sous cette rubrique figurent des recherches touchant non seulement à la physique fondamentale de l'état solide, mais aussi aux changements et dommages subis par les matériaux soumis à des radiations à haute énergie. Le bombardement par neutrons rapides, protons, etc. expulse les atomes de leurs positions initiales dans les alliages, cristaux, et autres matériaux; les vides ainsi créés, les atomes interstitiels, les dislocations, groupements et autres formes de défauts peuvent modifier profondément les propriétés des matériaux. La plupart des pièces constitutives des réacteurs de puissance doivent être prévues pour durer de cinq à trente ans. Aussi est-il très important de disposer d'installations d'essais émettant des flux cent fois plus intenses et au-delà, de manière à pouvoir, sur une période n'excédant pas quelques jours ou semaines, exécuter des recherches portant sur des niveaux comparables de dommages causés à un matériau particulier. Pour les études fondamentales, il est d'autre part actuellement difficile d'étudier un grand nombre de phénomènes à cause des longues durées d'irradiation nécessaires pour obtenir des résultats clairement observables. Parmi les effets de cette nature figurent la diffusion de radiation plus intense d'un élément à travers un autre; la compréhension

de ce phénomène est indispensable pour pouvoir prédire la stabilité des alliages ou des céramiques soumis à des champs élevés de radiations. D'autres exemples sont discutés dans la réf. 20, section V.C., pp. 67-71; les deux exemples suivants figurent parmi les plus instructifs:

“La formation d'hydrogène et d'hélium dans les métaux entraîne probablement toujours des effets nuisibles sur les propriétés mécaniques. Lorsque l'intensité des flux des réacteurs est de l'ordre de 10^{13} n/cm²/sec., des quantités notables d'hélium ne prennent naissance que dans le beryllium, le lithium et le bore. Sous l'effet de flux de neutrons rapides de 10^{15} à 10^{16} , par contre, les réactions (n,p) et (n, α) peuvent engendrer des quantités appréciables d'hydrogène et d'hélium dans de nombreux autres métaux. Le flux de neutrons de la machine ING permettrait une étude des formations de gaz à laquelle ne se prêtent pas les installations actuelles du CRNL.

“On étudie actuellement des réacteurs devant utiliser comme composants critiques des alliages de zirconium et fonctionnant à des températures auxquelles ces alliages sont renforcés par des irradiations de neutrons. L'importance de la résistance est cependant secondaire comparée à celle de la ductilité (ou ténacité) lorsqu'on envisage la possibilité de défaillances d'allure catastrophique. Une accumulation de preuves semble aujourd'hui confirmer que les effets nuisibles de l'irradiation peuvent atteindre un point de saturation pour des flux totaux de l'ordre de 10^{20} à 10^{21} n/cm². Il reste cependant possible que l'apparente saturation ne constitue en fait qu'un palier dans la courbe propriétés/flux. Les bureaux d'étude de réacteurs sont par suite impatients d'obtenir des données expérimentales concernant des flux totaux supérieurs à 10^{22} n/cm². L'ING permettrait de réaliser sur une durée de 10 à 100 jours une telle irradiation totale d'un matériau en neutrons. Pendant la marche d'un réacteur, la formation d'hydrogène peut réduire la ductilité plus que ne le peut l'irradiation. On doit donc tendre, en utilisant une période d'irradiation aussi courte que possible, à réduire au minimum la formation d'hydrogène. L'ING permettra une irradiation totale élevée avec acquisition minimale d'hydrogène. Il devrait en résulter une précision accrue dans l'estimation de la durée de vie des composants à l'intérieur des réacteurs.

“Les vitesses de transmutation des matériaux utilisables pour la construction de la machine ING seront appréciables. C'est ainsi que dans un flux thermique de 10^{16} n/cm²/sec. l'aluminium est converti en silicium à la vitesse d'environ 7% par an. Il serait intéressant d'étudier l'effet résultant sur les propriétés mécaniques des alliages

aluminium-silicium; les atomes transmués se déposent en effet et peuvent subsister dans une configuration à l'état de non-équilibre. Les limites de la solubilité solide peuvent en d'autres termes être largement dépassées et la formation d'agglomérations métastables de silicium pourrait engendrer des changements dans la résistance et la ductilité. Parmi les autres réactions présentant un intérêt pratique figure la conversion de zirconium en molybdène à la vitesse de 0,4% par an."

Technologie de l'énergie nucléaire

(Réf. 20, section V.B., pp. 50-58). "Le Générateur de flux neutromiques intenses a un rôle important à jouer dans la production de l'énergie nucléaire; la nature de ce rôle dépendra cependant des rendements atteints dans la production de faisceaux de protons et la production spécifique de neutrons. Ce rôle suivra aussi l'évolution des travaux en énergie nucléaire à moins qu'agissant peut-être en sens inverse, il ne l'influence. La possibilité de cette application des accélérateurs de particules à haute énergie et haut débit a été reconnue il y a longtemps par Lewis (DR-23, 1952 et EACL-968, 1960) et dans le projet MTA (Lawrence Radiation Laboratory, LRL-102, 1954). L'importance de la machine ING dans le domaine de l'énergie nucléaire résulte de deux de ses propriétés. Elle produit en premier lieu un grand nombre de neutrons libres qui ne sont pas "obligés" de participer au maintien d'un réacteur à l'état critique et peuvent par suite être utilisés à convertir des atomes fertiles en atomes fissiles. En second lieu, les protons à haute énergie peuvent être utilisés directement pour fissionner, avec un gain net d'énergie, des matériaux fertiles. L'une et l'autre de ces propriétés, et peut-être une combinaison des deux, pourraient être exploitées en vue de produire une énergie nucléaire plus économique ou d'augmenter nos réserves d'énergie nucléaire. Etudions en premier lieu la production de matériaux fissiles à partir de matériaux fertiles. Malgré l'absence d'une prospection intensive concernant le thorium, on peut estimer que les ressources canadiennes connues d'uranium et de thorium sont à peu près égales. Sur ces matériaux, environ 1/140 seulement de l'uranium (l'uranium-235) peut être immédiatement fissionné dans un réacteur à neutrons thermiques pour produire de l'énergie. Une telle application est strictement impossible avec le thorium. En ajoutant cependant un neutron à chacun des atomes d'uranium (uranium-238) restants ou aux atomes de thorium, on produira de nouveaux isotopes fissiles de plutonium-239 et d'uranium-233 qui peuvent alors être "brûlés" dans un réacteur à neutrons thermiques. Si, par suite, les neutrons libres nécessaires

étaient disponibles, l'énergie qui pourrait être extraite de nos ressources en combustible nucléaire serait multipliée par environ 300. A l'intérieur d'un réacteur à neutrons thermiques du type CANDU, quelques neutrons en excès sont disponibles; ils sont utilisés pour produire du plutonium-239 dont une partie est alors brûlée sur place et accroît la production d'énergie sans atteindre cependant le double de ce qui pourrait être obtenu en brûlant complètement de l'uranium naturel 235. En récupérant le plutonium à partir du combustible vidangé et en le réutilisant, on peut multiplier par un coefficient un peu plus élevé l'énergie extraite; mais si le réacteur fonctionne de manière à produire moins d'atomes fissiles qu'il n'en détruit, la limite d'exploitation du combustible par ce processus est rapidement atteinte. C'est ainsi que dans les réacteurs CANDU avec facteur moyen de conversion de 0,8, l'énergie théorique maximale pouvant être obtenue par recyclage n'est que de cinq fois celle qui provient de l'U-235 contenu dans l'uranium naturel.

“Si un nombre suffisant de neutrons supplémentaires est disponible dans un réacteur de puissance, le facteur de conversion peut être encore accru; il se produira effectivement dans certains cas de la surrégénération, c'est-à-dire une production de matériaux fissiles supérieure à la quantité détruite. Cette condition permet en principe l'utilisation totale des réserves de matériaux fertiles en vue de la production d'énergie; quelques restrictions à ce schéma un peu sommaire s'imposent cependant.

“Des taux de surrégénération assez élevés pour compenser les pertes opératoires et satisfaire aux exigences d'un complexe de puissance en expansion ne sont réalisables qu'avec des réacteurs à surrégénération rapide fonctionnant dans un cycle Pu-U. C'est seulement en effet dans la fission rapide du Pu que des neutrons en excès sont produits en quantité suffisante pour que soit atteint le rapport nécessaire pour la surrégénération (1.2-1.3). On étudie actuellement dans un grand nombre de pays des réacteurs rapides visant à la combustion complète des réserves d'uranium. Les qualités économiques de ce genre de réacteurs sont cependant encore incertaines.

“Contrastant avec le précédent, l'isotope fissile U-233 résultant de l'irradiation du thorium naturel par des neutrons ne peut être efficacement brûlé dans les réacteurs rapides. La production en neutrons n'augmente pas en effet d'une manière appréciable au niveau d'énergie des neutrons caractéristique des réacteurs rapides. D'un autre côté, aux énergies thermiques et intermédiaires, le taux de libération des neutrons par neutron capturé dans U-233 est supérieur à celui des deux autres isotopes fissiles ordinairement disponibles (U-235 et Pu-239).

Le cycle ^{233}U -Th est potentiellement le meilleur pour les réacteurs à neutrons thermiques, car, en surveillant l'économie en neutrons dans le réacteur, on peut accroître le rapport de conversion au point où se produit une surrégénération marginale. Si elle est réalisable, cette vitesse de surrégénération ne suffira cependant pas à équilibrer les pertes dues à la répétition du processus et les demandes croissantes en énergie. La fréquente répétition du processus nécessaire pour économiser les neutrons peut en outre élever à une valeur prohibitive le prix de l'énergie. Aussi est-il probablement préférable d'exploiter un tel réacteur sur un cycle d'alimentation du type "presque surrégénérateur" ou "convertisseur avancé". Ce cycle exige des matériaux fissiles "artificiels" provenant d'une source extérieure; c'est ici que la machine ING pourrait jouer un rôle en tant que producteur de ^{233}U .

"La seconde caractéristique de la machine ING sous le rapport de l'énergie nucléaire résulte du fait que l'absorption d'un neutron à haute énergie par un matériau fertile tel que le thorium ou ^{238}U engendre dans la plupart des cas des réactions de fission; il en résulte une libération d'énergie et l'émission d'un nombre de neutrons double de celui qui aurait été produit dans une cible plomb-bismuth. On pourra ainsi produire directement de l'énergie nucléaire à partir de la fission d'atomes fertiles en même temps qu'on convertira de nombreux autres atomes fertiles en combustible fissile pour réacteurs.

"Le Canada ayant ainsi décidé de se spécialiser sur les réacteurs de puissance à uranium naturel modérés à l'eau lourde, ayant en outre la bonne fortune de posséder (dans le district du lac Elliott) les plus importantes ressources connues en Amérique du Nord à la fois en thorium et en uranium, l'exploitation des possibilités offertes par la machine ING dans le domaine de l'énergie nucléaire constitue l'extension la plus naturelle et la plus immédiate de ses études de réacteurs de puissance."

La proposition continue en analysant les rendements et caractéristiques économiques d'un système générateur d'énergie utilisant la "surrégénération électrique"; elle conclut qu'il devrait, à un certain stade de progrès de l'énergie nucléaire, présenter d'intéressantes possibilités économiques, car les prix des minerais d'uranium ou de thorium sont orientés vers la hausse tandis que les méthodes d'accélération des particules gagnent en efficacité. Certains progrès concernant l'amélioration des systèmes peuvent être réalisés au bureau d'études et par des expériences analogiques à petite échelle; dans l'avenir, cependant, les progrès résulteront de l'étude des problèmes sur machines réelles et d'essais réalisés avec des particules réelles accélérées à de hautes énergies.

“Tandis que le travail d’exécution des plans et la construction de l’accélérateur ING constitueront une avance technologique majeure, l’installation elle-même fournira un utile banc d’essai pour de nouveaux dispositifs d’accélérateur....”

Autres usages

Il convient de ne pas perdre de vue l’emploi de l’installation comme terrain d’essai en vue de nouveaux progrès dans la production de puissance HF élevée, dans les systèmes de contrôle, les aimants supraconducteurs, la cryogénie, l’instrumentation, les systèmes à vide etc. On peut aussi envisager l’étude chimique des éléments lourds rendue possible par la production de quantités substantielles d’isotopes variés, l’analyse efficace de l’activation et de nouveaux progrès dans la chimie des radiations, tous deux rendus possibles par l’existence de flux élevés de neutrons, de protons, mésons, rayons gamma, etc; enfin la recherche en biologie et thérapeutique médicale.

Deuxième Partie

ÉVALUATION

DEUXIÈME PARTIE

ÉVALUATION

2.1 IMPORTANCE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE L'ING.

a) Importance pour l'ÉACL

Pour résumer le chapitre 1.2, nous prenons pour acquis que l'Énergie Atomique du Canada Limitée, a pour mission principale de mettre au point des réacteurs nucléaires permettant la génération d'énergie électrique de façon économique, compte tenu particulièrement du contexte canadien. Cet organisme possède sa Division des produits commerciaux, chargée d'écouler au mieux les isotopes radioactifs que les réacteurs de puissance ou de recherche donnent plus ou moins comme sous-produits. On compte que, dans le cadre des intentions du gouvernement au sujet de l'industrie canadienne, l'ÉACL mette au point et favorise la mise au point de produits industriels pour l'exportation, dans les limites où cette entreprise serait économiquement intéressante.

Les besoins de l'économie canadienne en centrales électriques continueront à croître, en doublant approximativement tous les dix ans. Il est même possible que ces besoins grandissent encore plus rapidement si l'accroissement de population s'accélère ou si le chauffage électrique des maisons ou la propulsion électrique des automobiles se répand. Une part de plus en plus grande de l'énergie électrique sera fournie par les centrales électronucléaires. L'extrapolation des dépenses annuelles et des investissements pour des centrales électriques canadiennes, y compris les lignes de transmission telle qu'illustrée sur la figure 2, indique des montants respectifs de 2200 millions et 1400 millions de dollars pour 1975. On en déduit facilement que de faibles économies sur le coût de l'électricité, comme l'on s'attend à en réaliser par les travaux de recherche et de développement, produiront de substantielles épargnes pour l'économie du pays.

On n'attachera pas d'importance particulière dans l'avenir à ce que le prix actuel du kilowatt-heure des centrales thermiques à charbon soit économique. De fait, le bien-être d'une société industrielle dépend de sa capacité à se procurer de l'électricité à bon marché.²⁷ La croissance des besoins en énergie du Canada est comparable à celle que l'on observe partout au monde. Cette croissance mondiale façonne le milieu humain de telle sorte qu'un marché d'exportation pour les réacteurs nucléaires, les matériaux et l'appareillage connexe devrait s'ouvrir à qui saura déployer des méthodes de ventes dynamiques soutenues par une administration avisée.

Dans le domaine des applications des isotopes, les efforts de l'ÉACL pour vendre des appareils médicaux et industriels d'irradiation utilisant du cobalt 60 ont été couronnés de succès. De nouveaux types d'utilisation tels que la conservation des aliments par irradiation, la détection par radiotraceurs, l'analyse par activation neutronique et la génération d'énergie par les isotopes offrent de telles perspectives de croissance qu'une extrapolation raisonnablement optimiste indique des ventes atteignant 100 millions de dollars par an vers 1980. Actuellement, 90 pour cent des ventes réalisées par la Division des produits commerciaux concernent l'étranger.

On ne peut douter, à la lumière de ces faits, que l'ÉACL doive poursuivre la réalisation de son programme de recherches et de développement technique. Il se peut qu'on atteigne un plateau dans la courbe descendante des coûts de l'énergie électrique, ou que l'on ne découvre plus de nouvelles applications des matériaux radioactifs, mais jusqu'à présent aucun signe n'en est apparu. En conséquence nous tenons pour acquis que l'ÉACL est chargée d'une mission de

²⁷ Le D^r W.B. Lewis s'est longuement étendu sur ce sujet, dans un exposé soumis en 1964 au Conseil d'administration de l'ÉACL. Il a déclaré ce qui suit: "Il est absolument essentiel, pour que l'économie toute entière croisse et prospère, de fournir à l'industrie canadienne qui lui sert de fondation des quantités toujours croissantes d'énergie électrique à bon marché. On ne semble pas s'être rendu compte de façon générale que jusqu'à l'avènement de l'énergie électronucléaire économique l'industrie canadienne sauf en Alberta avait la perspective de payer des prix toujours croissants pour l'électricité. Dans toutes les régions le coût de l'énergie hydroélectrique aurait monté en fonction du coût croissant des installations de plus en plus éloignées et de l'allongement des lignes à haute tension. Les coûts des combustibles fossiles et de leur transport se seraient accrues aussi. Ces particularités auraient enrayé la croissance économique, car les besoins d'énergie auraient été plus grands, entraînant un accroissement des frais pour les utilisateurs existants. Actuellement la balance penche de l'autre côté. Toutes les prévisions indiquent que le prix du kilowatt-heure diminuera en fonction du nombre de centrales installées. Nous pouvons donc sans inquiétude conseiller au public d'utiliser autant d'énergie électrique qu'il est utile à son confort. En outre, cette situation ne sera pas temporaire, car on peut prédire un effondrement des coûts réels de l'énergie au cours des prochains siècles, à condition qu'on n'enraye pas le développement de l'énergie nucléaire sous l'action de la demande."

longue durée, et nous pensons que ses dirigeants ont été bien avisés d'établir les plans d'un programme de recherches scientifiques à long terme, qui permettra de conserver un noyau de scientifiques hautement qualifiés dans l'organisme. Il n'est pas nécessaire d'insister ici sur l'importance reconnue pour un organisme industriel de recherches et de développement technique de posséder un groupe de scientifiques spécialistes de la recherche fondamentale.²⁸

L'exécution proposée du Programme de l'ING entraînerait un ensemble d'avantages désirables, en fonction de la mission à longue échéance dont l'ÉACL est chargée.

- (1) Le Programme utiliserait les installations hors pair de recherches aux Laboratoires Nucléaires de Chalk River, les perfectionnerait et rehausserait le prestige de cet établissement de physique des neutrons.
- (2) Il maintiendrait une position unique pour l'ÉACL (et le Canada) dans le monde, mettant le pays dans une position commerciale avantageuse lorsque de nouveaux développements se produiront en science et en technologie nucléaires, en quelque partie du monde qu'ils apparaissent.
- (3) Si l'on tient pour acquis que l'ÉCAL serait constitué en Institut national, il améliorerait les échanges entre l'ÉACL et les autres laboratoires canadiens, particulièrement ceux des universités.
- (4) Quels que soient les perfectionnements ou les concepts nouveaux qui apparaîtront à long terme en technologie de l'énergie, il est quasi certain que les phénomènes électromagnétiques joueront un rôle plus grand que jusqu'à présent. Les scientifiques de l'ÉACL n'ont eu jusqu'à présent qu'une expérience assez restreinte dans ce domaine. Le Programme de l'ING les introduira directement au coeur de la technologie la plus avancée de l'électromagnétisme. Ces travaux pourraient mener à la surrégénération de l'électricité comme une technique principale ou auxiliaire de génération d'énergie, ou servir d'entrée ou de point de départ pour des travaux sur la fusion thermonucléaire si une méthode réalisable apparaissait au cours des travaux de recherche fondamentale réalisés ailleurs.

²⁸ Veuillez consulter par exemple l'article du D^r L.R. Hafstad, vice-président chargé de la recherche à la General Motors Corp., dans le "Science Journal" de septembre 1966.

- (5) Le défi technique que la réalisation de l'ING représente, la mise au point de méthodes de transport rapide de la chaleur générée dans un faible volume et du refroidissement par un métal liquéfié, la connaissance du comportement des matériaux soumis à l'action d'un faisceau de neutrons ou de protons de très forte intensité placeront l'ÉACL dans une position technologique privilégiée au sujet des réacteurs électronucléaires avancés, y compris les surrégénérateurs à neutrons rapides. Les installations de l'ING pourraient devenir un centre d'essais très rigoureux de matériaux pour un certain nombre d'organismes scientifiques dans le monde, comme les réacteurs NRX et NRU de Chalk River l'ont été.
- (6) La réalisation d'un flux intense de neutrons rendrait possible la fabrication de certains isotopes radioactifs en quantité commerciale, qui ne sont produits que beaucoup plus difficilement et à des coûts beaucoup plus élevés par d'autres méthodes. Ces isotopes seraient d'un intérêt considérable pour la Division des produits commerciaux, et lui permettraient d'effectuer des ventes importantes.

b) Importance pour la communauté scientifique

L'institut de recherches constitue actuellement le moyen d'atteindre aux grandes réalisations scientifiques. Un grand effort de recherche est rendu possible par la réunion d'un personnel scientifique travaillant à plein temps dans le cadre d'un programme important d'expérimentation ou à l'aide d'une installation de recherches exceptionnelles. Ce travail de groupe est très efficace pour mener des recherches approfondies dans certains domaines de la science et de la technologie. L'histoire des principaux laboratoires nucléaires du monde, Argonne, Brookhaven, le CERN, Chalk River, Dubna, Harwell, Oak Ridge et le Lawrence Radiation Laboratory, etc., montre qu'il a été possible d'y obtenir un rendement et une créativité dont l'équivalent ne peut se trouver dans un laboratoire individuel où l'activité est sporadique. Le fait que les Laboratoires Nucléaires de Chalk River ont atteint le niveau international par leur contribution aux sciences nucléaires confirme leur valeur pour la communauté scientifique canadienne en général. Les laboratoires de Chalk River ont été la cheville ouvrière des efforts canadiens dans le domaine des sciences et de la technologie nucléaires, et ont servi à établir des contacts étroits entre les cercles scientifiques canadiens du domaine nucléaire et les principaux physiciens du monde particulièrement dans les secteurs de l'énergie nucléaire, de la physique nucléaire des particules de faible

énergie et de la physique des neutrons. Comme Derek de Solla Price l'a souligné dans son ouvrage "Little Science, Big Science" (Columbia University Press, 1963), il existe différents niveaux de communication scientifique. Les revues scientifiques, qui constituent le niveau de communication accessible au scientifique moyen pris individuellement, se trouvent souvent une ou deux années en retard par rapport à l'information directe diffusée verbalement et officieusement parmi la centaine de scientifiques qui constituent le peloton de tête dans un domaine donné. Le scientifique désirant travailler en pointe doit atteindre la notoriété grâce à laquelle il peut communiquer de façon directe et familière avec les autres chefs de file oeuvrant dans son domaine. Cette possibilité n'est pas atteinte facilement. Il en coûte, tant en argent qu'en intelligence. C'est pour ces raisons que l'action des laboratoires de Chalk River s'est avérée bénéfique pour la communauté scientifique canadienne.

L'ÉACL, grâce aux difficultés que ses scientifiques ont dû surmonter et à ses installations hors ligne, a fourni le cadre nécessaire à la formation de plusieurs membres de son personnel qui sont devenus des scientifiques et des ingénieurs de réputation reconnue et nombre de ces anciens²⁹ travaillent maintenant dans l'industrie et les universités.

Les arguments exposés ci-dessus alimentent le dossier établi pour la création d'un organisme canadien du type "Institut de recherches ou Laboratoire National". Le programme de l'ING, œuvre d'un intérêt scientifique et d'un retentissement international évident fournirait sans aucun doute un défi technique d'importance suffisante pour motiver la création d'un Laboratoire national, qui continuerait à jouer un rôle primordial pour la communauté scientifique canadienne. Les chapitres traitant des possibilités techniques canadiennes et des charges financières établiront si le défi technique ou le coût du programme sont à la portée du Canada. Les chapitres sur l'organisation et l'emplacement exposeront les raisons qui militent pour que l'Institut soit simplement l'extension et la continuation des Laboratoires de Chalk River ou un organisme à organisation et direction indépendantes. Les quelques paragraphes suivants exposeront les raisons pour lesquelles le programme soutiendrait ou non les intérêts de la communauté scientifique canadienne. Le Comité tient pour acquis que le Canada devrait maintenir en activité au moins un organisme du type

²⁹ Les dossiers des Laboratoires nucléaires de Chalk River (CRNL) montrent qu'environ 50 scientifiques ayant plusieurs années d'expérience en recherche à Chalk River font partie du personnel universitaire canadien.

“Institut de recherches concertées” dans le domaine général des sciences nucléaires. L'impression qui semble prévaloir dans certains secteurs des communautés scientifique et technique, selon laquelle les fonds nécessaires à une telle entreprise seraient obligatoirement prélevés sur le montant disponible pour le soutien de la recherche approfondie dans leurs disciplines respectives, semble se fonder en partie sur des précédents. On ne doit cependant pas lui laisser jouer un rôle déterminant dans l'établissement de la ligne de conduite future. L'étude financière montrera plus tard que l'importance des engagements financiers nécessités par la réalisation de l'ING n'exclut pas nécessairement l'aide à fournir à de nombreux autres programmes canadiens. Les appréhensions de certains scientifiques se fondent sur le fait indéniable que quelques domaines de la science et du génie au Canada, y compris certains secteurs concourant au développement de l'énergie nucléaire, se sont trouvés dans l'impossibilité d'obtenir un soutien financier dont l'importance aurait répondu aux vœux de leurs protagonistes. Nous n'avons pas à déterminer si le non-développement technique de certains secteurs a été une conséquence du manque d'idées valables, de la pénurie de scientifiques compétents ou d'un défaut dans les méthodes d'attribution des subventions. *Quelles qu'en soient les causes, la situation actuelle exige implicitement que l'octroi d'un soutien à la réalisation de l'ING soit accompagné d'une assurance donnée aux autres cercles de la communauté scientifique qu'un soutien financier serait en principe disponible pour la réalisation de programmes d'intérêt comparable.*

L'évaluation de l'ING par comparaison avec d'autres possibilités dans le domaine des sciences nucléaires est compliquée par le fait que l'ING sera un programme touchant plusieurs disciplines. Il résulte de la méthode proposée que pour réaliser un flux intense de neutrons il est nécessaire de construire un accélérateur linéaire de protons 65 fois plus puissant, au même niveau énergétique final, que la moyenne de celui qui est prévu pour l'accélérateur linéaire de protons du futur “Los Alamos Meson Factory” (LAMPF). Il semble par conséquent qu'il serait dommage de ne pas construire également l'installation nécessaire pour mener des recherches à l'aide de faisceaux de mésons. Le coût de construction de LAMPF, en tant qu'installation spécialisée dans l'étude des mésons, a été estimé à 55 millions, à l'exclusion de nombreuses installations destinées à la réalisation d'expériences particulières.

En outre, en comparant d'autres installations spécialisées, la Commission américaine de l'énergie nucléaire, USAEC, se propose de commencer la construction, au coût de 87 millions et demi de dollars,

d'une installation d'essais à flux de neutrons rapides dans le but primordial de soumettre des matériaux et des éléments d'appareils à l'action de ce flux dans le cadre de leur programme de mise au point de surrégénérateurs. Ce réacteur sera doté d'un flux de neutrons rapides atteignant 10^{16} neutrons /cm²/sec dans certaines régions, générés à un niveau énergétique d'environ 400 mégawatts thermiques. Il n'atteindra pas le niveau de flux de neutrons thermiques qui serait atteint par l'ING et n'aura pas ses possibilités de réglage et de flexibilité pour la recherche expérimentale. Les É.-U. ont déjà construit un réacteur à flux intense de neutrons, spécialement en vue de tenter la fabrication industrielle d'isotopes radioactifs (réacteur HFIR à Oak Ridge). L'installation a coûté 22 millions de dollars et les frais annuels d'exploitation atteignent environ 4 millions de dollars. La réalisation d'un réacteur de 1000 MW générant un flux intense de neutrons thermiques similaire à celui de l'ING coûterait au moins 100 millions de dollars, et ses frais d'exploitation annuels atteindraient 15 millions de dollars.³⁰

En vue d'évaluer un programme aux aspects si nombreux, on a essayé d'estimer les bénéfices scientifiques et technologiques qu'en tireront les diverses disciplines et entreprises, en fonction des emplois respectifs et sur la base du coût des installations rendant des services équivalents.³¹

Cette méthode est très approximative en mettant les choses au mieux, et les progrès scientifiques réalisés jusqu'au moment où le générateur entrera en fonctionnement complet, c'est-à-dire en 1973 pour la mise en marche à pleine puissance, et en 1980 pour le plein emploi en recherches, pourraient bien déplacer considérablement le choix des facteurs déterminants. Les principales disciplines intéressées sont indiquées au tableau n° 2, sous réserve des observations précédentes. La part de chacune d'elles est indiquée en pourcentage approximatif du total.³²

³⁰ Note des Laboratoires nucléaires de Chalk River: G.A. Bartholomew le 28 novembre 1966

³¹ Notes des Laboratoires nucléaires de Chalk River: G.A. Bartholomew, le 28 novembre 1966, T.G. Church, le 29 novembre 1966

³² Les chiffres ont été quelque peu modifiés en comparaison de ceux qui sont mentionnés dans les notes précédentes, à la suite de discussions avec les auteurs de ces notes et avec les conseillers scientifiques du Comité. Le nombre particulièrement élevé de physiciens nucléaires universitaires s'intéressant à l'installation de recherches sur les mesons représente, selon M. Bartholomew, le nombre de physiciens de tout endroit au monde qui pourraient se servir de l'installation, et non seulement le nombre de physiciens des universités canadiennes qui se présenteraient. Le nombre mentionné a par conséquent été réduit pour mieux représenter les physiciens nucléaires canadiens qui s'intéresseraient à l'installation. En même temps, un personnel scientifique supplémentaire a été classé comme travaillant dans les sciences de base des accélérateurs, conformément à ce que l'on a noté aux installations de Brookhaven et de SLAC.

La physique nucléaire fondamentale et les sciences fondamentales de la matière sont d'une importance similaire, et constituent dans leur ensemble 60 pour cent de l'utilisation totale. En fait le CRNL estimait que la physique nucléaire en constituait moins de 25 pour cent au début des opérations. Sa croissance plus ou moins rapide que les sciences de la matière dans les quelques années suivantes dépendra entièrement de la nature des progrès scientifiques réalisés le moment venu. Nous avons utilisé le chiffre de 30 pour cent. Les autres bénéfiques d'utilisation iront aux sciences appliquées, à la technologie et à l'industrie, contribuant ainsi aux progrès de la technologie de l'énergie, de la conception des réacteurs et de la production des isotopes, à la recherche et au développement technique des générateurs de haute tension, des générateurs de haute fréquence de très haute puissance et de leur régulation, des supraconducteurs, des sources d'ions à fort débit, et de la physique appliquée des plasmas. Les scientifiques des laboratoires de Chalk River mettent l'accent sur la production d'isotopes, car ils s'attendent à ce que les revenus de leur vente réduisent d'autant les frais d'exploitation annuels, soit de 5 à 10 millions de dollars par an après cinq ou six années de fonctionnement, et qu'ils soient à la source d'une augmentation substantielle des ventes de la Division des produits commerciaux de l'ÉACL.

Tableau n° 2. – Pourcentage d'utilisation possible de l'ING par les diverses spécialités scientifiques ou technologiques

PHYSIQUE NUCLÉAIRE FONDAMENTALE environ 30%

Physique du noyau – interactions fondamentales des neutrons avec les électrons, les protons, d'autres neutrons, fluorescence de résonance des rayons gamma, particulièrement avec les neutrons polarisés, réactions (η , γ)

Physique des mésons – faisceaux de mésons μ et π , faisceaux de neutrons et de protons d'énergie intermédiaire, pour l'étude des réactions nucléaires jusqu'à 1 milliard d'eV.

SCIENCE DE LA MATIÈRE environ 30%

Physique de l'état solide, physique des métaux, chimie nucléaire (transmutation), radiochimie – Diffraction des neutrons thermiques dans les liquides et les solides, vibration de réseaux, excitations électroniques et magnétiques dans les cristaux, faisceaux de neutrons lents pour des études structurales autour des transitions de phase, dislocations, défauts de structure dus aux impuretés, amas d'atomes, neutrons polarisés pour l'étude

structurale et dynamique des matériaux magnétiques, structure des cristaux organiques et des molécules d'origine biologique, nouveaux isotopes, réactions chimiques dans les solides et les liquides excités ioniquement.

Métallurgie, matériaux des réacteurs, blindage, technologie des métaux liquéfiés, supraconducteurs – Comportement des matériaux soumis à de fortes irradiations, dommages dûs à l'irradiation, fluage, corrosion due aux métaux liquéfiés, cavitation.

ÉNERGIE NUCLÉAIRE

environ 10%

Données concernant les réacteurs – Données fondamentales pour alimenter les études de l'ÉACL au sujet des futurs réacteurs, et expérimentation avec ces derniers (réacteurs à flux intense, réacteurs à neutrons rapides, réacteurs sous-critiques de puissance, surrégénération électrique.

GÉNIES DIVERS ET PRODUCTION

environ 30%

Technologie de pointe – Générateurs de haute tension, générateurs à haute fréquence de très grande puissance, dispositifs de réglage de précision et de contrôle, technologie des vides poussés, cryogénie, supraconducteurs, sources d'ions de grande intensité, physique appliquée des plasmas.

Production des isotopes – nouveaux isotopes, et augmentation de la fabrication des produits commerciaux de l'ÉACL, tels le cobalt 60, le polonium 210, le curium 242, le curium 244, le plutonium 238, etc.

L'intérêt que la communauté scientifique dans son ensemble porte à l'objectif principal visé par un générateur de flux intense de neutrons a été indiqué lors de deux colloques internationaux au cours de l'année passée, et a été détaillé dans une note du CRNL.³³

Un extrait de l'une des principales conclusions atteintes par ces colloques est utile à reproduire:

³³ G. A. Bartholomew. "Need Re-Affirmed for Intense Fluxes of Thermal Neutrons" (Réaffirmation de la nécessité de posséder une source de flux intense de neutrons thermiques). 10 pages, 8 décembre 1966. Les colloques mentionnés étaient les suivants: Réunion traitant des applications en recherche des accélérateurs intermédiaires et des réacteurs pulsés à impulsions répétées, Dubna, URSS, du 18 au 21 juillet 1966, sous les auspices de l'Agence internationale de l'Énergie atomique; Colloque sur les sources intenses de neutrons, Santa-Fé, Nouveau-Mexique, E.-U., septembre 1966, sous les auspices du Comité européen des données nucléaires et du Comité Europe-Amérique de physique des réacteurs.

“Par contraste avec la situation actuelle, l'accélérateur à faisceau à forte densité de protons, fondé sur le principe de l'évaporation et de la spallation neutronique, pourrait après un développement technique convenable fournir la plus puissante source de neutrons de toute une gamme d'énergies allant jusqu'à 1 000 MeV (un flux de neutrons ther-miques atteignant 10^{17} à 10^{18} neutrons/cm²/s pourrait être réalisé). Le grand intérêt que présentent les sources intenses de neutrons constitue un fort stimulant pour la réalisation de telles machines.”

L'intérêt d'un programme de recherches aux énergies intermé-diaires à l'aide de mésons a été présenté dans son ensemble et avec brio par L. Rosen, qui travaille aux Laboratoires de Los Alamos.³⁴

Au sujet des recherches avancées en électromagnétisme, le grand physicien russe P. Kapitsa, directeur de l'Institut des questions de physique de Moscou, fit à la presse rassemblée quelques remarques concernant les recherches qui l'intéressent. “Science” les reproduit comme suit:³⁵

“Kapitsa demande qu'on réalise plus de recherches sur la transmission de grandes quantités d'énergie électrique, 1 000 MW par exemple, par guide d'ondes, mais il reconnaît aussi que l'emploi de guides d'ondes pour la transmission d'énergie électrique ne pourra être réalisée que lorsqu'on disposera de supraconducteurs à température ambiante, ou à son voisinage.

Kapitsa prévoit un futur énorme pour des applications de la physique des basses températures, telles que le développement tech-nique des supraconducteurs qui permettront la production économique de champs magnétiques très intenses dans les accélérateurs ou les générateurs de courant électrique, les émetteurs de micro-ondes et les générateurs magnétohydrodynamiques.”

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que le générateur de flux neutroniques intenses constitue le but primordial du programme de l'ING. D'autres installations fournissant d'abondantes quantités de mésons seront érigées au cours des six ou sept prochaines années. Le coût croissant des accélérateurs nucléaires doit éviter le doublement des installations et nécessite l'institution d'une collaboration inter-nationale pour l'utilisation des installations qui se complètent l'une l'autre. En conséquence, le Comité approuve la conduite prévoyant que le Canada réalisera une installation spécialisée qui sera accessible

³⁴ L. Rosen. “Meson factories” (Usines à mésons), “Physics Today”, décembre 1966, p. 21-36.

³⁵ “Science”, 12 août 1966, p. 726.

aux scientifiques étrangers en contrepartie de la possibilité pour les scientifiques canadiens de réaliser certaines de leurs expériences dans les grandes installations étrangères. Cette conduite doit particulièrement convenir à la physique des particules à haute énergie. Le Comité favorise la construction de l'ING plutôt que celle d'un accélérateur de haute puissance dont le prix serait semblable à celui de l'ING ou tout au moins bien supérieur à sa moitié, et dont le rendement serait inférieur à celui de l'accélérateur à 200 milliards d'électrons volts que les É.-U. vont construire, et même ne ferait guère mieux que les accélérateurs du CERN, de Brookhaven, de Daresbury, de Stanford, de Cambridge, de Princeton, de Desy, d'Agonne, etc. Cette voie dépend bien entendu de la possibilité pour les scientifiques canadiens étudiant les particules à haute énergie de recevoir tout l'appui nécessaire pour réaliser des expériences dans quelques installations nucléaires américaines, et d'y être accueillis. Cet accueil serait assuré par une substantielle participation canadienne au financement des installations américaines, mais une meilleure ligne de conduite consiste à se trouver en position d'offrir une contrepartie, en autant que nous pouvons nous le permettre, et de posséder une installation au moins sur laquelle le Canada aura la haute main.

Le diagramme de la figure 3 indique quelles seront les dépenses totales concernant la physique nucléaire fondamentale, y compris le programme de l'ING. L'extrapolation s'étend jusqu'en 1980, et elle se fonde sur les conclusions du Comité de prévision du Conseil national de recherches au sujet des universités, ainsi que sur une estimation raisonnable de l'extension des programmes internes du CNR et de l'ÉACL. On obtient ainsi une certaine perspective du poids financier de l'ING, qui pourrait affecter les recherches scientifiques *fondamentales*. Les frais entraînés par l'installation TRIUMPH sur le littoral du Pacifique sont inclus dans la prospective, ainsi que l'installation future possible d'un accélérateur inter-universitaire dans l'ouest de l'Ontario par suite de recherches au sujet des générateurs de très hautes tensions, et l'augmentation de la participation des physiciens canadiens aux expériences menées hors du Canada sur les particules à haute énergie. On a fait l'évaluation du financement de la recherche dans les universités par les gouvernements fédéral et provinciaux, en vue d'ajouter son montant à celui qui concerne les laboratoires des organismes publics. On a indiqué pour comparaison le montant de l'aide des É.-U. à la physique nucléaire fondamentale, y compris la physique des particules à haute énergie.

Il est nécessaire de donner quelques éclaircissements sur la façon dont les chiffres ont été calculés, car il est important de

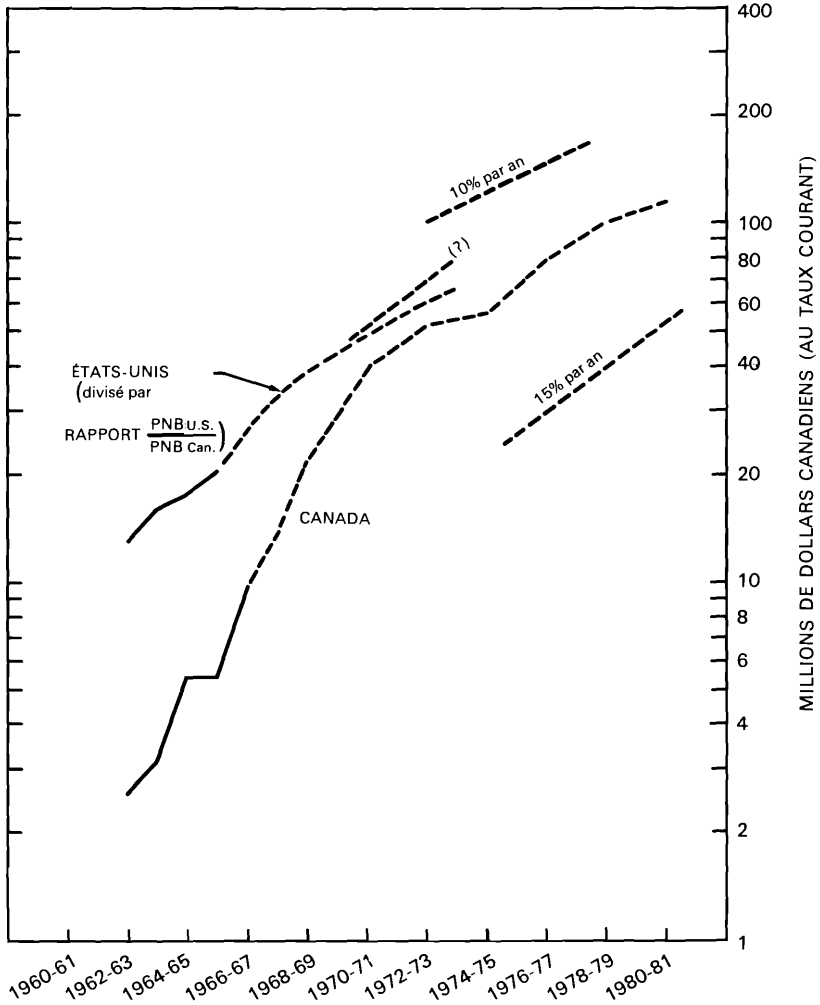


Figure 3 PROJECTION DES DÉPENSES AFFECTANT À LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE FONDAMENTALE (y compris la physique des hautes énergies).

Note: Les montants canadiens comprennent 11 installations universitaires, Chalk River, NRC, ING, TRIUMF, Projet du Sud-Ouest de l'Ontario et une certaine utilisation d'installations américaines à haute énergie. Les frais indirects de la recherche universitaire ont été estimés pour qu'ils s'ajoutent à ceux des laboratoires gouvernementaux. On a inclus dans les montants américains les frais indirects estimés et les contributions non-fédérales pour que la comparaison soit possible.

connaître les facteurs qui peuvent en altérer l'exactitude, et pour ne pas attacher trop d'importance aux dissemblances entre les courbes concernant le Canada et les É.-U. on a utilisé la formule établie par

le Comité du Conseil national de recherches, présidé par le Professeur Bonneau, pour le calcul de l'aide générale aux universités, en vue d'évaluer le coût total de la recherche dans les universités; le montant des subventions du gouvernement fédéral a été simplement doublé. Le montant des besoins futurs des universités, tels que ces dernières l'ont établi pour le Comité du Conseil, est très approximatif, et on a tenté de prévoir les dépenses pour un futur plus lointain que celui que les universitaires ont coutume de contempler. Les évaluations ont été établies en dollars constants de 1966. Le montant concernant l'ÉACL a été établi à 3 millions de dollars, montant constant comprenant les dépenses d'exploitation et d'investissement. On donne ainsi à entendre que l'activité déployée pour mener à bien les programmes de types actuels, en physique nucléaire pure, décroîtra graduellement au fur et à mesure que le programme de l'ING prendra son essor. La proportion des dépenses de l'ING concernant la physique nucléaire fondamentale atteint 30 pour cent selon l'analyse donnée au paragraphe 2.1 (b). Le coût de l'ING, calculé en dollars constants de 1966, sont ceux établis au paragraphe 2.4. Pour finir, les montants totaux furent augmentés de 5 pour cent par année, selon la méthode américaine, afin que les courbes puissent être comparées, les facteurs étant similaires.

Les montants concernant les É.-U. n'étaient disponibles nulle part sous cette forme, et il a fallu les calculer à l'aide des statistiques accessibles et de nombreuses estimations et déductions. Le facteur principal d'incertitude était le niveau de recherche nucléaire fondamentale que les universités américaines sont disposées à soutenir sous la rubrique "Recherches et enseignement dans les facultés". Les relevés américains n'ont jamais donné ces détails, et nous ne connaissons pas les bases de l'affirmation du Rapport Pake³⁶ (Enquête sur la physique aux É.-U.), selon laquelle l'aide d'origine non fédérale dans le domaine de la physique des particules à faible énergie a atteint environ un tiers des coûts de construction et un sixième des frais d'exploitation dans les universités.

Cette affirmation peut s'appliquer à ce que l'on définit habituellement aux É.-U. comme étant la recherche à budget autonome dans les universités, et qui ne comprend pas les recherches réalisées dans les facultés. Il existe un autre trait important de la courbe concernant les É.-U. L'extrapolation concernant les années postérieures à 1968 indique que les montants n'augmenteront que de 10 pour cent par an,

³⁶ "Physics: Survey and Outlook", National Academy of Sciences, Publication du National Research Council, n° 1295. Washington, 1966.

bien qu'antérieurement et pendant longtemps la physique nucléaire ait bénéficié d'un accroissement de financement atteignant 16 pour cent par an. Nous ne pouvons être certains que ce fait révèle un changement de ligne de conduite imposé par la guerre au Vietnam et autres soucis, ou qu'il reflète simplement l'habitude prospective trop modeste qui est dépassée par les faits. Il existe pourtant certaines indications que le premier cas est le plus vraisemblable, bien que le dernier facteur ne soit certainement pas entièrement absent. Le point d'interrogation flanquant la courbe extrapolée concernant les É.-U. à la figure 3 reflète cette incertitude.

Le montant des dépenses des É.-U. a été divisé par le rapport entre le produit national brut du Canada et celui des É.-U. pour que les montants, exprimés en dollars canadiens, puissent être comparés.

Il est remarquable que la courbe de prospective du Canada se rapproche fortement de celle des É.-U. (rapport 8/10) vers 1972, compte tenu des produits nationaux bruts. Bien que les buts prioritaires choisis par d'autres pays ne soient pas nécessairement valables pour le nôtre, et que les estimations des montants puissent être fortement entachées d'erreur, les courbes sont suffisamment rapprochées pour susciter un second examen. Le Comité découvre deux raisons d'inquiétude. Tout d'abord, le Canada ne réalise qu'un total bien plus faible de recherches appliquées et de développement technique que les É.-U. En outre, il y a eu de nombreuses plaintes de la part de scientifiques canadiens en physique nucléaire soutenant que le rendement de leurs recherches avait été entravé par le manque de fonds pour dépenses d'exploitation, et qu'ils n'avaient pu tirer le maximum de leurs accélérateurs actuels. En d'autres termes, les physiciens nucléaires pourraient bien souffrir maintenant des séquelles de l'ancienne ligne de conduite qui favorisait la construction d'un trop grand nombre d'accélérateurs ou ne prévoyait pas de fonds suffisants pour leur exploitation, ou les deux à la fois. Bien qu'il existe sans aucun doute certains groupes méritants qui ne devraient pas être pénalisés pour les erreurs d'autres groupes moins méritants, le Comité est d'avis que le gouvernement ne devrait agir qu'avec prudence et qu'il devrait prendre ces faits en considération avant de répondre à toutes les parties des demandes de fonds.

En dépit des paroles de prudence précédentes, il est bon de faire remarquer que le rapprochement des courbes des É.-U. et du Canada découle des dépenses transitoires de construction d'ING et de TRIUMPH, et il se peut que plus tard les deux courbes divergent de nouveau. Ces deux courbes ne sont que des extrapolations, et bien

entendu elles pourraient être fortement modifiées par les événements ou les changements de ligne de conduite dans l'intervalle.

Le Comité a remarqué qu'il se produit un très important accroissement des recherches en physique nucléaire dans les universités, qui est reflété par la courbe, et que le diagramme de la figure 4 du paragraphe suivant montre encore plus clairement. Les installations de Chalk River ne dominent plus la scène, même avec le renfort de l'ING, et vers 1975 plus de 80 pour cent des recherches en physique nucléaire fondamentale au Canada seront réalisées par des scientifiques travaillant dans les universités. Dans ces circonstances, le fait que le Canada atteigne un niveau de recherche nucléaire fondamentale comparable, toutes proportions gardées, à celui des É.-U., mais que son niveau de recherches appliquées soit bien plus faible, pousse le Comité à favoriser la réalisation de l'ING plutôt que celle d'autres installations, parce que l'ING suscitera des travaux considérables de technologie nucléaire et l'emploi des équipes de recherche appliquée et de développement technologique de l'ÉACL. Bien que l'ING doive intéresser fortement les chercheurs universitaires en sciences fondamentales, ce programme sera loin de constituer une entreprise purement universitaire.

Il n'a pas été possible d'établir des comparaisons pour les autres domaines scientifiques principaux touchés par l'ING, car les données comparables manquaient. La physique nucléaire a été choisie également car c'est un domaine auquel on accorde trop d'importance, à en croire ce que l'on entend de temps en temps. Les relevés de comparaison, tel le CAP Statistical Survey de 1964, ("Physics in Canada, numéro spécial, 1965) ont montré que dans d'autres domaines, la physique de l'état solide, la technologie de la matière, l'électronique et l'électromagnétisme, par exemple, le niveau des recherches réalisées au Canada est trois à quatre fois plus faible que celui des É.-U., toutes proportions gardées, et cette situation a été une cause d'inquiétude pour la communauté scientifique canadienne. En conséquence, la réalisation du programme de l'ING, qui suscitera de nombreux travaux scientifiques dans ces domaines, sera la bienvenue, et ne risquera pas de bouleverser l'équilibre des disciplines scientifiques*

* On ne doit pas en déduire que le Comité considère un tel équilibre des disciplines comme une base saine pour l'établissement d'une ligne de conduite scientifique. Le Dr C J Mackenzie a déclaré ce qui suit: "Les nations moyennes comme le Canada découvriront bientôt qu'aucun pays ne peut espérer explorer tous les secteurs possibles des sciences; tout pays qui suit une telle ligne de conduite est destiné à la médiocrité scientifique, car ses ressources matérielles et humaines étant trop dispersées il lui est impossible d'atteindre à l'excellence en un seul domaine."

En résumé, le Comité pense que l'ING constitue un excellent programme par son envergure scientifique, la profondeur des recherches qu'il suscitera et le nombre des techniques qu'il mettra à contribution et développera. Le programme fournira une installation de base pour un laboratoire national canadien qui pourrait faire d'importantes et notables contributions à la science mondiale, et aiderait ainsi à maintenir le Canada dans la position de participant à l'échange mondial des idées.

c) Importance pour les universités

On saisit de plus en plus nettement qu'il est possible de gagner sur deux tableaux en associant les laboratoires de recherches d'un organisme public avec les établissements universitaires. L'influence d'esprits jeunes et dynamiques, aux études supérieures, pourrait prévenir la sclérose guettant les scientifiques qui poursuivent des recherches fondamentales dans les laboratoires des organismes publics. Les maladies professionnelles y sont la stagnation mentale et un trop grand souci des méthodes bureaucratiques. D'un autre côté, les laboratoires d'un organisme public peuvent offrir quelque chose aux chercheurs universitaires, au cas où une forte personnalité, une brûlante question scientifique ou le sentiment d'une mission à accomplir auraient formé un personnel possédant compétence, énergie et motivation, caractéristiques des meilleurs types d'instituts de recherches. Le laboratoire peut fournir aux chercheurs universitaires et aux étudiants la possibilité d'utiliser des installations exceptionnelles et de ressentir la joie de la recherche de pointe à plein temps; ses scientifiques les plus marquants peuvent participer dans un programme d'échanges ou exposer leurs idées dans les universités. Ce genre d'interaction a été clairement exposé dans un article préparé par l'OCED³⁷ et cette tendance est illustrée en pratique par les succès des Laboratoires Rutherford en Grande-Bretagne, et par ceux des laboratoires de Brookhaven, Lawrence, Oak Ridge et Argonne aux É.-U.

Il n'est pas surprenant, en conséquence, de voir que l'ÉACL désire établir un organisme pour s'occuper du programme de l'ING, auquel les universités pourraient participer plus activement qu'elles n'ont pu le faire avec les Laboratoires nucléaires de Chalk River. Le Comité ne connaît aucune raison de douter de la sincérité de l'ÉACL à ce sujet. Un paragraphe ultérieur traitera des problèmes qui se poseront pour préciser les caractéristiques de l'organisme qui

³⁷ "Recherche fondamentale et politique gouvernementale" Organisation pour la coopération économique et le développement, Paris, 1966.

assurera une collaboration efficace et harmonieuse entre les scientifiques utilisant l'ING et ceux des universités.

L'utilité du programme de l'ING pour la recherche universitaire dépend des facteurs suivants:

- 1) le programme doit avoir l'importance scientifique nécessaire et le caractère exceptionnel qui attireront les chercheurs universitaires loin de leur université pour utiliser ses installations;
- 2) il ne doit pas entraîner un tel appel de fonds et d'hommes qu'il réduirait les sommes disponibles pour les recherches de petite envergure, mais pourtant importantes, qui sont réalisées dans les établissements universitaires, ou qu'il forcerait la participation de scientifiques dont les intérêts se portent ailleurs;
- 3) il devrait de préférence se rattacher à des disciplines pour lesquelles les universités disposent d'installations. Un sain dialogue est meilleur qu'un soliloque dominateur.

En ce qui concerne la première condition, les critères ne sont pas différents de ceux qui ont été étudiés au paragraphe traitant de l'importance du programme de l'ING pour la communauté scientifique. Une installation d'envergure internationale constituerait certainement un centre d'attraction pour les scientifiques à l'intérieur du pays.

Au sujet de la seconde condition, il est indispensable de distinguer entre les rôles que le programme assumerait a) face à l'ÉACL, b) en tant que Laboratoire national et c) comme installation utilisée par les cercles de la recherche universitaire.

Le premier souci de la communauté universitaire sera d'éviter que le programme ne monopolise la scène de la recherche, gênant le développement d'excellents travaux de recherche dans les universités par ses appels de fonds et de talent. C'est seulement au sujet de la physique nucléaire qu'on a posé la question d'une concentration excessive des moyens du Canada pour la recherche, et en conséquence c'est le seul domaine qui pourrait se voir imposer des limites de croissance, entraînant des conséquences fâcheuses pour les chercheurs universitaires.

La courbe prospective du total des dépenses canadiennes en physique nucléaire fondamentale (figure 3) a été décomposée en ses éléments constitutifs pour évaluer les possibilités que ces craintes puissent être justifiées. Les éléments sont indiqués en pourcentage du total, au long des années qui viendront. Les résultats sont reportés

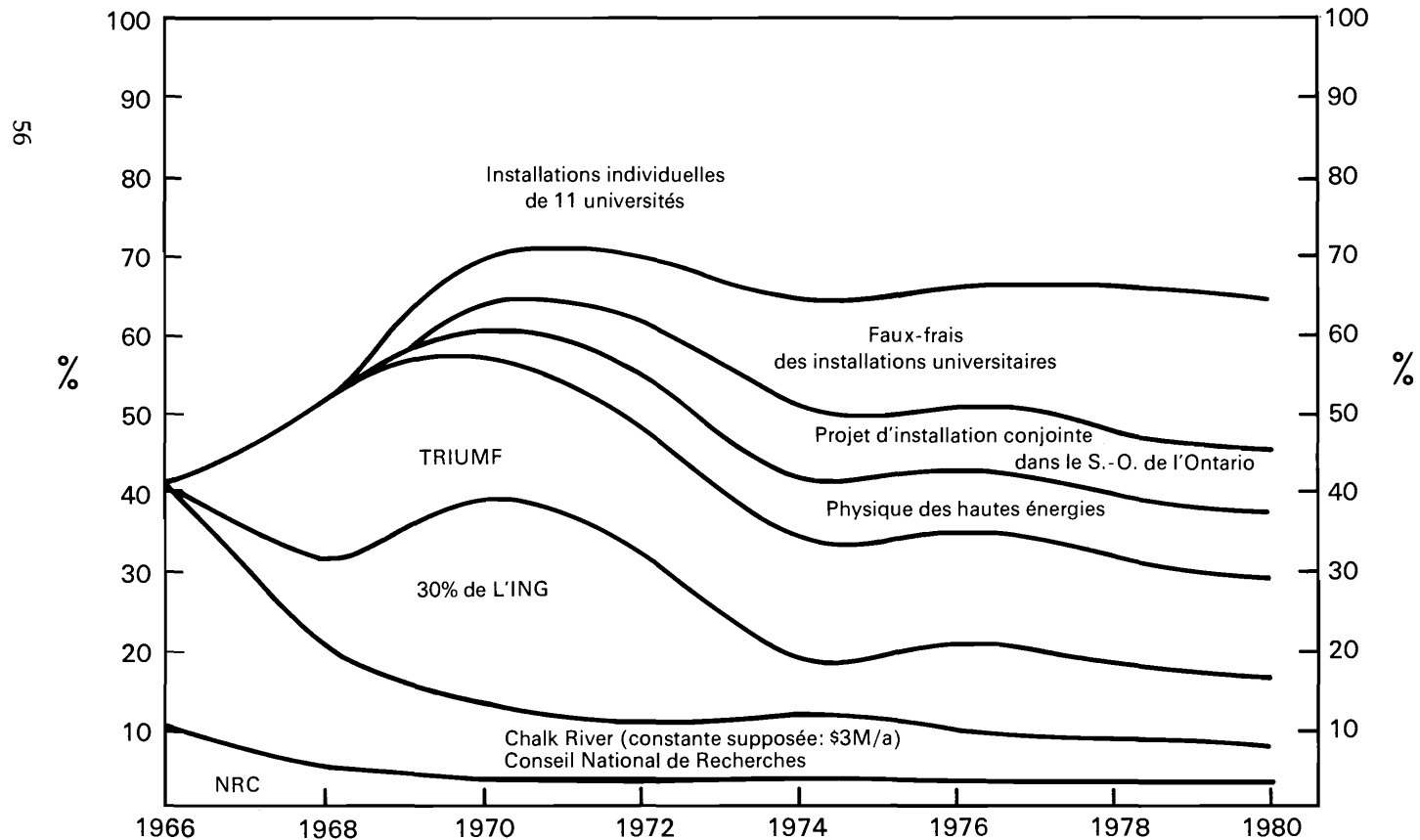


Figure 4 RÉPARTITION ESTIMÉE EN POURCENTAGE DES MONTANTS QUI SERONT ALLOUÉS DANS L'AVENIR AUX TRAVAUX DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE FONDAMENTALE.

Note: Les frais indirects estimés sont compris dans les chiffres donnés pour les universités, les faux-frais, TRIUMF, le S.-O. de l'Ontario et la Physique des hautes énergies.

à la figure 4. Ces prospectives doivent être considérées comme très approximatives actuellement. La proportion du programme de l'ING qui dépendra de la participation universitaire en physique nucléaire fondamentale atteindra environ la moitié de l'élément constitutif indiqué, qui à son tour constitue 30 pour cent du coût total de l'ING. Ainsi, au cours de la période de stabilité hypothétique qui suivra la construction de l'ING et de TRIUMPH (en avril 1967 rien n'était décidé pour ce dernier), soit vers 1975 ou 1976, environ 80 pour cent des dépenses nationales pour les recherches nucléaires fondamentales seront consacrés à la recherche universitaire et environ 10 pour cent de ce montant serviront à l'utilisation des installations de l'ING. Il ne semble pas que ces besoins soient excessifs et gênent le financement des installations de recherche des universités. On peut remarquer, en examinant la figure 4, que TRIUMPH comptera pour 20 pour cent environ des dépenses de recherche universitaire.

Le Comité consultatif de l'ING a recherché quels seront les domaines qui intéresseront les chercheurs universitaires utilisant les installations de l'ING. Les voici:

- 1) Physique des mésons.—Les recherches sur la structure du noyau seront poussées dans le domaine des niveaux énergétiques intermédiaires (de 100 à 1,000 MeV). Si TRIUMPH est construit, il constituera la seule autre installation canadienne où ces recherches pourront être menées à bien. Il se produirait un certain partage des travaux, car un pour cent seulement du faisceau de l'ING à pleine puissance, dirigé vers un générateur de mésons, fournirait un flux de mésons mu trente fois plus puissant que celui de TRIUMPH. Les physiciens canadiens du méson se sont trouvés divisés par leurs préférences. Certains auraient préféré une plus petite installation réservée à leur usage, munie de réglages précis et à l'abri le plus possible des radiations extérieures. D'autres préfèrent jouir de la liberté de déplacement pour entreprendre leurs expériences avec l'installation disponible qui convient le mieux à leurs desseins, y compris celle de Los Alamos (LAMPF) et de l'ING. Il n'entre pas dans les attributions du Comité de décider si les scientifiques canadiens pourront disposer d'une, de deux ou des trois possibilités de la combinaison ING-TRIUMPH-installation étrangère. Il n'y a aucun doute que l'installation de l'ING serait utilisée par une forte proportion des chercheurs universitaires qui s'intéressent à la physique des mésons.

- 2) Physique des particules à haute énergie. C'est l'étude des particules élémentaires nécessitant des énergies dépassant un milliard d'électron-volts. Le but est en fait d'analyser la structure des neutrons, des protons et des électrons, que nous considérons il y a quelques années comme des particules ultimes. Les phénomènes qui révèlent les caractéristiques de leur structure commencent avec l'apparition des divers types de mésons à des énergies dépassant 400 MeV. Quelques études utiles dans le domaine de la physique des particules à haute énergie peuvent être menées à bien dans la gamme 400 – 1,000 MeV, et en particulier celle des rayons X dûs aux muons. Ainsi l'ING servirait à réaliser quelques expériences importantes, bien qu'il ne puisse satisfaire à tous les besoins ou les désirs des physiciens canadiens s'intéressant au domaine des particules à haute énergie.
- 3) Physique fondamentale des neutrons. Les accélérateurs linéaires d'électrons des universités de la Saskatchewan et de Toronto peuvent produire des bouffées très brèves et très intenses de neutrons, et selon l'orientation que leur extension prendra plus tard, ils pourraient bien être utilisés conjointement avec l'ING, par exemple pour l'étude des réactions (n, γ).
- 4) Physique de l'état solide.—L'étude de l'état solide et de l'état liquide de la matière par la diffusion élastique ou inélastique des faisceaux de neutrons a attiré l'attention mondiale sur les Laboratoires de Chalk River; ce programme a été continué à l'Université McMaster par un des anciens de Chalk River, le professeur B.N. Brockhouse, qui a organisé un fort groupe d'étudiants diplômés spécialisés dans ce domaine. On peut s'attendre à ce que le groupe entreprenne des recherches avec l'ING. Le groupe d'études de l'état solide en cours de formation à l'Université Dalhousie a exprimé son intérêt pour l'ING, et l'Université Simon Fraser en Colombie-Britannique en a montré quelques velléités. En général la physique de l'état solide s'est développée lentement dans les universités canadiennes, et l'on peut s'attendre à une extension considérable des recherches par diffusion des neutrons et autres méthodes au fur et à mesure que les universités se tourneront vers ce domaine.
- 5) Étude des matériaux, métallurgie.—Les problèmes posés par la cible de l'ING, les difficultés de contenir et de pomper les alliages métalliques très chauds et fortement radioactifs, constituent des obstacles redoutables. Les métallurgistes,

les spécialistes des matériaux et les physicochimistes de tout le Canada devront affronter une large gamme de difficultés scientifiques et techniques au fur et à mesure que les études et les expériences seront entreprises. Plusieurs des experts concernés feront partie du personnel enseignant universitaire, et intéresseront leurs étudiants diplômés à leurs travaux.

- 6) Problèmes de génie électrotechnique et électronique. Le département de génie électrique de l'Université de Toronto, encouragé par le CRNL, a entrepris un programme de recherches sur des méthodes spéciales de génération de courant continu à haute tension. Il est possible que les résultats en seront utilisés pour l'élaboration du premier étage d'accélération de l'ING. D'autres questions de génie avancé, comme le tracé des étages de l'amplifon, concernent déjà des membres des facultés de génie de l'Université de l'Alberta et de l'École Polytechnique de Montréal. Quelques questions relevant de la conception de l'appareil sont étudiées à l'Université de la Colombie-Britannique et à l'Université de la Saskatchewan.

On peut s'attendre à ce que les universités s'intéressent plus vivement au programme de l'ING et que leurs projets se précisent au fur et à mesure que sa réalisation deviendra plus certaine, et que sa mise en fonctionnement se rapprochera.

En dépit de leurs assurances et de leurs manifestations d'intérêt, il faut cependant se souvenir que les universitaires ont un fort penchant pour restreindre leur activité à leur propre université. La chose est bien naturelle, en raison de leur horaire de cours, des nombreuses tâches dont ils sont chargés et de leurs préoccupations, mais elle souligne le fait qu'il n'est pas facile d'obtenir la participation effective des chercheurs universitaires à la réalisation d'expériences dans une installation de recherches nationale. Cette collaboration exige de grands encouragements, financiers ou autres. Les facilités d'accès seront déterminantes, et l'étude de ce facteur sera faite plus tard, en déterminant si l'emplacement de l'ING sera à Chalk River ou ailleurs.

d) Importance pour l'industrie

Le président du Conseil des sciences a envoyé une lettre aux autorités du Ministère de l'Industrie le 13 décembre 1966, dans laquelle il demandait l'aide des spécialistes du Ministère pour évaluer les conséquences que la réalisation de l'ING pourrait avoir pour l'industrie

canadienne. Le Ministère de l'Industrie a donné suite très aimablement à la lettre en formant un groupe d'études sous la Direction du conseiller en recherche industrielle. Le groupe d'études, formé de spécialistes de diverses Directions, a discuté de la question en détail avec le personnel des Laboratoires nucléaires de Chalk River, et avec la direction d'autant de firmes industrielles représentatives que le temps disponible lui a permis. Son rapport a été transmis au Comité au début de mars. Il est reproduit dans l'appendice III, avec l'accord du Ministère de l'Industrie.

Le rapport a été d'une aide considérable pour le Comité et a reçu une attention particulière parmi les sujets étudiés.

L'étude de l'influence sur l'industrie de la réalisation de l'ING peut être divisée commodément en trois périodes: 1) pendant la construction 2) immédiatement après la construction et 3) à long terme. La première période porte surtout sur les effets immédiats des dépenses engagées et des exigences en compétence canadienne. Au cours de la deuxième période, l'accent portera sur le succès que l'industrie remportera en tirant profit des nouvelles possibilités de production et des nouvelles techniques, qu'elle aura eu à mettre au point pour élaborer les éléments de l'ING et construire l'installation, afin de maintenir son chiffre d'affaires et s'ouvrir de nouveaux marchés. La troisième période se rapporte surtout aux nouveaux produits industriels et aux nouvelles techniques qui auront pris naissance grâce aux résultats des recherches menées avec l'ING, et à leurs effets sur l'industrie canadienne. Les extraits entre guillemets reproduits ci-dessous proviennent du rapport du Ministère de l'Industrie, à moins qu'il n'en soit indiqué autrement.

1) *Effets au cours de la construction.*

a) Érection des bâtiments, aménagement des terrains, et services annexes.

“Les bâtiments et terrains, et leurs services annexes réclameront les efforts de l'industrie canadienne de la construction, mais ne poseront en général aucun problème en raison des capacités actuelles de l'industrie. Certaines exigences spéciales devront être satisfaites, particulièrement au sujet du blindage des radiations, de la ventilation et du filtrage de l'air, et d'autres mesures de protection du personnel; l'industrie canadienne a déjà satisfait à ces exigences pour nombre d'installations comportant un niveau élevé de radiations, et ne devrait pas éprouver de difficulté à le faire de nouveau.”

“...Les dépenses totales (pour couvrir les frais de construction autres que ceux du générateur) atteignent 47 millions de dollars, qui sont répartis sur une période de cinq années, si nous supposons que les bâtiments et services annexes doivent être prêts deux ans avant la mise en fonctionnement du générateur. L'effet sur l'économie de l'industrie concernée de cet apport annuel de 9.2 millions ne sera guère différent de celui qui serait produit par l'apport de la même somme destinée à la construction de logements ou de bureaux. Il est entendu que les plans des bâtiments prévoient une régulation complexe de la température, de l'humidité et de la ventilation et incluent des dispositifs avertisseurs de toute défaillance des régulateurs d'ambiance dans les zones dangereuses. Les pratiques habituelles en construction de logements et de bureaux devront être modifiées pour suivre un cahier des charges beaucoup plus strict au sujet de la régulation d'ambiance. Les industries du chauffage, de la ventilation et de la climatisation devront faire un effort pour rencontrer des spécifications plus exigeantes.

b) Frais des travaux d'ingénieurs et de direction.

“Le total des frais des bureaux d'ingénieurs et de gestion a été estimé à 11.7 millions de dollars, ou environ 16 pour cent du coût total du générateur. Ils consistent en frais de gestion, estimés à 4.5 pour cent pour tous les éléments du générateur, et en frais de travaux de génie, qui peuvent se situer entre 7.5 et 20 pour cent, selon les problèmes de génie qui devront être résolus et le niveau de développement technique désiré. Ces évaluations ont été faites par la Shawinigan Engineering Company à la demande du CRNL, en se basant sur son expérience antérieure avec d'autres programmes importants de génie nucléaire. Le plan d'ensemble et les plans détaillés seront établis en deux phases successives: “Le CRNL réunira un groupe d'environ 30 ingénieurs qui établiront un plan directeur en y mentionnant des détails suffisants pour leur permettre de surveiller efficacement les travaux. La plus grande partie des études seront cependant réalisées par un certain nombre de firmes liées par contrat avec l'ÉACL, à raison d'une par groupe d'appareils. On estime que l'ensemble de ces firmes emploiera environ 120 ingénieurs pour exécuter le travail. Le personnel total d'ingénieurs, tant pour le CRNL que pour les industries, passera d'environ 60 en 1968 à un maximum de 150 en 1970, pour retomber à 25 vers 1974. On a l'intention de ne prendre en considération que la candidature des firmes canadiennes pour la réalisation des installations les plus importantes, et le CRNL ne s'attend pas à rencontrer la moindre difficulté pour trouver des entrepreneurs acceptables. Plusieurs firmes américaines ont fait des démarches auprès du

CRNL à ce sujet et ont été informées que les travaux seraient exécutés par des firmes canadiennes. Il pourrait être nécessaire cependant de confier certaines études spécialisées très difficiles à une firme américaine.”

c) Pièces du générateur et groupes d'appareils.

Les éléments du générateur que l'industrie canadienne se sent capable de fabriquer coûteraient 51 millions de dollars, soit 78 pour cent du total. Cette affirmation doit cependant être acceptée avec prudence. Il n'y a aucun doute que l'industrie canadienne pourrait concevoir et fabriquer la plus grande partie du générateur; cependant cette réalisation en majorité canadienne nécessiterait l'installation de gros équipement supplémentaire, l'amélioration des possibilités techniques, la réalisation de travaux de recherche appliquée et de développement technique pour surmonter les difficultés inattendues. L'industrie a fait savoir que des recherches techniques seraient nécessaires pour la réalisation de pièces pour un montant atteignant 75 à 80 pour cent du total.

Les investissements supplémentaires en équipement devraient atteindre de 4 à 8 millions de dollars. Il est plus difficile d'évaluer la précision avec laquelle l'industrie canadienne a estimé ses propres capacités.

“Le cahier des charges très strict et le haut rendement exigé tant des pièces que de l'installation complète prendra un certain nombre de firmes par surprise, tout comme lors de l'exécution des programmes spatiaux. Ces firmes se diront tout à fait capables de faire face aux exigences de l'ING dans certains domaines, parce qu'elles le croiront. Mais cependant au moment de réaliser l'appareil, la firme concernée pourrait bien découvrir qu'elle est incapable d'y parvenir sans d'autres travaux d'études et de développement technique, ou sans un meilleur contrôle de la qualité de la fabrication, ou même tous les deux.”

Des événements semblables se sont produits naguère, comme lors de la fabrication des batteries d'accumulateurs au nickel-cadmium pour l'Alouette-I, et celles des pompes à fluide caloporteur des réacteurs nucléaires. L'ÉACL peut en fait citer de nombreux cas où les exigences techniques avancées des installations de recherche et d'essais des prototypes atteignaient la limite des possibilités de l'industrie, et même quelquefois les dépassaient jusqu'à causer des embarras financiers aux deux parties en cause. Ces difficultés ne

sont cependant pas réservées à l'industrie canadienne; aux États-Unis elles ont gêné tous les programmes de recherches avancées, tels ceux de recherche spatiale, de réseaux de défense et de physique des particules à haute énergie. Les experts-conseils du Comité ont cité nombre d'exemples concernant leurs propres projets à Brookhaven et à Stanford.

Bien que cette situation soit embarrassante pour la firme qui a calculé les coûts de réalisation, elle a également ses bons côtés. L'amélioration obligatoire des possibilités des firmes, l'élévation de la compétence du personnel technique et de la direction, le renforcement du contrôle de la qualité, l'amélioration des méthodes de fabrication, la mise au point de nouvelles techniques, constituent certains des avantages les plus importants que procure l'exécution de ces grands programmes de l'État. Sans aucun doute, l'accroissement des possibilités des firmes leur ouvre l'accès de nouveaux marchés, et constitue en lui-même un avantage financier.

Notre souci principal concerne deux questions importantes: 1) les coûts de ces accroissements des possibilités techniques des firmes, qui sont des processus éducationnels, ont-ils été suffisamment pris en considération lors de l'établissement des devis? 2) est-ce que l'amélioration des possibilités techniques se produira dans la direction qui servirait d'autres marchés que la construction d'installations d'accélérateurs de particules nucléaires?

En ce qui concerne la première question, le Comité s'appuie avec confiance sur le jugement de l'ÉACL, dont les membres ont acquis une expérience considérable au cours des vingt dernières années par leur collaboration avec l'industrie canadienne qui a réalisé des installations de génie nucléaire avancé. Cependant certaines réserves persistent au sujet de l'importance de l'effort nécessaire pour résoudre les problèmes techniques. Le Comité a exprimé ses vues sur ce point au paragraphe 2.2, et craint que cet effort ne puisse être évalué avec suffisamment de précision avant que d'autres études et essais de praticabilité aient été réalisés. Il n'existera jusque là aucune base pour choisir entre les diverses opinions qui ont été exprimées.

Le paragraphe qui suit traitera du second point, concernant l'existence d'un marché pour les nouvelles possibilités industrielles apparaissant à court terme.

La proportion des fonds qui seront dépensés au Canada pour les travaux d'ingénieurs, la construction des éléments et unités fonctionnelles, l'érection des bâtiments et la préparation des terrains

atteindra 86 pour cent du total, si l'on accepte les pourcentages annoncés de participation canadienne à la construction.

2) Effets se produisant immédiatement après la construction.

Une tournée des industries pouvant être intéressées par les travaux de génie et de construction de l'ING a révélé le manque d'optimisme de leurs dirigeants au sujet des avantages futurs. Deux ou trois appareils spéciaux seulement semblent posséder des possibilités commerciales ailleurs: les générateurs d'ondes à haute fréquence de haute puissance (émetteurs-récepteurs à ondes décimétriques, appareils pour l'armée, chauffage et séchage à haute fréquence), la production et la fabrication de pièces en zirconium (pour les industries chimique et nucléaire) et les pompes à vide (qui en raison de la concurrence ne seraient pas nécessairement des entreprises rentables à l'exportation).

Des subsides atteignant plusieurs centaines de milliers de dollars seraient indispensables pour ériger les installations nécessaires à la mise au point, aux essais et à la production de pièces canadiennes destinées à constituer plus de 50% des éléments de pompes à vide dont la production pourrait atteindre 2,5 millions de dollars. On ne peut être certain que cette production serait viable sans mener à bien une étude des marchés en raison de la concurrence permanente des États-Unis et des pays d'outre-mer. Il faut noter cependant que les pompes à vide sont utilisées de plus en plus, non seulement dans les laboratoires de recherches, mais aussi dans les industries des produits alimentaires, des produits chimiques et en métallurgie.

Le principal marché des générateurs de très haute puissance à haute fréquence de type amplifon serait constitué par les utilisateurs de micro-ondes, qui actuellement disposent de tubes électroniques d'une puissance maximale de 25 kW seulement. Des tubes d'une puissance de 500 kW seraient très intéressants pour eux et entraîneraient l'apparition de nouvelles applications industrielles. Un autre marché existerait peut-être dans le domaine du brouillage militaire. La firme qui s'intéresse à la mise au point de ces dispositifs estime qu'il existe dans ces deux secteurs un marché possible d'un million de dollars par an; elle a fait savoir qu'elle serait prête à étendre ses installations de fabrication et d'essais à ses propres frais. Le chiffre d'affaires initial causé par la fourniture d'amplifons et de klystrons pour l'ING atteindrait un montant de 4 à 10 millions de dollars. Le chiffre d'affaires subséquent relatif aux pièces détachées et à l'entretien atteindrait entre 100,000 et 200,000 dollars par an, en supposant que les tubes servent pendant toute leur vie prévue.

Il est apparu qu'en général les réponses fournies par les responsables de l'industrie, au sujet des possibilités de réaliser de nouveaux produits à la suite de leur participation au programme de l'ING, étaient plutôt faibles. On peut interpréter leurs réactions de différentes façons mais il ne serait pas judicieux de considérer leurs réponses comme exprimant une certitude. Il serait naïf de croire qu'une courte enquête d'opinion menée parmi les responsables de quelques industries actuelles donnerait un tableau véritable et complet des effets probables de l'ING dans cinq ou dix ans. Il est nécessaire de tenir compte des facteurs suivants:

- a) les chefs d'industrie considèrent les nouveaux marchés en fonction des possibilités actuelles, ou tout au moins ne font que de très modestes extrapolations. L'ouverture de nouveaux marchés, l'introduction de nouvelles technologies sont rarement admises sans études préalables approfondies. Ce ne sont que les très grosses sociétés industrielles qui établissent des plans cinq ou dix ans d'avance pour pénétrer dans de nouveaux marchés, et seulement en conjonction avec un programme d'action de leur organisme de recherches. Un engagement définitif, s'appuyant sur les avantages que procureraient de nouvelles techniques, ne serait pris qu'après des études techniques et des essais témoins par l'organisme de recherches. Dans le cas de l'ING, où le gouvernement exerce les pouvoirs de direction, on ne pouvait s'attendre qu'à une attitude peu entreprenante et presque négative de la part de l'industrie au sujet de son entrée dans les marchés futurs. Cette attitude défaitiste constitue une base inadéquate pour le choix d'une ligne de conduite. Les membres du Comité ont remarqué que deux ou trois sociétés canadiennes n'auraient probablement exprimé aucun enthousiasme pour la création des Laboratoires nucléaires de Chalk River, si on avait demandé leur avis en 1942. Elles n'auraient vu aucun avenir pour de nouveaux produits industriels dérivant de l'activité de ces laboratoires. Et pourtant elles sont actuellement très occupées à vendre des éléments de réacteurs nucléaires aux marchés canadiens et étrangers.
- b) Si l'État prend l'initiative d'ouvrir une nouvelle voie à la recherche dans le but de susciter l'élaboration de nouveaux produits industriels, ou qu'il persuade une industrie de s'engager dans de nouveaux types de fabrications en lui montrant qu'elle s'ouvrira de grands marchés après la fin de son contrat initial avec lui, il exerce une prérogative normalement

dévolue à l'industrie, celle de choisir les marchés où elle veut pénétrer. Dans ces circonstances une partie du coût des recherches préliminaires sur le marché doit incomber à l'État, ainsi qu'une part de la charge de conduire l'entreprise au succès commercial. Ce principe doit même s'appliquer à toutes les dépenses que l'État engage en recherches, dans la mesure où la fabrication de nouveaux produits industriels est utilisée comme justification de la dépense. Il est bien entendu que d'autre part le gouvernement estime habituellement que si son choix a été bon, l'industrie concernée découvrira un marché profitable, voudra s'y installer, et en tirera un bénéfice maximal grâce à ses propres intérêts. Nous n'entamerons pas un débat pour savoir si les investissements de l'État seront suffisamment remboursés par le surcroît de taxes que les industries paieront sur leurs bénéfices, et par l'augmentation du produit national brut, ou si des taxes supplémentaires devraient être imposées sur les bénéfices que les sociétés tirent de la vente des nouveaux produits ou de l'utilisation de leurs nouvelles possibilités de production suscitées par les achats de l'État ou l'aide à la recherche. Le principe expliqué ici, bien qu'il ne soit rien de plus que l'affirmation que l'État doit se comporter comme un investisseur sérieux, entraîne quelques conséquences pour la direction du programme, qui seront étudiées au chapitre traitant de l'organisation. En bref, même une grosse société industrielle ne s'attend pas que de nouveaux produits apparaissent soudainement dans ses diverses divisions, simplement parce qu'elle a institué quelques programmes de recherches bien choisis dans ses laboratoires de recherches. Les lignes de conduite et les méthodes suivies par la Direction du programme de l'ING, ainsi que les voies technologiques suivies, les caprices, préférences et motifs d'action des chefs d'industrie présents et futurs, décideront si les contrats pour le développement technique et la construction de l'ING ouvriront de nouveaux marchés intéressants à l'industrie canadienne, ou si au contraire ils auront un effet distrayant et désorganisateur. C'est une des raisons pour lesquelles une enquête d'opinion parmi les industriels ne peut donner de réponse satisfaisante sur l'importance potentielle du Programme, bien qu'elle puisse donner des indications intéressantes. En outre le facteur que constitue la ligne de conduite de la direction du programme peut être modifiable.

c) au premier alinéa ci-dessus, nous avons rejeté l'enquête d'opinion publique comme base saine de prédiction de la technologie future. Au second, nous avons affirmé qu'un organisme public doit assumer certaines charges quand il attire l'industrie dans de nouveaux domaines techniques. Nous devons essayer maintenant de prévoir si les problèmes technologiques posés par la construction de l'ING orienteront l'industrie canadienne vers des domaines profitables.

Dans le domaine des pompes à vide, pompes à liquides et échangeurs de chaleur, où les contrats atteindront un montant total de 3 millions de dollars, l'opinion des industriels est qu'il ne sera pas nécessaire d'entreprendre d'études nouvelles ou de réaliser des développements techniques, et que les nouveaux marchés potentiels seront petits. Il semble douteux cependant que les industries canadiennes ne doivent rien trouver de nouveau ou de différent dans le cahier des charges de l'ING. Et en fait l'expérience du programme d'énergie atomique nous enseigne le contraire, et ne donne qu'une faible idée des difficultés inhabituelles présentées par les circuits de circulation et les circuits caloporteurs à alliage liquéfié de plomb et bismuth. L'explication la plus raisonnable de la réaction de l'industrie est que cette dernière estime qu'aucun type spécial d'appareil n'aura besoin d'être mis au point, qui pourrait ensuite être construit en série et mis sur le marché. Cette explication concorderait parfaitement avec le caractère de l'industrie concernée, qui généralement conçoit des ensembles d'éléments standards déjà disponibles et n'aborde les études d'installations et les fabrications spéciales que si on l'exige. En conséquence, les principaux avantages qu'elle retirerait du programme serait l'accroissement de l'expérience et des capacités du personnel qui pourrait ensuite être utilisé dans l'industrie chimique de transformation.

Une situation semblable existe dans les secteurs de l'électronique de base, du traitement des données, des instruments et des systèmes de commande (les contrats y atteindraient un montant de 5 millions de dollars). Ce sont des secteurs où domine une technologie des systèmes, utilisant un arsenal commun d'éléments constitutifs plus ou moins standards pour résoudre un large éventail de problèmes. La remarque du Ministère de l'Industrie indiquant qu'on n'envisage pas d'étude industrielle ou de développement technique indique que l'on n'a pas reconnu l'extrême complication du système de commande qui sera nécessaire pour maintenir la focalisation du faisceau de particules à haute énergie, pour conserver un décalage de phase précis des ondes de haute fréquence tout au long de l'appareil, et pour protéger l'ensemble contre des défaillances transitoires (toute divergence

du faisceau de particules à haute énergie due à une distorsion momentanée, ne durerait-elle qu'une milliseconde, entraînerait une radioactivité d'un niveau fort gênant dans certaines parties du générateur). D'autre part, l'annotation du rapport du Ministère de l'Industrie, "seulement pour des réalisations semblables" semble de pas tenir compte de l'aisance du transfert d'un dispositif électronique d'un appareil à un autre. De nouveau dans ce cas, les avantages obtenus au cours de la réalisation du programme consisteront surtout en l'accroissement des capacités du personnel, et cet avantage sera valable aussi longtemps qu'il existera des problèmes de traitement des données et de conception des systèmes de commande électroniques.

L'ensemble le plus important est celui de l'accélérateur linéaire à haute fréquence qui coûtera 23 millions de dollars, sans les tubes électroniques à haute puissance. C'est une réalisation qui exige de l'industrie des études et des travaux de développement technique. Pourtant le tableau de l'annexe 3 ne fait aucun commentaire au sujet des marchés que la nouvelle technologie permettrait d'ouvrir, ou de ses applications. Ces travaux s'appuieront en substance sur des études de génie sur commande dans le domaine des hautes puissances. Il est difficile de prévoir la gamme des travaux de génie qui découleraient après cinq ans ou plus de la réalisation d'un tel générateur surpuissant d'ondes à hyperfréquence. Ces travaux pourraient être accomplis pour d'autres pays du monde: les firmes d'ingénieurs-conseils et quelques firmes de construction électronique canadiennes ont acquis une excellente réputation et réalisent des travaux spécialisés et profitables dans d'autres pays. De nouveau, les avantages principaux tirés de l'exécution de programme de l'ING consisteraient en une amélioration de la compétence technique des ingénieurs et des techniciens des firmes concernées. Les problèmes posés par la construction de générateurs surpuissants d'ondes de haute fréquence à rendement très élevé sont liés étroitement à la théorie électromagnétique fondamentale, au génie électronique, aux questions de haute tension et d'isolement et à l'électrotechnique. Les ingénieurs ayant acquis de l'expérience avec le programme de l'ING ne seraient pas déconcertés par certains problèmes difficiles posés par la génération et la transmission d'énergie à haute tension en courant continu ou alternatif. D'autre part, il n'est pas certain qu'il existera une demande permanente pour les gabarits de montage précis pour guides d'ondes et les matériels d'essais spécialisés qui auront été mis au point pour la phase de développement technique et de construction du générateur.

Les tubes électroniques à haute fréquence, pour lesquels les contrats atteindront un montant de 10 millions de dollars ou plus, cons-

tituent un domaine industriel dont les dirigeants ont donné une réponse encourageante au ministère de l'Industrie. Ils prévoient l'existence d'un marché pour des ventes atteignant un million de dollars par an de tubes électroniques à haute fréquence de haute puissance. Ils n'ont pourtant établi aucune prospective ni indiqué de dates précises.

Dans le domaine de la fabrication des matériels, les avantages que l'industrie tirerait de sa collaboration au programme de l'ING consisteraient surtout en accroissement de compétence technique de son personnel pour la construction de haute précision des sections de guides d'ondes et des cavités résonnantes, et le façonnage, le soudage, et l'alliage de métaux peu communs tels que le zirconium, le niobium, le béryllium, etc. Ces techniques trouveront leur emploi dans l'industrie nucléaire, mais pourraient aussi trouver leur place dans l'industrie chimique.

Le Comité conclut que le programme de l'ING toucherait un certain nombre d'industries, leur offrirait l'occasion de relever son défi dans une large gamme de techniques, et développerait de nouvelles possibilités dans le domaine de la conception des ensembles mécaniques et électroniques, possibilités qui pourraient trouver leur emploi à la solution de nombreux autres problèmes. Il n'y a aucun doute que certaines sociétés très spécialisées qui seront appelées à collaborer au programme de l'ING (dans le domaine des électro-aimants de précision par exemple) pourraient ne pas se trouver assurées d'une utilisation permanente de leurs services, mais il semble que ces sociétés constitueraient la minorité. On ne peut prévoir la nécessité de produits spéciaux ou d'innovations au point où nous en sommes, bien qu'on soit certain que tout projet de génie aux exigences inhabituelles doive en susciter l'apparition. Les dépenses entraînées par la réalisation de l'ING seront suffisamment importantes et dureront un temps suffisant pour qu'on puisse compter sur la création de nouveaux produits et l'utilisation des nouvelles techniques entraînant l'ouverture de marchés profitables. Il est cependant très important d'instituer des mécanismes de surveillance, d'encouragement, et si nécessaire de soutien financier de ces entreprises pour en assurer un succès durable.

3) EFFETS À LONG TERME DES RECHERCHES DE L'ING SUR L'INDUSTRIE CANADIENNE

Comme on aurait pu s'y attendre, l'opinion des industriels est empreinte d'un profond scepticisme n'apportant que bien peu d'éléments positifs pour l'évaluation des perspectives à long terme de

progrès industriels découlant des travaux de recherche qui sont décrits dans la proposition du programme de l'ING. La préparation de perspectives technologiques sur des durées atteignant dix, vingt ou trente ans est pratiquement inconnue au Canada.

La recherche sur les matériaux, la production d'isotopes radioactifs et la génération de courant électrique sont les trois domaines ou de nouvelles techniques, de nouvelles méthodes, et de nouveaux produits semblent susceptibles d'apparaître.

Un des résultats de l'exploitation de l'ING, et partiellement des recherches entreprises, sera le développement technique de nombreux isotopes nouveaux. Ces derniers, qui sont préparés et mis sur le marché par la Division des produits commerciaux de l'ÉACL occupent actuellement un marché de 8 millions de dollars par an. Le produit de base, l'isotope, représente environ 20 pour cent de ce montant. Actuellement le marché s'accroît de 20 pour cent par an, et si cette tendance continue, il atteindra 100 millions de dollars en 1980. Si cette croissance était soutenue pendant sept ans par des méthodes de vente dynamiques, l'importance du marché atteindrait déjà 28,5 millions de dollars. À ce moment, la proportion affectée directement à l'achat des isotopes eux-mêmes atteindrait 5,7 millions de dollars, dont une partie substantielle serait due à l'activité de l'ING. Ainsi, les possibilités de tirer un revenu substantiel de l'ING par la vente des isotopes sont tout à fait raisonnables, si l'on se base sur une modeste extrapolation à court terme des résultats actuels. Les nouvelles applications, les nouveaux dispositifs et les nouveaux services qui réclameront ces isotopes seront activement développés pour en élargir le marché. Une des applications les plus importantes de ces isotopes préparés sur demande se trouvera dans le domaine des générateurs d'électricité fonctionnant à l'aide de radio-isotopes. Ils seront de toutes tailles, depuis le générateur d'un milliwatt nécessaire au régulateur cardiaque jusqu'à celui d'un kilowatt utilisé pour l'exploration des océans ou de l'espace, ou pour des stations arctiques. Un comité de l'Euratom a fait une utile récapitulation des possibilités de ces dispositifs.*

Les commentaires qu'offre le rapport du Ministère de l'Industrie, au sujet de la production d'énergie électrique, semblent minimiser de façon excessive les relations possibles entre le programme de l'ING et le programme d'énergie électronucléaire:

‘Enfin, il n'a pas été possible de découvrir une relation directe entre ce projet et l'exploitation future de l'énergie nucléaire par

*OCDE Observer, n° 24, octobre 1966, p. 49-53.

l'ÉACL ou par l'industrie canadienne. Il y a évidemment toujours la possibilité qu'une découverte de physique nucléaire ouvre de nouvelles possibilités de production d'énergie électronucléaire mais il ne semble pas que le programme de l'ING en fasse un objectif primordial."

La proposition de construction de l'ING, au paragraphe 1.3, traite en détail des possibilités de génération d'électricité à partir du combustible fissile, et souligne la valeur d'un flux intense de neutrons pour l'installation d'essais des matériaux pour réacteurs, et pour l'acquisition de données plus précises sur les réactions nucléaires en vue de l'amélioration des réacteurs. En outre, les relations entre les techniques constituent des avantages d'une certaine valeur potentielle. L'expérience acquise par les ingénieurs dans l'utilisation des flux de neutrons à haute énergie et des circuits caloporteurs à métaux liquéfiés constituerait une voie directe vers la technologie des surrégénérateurs; celle qui serait acquise avec les générateurs électromagnétiques à haute puissance et à courant intense servirait de lien aux recherches sur la fusion thermonucléaire quand le temps serait venu de pénétrer dans ce domaine. D'autres relations s'établiront, et même sont en voie de s'établir dans le domaine des générateur de haute tension à courant direct. Ainsi, les conséquences à long terme du programme pour l'industrie électronucléaire canadienne et les centrales électriques en général sont loin d'être négligeables.

Comme on l'a exposé ci-dessus, de nouvelles inventions devront apparaître dans les domaines où les ingénieurs doivent faire face à des exigences complexes, et où la technique doit aller à la limite de ses possibilités. Et de nouveaux produits seront créés dans les secteurs où les recherches rendent possibles de nouvelles applications, comme la création sur demande de nouveaux isotopes. Il est impossible de prévoir exactement ce que seront ces nouveaux produits dans quinze ans ou plus. Cependant de nouvelles idées ou de nouvelles inventions, même bonnes, n'engendrent pas toujours des produits commerciaux et par conséquent des avantages économiques. Si nous nous souvenons qu'en tant que Canadiens nous créerons notre futur, nous pouvons faire plus qu'essayer de deviner ce qui pourrait arriver. Nous pouvons prendre une attitude constructive qui produira, par son dynamisme, des résultats intéressants. Comme nous commençons à comprendre le rôle dans notre société de la technique de l'innovation technologique, nous pouvons délibérément créer les conditions qui feront démarrer les bonnes inventions et les encourageront; il s'agirait par exemple de procéder à des recherches sur les marchés, à favoriser l'entreprise, à susciter l'apport de capitaux qui favoriseraient l'exploitation des inventions valables, des techniques,

des procédés, etc. découlant des recherches menées à bien au cours d'un grand programme de recherches et de développement technique. Si une telle action est entreprise, les opinions pessimistes ou les attitudes négatives de l'industrie n'influenceront pas l'avenir.

Il est bon de se souvenir que ce que l'on qualifie d'"avantages à court terme" dureront de sept à dix ans, et la dépense annuelle de 20 ou 30 millions de dollars produira sans aucun doute de nombreux effets secondaires au bénéfice de la technologie industrielle; ils sont toutefois trop divers ou imprévisibles actuellement pour permettre le calcul d'une proportion entre le coût et les bénéfices. Il n'y a aucun doute que le programme contribuera puissamment à attirer et à retenir des scientifiques renommés et des ingénieurs hautement qualifiés dans l'industrie canadienne, ainsi que dans les laboratoires des universités et de l'État, et que ce résultat à lui seul constituera un premier pas important dans l'amélioration des possibilités canadiennes de rivaliser avec les autres nations de haute technologie.

En conclusion, nous pouvons être optimistes au sujet des bénéfices que l'industrie canadienne tirera de sa participation au programme de l'ING, particulièrement si nous favorisons ce résultat par une action positive. Nous ne prétendons pas que les avantages prévisibles que l'industrie tirera de sa participation constitueraient en eux-même une justification suffisante pour la construction de l'ING. Le pourcentage d'importance attribué dans le paragraphe 2.1 (tableau 2) aux divers buts visés par le programme montre qu'il serait trop optimiste d'espérer un tel résultat, et qu'une grande partie du programme, disons la moitié, produira des avantages économiques et autres d'une nature moins prévisible, et à plus long terme, tels que ceux qu'entraînent un investissement dans l'éducation et les recherches fondamentales.

e) Importance pour le pays et pour le public

C'est à la haute qualité des recherches entreprises dans les Laboratoires de Chalk River, à la suite des premiers contacts du Canada avec les questions atomiques au cours de la seconde guerre mondiale, que le pays doit d'être un des six membres originels de la Commission internationale de l'énergie atomique et maintenant l'un des membres permanents du Conseil d'administration de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Le prestige du Canada dans ce domaine a permis sa participation efficace aux conférences sur le désarmement nucléaire et à d'autres pourparlers internationaux au sujet des questions épineuses du contrôle de l'utilisation des matériaux fissiles et des armes atomiques.

Le Canada aurait été laissé en dehors du cercle restreint des puissances nucléaires depuis longtemps s'il n'avait poursuivi de puissants efforts de recherche produisant une contribution reconnue aux connaissances scientifiques en physique nucléaire, en physique de l'état solide, en génie électronucléaire, etc., et offert de remarquables installations pour les expériences et les essais que les scientifiques des É.-U. et d'autres nations voulaient réaliser. Le Canada serait une nation peu considérée, ne possédant pas de monnaie d'échange scientifique, à la merci d'autres nations pour se procurer des centrales électronucléaires, au lieu d'avoir des relations cordiales et excellentes avec la U.S. Atomic Energy Commission, d'obtenir de rapides échanges de renseignements et un juste retour des avantages concédés. Il est difficile d'évaluer de tels facteurs, et certaines nations peuvent être suspectées de nationalisme exagéré par la trop grande importance qu'elles leur accordent. Nous pensons cependant après réflexion que le D^r C.J. Mackenzie avait raison quand il pressait le Canada de profiter de l'occasion qui se présentait et de participer pleinement à l'une des grandes aventures scientifiques et techniques de notre temps.

On doit souligner que le succès commercial dans la conception et la vente des réacteurs nucléaires n'assure pas seul le prestige international et la participation aux conseils internationaux, mais qu'on les obtient surtout par une grande renommée en recherche scientifique fondamentale. D'autres pensent, avec quelque raison, qu'une excellente réputation scientifique est une bonne indication du niveau des connaissances dans une société ou une nation. En conséquence, si l'on pense que les avantages mentionnés ci-dessus sont valables pour une nation, il est nécessaire que cette dernière possède un grand laboratoire national et qu'on y poursuive un effort de recherche fondamentale dans les sciences nucléaires et connexes.

Cependant le montant de la facture à payer pour construire des installations d'importance majeure n'a fait que croître, et la réalisation du programme de l'ING coûtera de telles sommes qu'elle soulève de nombreuses inquiétudes. Ces inquiétudes affectent les scientifiques qui craignent que leur propre budget soit diminué. Elles touchent les personnes sans vision de l'avenir qui ne voient pas l'avantage de poursuivre des recherches à longue échéance. Elles affectent encore les gens dont le sens des affaires n'a pas évolué avec l'augmentation des revenus du pays. Cependant la plupart des inquiétudes exprimées viennent d'esprits prudents et raisonnables.

Quelque soit la raison particulière invoquée pour s'inquiéter des dépenses de cette importance, il est indispensable que le public, y

compris les cercles techniques en général, soit convenablement informé, et qu'il soit prêt à soutenir l'exécution du programme avec dynamisme et une grande constance. Rien ne serait pire pour la communauté scientifique canadienne que le projet devienne l'objet d'une polémique ou un enjeu électoral et que sa réalisation traîne et finalement s'effondre dans une atmosphère d'incertitude financière et de découragement. Le Comité souligne que si la réalisation du projet de l'ING est entreprise, ce doit être en pleine connaissance de son coût et de sa valeur, et avec la ferme intention de le soutenir jusqu'au succès final.

Nous croyons que le projet de l'ING est suffisamment original, hardi et même spectaculaire pour satisfaire l'imagination du public et la fierté nationale. La question qui vient ensuite est de savoir si la charge financière est raisonnable. Les paragraphes qui suivent traitent de ce sujet.

2.2 POSSIBILITÉS DE RÉALISATION TECHNIQUE

Il n'y a aucun doute que l'ING soit réalisable. Les possibilités que nous envisageons ici sont celles de la réalisation dans les limites des coûts prévus, en tenant compte des problèmes techniques qui restent à résoudre. C'est une tâche difficile, même pour des experts, car un tel générateur se situe aux limites des possibilités techniques. S'il était facilement réalisable, il aurait déjà été construit ailleurs depuis longtemps, et d'autre part n'offrirait que peu d'intérêt au point de vue des problèmes de génie. Le Comité a dû s'appuyer sur le jugement des experts y compris ceux de Chalk River, pour étayer les conclusions du présent chapitre. Voici une récapitulation des principaux problèmes techniques qui restent à résoudre:

a) Les divergences accidentelles du faisceau

En raison du fort courant de particules à haute énergie, les radio-activations accidentelles de pièces du générateur peuvent être graves. Le faisceau doit être parfaitement focalisé dans un vide poussé de façon que le moins possible de protons diffusent dans les parois et les électrodes de l'appareil. La défocalisation d'un courant de quelques microampères de protons à haute énergie ou du faisceau entier pendant des durées de la brièveté d'une milliseconde peuvent induire une radio-activité suffisante dans les pièces de l'appareil pour y interdire toute réparation pendant plusieurs jours, ou pour obliger à l'emploi de robots télécommandés. La nécessité de prévoir un tel appareillage pour accéder à tous les éléments du générateur accroîtrait fortement son coût.

En conséquence il est nécessaire d'étudier soigneusement les mécanismes de commande qui prévendraient toute aberration transitoire des lentilles magnétiques, toute variation de l'amplitude et de la phase du champ haute fréquence, toute variation d'intensité de la source d'ions, etc, et de réaliser des études d'ensemble sur les conséquences possibles de chaque type de panne.

b) l'accélérateur

Jusqu'en 1966 le choix du type d'accélérateur s'était fixé sur le cyclotron à orbites séparées (SOC) conçu en 1963 par F.M. Russell, des Laboratoires Rutherford. Il permettait en principe d'accélérer de forts courants de particules jusqu'à de hautes vitesses, d'utiliser facilement le faisceau émergent, et ne produirait qu'un faible niveau de défocalisation ou de diffusion à l'intérieur de l'appareil. Cependant aucun prototype fonctionnel n'a encore été construit. Pendant ce temps, les laboratoires de Los Alamos travaillaient à la réalisation d'un accélérateur linéaire (LINAC) de protons produisant un faisceau de haute intensité pour leur générateur de mésons, et L. Rosen exprima une idée nouvelle qui permit une amélioration considérable de l'efficacité en haute fréquence du LINAC. Voici un extrait de l'"ING Newsletter" du 4 octobre 1966:

“Le LINAC avait été rejeté à l'origine en raison de fortes pertes dans le cuivre dans l'appareil. Le nouveau concept de branchement latéral conçu à Los Alamos fait espérer qu'on pourra réduire la perte de puissance de moitié pour un accélérateur d'une longueur donnée. En accroissant la longueur jusqu'à 4000 pieds, les pertes sont réduites au niveau acceptable de 15 à 30 mégawatts. Le concept de base du LINAC provient de celui d'un accélérateur à onde progressive; lors de l'utilisation d'un guide d'ondes à disques, plus les particules voyagent lentement plus le courant est fort, et plus les pertes dans le cuivre sont grandes. En outre l'énergie, tant pour le faisceau que pour les pertes, doit être fournie à tout l'appareil à partir d'une extrémité. L'appareil à branchement latéral conçu à Los Alamos évite cette sujétion par l'alimentation d'énergie en parallèle à un appareil qui est en fait constitué d'une série de boîtes. On ne sait pas clairement quelle serait la meilleure configuration de fonctionnement, car il n'est pas nécessaire d'injecter une onde progressive, mais il suffit d'établir l'écart de phase convenable entre les boîtes successives. On peut prévoir qu'il est encore possible de réduire les pertes par emmagasinement de l'énergie dans des ferrites ou des diélectriques, et en conséquence il pourrait être avantageux de procéder à des recherches étendues sur ce sujet.”

L'extrait suivant des minutes du Comité consultatif de l'ING à sa réunion du 18 novembre 1966, expose le déroulement de cette phase de l'étude technique de l'ING.

“a) Au moment du Colloque sur l'ING en avril 1965, les accélérateurs LINAC et SOC avaient été étudiés, et ce dernier avait été préféré. Il serait plus facile de se procurer les générateurs travaillant au bas de la gamme des hautes fréquences, et l'utilisation de l'énergie serait meilleure. Le modèle LINAC semblait avoir une longueur de faisceau trop grande et consommer beaucoup trop d'énergie. Il ne semblait pas qu'un générateur haute fréquence d'un rendement raisonnable fût disponible. Les experts en accélérateurs ne favorisaient guère l'emploi des amplitrons à ce moment-là.

b) Peu de temps après, à une conférence sur les accélérateurs, les scientifiques de Los Alamos firent un exposé de leur travail en cours sur le LINAC qu'ils voulaient utiliser pour LAMPF. La conception de LINAC faisait des progrès.

c) Au cours d'une visite au LASL à l'automne de 1965, les scientifiques canadiens notèrent les progrès suivants:

i) mise au point d'un appareil à branchement latéral de mode $\pi/2$ dont l'impédance de shunt était améliorée ainsi que son insensibilité à la charge et aux erreurs;

ii) confirmation des mesures effectuées à faible puissance par accélération analogique des électrons jusqu'à un courant équivalent à 300 mA, sans aucune anomalie;

iii) développement technique par la firme Raytheon d'un amplifon de 100 kW à 800 MHz, dont un exemplaire avait été acquis par LASL.

d) A la conférence sur le SOC réunie en automne 1965 à Gatlinburg, les scientifiques d'Oak Ridge donnèrent un compte rendu de leurs études techniques des électro-aimants et de leurs pièces polaires, révélant que les scientifiques du CRNL avaient été trop optimistes au sujet des tolérances d'ouverture. (Ces dernières furent augmentées plus tard, comme l'indique AECL-2600). On craignait aussi de ne pouvoir réaliser ou maintenir la tension des cavités.

e) Au début de 1966, on décida de consacrer une partie des efforts des scientifiques du CRNL à étudier de nouveau le LINAC de façon plus détaillée.

i) nous préparâmes une étude-pilote préliminaire fondée sur une adaptation des travaux du LASL et du modèle MURA au

fonctionnement en régime d'ondes continues et demandâmes à la SECO d'en estimer le coût.

ii) nous demandâmes également à la société Raytheon de préparer un exposé technique prouvant que les amplitrons convenaient à nos besoins et donnant un schéma d'installation haute fréquence les utilisant.

iii) en comparant les appareils LINAC et SOC nous découvriâmes que nous ne pouvions procéder à un choix en nous fondant sur les coûts des appareils. LINAC semblait offrir moins de difficultés d'installation et de mécanique, particulièrement aux points de vue maintien de l'alignement de l'appareil et de facilités de réparations. L'accélérateur linéaire commença à faire figure d'alternative intéressante, étant donné qu'il existe deux installations LINAC, dont l'une est en cours d'érection (LAMPF) et l'autre est terminée (SLAC), qui pourront fournir des données tirées de leur construction et de leur conception.

f) Nous fîmes une seconde visite au LASL en mai 1966 et étudiâmes de nouveau les travaux de ses scientifiques. Leurs espoirs étaient en cours de réalisation; d'excellents résultats découlaient de leurs études des structures périodiques; leur amplitron venait de leur être livré et était en cours d'essais.

g) Une nouvelle conférence sur le SOC se tint à Oxford en juillet. Russell y fit un exposé sur les études de son groupe pour un injecteur du type SOC pour le NIMROD. L'exposé donnait également les caractéristiques d'une installation LINAC pour des fonctions similaires. Son coût était beaucoup moins élevé.

Hagerman, du LASL, annonça que l'amplitron de son groupe fonctionnait convenablement, et que les physiciens en étaient très satisfaits (et ils le sont encore).

La proposition de Russell pour un super-SOC ne résolvait aucun des problèmes posés par le circuit magnétique, et même introduisait une nouvelle incertitude au sujet de l'alimentation en courant continu.

h) À ce moment il devint clair que nous devrions faire un choix sur l'orientation de notre programme d'études principal. Il nous était impossible d'étudier les deux plans de façon détaillée.

Nous fîmes le choix à la fin de juillet, après la publication du rapport AECL-2600.

En bref nous changeâmes complètement notre première décision. Nous mîmes de côté le SOC et choisîmes le LINAC pour les raisons suivantes:

- i) Le LINAC du LASL avait montré que son agencement représentait une structure améliorée pour l'accélération des particules à haute énergie;
- ii) l'amplifon constituait un générateur d'ondes de haute fréquence très efficace et acceptable;
- iii) l'injecteur P.S. du CERN donnant un courant dépassant 100 mA prouvait la possibilité de réaliser une section à faible énergie;
- iv) les travaux de construction et de mécanique seraient plus faciles particulièrement pour les fondations et l'alignement des éléments de l'accélérateur;
- v) ce dernier serait plus facilement réparé et aligné de nouveau. Le SLAC se trouve pratiquement sur la faille géologique de St. Andreas, mais les tremblements de terre ne devraient pas affecter l'accélérateur;
- vi) le SLAC a été construit dans les délais prévus sans dépasser le devis, prouvant que la réalisation technique de LINAC est à notre portée;
- vii) les installations LAMPF et SLAC peuvent fournir les données pertinentes de génie et de technique, et on peut consulter les résultats des études théoriques et expérimentales à Los Alamos.

i) Les conclusions de la récente conférence sur le LINAC au LASH tendent à confirmer notre choix. L'accélérateur SLAC fonctionne à la limite d'une instabilité transversale. La difficulté a été analysée, et bien que les calculs détaillés n'aient pas encore été accomplis, on s'attend que les effets du phénomène soient beaucoup moins importants dans un accélérateur de protons à des vitesses non relativistes comme l'ING dont la structure interne change continuellement, et où des effets additifs ne se produiront pas d'une section à l'autre.

La décision d'abandonner le SOC fut ensuite confirmée quand il devint certain que les tolérances de fabrication des grands électroaimants seraient extrêmement faibles, et qu'on ne pourrait les accroître qu'en augmentant fortement les dimensions des aimants à un coût fortement accru. Il semble donc que le SOC n'aurait pu être réalisé comme prévu.

Le projet d'utilisation du LINAC paraît toujours dépourvu d'embûches, sauf peut-être quelques problèmes posés par les tubes à haute fréquence de grande puissance et une instabilité possible du faisceau. L'accélérateur de l'ING sera très long et les champs électriques dans les cavités seront maintenus en-dessous de la tension de rupture, en vue de réduire les pertes en haute fréquence. La construction de la structure de base sera en conséquence un travail important et répétitif, mais les difficultés d'alignement, d'isolation électrique, des joints à vide hermétiques et autres devraient être aisément surmontables. Cependant, comme le D^r Blewett l'indique (Appendice II) certaines incertitudes persistent au sujet de la possibilité que des oscillations ou des instabilités affectent le faisceau. L'accélérateur linéaire de Stanford, long de deux milles, fonctionne par pulsations tout comme l'injecteur LINAC de protons du CERN, et le futur LINAC de Los Alamos. Si l'on réalise un faisceau continu à haute intensité, quelques-uns des termes qui paraissaient de faible importance au cours des premières analyses mathématiques pourraient en fonction du temps prendre des valeurs d'une amplitude gênante. Les temps d'accroissement des instabilités pourraient avoir une longueur suffisante pour permettre l'étouffement des oscillations par des interruptions périodiques du faisceau, mais seuls des calculs détaillés et des expériences sur modèle ou par analogie pourraient répondre partiellement à la question. Comme le programme de Stanford³⁸ l'a prouvé, l'accélérateur terminé pourrait encore réserver des surprises.

c) Générateur à haute fréquence

La possibilité de réaliser le prototype d'ING projeté dépend largement du développement technique du tube amplifon afin qu'il atteigne une puissance et un rendement améliorés. L'amplifon, qui est une version agrandie du magnétron, a été mis au point par la société Raytheon aux É.-U. C'est actuellement le seul dispositif qui semble capable d'émettre une puissance de 500 kW à 800 MHz. On a cité la possibilité de réaliser un klystron de 1,5 MW en régime continu à 800 MHz, mais il n'a pas été construit, et n'aurait probablement pas un rendement supérieur à 60 pour cent. (AECL 2600, section XIV.C, p. 13) La publication AECL-2600 ajoute ce qui suit:

L'amplifon est le plus prometteur des dispositifs à champs croisés. Le plus gros appareil existant actuellement émet une onde

³⁸Une instabilité transversale est apparue à des courants plus faibles que prévus, et oblige à limiter actuellement le courant à la moitié de l'intensité prévue. La cause du phénomène a été élucidée.

continue de 100 kW à 800 MHz. La mise au point d'un générateur de 500 kW est considérée comme étant sans complications. Un rendement de 74 pour cent a été obtenu pour le premier modèle du générateur de 100 kW, et un rendement de 85 pour cent semble possible pour un générateur de 500 kW. Le tube est robuste et il est dépourvu des grilles et de cathodes chaudes fragiles, qui constituent deux causes de non-fonctionnement des tubes, dans les autres dispositifs. On emploie une cathode de platine à émission secondaire refroidie par circulation d'eau. L'amplifon actionnant l'accélérateur linéaire doit être d'un fonctionnement sûr.

Cependant, l'amplifon n'a pas été essayé en conjonction avec un accélérateur. On ne possède qu'une expérience modeste de son fonctionnement dans un circuit à bande étroite, telle une cavité du LINAC. Le bulletin "ING Newsletter" du 4 octobre 1966, déclare encore ce qui suit:

"Nous avons eu des entrevues avec les ingénieurs de la société Raytheon au sujet des possibilités de réaliser des amplifons de haut rendement et de longue vie utile. Les perspectives sont très encourageantes, mais il est nécessaire de réaliser des perfectionnements très importants, car l'obtention d'un haut rendement nécessite des modifications empiriques de la structure du tube. Les amplifons conçus pour d'autres applications ne peuvent servir de guide que de façon incomplète.

On doit se souvenir que les extrapolations promettant un rendement de 85 pour cent à 500 kW sont celles des fabricants, de sorte qu'une certaine prudence est de mise. Par contre, il faut remarquer que l'amplifon de 100 kW de Los Alamos fonctionne parfaitement bien.

Une des faiblesses de l'amplifon est qu'il n'a qu'un faible gain de puissance d'environ 10 db. En conséquence chaque tube devra être actionné par un klystron de 100kW.

En dehors des perfectionnements techniques à apporter à l'amplifon de 500 kW, le problème le plus délicat à résoudre concerne le fonctionnement sûr qu'en réclame l'accélérateur. Le LINAC de Stanford utilise 240 klystrons tout au long de l'accélérateur, et plus d'une demi-douzaine sont en panne à tout moment. Comme il s'agit d'un accélérateur d'électrons, et que ces derniers voyagent à une vitesse presque constante au long de l'accélérateur, les klystrons manquant à quelques endroits n'ont que peu d'influence sur l'accélération du faisceau d'électrons. Au contraire, les paramètres des générateurs HF doivent changer tout au long d'un accélérateur linéaire de protons, et

la panne de n'importe lequel des 150 amplitrans, ou de leur klystrons de commande, imposerait l'arrêt de l'accélérateur. Les scientifiques du CRNL croient maintenant qu'on pourrait s'accommoder d'une telle panne, et que le faisceau ne serait pas interrompu si un dispositif de commande ajustait automatiquement la phase de l'onde de haute fréquence dans les autres cavités de l'ensemble. On peut cependant voir qu'il sera impossible d'étudier le problème de la sûreté de fonctionnement tant qu'une expérience suffisante n'aura pas été acquise avec les amplitrans de 100 kW et de 500 kW et que leur vie utile n'aura pas été évaluée à l'aide de données suffisantes. Le D^r Taylor fait les commentaires suivants (Appendice II):

“Le LINAC de Stanford a été en fonctionnement partiel depuis un an, et les klystrons ont accompli l'équivalent du fonctionnement d'un klystron pendant 500,000 heures. Six cents pannes de tubes ont été notées; il est cependant encore très difficile d'évaluer la vie utile d'un klystron avec précision. Comme la vie utile d'un klystron est d'environ 10,000 heures (soit deux ans), il apparaît qu'aucun programme d'essais ne peut être préparé pour évaluer sa vie utile réelle.”

Des programmes importants pour évaluer la fiabilité des tubes par d'autres moyens sont certainement justifiés.

Il faut prendre, dès le début des études de conception, les décisions fondamentales concernant le générateur à haute fréquence, c'est à dire décider si les sections individuelles d'accélération seront alimentées par un seul amplitrans, ou si des appareils de remplacement efficaces peuvent être construits à des prix raisonnables, ou encore si une alimentation multiple de l'accélérateur par un générateur à tubes multiples peut être réalisée. Cette décision est de la plus haute importance pour la sûreté de fonctionnement de l'installation d'accélération toute entière.

Il se peut que des programmes différents d'alimentation en haute fréquence doivent être poursuivis parallèlement aussi loin que possible, bien que cette méthode doive accroître les frais de recherches et de développement technique.

Il est bon de noter que l'ING doit jouir d'une grande sûreté de fonctionnement ou d'une forte proportion d'utilisation par rapport au temps total, spécialement pour les essais sur les matériaux et la production d'isotopes.

d) La source d'ions et l'injecteur

La source d'ions devra émettre un courant continu d'ions positifs atteignant 150 à 180 mA. Ce courant doit être bien plus important

que celui du faisceau final pour les raisons suivantes: 1) il se peut que seulement 60 pour cent du courant ionique consiste en protons; 2) les protons ne se présentent pas tous au canal d'extraction du faisceau; 3) les protons ne peuvent être accélérés par le champ électrique qu'au cours de la phase convenable du cycle haute fréquence (coefficient d'entraînement de phase). Comme le prototype étudié prévoit l'existence dans l'accélérateur linéaire d'une "section Alvarez" alimentée en haute fréquence à environ 268 MHz avant la section principale alimentée à 805 MHz, il se produit une perte supplémentaire de protons dans l'espace de transition entre les deux sections alimentées à des fréquences d'accélération différentes. C'est une des raisons pour lesquelles l'idée d'un générateur à courant continu, pouvant communiquer aux ions une énergie suffisante pour rendre non nécessaire l'installation d'une "section Alvarez", a été prise en considération. L'ÉACL a déjà accordé un contrat au Département de génie électrique de l'Université de Toronto pour étudier la réalisation technique d'un tel générateur, fondé sur le concept d'une machine à champ magnétique tournant, suggéré par feu le Professeur Van de Graaf. S'il n'était pas possible de faire l'étude technique de ce générateur à courant continu dans le délai disponible, la conception de l'ING serait poursuivie en se fondant sur le dispositif utilisé par l'accélérateur linéaire de protons de Los Alamos.

Les exigences techniques imposées à la source d'ions sont à certains points de vue moins difficiles à remplir que celles que remplissent certaines sources d'ions actuelles, mais à d'autres points de vue elles vont plus loin. Le type de source d'ions que l'on étudie est appelé "duo-plasmatron". Le CERN a utilisé des sources d'ions de ce type, ainsi que les laboratoires de Brookhaven et de Los Alamos. Elles donnent des pulsations de courant dépassant le courant nécessaire à l'ING. Les courants ne sont pas continus, mais les pulsations sont suffisamment longues pour établir une charge d'espace constante au cours de la pulsation, et de toutes façons le filament fonctionne continuellement. Ces faits indiquent qu'il ne devrait pas apparaître de difficulté théorique pour l'obtention du courant nécessaire à l'ING. Il ne serait nécessaire que d'établir un refroidissement complémentaire. Les sources utilisées pour les expériences sur la fusion thermonucléaire à Oak Ridge ont fonctionné à des courants d'arc atteignant 50 ampères, fournissant un courant d'ions de 1 ampère.³⁹

³⁹ Une revue récente de ces sources a paru il y a peu de temps. Voyez O.B. Morgan, G.C. Kelley et R.C. Davis dans "Technology of intense DC Ion beams" (Technologie des faisceaux intenses et continus d'ions), *Review of Scientific Instruments*, 38: 4, p. 467-480, avril 1967.

Les filaments résistent généralement quelques dizaines d'heures, bien qu'on ne se soit pas occupé de savoir si leur durée pouvait dépasser quelques heures. Le courant n'est pas concentré dans un volume suffisamment petit pour l'ING, c'est à dire que l'émittance, ou brillance du filament, n'est pas aussi grande qu'on le voudrait, mais le courant total est beaucoup plus intense qu'il n'est nécessaire pour l'ING.

Il semble ainsi que la technologie actuelle des sources d'ions soit parfaitement capable d'atteindre le but visé, bien que quelques perfectionnements techniques soient nécessaires. La plus grande difficulté est d'obtenir une vie utile de durée raisonnable, disons quelques jours au moins. Les plans du prototype de l'ING prévoient deux sources, dont l'une pourra fonctionner pendant que l'autre subira les réparations nécessaires. Cependant il serait préférable de réduire ces opérations au minimum, car chacun de ces changements demandera un démarrage et un réglage de la source d'ions qui pourraient causer une défocalisation accidentelle du faisceau et une irradiation des pièces de l'appareil, et déranger des expériences de longue durée. Les experts du CRNL pensent qu'il serait possible d'utiliser un duoplasmatron ou une cathode creuse sans filament chaud, éliminant ainsi une cause de détérioration rapide.

La publication AECL-2600 mentionne d'autres problèmes, touchant en particulier la stabilité du courant. Etant donné que 80 à 90 pour cent de l'énergie haute fréquence tournée aux cavités résonnantes seront absorbés par le faisceau en cours d'accélération, toute variation transitoire du courant du faisceau pourrait causer de fortes variations de la tension haute fréquence, entraînant une défocalisation du faisceau et une irradiation des pièces de l'accélérateur. Le plasma de la d'ions source peut être sujet à des oscillations ou à des instabilités, ce qui ajoute aux causes de fluctuations du faisceau.

e) La cible

La seule cible convenable pour un faisceau intense de neutrons semble devoir être un alliage métallique en écoulement de la composition mentionnée. L'utilisation d'un élément lourd est préférable pour la réaction de spallation; c'est pourquoi on a choisi un alliage de plomb et de bismuth. L'alliage est liquide à des températures supérieures à 125°C. Le circuit de la cible contiendrait de 50 à 60 tonnes de cet alliage, circulant dans les tuyaux à la vitesse de 12 pieds 3/4 par seconde, et à 20 pieds par seconde dans le tube cible. La température

minimale de l'alliage plomb et bismuth dans le circuit serait de 325°C et la température maximale de 450°C.

Le plan de la cible complète serait très complexe, et de la nature exposée dans l'AECL-2600, sections VII-A, bien qu'il ne soit pas établi définitivement. Les principaux problèmes viennent de l'alliage liquéfié, et de son action corrosive sur les pièces des pompes et sur les tuyauteries. On a déjà étudié cet alliage comme caloporteur dans les circuits de réfrigération des réacteurs, mais les travaux ont été ralentis depuis quelque temps en raison de l'utilisation générale du sodium liquéfié comme fluide caloporteur. Une grande partie des travaux originels ont été accomplis à Brookhaven; c'est pourquoi le Dr. Blewett et ses collègues ont une large connaissance du sujet. Comme ils l'indiquent en détail (appendice II, 2-5), les problèmes posés par le choix des matériaux et des méthodes de construction sont formidables et ils nécessiteront nombre d'études et d'expériences.

Non seulement certains composants sont attaqués ou dissous partiellement par l'alliage plomb-bismuth, mais encore la corrosion est très accélérée par certaines impuretés présentes en faibles quantités dans l'alliage, lesquelles peuvent y être formées par transmutation sous l'action du faisceau intense de neutrons. En outre, la solubilité de certains composants présents en proportion de quelques parties par million peut être très importante, car les différences de températures tout au long du circuit de l'alliage liquéfié peuvent causer la dissolution d'un élément en un lieu du circuit et son dépôt en un autre. Les différences de températures ajouteront l'action électrolytique à la corrosion directe par solution et aux efforts mécaniques tels que ceux de la cavitation.

Les scientifiques du CRNL sont cependant bien au courant de ces difficultés. Nous attirons l'attention sur elles, pour qu'on ait une meilleure compréhension de l'ampleur des problèmes qui restent à résoudre.

f) Autres modèles d'accélérateurs de protons

En plus de leur effort principal dirigé vers la mise au point d'un accélérateur linéaire de protons, les scientifiques du CRNL ont poursuivi leurs études sur une petite échelle au sujet d'autres appareils qui pourraient accélérer les protons plus directement ou plus économiquement. L'un des appareils étudiés est le "prototron" qui accélère les électrons, en pulsation par un procédé du type "transformateur", et où les électrons circulant dans l'appareil y constituent le secondaire d'un transformateur. Le prototron semble offrir quelque intérêt parce

qu'il pourrait conduire directement à un dispositif annulaire d'emmagasinement magnétique ce qui représente une extension possible de l'ING. Cependant la possibilité de réaliser des économies sur le prix de revient paraît douteuse.

Une seconde possibilité est constituée par le dispositif "plasmadrag", utilisant des pulsations très intenses d'électrons, émis par effets de champ, et entraînant des protons dans leur sillage. Ainsi de forts courants d'électrons accélérés par des champs de quelques millions de volts seulement pourraient impartir de très fortes énergies aux protons (dans le rapport de leurs masses s'ils atteignent la même vitesse). Un exposé du Dr Lewis⁴⁰ a analysé cette idée de façon préliminaire.

Il consisterait fondamentalement en un dispositif utilisant les plasmas, mais pourrait souffrir de diverses difficultés, telles les instabilités, la recombinaison électron-ion, etc. C'est une idée d'un avenir problématique, qui pourrait nécessiter de nombreuses études poussées et autant d'expériences; ce sont pourtant de telles idées qui pourraient ouvrir la voie vers des méthodes économiques de construction d'un générateur à flux neutroniques intenses.

L'emploi des supraconducteurs pourraient fournir d'autres possibilités, aidant à réduire les pertes en haute fréquence et permettant ainsi de raccourcir l'accélérateur. Un petit prototype d'accélérateur d'électrons utilisant des supraconducteurs a récemment fourni des résultats prometteurs à Stanford. Les pertes HF peu élevées permettent d'accélérer les électrons en un faisceau continu plutôt que par pulsations.

Plus de 200 communications ont été présentées à une conférence récente sur le génie et la technologie des accélérateurs (Washington du 1^{er} au 3 mars 1967). Elles constituent la preuve de l'évolution constante des idées actuelles sur la construction des accélérateurs.

g) Conclusions sur les possibilités de réalisation

La liste des problèmes mentionnés ci-dessus ne prétend pas être exhaustive. Il suffit de montrer que les difficultés restant à surmonter au cours du développement technique de l'ING sont très nombreuses, et que les expériences nécessaires pour délimiter les problèmes posés se trouvent à un stade préliminaire tel que les devis

⁴⁰ W. B. Lewis. Proposed Experiments to Test New Principles for a High Energy Accelerator. (Expériences proposées pour l'essai de nouveaux principes d'accélération des particules à haute énergie) DM-87, Chalk River, Février 1967).

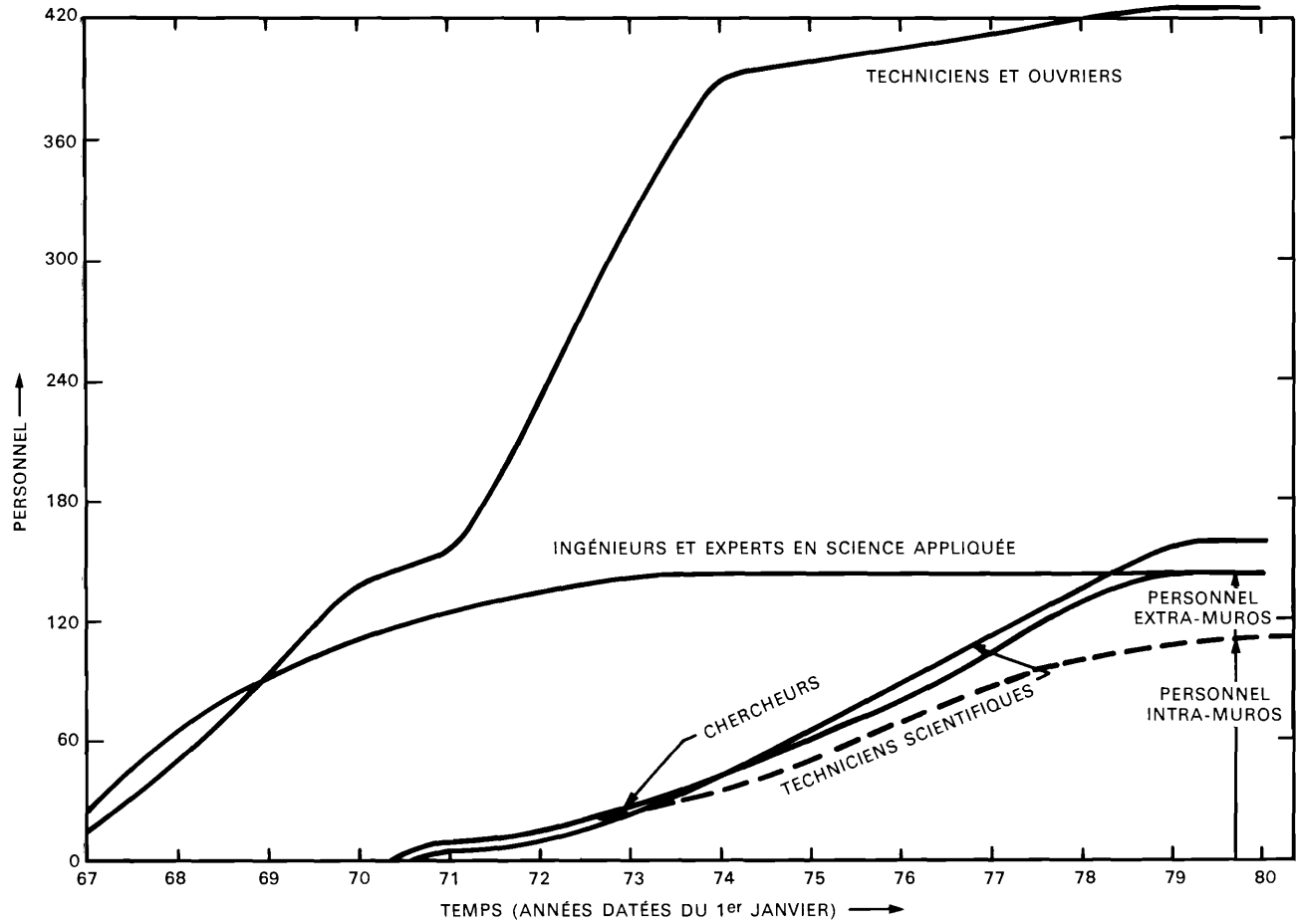


Figure 5 PERSONNEL INTRA-MUROS POUR L'ING-AUGMENTATION AVEC LE TEMPS (graphique extrait du document AECL FSD/ING-75).

estimatifs et l'évaluation du délai de réalisation ne peuvent être qu'approximatifs. Dans la plupart des cas, cependant, le programme de l'ING ne semble pas se trouver en dehors des voies normales de développement de la technologie des accélérateurs. Nous estimons, en nous appuyant sur l'avis de nos conseillers scientifiques, que l'ING est probablement réalisable, à condition que les études et les expériences destinées à établir le plan du prototype continuent. Le problème des possibilités de réalisation devrait être clairement résolu après un an et demi ou deux ans de recherches complémentaires. On pourra établir à ce moment des devis beaucoup plus sûrs, et il serait alors possible de prendre la décision nette à ce moment de poursuivre la construction en se fondant sur les résultats obtenus.

2.3 CONSIDÉRATIONS SUR LE PERSONNEL

a) Besoins en personnel.

Le personnel total nécessaire pour faire fonctionner l'installation de l'ING atteindra de 650 à 750 personnes pour le générateur seul en 1974 puis passera à 900 ou 1000 personnes pour l'installation complète vers 1980. La figure 5 montre un diagramme de l'accroissement du personnel d'année en année, depuis le début des travaux de construction, selon la publication FSD/ING-75, p.8.

On peut faire deux remarques à propos de ce diagramme. Il semble tout d'abord que le besoin d'avoir quelques chercheurs scientifiques dès le début pour préparer l'étude des possibilités expérimentales de l'appareil ait été oublié, ou que tout au moins on ait pensé qu'ils ne seraient requis qu'à titre de conseillers scientifiques à temps partiel. Deuxièmement, le titre d'une des courbes est inexact. Elle rapporte les scientifiques attachés à l'établissement, alors que les scientifiques invités y sont aussi comptés; ils devraient atteindre le nombre de 15 pour le générateur seul, et de 50 lorsque l'installation entière sera terminée. En conséquence nous avons tracé une ligne en tirets pour représenter la courbe révisée.

Les courbes de la figure 6, tirées encore de la publication FSN/ING-75, représentent l'apport de personnel extérieur sous contrat. Aucune des courbes ne montre l'apport de personnel universitaire sous contrat ou à titre consultatif qui pourrait être un élément d'importance. Nous espérons bien que le programme réussira à promouvoir les recherches extérieures, (recherches appliquées tout au moins) dans les firmes industrielles et chez les consultants à un niveau plus élevé que la courbe inférieure de la figure 6 ne semble l'indiquer. Nous

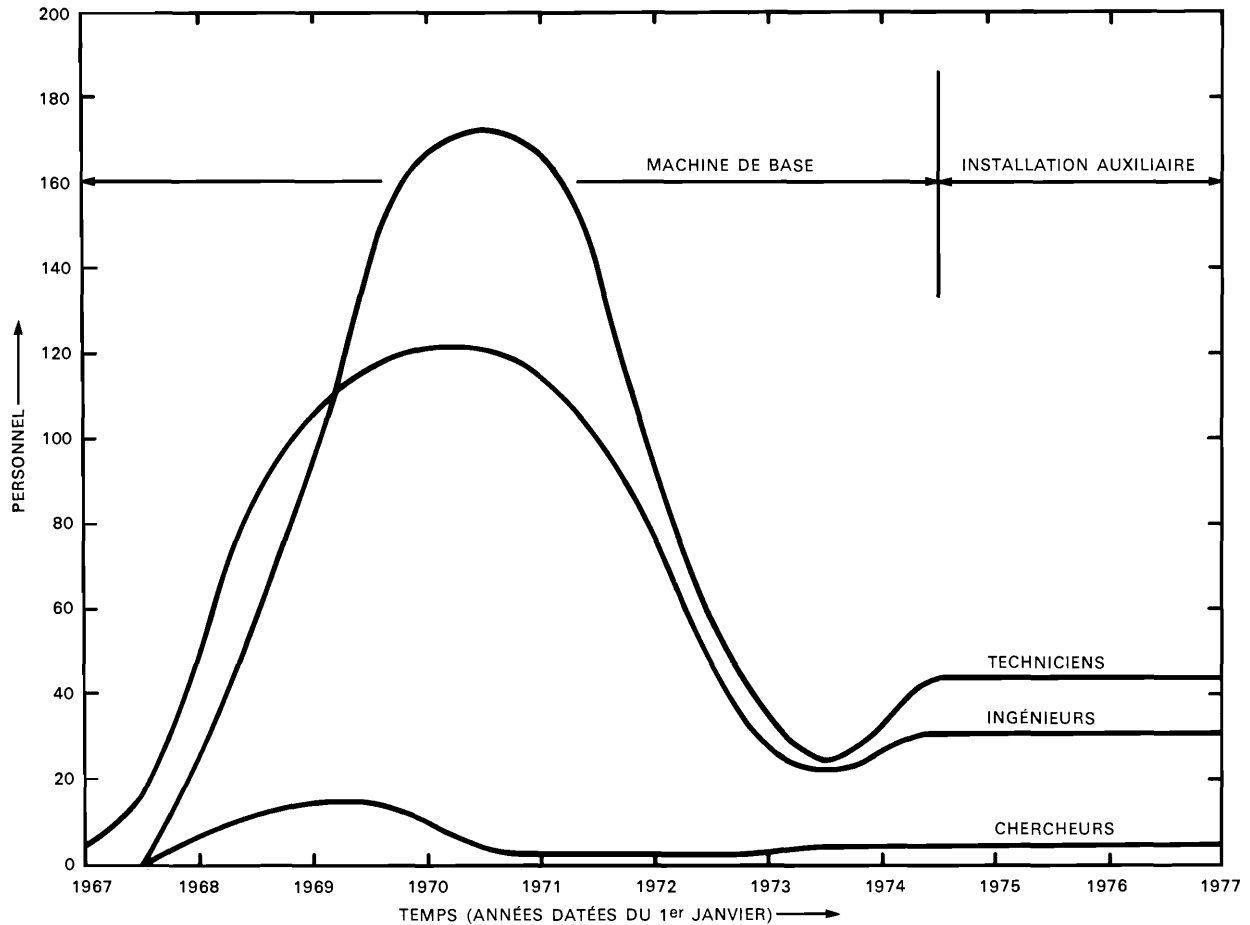


Figure 6 PERSONNEL D'ENTREPRISES CONTRACTANTES ET CONSULTATIVES APPELÉ À TRAVAILLER POUR L'ING (d'après le document AECL FSD/ING-75).

croions que ces disparités résultent d'erreurs ayant entaché la préparation des courbes, car elles ne reflètent pas les intentions mentionnées dans la proposition, ni celles que les dirigeants de l'ÉACL ont exprimées verbalement.

Les étudiants diplômés travaillant conjointement avec le personnel universitaire peuvent constituer un autre élément important des effectifs utilisant l'installation. Si par exemple 30 ou 40 scientifiques travaillent comme visiteurs dans l'installation terminée, et que chacun amène une moyenne de deux ou trois étudiants diplômés, il s'y trouvera un groupe de 60 à 90 étudiants menant des expériences scientifiques, sans compter beaucoup d'autres des sections de génie qui pourraient travailler sous contrat à la solution de problèmes de génie. On ne peut qu'évaluer très approximativement l'apport d'étudiants diplômés, car ceux qui sont relativement inexpérimentés en recherche ne sont pas toujours acceptés avec plaisir aux installations de recherche avancée, où toute erreur de jugement pourrait causer une panne très coûteuse et des retards aux autres chercheurs.

On a tracé un diagramme pour donner quelques idées de la composition des effectifs travaillant pour l'ING et de leur domaine d'activité. Il montre la répartition du personnel scientifique, entre autres, à trois stades importants de l'évolution du programme, c'est-à-dire au cours de la construction (vers 1970), au début de l'exploitation de l'accélérateur seul (vers 1974) et en pleine exploitation de l'installation terminée (vers 1980). Les chiffres et leur disposition sont tirés de l'étude des effectifs parue dans FSD/ING-67 et FSD/ING-75, des exposés de G.A. Bartholomew et T.G. Church (28, 29 novembre et 8 décembre 1966). Ils ont été précisés au cours de discussions avec les scientifiques du CRNL. Il n'est pas besoin de dire que les chiffres ne sauraient être donnés avec précision maintenant, et qu'ils représentent un compromis entre diverses opinions. On ne peut les utiliser qu'à titre indicatif.

On peut remarquer que le nombre de scientifiques mentionné ne concorde pas exactement avec la répartition des pourcentages d'utilisation indiqués au chapitre concernant l'importance de l'ING. La raison réside dans le caractère partiellement subjectif de cette répartition, incluant non seulement les utilisateurs directs de l'ING mais aussi les utilisateurs indirects, et basée sur l'importance des opérations connexes. Ainsi le nombre de scientifiques s'occupant directement de la chimie et de la production des isotopes serait sans doute très faible, mais l'ING pourrait devenir le centre principal dans le domaine des applications des isotopes et des opérations

Tableau 3. Personnel Scientifique Travaillant avec l'ING

Genre d'activité	Au cours du développement technique et de la construction, vers 1970		Générateur seulement, vers 1974		Installation complète, vers 1980		Remarques:
	Chercheurs scientifiques	Personnel de soutien en sciences appliquées et en génie	Chercheurs scientifiques	Personnel de soutien en sciences appliquées et en génie	Chercheurs scientifiques	Personnel de soutien en sciences appliquées et en génie	
Physique nucléaire fondamentale	1		21	15	70	20	40 visiteurs
Physique des réacteurs (y compris la technologie nucléaire avancée)	1		2	3	10	11	
Physique fondamentale de l'état solide	1		15	7	23	7	
Matériaux, métallurgie	1		2	14	15	14	
Électromagnétisme (y compris les nouvelles conceptions d'accélérateurs la haute tension, les supra-conducteurs, les plasmas, etc.)	10	85	5	45	10	30	
Chimie, isotopes	1		3	3	6	10	
Sciences biologiques			2	3	6	3	
Total pour la rech. et le dével. tech.	15	85	50	90	140	95	
Personnel d'exploitation		<u>10</u>		<u>55</u>		<u>58</u>	
Personnel scientifique		110		195		293	
Scientifiques invités mentionnés ci-dessus			15		50		

commerciales de la Division des produits commerciaux, où un important personnel serait occupé aux travaux de développement technique, de traitement et de commercialisation. Ce personnel pourrait atteindre plusieurs centaines de personnes vers 1980, pour un chiffre d'affaires brut pouvant aller jusqu'à 50 millions de dollars. De même, les résultats particulièrement intéressants qu'il est possible d'obtenir en physique de l'état solide par l'emploi d'un flux intense de neutrons peuvent servir à promouvoir un effort beaucoup plus considérable de recherches sur l'état solide ne nécessitant pas directement l'utilisation du générateur de neutrons mais réalisé tant à l'installation de l'ING que dans les laboratoires avoisinants. Un autre facteur intervenant dans l'appréciation subjective consiste dans le fait que l'intérêt scientifique soulevé par le générateur pourrait y attirer un grand nombre de physiciens désirant travailler à l'étude des mésons, bien que la proposition de l'ING n'accorde pas de haute priorité à l'installation d'un générateur de mésons comme raison motivant la réalisation du programme de l'ING.

On s'est demandé si le nombre de scientifiques de différentes spécialités qui seraient attirés par l'ING serait susceptible d'entraîner une demande trop forte sur les ressources disponibles, et ainsi d'empêcher que d'autres programmes de valeur puissent bénéficier d'un effectif convenable des scientifiques. Pour évaluer cette possibilité on a pris pour acquis que les physiciens seraient les plus nombreux dans les disciplines représentées.*

Le Secrétariat des sciences procéda à une grossière estimation du nombre des scientifiques dans les spécialités pertinentes de la physique (en suivant la répartition du relevé statistique de l'A.C.P. en 1964) dont on peut raisonnablement prévoir la présence parmi les effectifs prévus de l'ING pendant les années 1974 et 1980. Ces chiffres seront comparés à ceux qui indiquent le nombre total de physiciens canadiens dans les mêmes disciplines à l'époque considérée.

* Ce n'est pas le cas pour le personnel actuel de l'ÉACL, malgré l'idée préconçue que tout membre de l'organisme est un physicien nucléaire. En fait la spécialité qui compte le plus grand nombre de membres est le génie chimique. Le nombre total de scientifiques est de 803, dont seulement 171 sont des physiciens; 70 de ces derniers travaillent en recherche appliquée, dans le secteur du perfectionnement des réacteurs de puissance, et seulement 29 travaillent à la recherche en physique nucléaire fondamentale. Données tirées d'un relevé en cours de l'Association canadienne des physiciens.

Tableau 4. – Personnel Scientifique Travaillant avec l'ING
Répartition approximative par spécialité.

	Générateur 1974		Installation complète, 1980	
	Total	Docteurs ès sc.	Total	Docteurs ès sc.
Physique:				
Électromagnétisme	15	5	15	5
Électronique	30	10	60	10
Particules élémentaires	2	1	3	2
Physique nucléaire	27	20	106	70
État solide	22	15	30	22
Chaleur	2	1	2	1
	<u>98</u>	<u>52</u>	<u>216</u>	<u>110</u>

Remarque: Un nombre croissant de scientifiques, y compris des titulaires de doctorats, viennent à l'électromagnétisme et à l'électronique par la voie du génie électrique plutôt que par celle de la physique et les étudiants qui précédemment obtenaient leurs diplômes en génie physique les reçoivent maintenant sous d'autres dénominations, telles que les sciences de l'ingénieur. Dans le cas précédent nous considérons que les désignations traditionnelles sont encore employées, bien que cette évolution sémantique fasse des relevés par discipline une entreprise vouée à l'échec.

Les inscriptions dans les écoles des gradués en science et en génie s'accroissent rapidement: l'augmentation atteint 20 pour cent par an ou plus depuis plusieurs années. Les prévisions du nombre de bacheliers ès sciences, de titulaires de maîtrise et de doctorats, tirées des études de prospective de Michener et Sheffield ⁴¹, ⁴² sont reproduites à la figure 7.

On s'est basé sur les taux de croissance indiqués qui atteignent entre 10 et 20 pour cent par an, et sur les prévisions du taux d'accroissement du nombre total de physiciens aux É.-U. ⁴³ pour établir les hypothèses suivantes:

⁴¹ R. D. Michener. "First Degrees Awarded by Canadian Universities and Colleges, projected to 1976/77" (Prévisions établies jusqu'en 1976-1977 du nombre des diplômes accordés par les universités canadiennes et les écoles affiliées), Canadian Universities Foundation, 1964

⁴² E. F. Sheffield. "Enrolment in Canadian Universities and Colleges to 1976/77" (1966 projection) (Prévisions établie jusqu'en 1976-1977 des inscriptions dans les universités canadiennes et les écoles affiliées; Extrapolation de 1966) A.U.C.C. Ottawa, 1966.

⁴³ "Physics,—Education, Employment Financial Support — A Statistical Handbook", (Exposé statistique concernant l'instruction, la main-d'oeuvre et l'aide financière dans le domaine de la physique) American Institute of Physics, 1964)

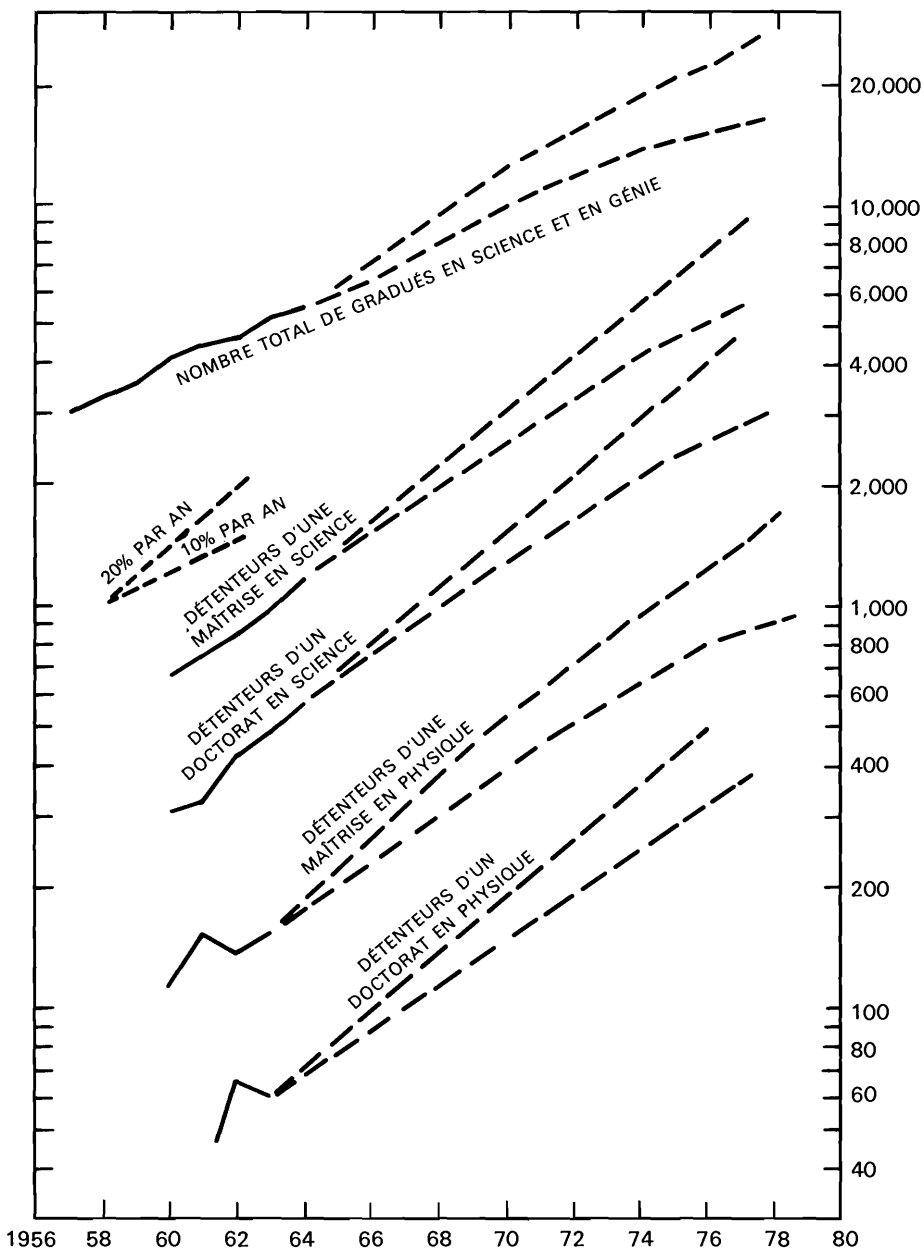


Figure 7 TAUX ANNUELS D'OBTENTION DES DIPLÔMES DANS LES UNIVERSITÉS CANADIENNES ET PRÉVISIONS JUSQU'EN 1980.

Graphique établi d'après R. D. Michener C.U.F., 1964, mais la marge d'erreur s'élargit avec le temps.

Note: La participation des détenteurs de Maîtrise d'une classe de 1^{er} ordre passe de 1:5 en 1964 à 1:3 en 1975. La participation des détenteurs de Doctorat passe, elle, de 1:10 en 1964 à 1:6 en 1975.

1. Le taux de croissance du nombre de physiciens au Canada dans les spécialités dont l'importance relative est raisonnablement comparable à celle des É.-U. c'est-à-dire en physique nucléaire et en physique de la chaleur, par exemple, devrait atteindre 10 pour cent par an.

2. Les taux de croissance dans les autres domaines, où l'effort scientifique du Canada semble relativement faible, c'est-à-dire en électromagnétisme, en électronique, en physique de l'état solide, ont été évalués à 15 pour cent.

3. Les taux de croissance aux É.-U. ont été évalués uniformément à 10 pour cent. L'extrapolation du nombre des diplômes obtenus se fonde naturellement sur la constance de la proportion de physiciens par rapport au nombre total de diplômés. Il est cependant parfaitement possible que la structure sociale du Canada change, que l'intérêt des étudiants pour les sciences et les techniques se déplace, et que le nombre de personnes entrant dans le domaine de la physique, de l'électrotechnique, de la chimie nucléaire et des sciences biologiques croisse ou décroisse.

La figure 8 reproduit les résultats de ces calculs, et la figure 9 établit la comparaison entre ces résultats et les chiffres concernant les É.-U. Il apparaît immédiatement que les tendances actuelles causeraient un très fort accroissement numérique si elles persistaient. Le nombre total des physiciens devrait sextupler, et passer de 1300 en 1964 à 7500 en 1980. En conséquence, les besoins en personnel de l'ING semblent relativement faibles par rapport au nombre total de physiciens canadiens dans les spécialités concernées. Par exemple, en 1980 le personnel de l'ING comprendra 60 physiciens en électronique sur un total de presque 900, soit 6 à 7 pour cent. Lors de son étude des effectifs nécessaires, le Dr. Lewis a souligné que les domaines intéressant particulièrement les scientifiques vers 1980 pourraient bien causer une proportion excessive de la physique nucléaire et de la physique de l'état solide lors de l'utilisation de l'ING. Si l'on pense que la physique nucléaire doit accaparer l'attention des scientifiques, et que le générateur de mésons attirerait un grand nombre d'expérimentateurs, particulièrement de l'extérieur, le nombre de physiciens pourrait bien atteindre 106 vers 1980, sur un total de 920, ou de 1070 si l'on y inclut les physiciens spécialistes des particules à haute énergie. Ces chiffres signifient que 10 ou 11 pour cent de tous les physiciens du Canada utiliseraient l'ING pour la plupart ou la totalité de leurs expériences. Il ne semble pas que cette proportion soit excessive si l'on considère que l'ING serait la principale installation canadienne dans le domaine de la physique nucléaire.

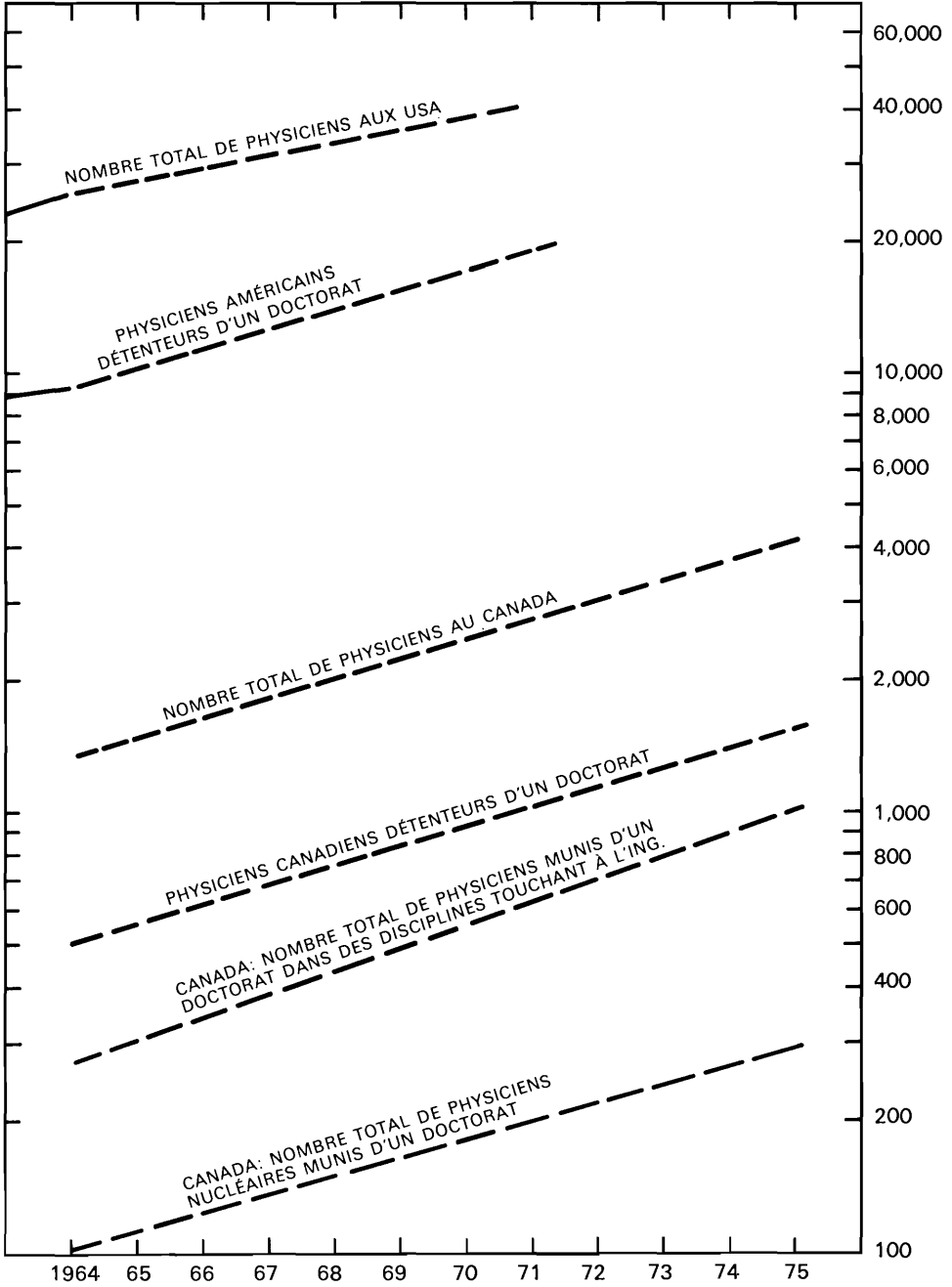
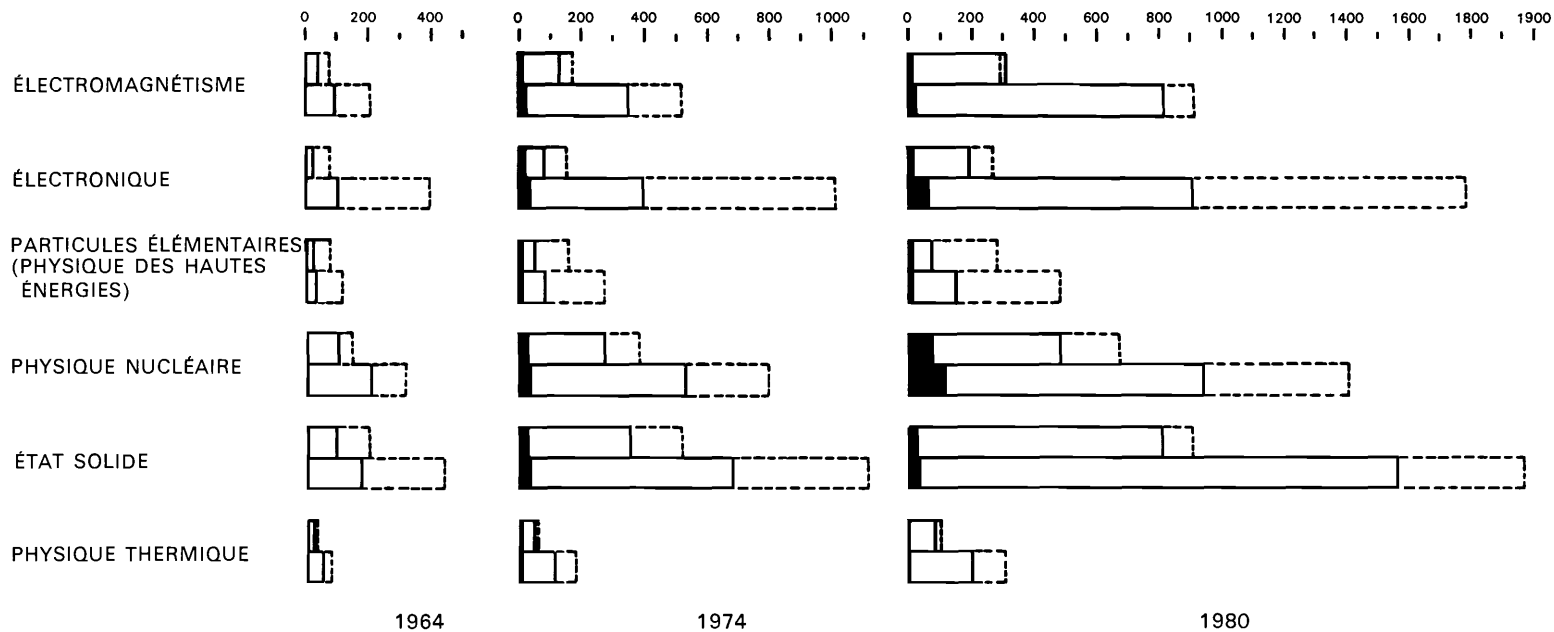


Figure 8 NOMBRE DE PHYSIENS PRÉVUS JUSQU'EN 1975.



Le nombre total des physiciens canadiens est indiqué par la bande inférieure de chaque paire

Le nombre des physiciens munis d'un Doctorat est indiqué par la bande supérieure de chaque paire

En ligne pointillée on peut voir le nombre des physiciens américains réduit par tête d'habitant

Les parties ombragées donnent le nombre de physiciens qui emploient l'ING

Figure 9 NOMBRE DE PHYSICIENS AU CANADA DANS DES DISCIPLINES TOUCHANT À L'ING.

On n'a pas établi de prévisions du nombre total des scientifiques et des ingénieurs; bien entendu leur nombre serait beaucoup plus élevé que celui des physiciens, et il ne semble pas que l'ING puisse éprouver des difficultés à se procurer le personnel scientifique nécessaire dans un tel contexte.

Les analyses statistiques ainsi réalisées n'indiquent nullement qu'il se produirait une demande excessive de techniciens et de scientifiques de la part de l'ING. Cette remarque ne signifie pas que certaines pénuries de spécialistes, de personnel expérimenté, ou de personnalités exceptionnelles ne se produiraient pas. Il n'est cependant pas obligatoire de se limiter aux ressources canadiennes en spécialistes. Un des arguments principaux favorisant la construction d'une installation exceptionnelle comme l'ING est qu'elle constituerait un centre d'attraction d'une puissance suffisante pour attirer des scientifiques et des techniciens de tous les pays du monde. Il n'y a aucun problème d'effectifs pour l'organisme qui peut puiser dans le réservoir international de spécialistes. En outre, si l'ING était l'instrument par lequel un autre Rutherford pouvait être attiré au Canada, sa valeur serait très grande assurément.

La conclusion à laquelle on arrive après étude des prévisions va à l'encontre des craintes voulant que l'ING fasse un emploi excessif des effectifs scientifiques canadiens; au contraire, comme le nombre des diplômés en études supérieures doit croître si rapidement, le Canada éprouvera des difficultés à leur offrir les positions attrayantes qui retiendront les plus brillants d'entre eux au pays.

Michener⁴¹ a noté ce qui suit: "Il n'est pas trop tôt actuellement pour se demander comment nous emploierons les 95,100 diplômés qui sortiront des universités en 1976-1977, et comment les trois quarts de million de diplômés de la période 1963-1964 à 1976-1977 seront utilisés au mieux."

Les avertissements des économistes doivent cependant être présents à l'esprit en même temps que les considérations précédentes. Il ne faut pas que ces arguments nous induisent à soutenir des projets qui ne seraient simplement réalisés que pour fournir du travail à certains.

b) Rôle joué par la formation d'un personnel scientifique et technique qualifié.

Si l'on examine le projet de laboratoire national que constituerait l'ING, on comprend qu'il ne devrait pas agir comme un malstrom englutissant les rares effectifs de scientifiques ou de techniciens, mais

plutôt comme une source, ou un terrain de formation supérieure de ces mêmes scientifiques ou techniciens.

L'ING fournira aux jeunes scientifiques venant de recevoir leur doctorat la possibilité de perfectionner leurs connaissances, par leur collaboration à plein temps avec les équipes de pointe travaillant aux frontières de la recherche. Quand ils auront découvert leur voie, peut-être après avoir fait une contribution d'importance aux recherches, nombre d'entre eux partiront occuper des postes universitaires ou des postes de chercheurs dans les laboratoires, y compris ceux de l'industrie. Cette évolution s'est produite au CRNL, au Conseil national de recherches, et dans d'autres grands laboratoires à l'étranger, et elle a constitué un complément de valeur au système traditionnel d'éducation. Les problèmes posés par le développement technique, la construction, et l'exploitation de l'ING entraîneront des travaux scientifiques en avance sur les besoins et les capacités actuelles de l'industrie, dans les autres domaines des sciences appliquées, du génie, de l'aide technique et des métiers techniques. L'expérience acquise par le travail en collaboration avec une équipe de pointe sous une direction scientifique de premier ordre est l'équivalent d'un cours supérieur, en administration, en organisation de la recherche et du développement technique, et dans les divers domaines scientifiques et techniques pertinents. Ce type d'internat technique peut avoir des effets à longue portée, au fur et à mesure que ces diplômés se répandront dans les organismes industriels et publics, dans les établissements d'enseignement, comme de nombreux scientifiques et ingénieurs en sont la preuve vivante à la suite de leur internat au MIT Radiation Laboratory, avec le Manhattan Project, au U.K. Telecommunication Research Establishment, et avec d'autres grands programmes coordonnés de recherches et de développement technique de la seconde guerre mondiale.

Il faut établir un équilibre judicieux entre les différents facteurs tels que le type d'organisation, l'échelle des traitements, le genre de poste, la ligne de conduite de la direction, l'emplacement du laboratoire etc. pour rendre ce rôle le plus productif possible et en même temps pour préserver le dynamisme de l'établissement et le moral de son personnel. Il est par conséquent nécessaire d'analyser l'expérience d'autres organismes du même type.

La fondation d'une école, par exemple, n'a aucune utilité si ses diplômés ne peuvent trouver d'emploi. Il est inutile d'essayer de prévoir actuellement quelles seront les spécialités dont l'industrie aura précisément besoin au cours des deux ou trois prochaines décennies.

Tout ce qu'on peut savoir est qu'elles auront un contenu scientifique de plus en plus élevé, et qu'elles nécessiteront un large emploi des technologies des ordinateurs et de l'information. L'envergure et la variété des techniques mises à contribution pour la réalisation de l'ING donnent quelques assurances que des carrières seront ouvertes aux spécialistes qui y seront formés, aurant qu'on puisse l'espérer maintenant, et beaucoup plus que ne le pourraient d'autres programmes proposés.

2.4 ESTIMATION DES DÉPENSES

L'analyse qui suit est basée sur les données fournies par l'ÉACL dans les publications AECL-2600, FSD/ING-67, FSD/ING-75, et le devis préliminaire de décembre 1966, préparé pour l'ÉACL par la Shawinigan Engineering Company, Ltd. Les conseillers techniques du Comité ont procédé à quelques vérifications et ont fait quelques remarques, mais aucune étude indépendante du détail des coûts de revient ne pouvait être entreprise dans le délai disponible; un tel travail n'aurait d'ailleurs pas été approprié en raison de l'état incomplet des études de conception.

a) Frais de développement technique, de génie et de planification.

La proposition incluse dans la publication FSD/ING-67, mentionne ce qui suit à la page 28, section XI.A:

“On s'attend que la mise au point technique de l'ING se poursuive de la même façon que celle des autres grands projets de l'ÉACL, en dépit d'un besoin beaucoup plus grand en travaux de recherche. Il y aura ainsi trois voies principales ouvertes aux travaux de développement technique. La première sera la voie de la recherche appliquée dans les sections scientifiques, recevant quelque aide par le canal des contrats de recherche universitaire, et dirigée vers l'acquisition de données complémentaires touchant des problèmes particuliers posés par le principe même de l'ING. Il n'est pas pratique de séparer la part de cet effort de recherche destiné spécialement à l'ING, et son coût est inscrit au budget de fonctionnement de la section scientifique concernée.”

Le Comité reconnaît que le personnel ne serait pas employé de la meilleure façon possible si un groupe séparé était formé. Au lieu d'employer les scientifiques de l'ÉACL dans un rôle plus ou moins consultatif. Cependant l'emploi de ce personnel et de ses installations constitue une dépense qui devrait être portée au débit de l'ING. Il ne devrait pas être trop difficile d'établir une comptabilité simple dans

laquelle on pourrait évaluer le travail de ceux qui par exemple passeraient au moins le tiers de leur temps à des recherches pour le programme de l'ING. Les consultations exceptionnelles ou occasionnelles seraient simplement classées parmi les avantages dont bénéficie un organisme important et actif.

La conception, le développement technique et la surveillance de la construction du générateur nécessiteraient la présence d'un groupe d'environ 95 scientifiques et ingénieurs résidents ainsi que du personnel de soutien (FSD/ING-67, XI.B,p.30) Le groupe serait chargé des fonctions suivantes, au cours de la conception et de la construction de l'ING:

“Il expliquera les principes fondamentaux du fonctionnement de l'accélérateur et de la cible, établira un plan préliminaire de l'ING, y compris l'injecteur, l'accélérateur, les salles d'expériences et l'appareil générateur de neutrons lents.

Il réalisera des recherches appliquées pour l'ING en physique et en génie, y compris le perfectionnement de l'accélérateur, des électroaimants et des générateurs et guides de haute fréquence.

Il préparera des études de génie et des devis estimatifs pour tous les éléments de l'ING.

Il maintiendra une liaison avec les conseillers scientifiques et avec les entrepreneurs.”

Le coût du travail a été divisé d'une part en recherches et développement technique, occupant environ 40 scientifiques, et d'autre part en travaux de génie, occupant les 55 ingénieurs restant. Les devis estimatifs sont présentés dans le Tableau des prévisions budgétaires (FSD/ING-75, p. 27) aux rubriques “Recherches et développement technique”, “Personnel”, “Administration”, “Entretien”, “Frais d'exploitation” jusqu'à ce que le générateur soit terminé, soit vers 1974-1975. Après la mise en marche du générateur, il se produira une redistribution du personnel. Certains membres du groupe iront au soutien du programme de recherches, d'autres continueront les recherches de pointe, le perfectionnement de l'ING et les travaux de développement technique, d'autres encore s'occuperont de la direction de l'exploitation et de l'entretien du générateur lui-même.*

* La description et les devis pour “recherche et développement technique” de l'accélérateur à la page 28 du FSD/ING-76, XI.A, s'appliquaient au modèle de cyclotron à orbites séparées. Les problèmes de la mise au point du SOC ont été remplacés par ceux de l'accélérateur LINAC; les devis sont similaires.

Tableau 5 Devis Estimatif
des frais de recherches et de développement technique de l'ING
au cours de la construction du générateur.

(en millions de dollars, valeur de 1966)

Année budgétaire	Recherches et dévelop- pement technique	Personnel	Adminis- tration	Entretien	Frais d'exploit- ation	Total
1967	1.5	0.41	.02	—	—	1.93
1968	3.0	1.0	.03	—	—	4.03
1969	4.5	1.98	.04	—	.02	6.54
1970	4.5	2.08	.07	.03	.10	6.78
1971	4.5	2.08	.15	.10	.20	7.03
1972	3.0	2.08	.30	.30	.40	6.08
1973	1.5	2.08	.65	.60	.70	5.53
1974	1.5	2.08	.75	2.52	3.84	10.69

Remarque: Ces chiffres sont tirés du tableau de la page 27 du FSD/ING-75, mais le Comité a majoré de 50 pour cent les chiffres de la colonne "Recherches et développement technique" pour inclure les frais de la recherche appliquée mentionnée au début du présent chapitre. En raison de la nature des problèmes posés par le développement technique, et du désir d'accroître les possibilités de l'industrie canadienne au cours de cette phase de développement, le Comité considère que ces chiffres révisés peuvent encore être inférieurs aux coûts réels. Il faut cependant tenir compte de certains frais de construction. Il faudra réaliser d'autres études du développement technique et de la construction avant que l'on puisse avoir des bases suffisantes pour décider si le total a été sous-estimé ou surestimé.

b) Frais de construction

Les coûts de construction du générateur muni d'un accélérateur LINAC ont été calculés en détail par la Shawinigan Engineering Company Ltd. En voici le sommaire:

A. Coûts directs

1. Préparation du terrain 1,748,900
2. Injecteur 1,648,400
3. Générateur haute
fréquence 40,580,000
4. Accélérateur 15,945,600
5. Appareillage mécanique 606,100
6. Centre de commande
principal 247,400
7. Installation pour
l'étude des mésons 652,300

8. Tunnel à forte irradiation	4,921,200	
9. Tunnel pour les neutrons lents	1,738,400	
10. Installation pour les neutrons lents	14,273,200	
11. Bureaux et laboratoires	3,000,000	
12. Circuit caloporteur	1,260,000	
13. Services d'entretien et services publics	4,920,700	
14. Taxe de vente	210,000	91,752,200
B. Imprévus	15,577,500	107,329,700
C. Travaux de génie et gestion	18,337,400	125,667,100
D. Rajustement des prix	17,580,700	143,247,800
		143,000,000
E. Articles imprévus (10%)	14,300,000	157,300,000
F. Amélioration de conception	15,730,000	<u>141,570,000</u>

Le tableau de la page 27 du FSD/ING-75, donne une estimation approximative des dépenses, année par année. En voici la partie importante:

Tableau 6. Dépenses Annuelles de Construction

Année budgétaire	Dépenses de construction (en millions de dollars courants)*
1967	0.3
1968	2.8
1969	18.9
1970	23.6
1971	31.4
1972	34.0
1973	26.0
1974	4.6
Grand total	<u>141.6</u>

* rajustés de 4 pour cent par an.

En raison de l'incertitude qui affecte les prévisions du développement technique nécessaire à certains appareils, on ne peut considérer les montants ci-dessus que comme indiquant des ordres de grandeur. Des majorations de 30 pour cent pour imprévus ont été effectuées sur les devis de la plupart des articles soumis à ces incertitudes, et par conséquent on ne peut dire que le total constitue un minimum artificiel. Des difficultés inattendues pourraient accroître le total d'un montant pouvant atteindre 25 pour cent, mais par contre les coûts pourraient être diminués par des efforts dynamiques, de l'imagination, une excellente administration, de la chance aussi, et peut être par le fait que certains coûts ont été fixés trop hauts. Les conseillers du Comité ont découvert que certains articles avaient été oubliés, mais aussi que d'autres avaient été évalués trop généreusement. En définitive, ils ont estimé que les coûts totaux avaient été fixés de façon aussi réaliste que possible au stade des connaissances actuelles, et que des erreurs grossières étaient peu probables. Une estimation plus précise ne pourrait être obtenue qu'après des études plus poussées de certains appareils, tels la source ionique, le générateur haute fréquence et la cible de métaux liquides.

Quand le générateur de neutrons lui-même sera terminé, il sera nécessaire de construire les appareils annexes destinés aux chercheurs.

Ces devis (concernant l'installation fondamentale), comprennent le coût de l'accélérateur et des premières installations de recherche. On estime qu'il serait nécessaire de dépenser 27 millions de dollars pour l'érection d'autres installations de recherche nécessaires à des équipes scientifiques plus nombreuses. (FSD/ING-67, Ch. IV, p. 2) Le montant de ces frais dépendrait fortement des types d'expériences à réaliser, et serait probablement le plus élevé dans le cas où la majorité des scientifiques désireraient réaliser des expériences avec des mésons. Le tableau apparaissant à la page 27 du FSD/ING-75 semble donner une estimation raisonnable des coûts de construction de 1975 à 1980.

Tableau 7 – Estimation des Frais de Construction pour Compléter l'Installation (tiré du FSD/ING-75)

Année budgétaire	millions de dollars courants
1975	2.0
1976	6.5
1977	8.8
1978	9.0
1979	9.3

c) Frais d'exploitation et d'entretien

La Shawinigan Engineering Company (SECO) a établi des estimations des frais d'exploitation et d'entretien du générateur lui-même (installation fondamentale) quand il sera en pleine exploitation. Les chiffres effectifs sont basés sur la répartition du personnel exposée dans le FSD/ING-67. En voici le sommaire:

Tableau 8. Estimation des effectifs et des frais d'exploitation et d'entretien

	Effectifs	Frais annuels (y compris salaires et matériaux) en millions de dollars
Soutien de la recherche	118	2.478
Travaux de génie	62	0.599
Travaux	334	5.072
Administration, questions financières et physique médicale	81	0.745
Énergie	<u>595</u>	<u>5.331</u>
		14.225

Cent quarante quatre des 595 membres du personnel sont des scientifiques. L'estimation ci-dessus comprend des frais pour l'amélioration des installations, et des "dépenses pour gros appareillage nécessaire aux expériences et à l'exploitation générale". Il se peut qu'ainsi il se produise quelque chevauchement de dépenses déjà portées à la rubrique des frais de construction pour compléter l'installation. Cependant, comme les montants ne comprennent pas les traitements des chercheurs* ou les frais entraînés par les recherches poursuivies avec l'installation, on peut penser que le montant indiqué pour les expériences et l'exploitation générale ne comprend pas tout l'appareillage nécessaire aux chercheurs.

* Même les membres du CRNL ne sont pas entièrement d'accord avec les objectifs de SECO à ce sujet. Cependant les effectifs mentionnés par SECO concordent en gros avec l'interprétation donnée ici, c'est-à-dire qu'il s'agit du soutien total de la recherche. Nous pensons qu'autrement les chiffres donnant les effectifs scientifiques seraient trop bas et peu réalistes, et ne concorderaient pas avec le tableau d'évolution du personnel tel que l'expose le FSD/ING-67 et que reproduit le chapitre précédent. Le fait que la consommation d'énergie du LINAC semble devoir être plus faible que ne l'aurait été celle du SOC (mentionnée dans le FSD/ING-67) permet d'inclure le coût du personnel total de chercheurs dans les montants mentionnés au tableau de la page 27 du FSD/ING-75.

Actuellement les dimensions véritables des difficultés à surmonter sont si incertaines qu'il est absolument inutile de dénicher des détails critiquables. Certains problèmes qui apparaissent redoutables maintenant seront peut-être aisément résolus. D'autres qui semblent maniables grossiront peut-être jusqu'à dominer les autres. Le Comité note seulement que les coûts de remplacement d'appareillage dont le montant est utilisé par la SECO pour établir son estimation des frais d'exploitation comprennent un article "imprévu et divers" ridiculement faible. Il devrait atteindre 100,000 dollars plutôt que 2,200 dollars.

Le Comité pense qu'un autre article d'importance relativement mineure nécessiterait une révision. Il s'agit des salaires et traitements que SECO évalue selon le tableau ci-dessous. En regard de ces chiffres, nous avons inscrit des montants qui s'accordent mieux avec les barèmes actuels, selon le Conseil national de recherches et de récents relevés des échelles de salaires:

Tableau 9. Barème hypothétique des salaires annuels

	Montants fournis par SECO	Montants réels actuels (1966)
Directeurs de division	\$ 15,000	\$ 18,000
Scientifiques	10,000	13,000
Techniciens et dessinateurs	7,000	7,200
Ouvriers spécialisés	6-7,000	7,000
Commis de bureau	4,000	4,800

L'utilisation des chiffres les plus élevés augmenterait de 11 pour cent le budget total des traitements et salaires. Comme les articles principaux mentionnés dans l'estimation ont été évalués en pourcentage des salaires (à l'exception de l'énergie) le coût total devrait être augmenté d'approximativement le même pourcentage, soit 10 pour cent.

En compensation, on pourrait tenir compte du chevauchement probable des dépenses mentionnées par SECO pour l'amélioration des installations et pour l'achat d'appareillage important complémentaire, et de celles qui seront causées par la poursuite de la construction, telles que FSD/ING-75 les mentionne. Le chevauchement pourrait atteindre la valeur d'un million de dollars. En définitive, on ne découvre pas de raison bien fondée pour changer le montant total.

Une part importante des frais d'exploitation est causée par la consommation d'énergie. On s'attend qu'elle croisse régulièrement

depuis le premier branchement jusqu'au moment où le générateur de neutrons fonctionnera pendant 80 pour cent du temps, soit de deux à cinq années plus tard. On a calculé qu'à ce moment les dépenses d'énergie atteindront 5.3 millions de dollars annuellement. Cependant les dépenses pourraient être plus élevées si l'efficacité du générateur haute fréquence n'était pas aussi bonne que prévue; elles pourraient être plus faibles si un accord pouvait être conclu avec la compagnie fournissant l'énergie électrique, et prévoyant une répartition judicieuse des pointes de consommation.

d) Frais d'exploitation pour la recherche.

Outre les frais de fonctionnement et d'entretien de l'installation principale, l'estimation de la SECO mentionne les montants des traitements des chercheurs, des techniciens de laboratoire, le coût de leur petit appareillage, et les frais généraux découlant de leur activité. On peut se guider en gros sur l'expérience d'organismes tels que le CRNL, le Conseil national de recherches et les laboratoires industriels. Le total des dépenses qu'entraînait en 1966 l'activité de recherches d'un physicien dans les conditions de travail habituelles, sans l'utilisation d'une installation d'envergure importante, atteignait de 40,000 à 50,000 dollars par an.

Les chercheurs utilisant l'installation fondamentale passeront de 50 en 1974 à 140 aux environs de 1980, entraînant une augmentation des frais d'exploitation qui passeront de 2.5 millions de dollars environ à 5 ou 6 millions de dollars (valeur de 1966). Les deux premières colonnes du Tableau du FSD/ING-1975 mentionnent des sommes suffisantes pour couvrir ces dépenses, bien que leur calcul ait été réalisé différemment.*

On s'attend que presque un tiers des chercheurs soient des visiteurs. En conséquence les montants totaux des frais d'exploitation pourraient correspondre au budget interne d'exploitation, si les visiteurs émergeaient au budget de l'ING. De toutes façons le montant total indiqué semble représenter une estimation raisonnable des frais occasionnés par les recherches entreprises avec l'ING, à l'exception des frais supplémentaires causés par la présence des étudiants diplômés que quelques visiteurs amèneront avec eux. Ces frais pourraient bien être considérés comme des subventions à la formation supérieure et à la recherche universitaire, comme d'ailleurs pour certains de leurs directeurs de thèse. Autrement dit, une forte proportion des visiteurs

* voyez la remarque du paragraphe (c).

seraient des chercheurs universitaires qui de toute façon auraient reçu des subventions par quelque autre voie, et souvent cette voie aurait été plus coûteuse que celle de l'utilisation de l'ING.

Ainsi, on peut considérer jusqu'à un certain point (nous y reviendrons au prochain chapitre) que le Programme de l'ING ne constitue pas une forte charge supplémentaire pour le Canada, mais plutôt qu'il agit comme le coordonnateur des efforts dispersés qui de toutes façons auraient été entrepris avec peut-être moins d'efficacité et moins de succès.

e) Revenus.

L'ÉACL insiste fortement sur l'obtention de revenus, soit par la production d'isotopes, soit par la location d'installations spéciales d'essais. Les réacteurs NRX, NRU et Whiteshell ont été très intéressants à ce sujet, et le succès de leurs opérations a permis de réduire les dépenses nettes de façon notable. On peut s'appuyer sur ces précédents pour escompter des résultats similaires avec l'ING. Le FSD/ING-75 fournit l'estimation suivante des revenus:

Tableau 10. Estimation des revenus annuels de l'ING

Année budgétaire	Revenu de l'ING en millions de dollars
1975	< 1
1976	1 à 6
1977	3 à 10
1978	3 à 12
1979	5 à 15

f) Résumé des estimations de dépenses.

Les tableaux 11 et 12 récapitulent les estimations de dépenses étudiées dans les sections précédentes, et établissent les prévisions budgétaires annuelles en dollars constants de 1966 et en dollars courants.

Les coûts de construction sont rajustés de 4 pour cent chaque année, suivant ainsi l'interprétation donnée par SECO des tendances actuelles de l'indice des prix de la construction. Les frais de recherche et de développement technique ont été rajustés de 7 pour cent chaque année, soit 2.5 pour cent imputables à l'augmentation générale des

**Tableau 11 – Sommaire des Prévisions Budgétaires de l'ING,
en millions de dollars constants (valeur de 1966)**

Année budgétaire	recherche	travaux de génie	construction	exploitation et entretien	total	revenus	mouvements nets de trésorerie
1967	*	1.9	0.3		2.2		2
1968		4.0	2.7		6.7		7
1969		6.5	17.5		24.0		24
1970		6.8	21.1		27.9		28
1971		7.0	26.8		33.8		34
1972		6.1	27.9		34.0		34
1973		5.5	20.6		26.1		26
1974	2.1	*	3.5	3.8	9.4		9
1975	4.0		1.5	11.2	16.9	0.5	16
1976	4.8		4.6	11.8	21.2	3.5	18
1977	5.6		5.9	12.4	23.9	6.5	17
1978	6.4		5.8	13.0	25.2	7.5	18
1979	7.4		5.8	14.1	27.3	10.0	17
1980							

* Chacune de ces colonnes comprend quelques éléments de l'autre. Elles sont disposées selon l'importance qui leur est accordée.

**Tableau 12 – Sommaire des Prévisions Budgétaires de l'ING
en millions de dollars courants***

Année budgétaire	recherche	travaux de génie	construction	exploitation et entretien	total	revenus	mouvements nets de trésorerie
1967	+	1.9	0.3		2.2		2
1968		4.3	2.8		7.1		7
1969		7.4	18.9		26.3		26
1970		8.3	23.6		31.9		32
1971		9.1	31.4		40.5		40
1972		8.5	34.0		42.5		43
1973		8.2	26.0		34.2		34
1974	3.4	+	4.6	5.7	13.7		14
1975	6.9		2.0	17.8	26.7	0.8	26
1976	8.8		6.5	19.9	35.2	5.9	29
1977	11.0		8.8	22.2	42.0	11.7	30
1978	13.5		9.0	24.6	47.1	14.3	33
1979	16.7		9.3	28.3	54.3	20.1	34

* Les frais de construction ont été rajustés de 4 pour cent par an et ceux de la recherche et du développement technique de 7 pour cent. Les frais d'exploitation et d'entretien ont été rajustés de 6 pour cent par an, et les montants des revenus de 6 pour cent.

+ Voyez la remarque du tableau précédent.

prix, et 4.5 pour cent imputables à la complexité croissante et à d'autres facteurs affectant la recherche. Les frais d'exploitation et d'entretien ont été rajustés de 6 pour cent chaque année, pour tenir compte des tendances de l'indice des salaires de base au cours des dernières années. De même, les estimations de revenus ont été augmentées de 6 pour cent chaque année, car elles ont été établies dans le contexte des prix de 1966. Ce que nous payons un dollar aujourd'hui nous coûtera probablement deux dollars en 1979, sans que nous apercevions clairement des changements dans notre conception de la valeur relative des objets.

g) Frais supplémentaires à envisager

Certains fabricants canadiens auront besoin d'une aide financière pour ériger des installations si l'on désire qu'une forte proportion du matériel de l'ING soit fabriquée par eux au Canada. Le CRNL estime qu'entre 4 et 8 millions de dollars seront nécessaires à l'industrie canadienne pour perfectionner ses installations et lui permettre de fabriquer 75 pour cent de l'appareillage de l'ING. (FSD/ING-75, p. 23) Le rapport du Ministère de l'industrie ne donne aucune indication que cette évaluation serait dépassée.

L'industrie canadienne pourrait demander une aide financière ou autre, dans le cadre des programmes d'aide du Ministère de l'industrie, pour exploiter des inventions dérivant de ses recherches pour l'ING, ou pour utiliser des compétences industrielles que ses travaux auraient suscitées. Ce genre de demande serait probablement fondé sur des espoirs solides de réussite commerciale, et devrait donc être bien accueilli.

Les états estimatifs de l'ÉACL ont été établis d'après l'hypothèse de l'établissement de l'ING à Chalk River. Si un autre site était choisi, il faudrait compter quelques frais supplémentaires. Il est impossible de les chiffrer sans étudier un emplacement particulier. Cependant le supplément ne dépasserait probablement pas une somme de 3 à 10 millions de dollars.

2.5 QUESTIONS CONCERNANT LES IMPLICATIONS FINANCIÈRES

a) Prévisions des dépenses nationales en recherche et développement technique.

Le Comité sait parfaitement que l'activité des scientifiques canadiens présente certaines lacunes dans les domaines de la science

et de la technologie. Il faut tracer de nouvelles lignes de conduite et entreprendre l'exécution de nouveaux programmes qui combleront les lacunes présentées par certains secteurs et établiront de solides fondations pour bâtir la technologie qui servira à supporter l'économie future. On s'est fortement préoccupé de la gêne ou de l'empêchement que les dépenses annuelles importantes effectuées pour le programme de l'ING (soit un montant annuel moyen de 20 millions de dollars, valeur de 1966) pourraient causer au financement de nouveaux programmes de recherches. Le Secrétariat des sciences s'est livré aux études ci-dessous dans le but d'obtenir une bonne idée des effets que les dépenses de construction de l'ING pourraient avoir sur les dépenses totales de recherche et de développement technique au Canada, et sur le budget des autres programmes de recherche.

On fit une série d'hypothèses raisonnables sur les principes généraux qui guideraient l'action du Canada dans le domaine des sciences au cours de la prochaine décennie. Des prévisions des dépenses en recherche et développement technique de l'État, des universités et de l'industrie, comprenant la réalisation de plusieurs grands projets, furent ensuite établies jusqu'en 1975, en se fondant sur ces principes généraux. On additionna les dépenses et on examina leurs conséquences en fonction de leur pourcentage du produit national brut, du budget de l'État fédéral, et de la répartition des efforts entre l'État, les universités et l'industrie. Les paragraphes suivants donnent le détail des méthodes suivies et des résultats obtenus.

Ces niveaux d'activité en recherche fondamentale et dans les laboratoires des organismes publics canadiens sont adéquats en gros, si l'on se base sur une comparaison internationale des produits nationaux bruts, mais le taux brut d'investissement national en recherche et développement technique est faible. Il serait en conséquence nécessaire de procéder à de forts investissements dans ce domaine avec des objectifs précis, et en dehors des laboratoires des organismes publics.

Le Canada n'a entrepris que sur une petite échelle la recherche appliquée dans le domaine de la défense nationale et de l'exploration spatiale, qui dans d'autres nations ont servi de catalyseurs des développements de la technologie avancée. Ce fait permet au Canada de choisir d'autres objectifs majeurs, qui toucheront peut-être de plus près aux besoins fondamentaux de la société. On a pris pour acquis par conséquent que la croissance la plus importante des travaux de recherche et de développement technique se produira par la voie d'importants programmes axés sur des objectifs déterminés par les besoins

de la société canadienne ou par ceux du renforcement de l'économie industrielle et de l'augmentation de sa productivité. Les programmes doivent être d'envergure importante, si l'on veut qu'ils aident à former de grandes équipes de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens pendant un temps suffisant pour qu'elles deviennent viables et productives, et si l'on veut que ces programmes suscitent le dynamisme de l'ensemble triangulaire État-université-industrie.

Les projets canadiens visant des objectifs d'importance nationale et les programmes importants en recherche et développement technique ont été rares et de venue difficile, sauf ceux qui cherchaient à imiter les travaux entrepris à l'étranger. En conséquence, comme il ne disposait de rien de précis, le Secrétariat des sciences a considéré que des programmes de recherches seraient entrepris dans les domaines de la génération et du transport de l'énergie électrique, du traitement des données, des transports, de l'adaptation au milieu, du génie biomédical, de l'exploration spatiale, de l'étude des matériaux, des carburants, des aliments, etc., qui touchent très directement aux besoins fondamentaux d'une société industrielle ou aux nécessités particulières du contexte canadien. Chaque programme hypothétique fut l'objet d'une étude de prévision sérieuse sur la rapidité d'établissement des plans, d'organisation du programme et d'accroissement des dépenses. En tout treize programmes furent analysés de cette façon, y compris un programme devant parer aux imprévus, dont l'importance croît en fonction du temps pour tenir compte de l'incertitude croissante des prévisions.

À ce stade primitif des études sur l'évolution future de la science au Canada et les futures lignes de conduite, les méthodes suivies sont susceptibles de causer de grandes erreurs, et il est certain que les hypothèses faites ne sont pas destinées à servir de recommandations ou de guides pour l'établissement d'une ligne de conduite nationale. Elles peuvent tout au plus servir de points de départ pour un débat. Nous répétons qu'il s'agit d'hypothèses utilisées pour obtenir une idée de la façon dont les programmes futurs pourraient influencer le budget national, ou s'ils pourraient être affectés par les propositions en cours d'étude.

Les experts des divers organismes du Gouvernement n'ont pas été consultés directement pour connaître leurs propres idées au sujet des plans et des lignes de conduite à suivre pour assurer la croissance future (cependant leurs intentions sont connues de façon générale). Le Secrétariat en effet considère qu'il ne doit pas se mêler de questions contestées où les ambitions des ministères s'opposent, ainsi que les

conceptions sur les principes fondamentaux, les propositions de correction des hypothèses adoptées finalement, etc.. C'est pour la même raison que les perspectives concernant chaque ministère ou organisme public ne sont pas données ici. Il se peut que plus tard, dans d'autres circonstances, le gouvernement ou le Conseil des sciences puisse conduire une étude similaire en détail, ministère par ministère, pour étayer un débat d'orientation et pour établir une prospective à longue échéance des conséquences financières de certaines recommandations qui pourraient être faites par le Conseil des sciences.

Le Secrétariat a ensuite étudié les divers organismes du Gouvernement où se poursuivent activement des recherches. On a estimé qu'un taux de croissance de 7 pour cent par an était nécessaire pour maintenir l'activité d'un organisme de recherches. Ces 7 pour cent tiennent compte d'une inflation monétaire atteignant 3 pour cent par an et de l'accroissement du coût des recherches d'environ 4 pour cent par an, dû à la complexité croissante des recherches et à d'autres facteurs. Un tel taux de croissance correspondrait en gros à celui du produit national brut. Dans certains domaines de recherche où l'adoption de nouveaux instruments et de nouvelles techniques est très rapide, le taux de croissance mentionné ci-dessus pourrait être trop faible pour maintenir un nombre constant de scientifiques au travail; dans d'autres domaines déjà mieux explorés, ou ne demandant pas la même quantité d'instruments, le pourcentage de 7 pour cent pourrait représenter la croissance réelle.

On a considéré comme acquis en principe que la plupart des organismes du Gouvernement aideront sur une échelle modérément croissante la recherche dans les universités, les instituts et les industries directement concernées. Cette action serait bénéfique, car elle assurerait les liaisons, augmenterait le flot des idées nouvelles et améliorerait le recrutement du personnel scientifique. L'aide aux universités pourrait se faire sous la forme de contrats pour la résolution d'un problème particulier, souvent dans les sections de facultés de sciences appliquées ou de génie. Cette hypothèse est mentionnée ici parce qu'il se peut que le principe en soit partiellement applicable aux genres actuels de travaux de recherches menés dans des organismes du Gouvernement. Ce principe s'applique parfaitement à la conduite des futurs grands programmes.

Quelques exceptions à la règle générale sont apparues dans le cas des organismes du Gouvernement gérant d'actifs programmes

d'encouragement à la recherche dans les industries, tels le Conseil national de recherches, le Ministère de l'Industrie, l'ÉACL, ou chargés de diriger des programmes de subventions destinés à favoriser un accroissement des inscriptions dans les universités, par la voie des subventions de recherche dans les universités, tels ceux du Conseil national de recherches, de l'AECB ou du Conseil des recherches médicales. De toutes façons les prévisions de certains budgets d'organismes particuliers du Gouvernement ne reproduisent pas nécessairement ce que seront les budgets futurs de ces organismes. En effet aucune hypothèse n'a été faite sur l'organisme qui serait le mieux préparé à assumer la responsabilité de la gérance d'un ou de plusieurs des nouveaux programmes.

La figure 10 montre les résultats de ces calculs d'extrapolation de l'activité *actuelle* des organismes du Gouvernement. On doit remarquer que des dépenses internes de l'État en recherche et développement technique conserveraient un taux d'accroissement de 6.6 pour cent par an, en comparaison d'un taux moyen de 7.6 pour cent par an au cours de la période allant de 1958 à 1966. Les subventions de l'État à la recherche et au développement technique dans l'industrie et autres secteurs augmenteraient au taux d'environ 16 pour cent par an, alors que dans les universités ce taux atteindrait 20 pour cent par an, et que les dépenses du gouvernement fédéral pour la recherche et le développement technique augmenteraient de 11 pour cent par an. Ces chiffres comprennent les immobilisations.

Nouveaux programmes — On considéra ensuite la réalisation d'un certain nombre de nouveaux programmes de recherches et de développement technique de la nature de ceux décrits ci-dessous. La nature de chaque domaine détermina les hypothèses qui furent faites au sujet de la durée des études préliminaires, de la vitesse de développement du programme sous direction convenable, de l'importance des dépenses fédérales de soutien de la recherche interne qui servirait de guide, et de l'importance de l'effort à fournir dans les universités, les instituts d'universités et les instituts sans but lucratif, les laboratoires industriels etc. Les décisions furent passablement arbitraires même si elles étaient basées sur une expérience personnelle considérable. Les estimations sont naturellement sujettes à de grandes erreurs tout comme n'importe quelle tentative de prédire l'avenir. On s'appuya sur une vue optimiste des choses pour calculer la rapidité d'organisation des nouveaux programmes, leur financement, et le recrutement de leur personnel.

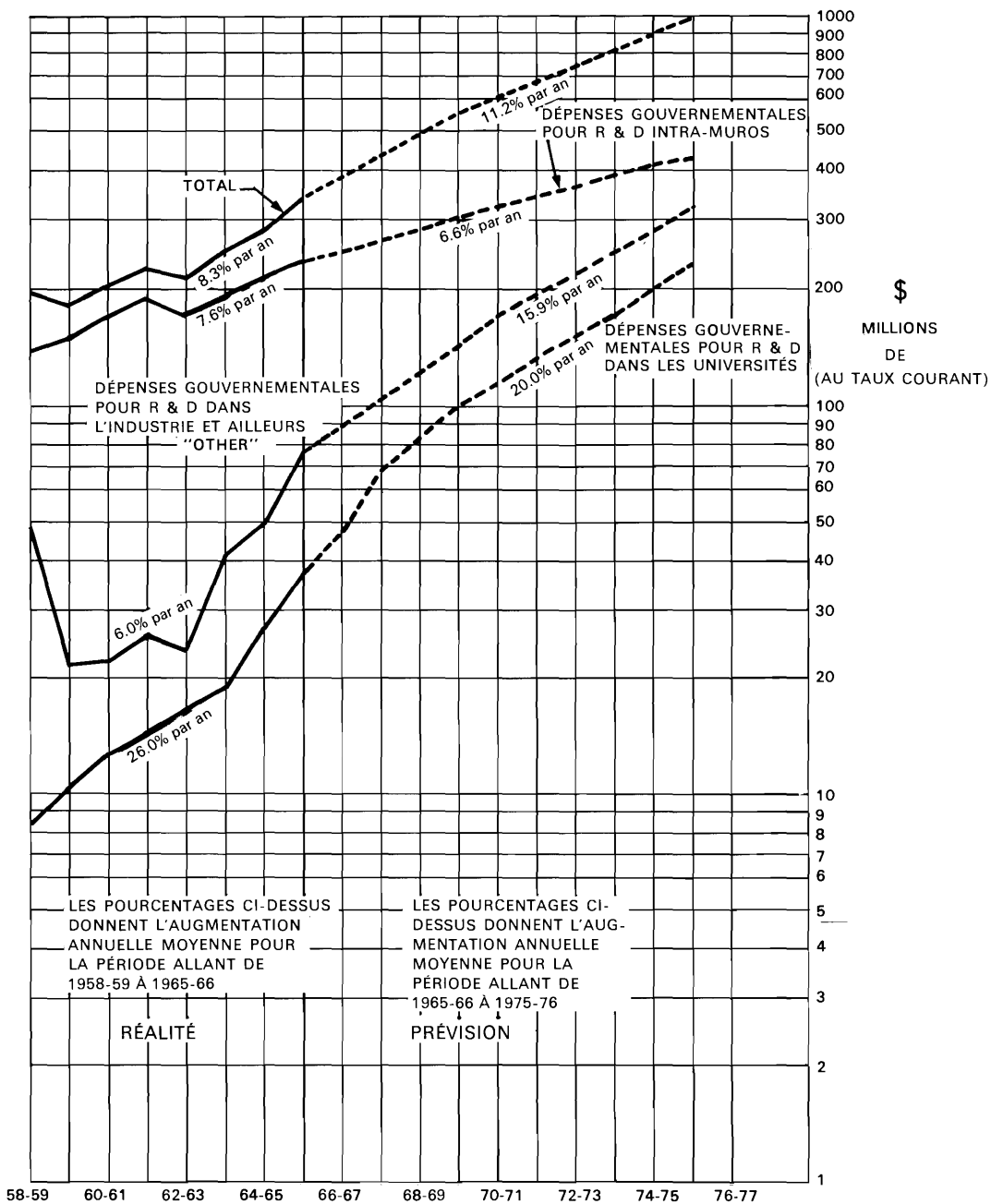


Figure 10 RÉPARTITION DES DÉPENSES GOUVERNEMENTALES TOTALES EN MATIÈRE DE RECHERCHES ET DÉVELOPPEMENTS (R & D) À L'EXCLUSION DES PROGRAMMES NOUVELLEMENT PROPOSÉS—SELON LE TYPE DES TRAVAUX.

Les sujets des nouveaux programmes figurent ci-dessous, ainsi que le montant projeté des dépenses fédérales pour 1975-1976 en frais d'exploitation et investissements, exprimés en dollars courants:

Recherches spatiales (selon les recommandations du Rapport Chapman, y compris les travaux de recherches et de développement technique d'un réseau de télécommunications par satellites): 80 millions de dollars.

ING (selon la présente proposition, les deux tiers du programme étant considérés comme une nouvelle entreprise, le restant étant porté au débit du budget pour la recherche et le développement technique de l'ÉACL. En effet, à défaut de la réalisation de l'ING, un programme d'une importance équivalente devraient être entrepris dans le cadre de l'ÉACL): 17 millions de dollars.

TRIUMPH (selon la proposition des universités de la côte du Pacifique. Montant estimé de la participation de l'État): 5.3 millions de dollars.

Transmission des données (Recherche et développement technique concernant l'emploi des ordinateurs, et autres moyens de traiter les données, technologie de l'information en recherche, dans l'enseignement, et dans les affaires, la cybernétique et l'automatisation): 70 millions de dollars.

Énergie électrique (génération, emmagasinage et transmission): 25 millions de dollars.

Études du milieu (technologie avancée de l'aménagement de l'environnement, de l'urbanisme, etc., particulièrement pour la réalisation de communautés boréales viables économiquement et peut-être aussi des stations sous-marines): 60 millions de dollars.

Transports (réseaux et véhicules optima conçus pour le climat canadien): 50 millions de dollars.

Matériaux (pour le développement d'une industrie secondaire basée sur les richesses naturelles du Canada): 80 millions de dollars.

Combustibles (utilisation optimale des gisements): 5 millions de dollars.

Produits alimentaires (amélioration de la production, soit par la culture, soit par synthèse): 25 millions de dollars.

Génie biomédical (utilisation des connaissances en physique et en technologie qui en découle pour répondre aux besoins médicaux et biologiques): 70 millions de dollars.

Biologie (recherche fondamentale et appliquée en biologie moléculaire, en biophysique, etc. pour application en génétique, en hygiène, etc.): 20 millions de dollars.

Imprévus (nouveaux programmes importants, actuellement imprévisibles): 60 millions de dollars.

On a reporté les dépenses prévues pour l'exécution de chaque programme, année par année, en les classant selon le type d'organisme réalisateur. La figure 11 indique le montant des fonds dépensés par le gouvernement fédéral dans les laboratoires de ses propres organismes, des universités et de l'industrie. Les dépenses totales (frais d'exploitation et investissements) relatives aux nouveaux programmes devraient montrer un fort taux d'augmentation, soit 49 pour cent par an, et atteindre 570 millions de dollars en 1975-1976, dont la majeure partie servirait à soutenir la recherche dans l'industrie. Une part importante des dépenses d'un montant croissant de 8 millions de dollars en 1968-1969 jusqu'à 108 millions de dollars en 1975-1976, a semblé nécessaire pour que les organismes du gouvernement établissent les agences et entreprennent un programme minimal de recherches pilotes, mais cette somme ne représente que 20 pour cent du total.

La figure 12 montre le diagramme hypothétique du financement total de la recherche et du développement technique par les universités et par l'industrie et d'autres organismes. On a estimé que les frais d'exploitation et d'investissement payés par l'industrie, et les frais d'exploitation payés par d'autres organismes croîtraient au même rythme qu'actuellement, soit 12 pour cent par an. Les dépenses propres des universités pour frais d'exploitation en recherche (fonds venant de sources provinciales ou privées) devraient ralentir quelque peu leur progression par rapport au financement d'origine fédérale, et n'augmenteraient que 14.3 pour cent par an. (les gouvernements provinciaux sont vivement pressés d'étendre les installations pour l'enseignement universitaire). Cette hypothèse est sujette à caution, car le taux d'accroissement total du financement de la recherche dans les universités, indiqué à la figure 13, n'atteint que 20 pour cent par an. Si les inscriptions d'étudiants diplômés continuent à croître à leur rythme actuel tout au long de la prochaine décennie, et que les universités canadiennes ne réussissent pas à diminuer le coût des recherches par étudiant diplômé, l'accroissement de 20

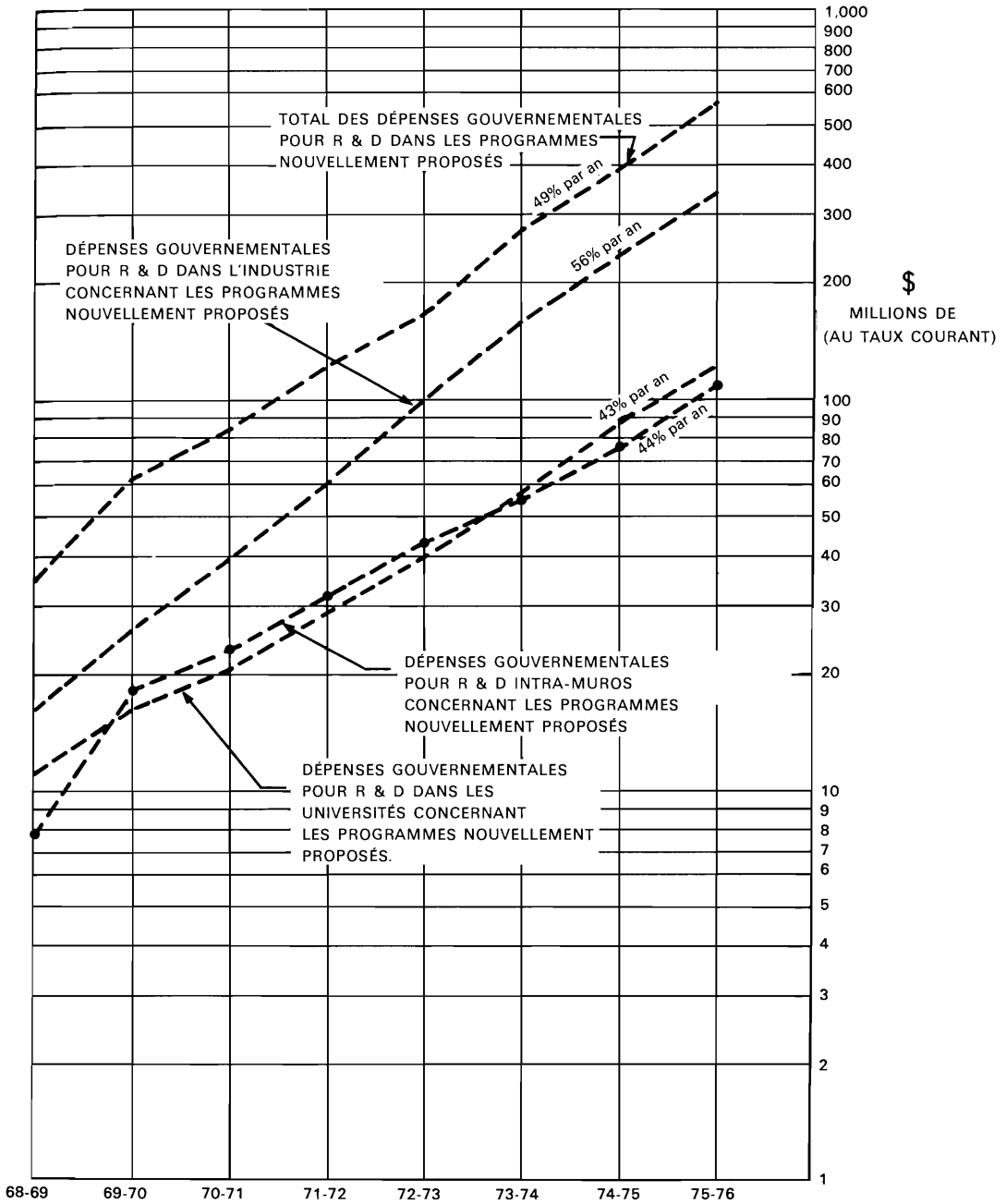


Figure 11 RÉPARTITION DES DÉPENSES GOUVERNEMENTALES POUR R & D CONCERNANT LES PROGRAMMES NOUVELLEMENT PROPOSÉS (y compris ING et TRIUMF)—SELON LE TYPE DES ORGANISMES FAISANT LES TRAVAUX.

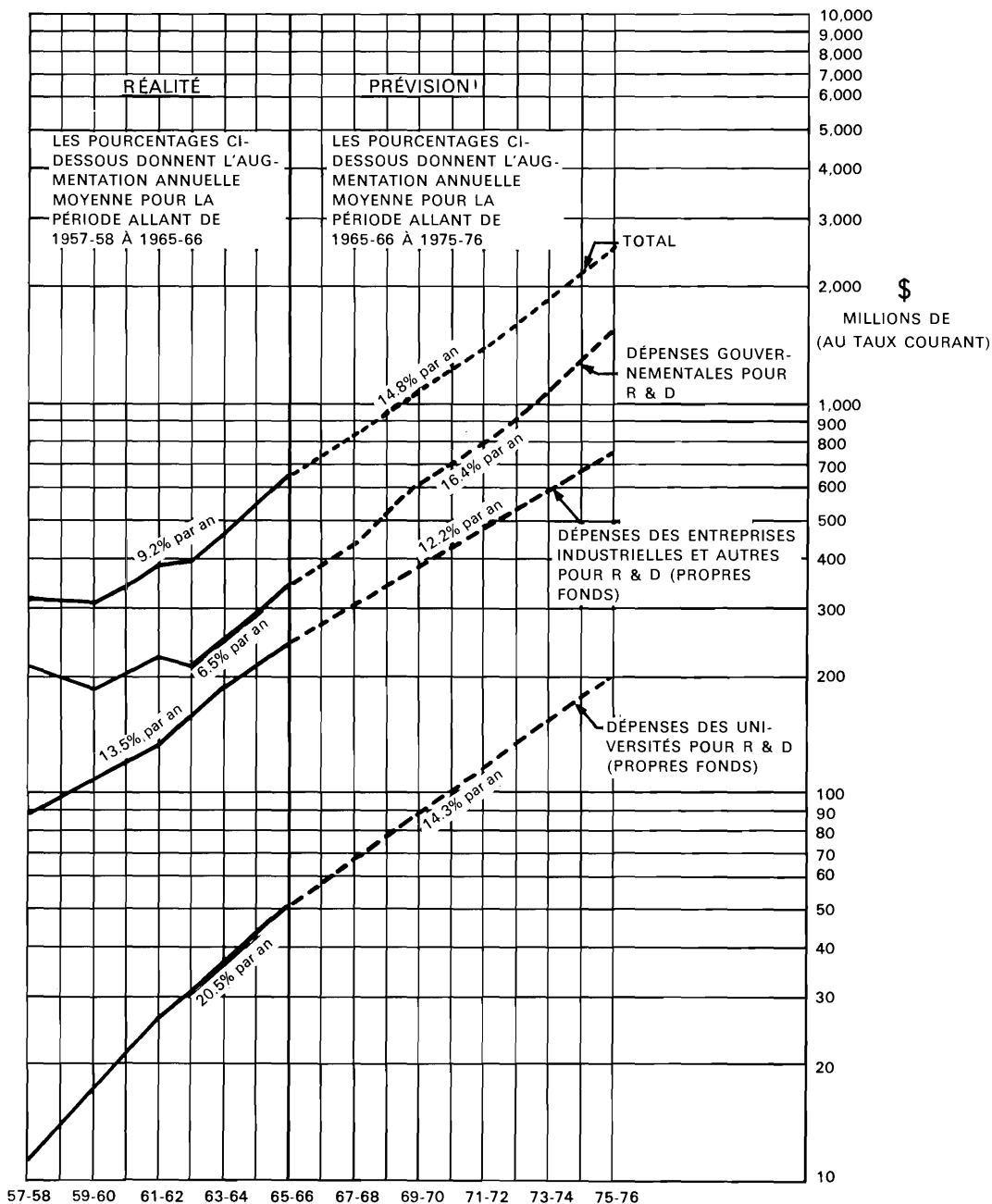


Figure 12 TOTAL DES DÉPENSES EFFECTUÉES POUR LES RECHERCHES ET DÉVELOPPEMENTS (R & D) AU CANADA, Y COMPRIS LES PROGRAMMES NOUVELLEMENT PROPOSÉS. LA RÉPARTITION EST FAITE SELON L'ORIGINE DES FONDS.

pour cent par an ne suffira pas. On serait alors obligé de recommencer les calculs pour prévoir les conséquences d'un plus haut niveau de financement des recherches universitaires tant par les gouvernements provinciaux que par le gouvernement fédéral.

La figure 13 détaille le financement dans chaque secteur. On doit remarquer que le total des dépenses du Canada en recherches et développement technique atteindrait 2.5 milliards de dollars en 1975-1976, dont 1.6 milliard de dollars serait des fonds du gouvernement fédéral. De ce dernier montant, 1.25 milliard (soit 54 pour cent) serait dépensé pour la recherche industrielle, 550 millions (23 pour cent) dans les laboratoires universitaires, et 540 millions (23 pour cent) dans ceux des organismes du gouvernement. Une part des dépenses de l'État pour les recherches dans ses propres organismes, soit environ 108 millions, serait consacrée aux nouveaux programmes.

Les perspectives du produit national brut, établies par G.T. McColm du Secrétariat des sciences, et reportées à la figure 14, indiquent qu'il atteindra de 103 à 117 milliards de dollars en 1975-1976. Ainsi les dépenses projetées et les nouveaux programmes entraîneraient des déboursés atteignant entre 2.1 et 2.4 pour cent du produit national brut en 1975, ce qui semble tout à fait raisonnable. Pour atteindre ce niveau, le total des dépenses annuelles pour la recherche devrait s'accroître de 15 pour cent par an, la part du gouvernement fédéral devant croître de 16.4 pour cent par an. S'il suit les tendances actuelles, le budget total du gouvernement fédéral atteindra environ 19 milliards de dollars en 1975-1976. En conséquence, la part de son budget que le gouvernement fédéral consacre à la recherche et au développement technique passera des 3.5 pour cent actuels à 8.4 pour cent en 1975-1976, ce qui encore semble raisonnable.

Les conséquences pour les effectifs scientifiques sont importantes. L'accroissement des dépenses au taux moyen de 15 pour cent par an impliquent une croissance parallèle des effectifs de scientifiques travaillant à la recherche et au développement technique. Si l'on se base sur un accroissement des coûts de la recherche d'environ 7 pour cent par an, l'accroissement des effectifs scientifiques devrait être annuellement d'environ 7.5 pour cent. Ce taux de croissance calculé est bien modeste si on le compare au taux de croissance des effectifs scientifiques aux États-Unis et à celui des inscriptions dans les universités canadiennes.

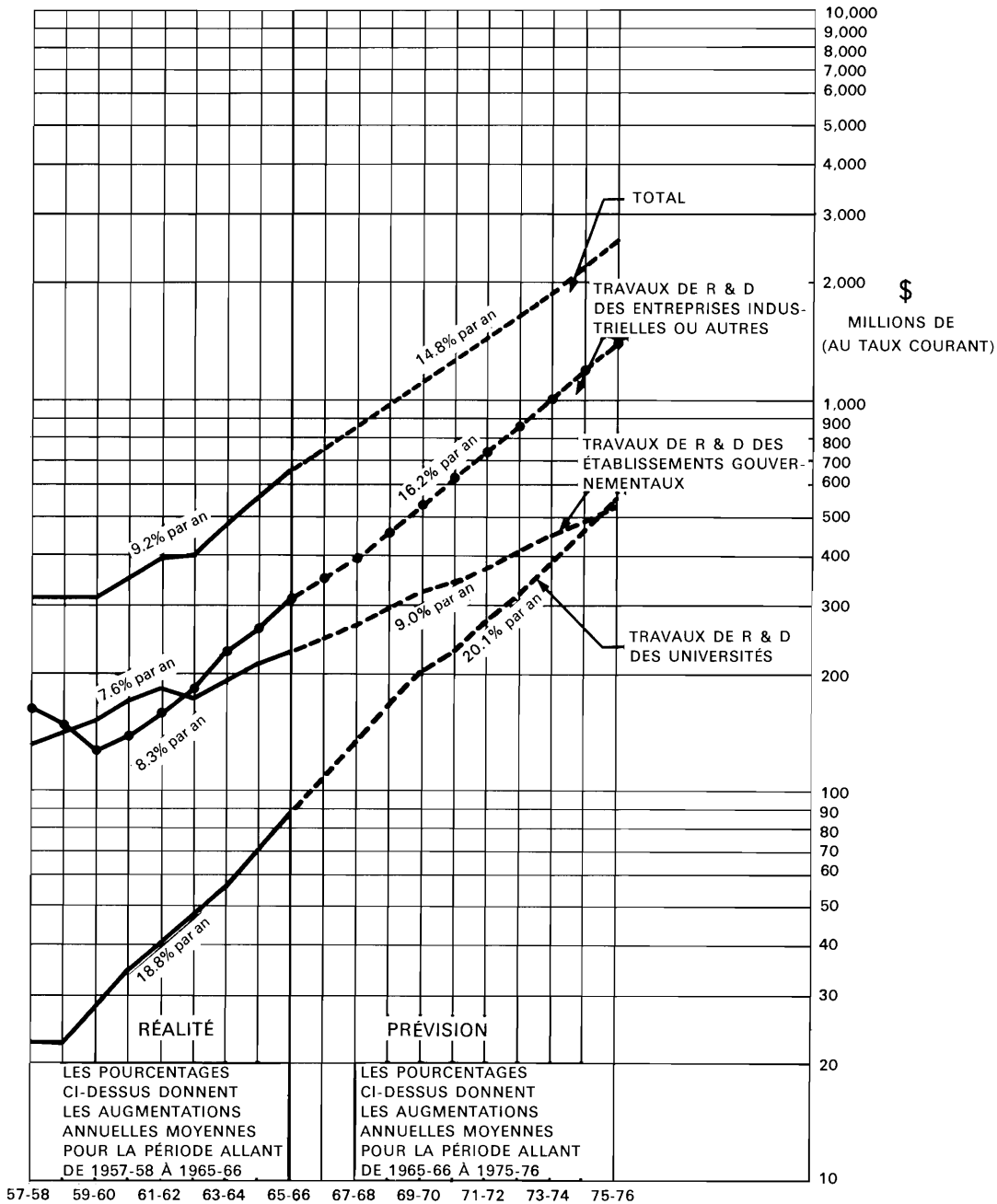


Figure 13 TOTAL DES DÉPENSES EFFECTUÉES AU CANADA POUR LES TRAVAUX DE R & D (y compris les programmes nouvellement proposés). LA RÉPARTITION EST FAITE SELON LES TYPES D'ORGANISMES QUI FONT CES TRAVAUX.

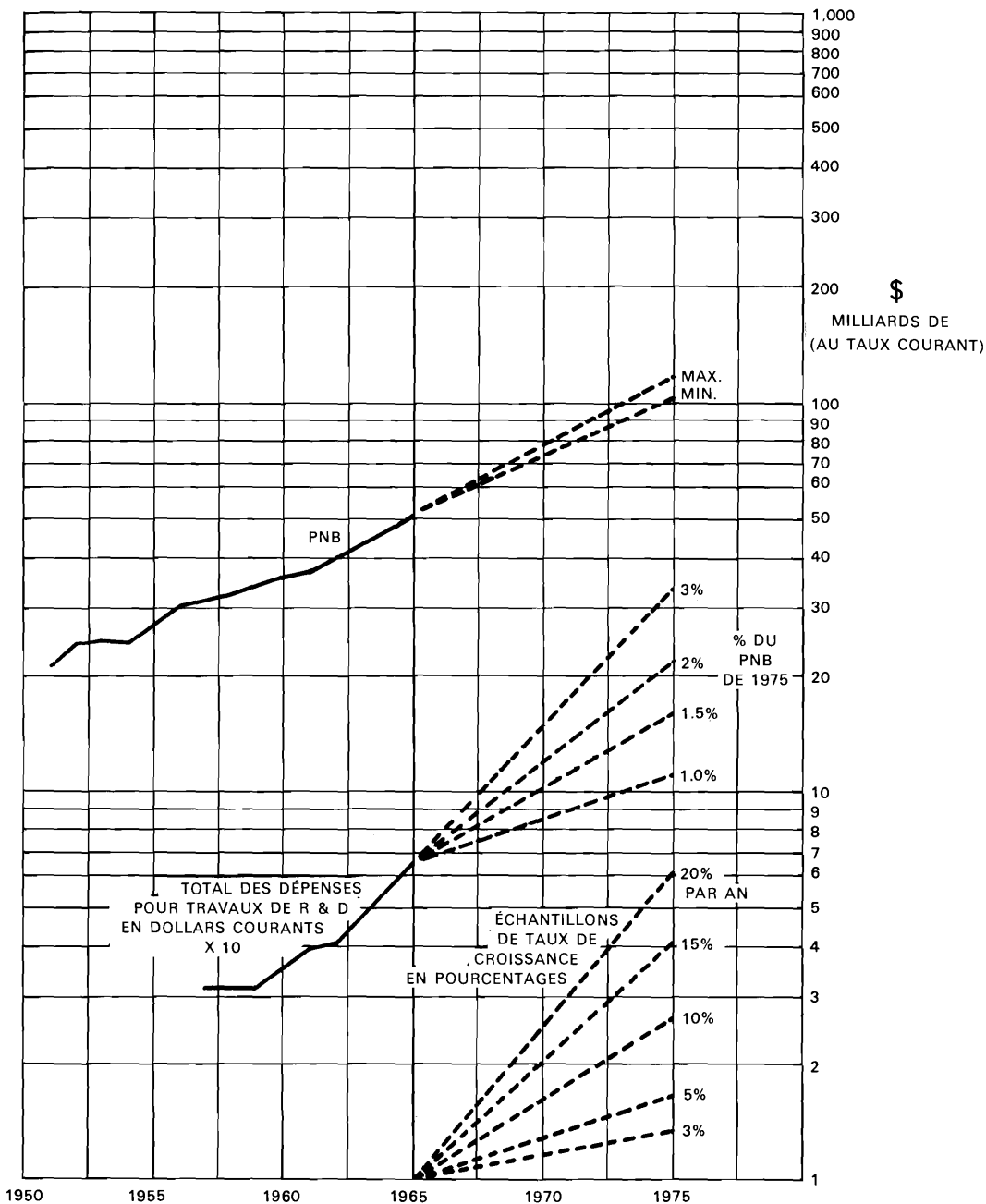


Figure 14 PRODUIT NATIONAL BRUT ET PRÉVISIONS JUSQU'EN 1975.

CONCLUSIONS. — Les conclusions qu'on peut tirer de cette étude très approximative sont les suivantes; si l'on estime qu'un peu plus de 2 pour cent du produit national brut doivent être investis en recherches et en développement technique en 1975-1976 (et certains pensent que cet objectif est modeste), le budget national pourra alimenter plusieurs programmes importants visant des objectifs d'importance nationale, c'est-à-dire qu'ils devraient répondre à des besoins de la société canadienne dans les divers domaines qu'on peut envisager maintenant. Les exemples mentionnés l'étaient plus à titre indicatif que spécifique. En tenant compte que des taux de croissance rapides mais raisonnables du financement des divers programmes seraient réalisés, que la plupart de ces programmes sont à peine esquissés, on s'aperçoit qu'un certain nombre d'années s'écouleraient avant que les dépenses de réalisation des programmes atteignent d'importantes proportions, disons des montants annuels de plus de 10 millions de dollars pour chaque programme. Nous devons reconnaître en effet qu'il serait peu sage d'accroître les dépenses plus rapidement que les idées fertiles seraient découvertes ou que le personnel scientifique serait formé.

On ne peut garantir la régularité de l'apparition de ces composants indispensables et nous pourrions découvrir que certains programmes dans des domaines de grande importance ne croîtraient pas aussi vite que nous le désirerions.

Dans un tel contexte, la proposition de réalisation de l'ING ne semble pas entraîner des dépenses si fortes qu'elles draineraient les fonds nécessaires à la réalisation d'autres programmes. Elle semble plutôt faire partie de ces quelques projets prometteurs pouvant compter sur un excellent noyau de scientifiques, qui pourraient constituer la base d'un important programme prêt à prendre son essor. La figure 15 indique l'importance des effets de la réalisation de l'ING, parallèlement aux autres nouveaux programmes hypothétiques. La courbe concernant la réalisation de TRIUMPH est également reportée à toutes fins utiles. On doit remarquer que l'effet des dépenses totales du gouvernement en recherches et développement technique est plutôt faible. Le total des dépenses de réalisation de l'ING, y compris le tiers considéré comme inclus dans le programme interne de l'ÉACL, atteint un maximum de 4.65 pour cent des dépenses du gouvernement pour la recherche et le développement technique en 1971-1972, puis diminue jusqu'à moins de 2 pour cent du total en 1975-1976, au fur et à mesure de la mise en route d'autres programmes.

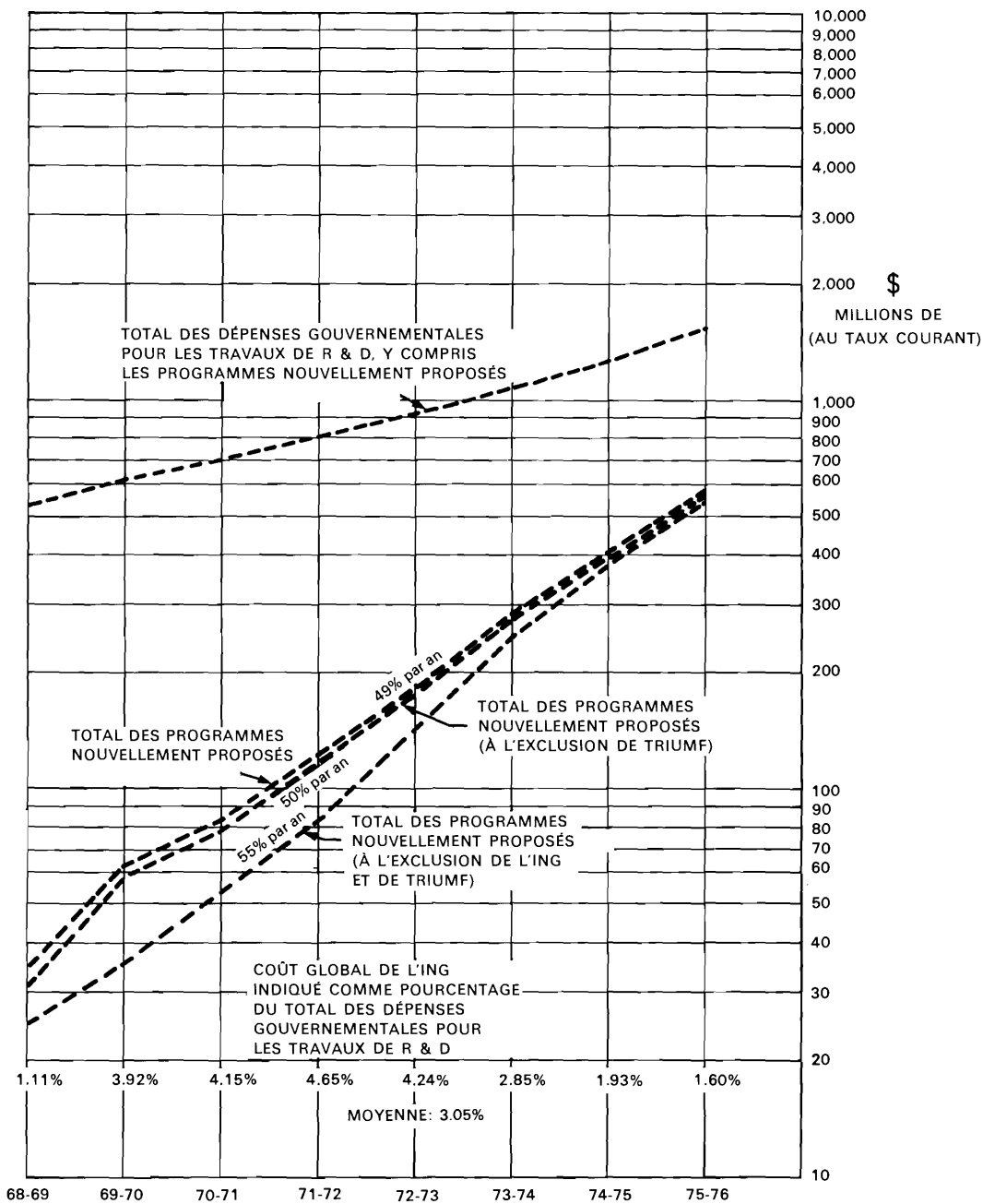


Figure 15 TOTAL DES DÉPENSES GOUVERNEMENTALES POUR LES TRAVAUX DE R & D COMPARÉ AU TOTAL DES PROGRAMMES NOUVELLEMENT PROPOSÉS ET EFFET DE L'ING ET DE TRIUMF.

b) Dépenses concernant l'ING en relation avec le programme de l'ÉACL.

Comme le paragraphe a) l'indique, le budget de recherches et de développement technique de l'ÉACL devrait augmenter de 11 pour cent par an et atteindre 117 millions de dollars en 1975-1976. Il est fort probable que les revenus tirés de l'énergie nucléaire et de l'industrie des isotopes seraient beaucoup plus élevés. Les ventes annuelles d'uranium canadien devraient atteindre plus de 300 millions de dollars, celles d'eau lourde plus de 50 millions, les isotopes et produit connexes plus de 30 millions, et les ventes de réacteurs toucheraient une partie indéterminée d'un marché mondial de 10 milliards de dollars; les besoins canadiens atteindraient presque 300 millions annuellement pour la construction de centrales électronucléaires. L'industrie continuerait à croître rapidement.

Il serait justifié de dépenser un pourcentage de 15 ou même 20 pour cent du total des dépenses de recherches et de développement technique pour des recherches fondamentales dans une industrie en croissance rapide, basée sur de hautes connaissances scientifiques. Les dépenses de l'ÉACL sont réparties selon ce pourcentage. Les laboratoires de la Compagnie de téléphone Bell, qui emploie 14,700 chercheurs en 17 endroits des États-Unis, octroient 15 pour cent de leur budget à la recherche fondamentale, le reste allant directement à la recherche en télécommunications (Electronic News, 23 janvier 1966). Un tel pourcentage de 15 ou 20 pour cent du total (117 millions de dollars) est l'équivalent de 17.5 à 23 millions de dollars.

On estime que les frais totaux d'exploitation de l'ING en 1975 atteindraient environ 26 millions de dollars courants. Lors de l'établissement des pourcentages d'utilisation (chapitre 2.1), on a alloué environ 60 pour cent du temps d'utilisation de l'ING à la recherche fondamentale, dont un tiers serait pris par des scientifiques non résidents, venant généralement des universités canadiennes. Ces chiffres approximatifs laisseraient donc environ 40 pour cent pour le programme interne de recherche de l'ÉACL, coûtant environ 10.5 millions de dollars en frais d'exploitation. Un tel montant concorde assez bien avec le montant total des dépenses de l'ÉACL en recherches et en développement technique mentionné ci-dessus, dans le cas où les recherches menées avec l'ING constitueraient la moitié du total des recherches fondamentales de l'ÉACL.

Les 40 pour cent restant du temps d'utilisation de l'ING seraient divisés entre les programmes de recherches appliquées de l'ÉACL (réacteurs avancés, essais des matériaux, etc.), la recherche appliquée

des facultés de génie des universités, la production commerciale d'isotopes, la recherche industrielle par voie de contrats de recherches et de développement technique, la recherche technologique et l'élaboration de produits nouveaux. Un montant de 10 ou 11 millions de dollars couvrant les frais d'exploitation dans ces domaines en 1975 ne semble pas exagéré.

c) Dépenses en relation avec les objectifs de la société

Il serait utile maintenant de récapituler brièvement les buts sociaux visés par les dépenses prévues.

Le programme électronucléaire de l'ÉACL vise directement la génération d'énergie électrique à bon marché. L'électricité peu coûteuse constitue un des besoins fondamentaux de notre société. Elle contribue puissamment à notre confort et nous facilite l'existence, et elle constitue un élément fondamental de la productivité industrielle et de son dynamisme économique. L'importance croissante des investissements canadiens dans l'industrie de l'électricité a été indiquée au chapitre 1.2.

Le programme de développement des applications des isotopes entrepris par l'ÉACL a contribué puissamment aux avantages que le monde a tiré des isotopes radioactifs. Ces avantages ont été rendus accessibles à tous les genres d'industries, et nombre de techniques en ont profité. Il ne fait cependant aucun doute que l'activité commerciale directe créée par la vente des isotopes et des produits connexes est dépassée de très loin par les avantages non chiffrables qu'en a tiré l'économie dans son ensemble, par les découvertes scientifiques que les radiotraceurs ont permises, les nouvelles techniques (traitements industriels par irradiation), l'amélioration de la productivité (jauges, radiographie, automatisation), les économies que procurent les nouvelles méthodes par rapport aux anciennes (analyse par radioactivation, indicateurs radioactifs dans les oléoducs, prospection), l'amélioration de l'hygiène (traitement du cancer, méthodes d'établissement du diagnostic, conservation des aliments), etc. Ces avantages ont été étudiés plus en détail au chapitre 1.2 traitant de l'importance des dépenses à engager.

Outre ces avantages industriels et sociaux qu'on peut difficilement évaluer, la recherche dans le domaine de la production des isotopes et de leurs applications a apporté des avantages financiers qui en ont fait une opération commerciale couronnée de succès. L'existence d'une entreprise manufacturière faisant des profits constitue un

avantage pour la société, car elle contribue à assurer une forte productivité et soutient la prospérité économique générale. Après dix ou quinze ans de lente croissance, et de préparation de ses bases d'action, la Division des produits commerciaux de l'ÉACL a devant elle une période de croissance rapide de ses ventes. L'ÉACL pourrait dans l'avenir transformer sa Division des produits commerciaux en société commerciale autonome. Comme nous l'avons mentionné dans les chapitres précédents, on s'attend qu'une forte partie des frais d'exploitation de l'ING, peut-être la moitié, pourrait être financée par les recettes provenant de la production d'isotopes.

Les objectifs de la recherche *fondamentale* sont de très grande étendue et ne visent pas un point en particulier. L'humanité a besoin de comprendre l'Univers ou se déroule son destin, et toute notre culture reflète cette recherche, dans la littérature, la musique, les arts plastiques et les aspirations religieuses. Une intense participation à l'acquisition des connaissances fondamentales est indispensable à la vitalité de notre enseignement supérieur. La société trouve donc des justifications aux dépenses entraînées par la recherche fondamentale: elle fait partie de notre système d'enseignement; elle constitue un élément de la recherche appliquée visant des objectifs pratiques; elle fait partie de l'activité culturelle au même titre que le théâtre, la musique, le ballet, les sports; elle contribue à l'échange de données scientifiques, à l'acquisition d'une position internationale en vue, etc., comme le chapitre 2.1 l'a exposé.

Comme un programme de recherche fondamentale ne vise pas un objectif particulier, que son but est l'acquisition d'un éventail indéterminé de connaissances nouvelles, il est difficile d'évaluer les dépenses qu'il pourrait entraîner, et de dire si un projet coûtera trop d'argent ou ne sera pas assez financé. Le mieux qu'on puisse faire consiste à choisir les meilleurs scientifiques, puis à s'assurer en gros que les installations d'expériences nécessaires à la réalisation de leurs idées sont utilisées à l'optimum, afin d'empêcher que le coût par scientifique ne soit excessif. Il est bien difficile d'y parvenir, car les différents domaines de recherche entraînent aussi des dépenses de montants très inégaux. Les biologistes, par exemple, ont besoin d'un grand nombre d'animaux de laboratoire et des installations nécessaires à leur entretien: ils ont aussi souvent besoin de nombreux techniciens de laboratoire pour réaliser des analyses chimiques soignées ou des essais biologiques; ces sujétions causent de fortes dépenses pour le soutien des travaux de chaque biologiste en recherche. Les recherches océanographiques ou géologiques peuvent

nécessiter l'envoi d'expéditions importantes à bord de navires dont il faut assurer l'équipement et le ravitaillement. Il leur faut même parfois des installations de lancement de fusées. Les physiciens spécialistes des particules élémentaires ont en général besoin de grands accélérateurs de particules. Bien que la moyenne du coût annuel total d'un scientifique poursuivant des recherches dans un petit laboratoire de physique atteigne entre 30,000 et 50,000 dollars, les frais peuvent se hausser jusqu'à 200,000 dollars par chercheur dans certains secteurs particuliers de la physique. On arrive à ce montant en considérant que le chercheur considéré est le seul responsable, sans inclure les autres scientifiques qui l'aident dans ses recherches.

En ce qui concerne le Programme de l'ING, on calcule que les frais causés par l'activité de chaque scientifique y atteindraient 73,000 dollars, valeur de 1966, si l'on considère que 60 pour cent des frais totaux d'exploitation de l'installation complète seront attribuables à la recherche fondamentale en 1979-1980, et que le nombre d'utilisateurs serait de 140. Si les recettes provenant de la fabrication d'isotopes n'atteignent que la moitié du montant mentionné au sommaire du chapitre 2.4, le coût par chercheur scientifique serait de 96,000 dollars. Ces chiffres s'accordent raisonnablement avec les coûts actuels dans les programmes de recherches de types semblables. Par exemple, les frais d'exploitation totaux du Laboratoire national de Brookhaven ont atteint 44.8 millions de dollars en 1965. Si on divise cette somme par le nombre de scientifiques faisant partie du personnel travaillant à plein temps, y compris les nouveaux stagiaires, on obtient un coût de 84,000 dollars des É.-U. par scientifique. Dans certains secteurs particuliers, à la pointe de la physique des particules à haute énergie, le coût annuel d'un scientifique atteint couramment 160,000 dollars.

Si les tendances actuelles continuent, le coût moyen de la recherche par scientifique doublera en l'exprimant en dollars de 1980. Cette remarque s'applique cependant à toute la recherche scientifique, et s'appliquerait à tout scientifique, qu'il travaille avec l'ING ou ailleurs au Canada. Nous pouvons considérer qu'à cette époque nous serons accoutumés à ces montants, et nous penserons probablement que la recherche scientifique vaut bien des sacrifices.

2.6 ORGANISATION

a) Relations avec l'ÉACL

On a proposé d'appeler l'ensemble entourant l'ING du nom d'Institut de recherches nucléaires (NRI). Nous utiliserons ce nom et ce

sigle pour plus de simplicité dans tout le présent chapitre, sans préjuger de son adoption au cas où l'ING serait construit.

La construction du générateur lui-même se déroulerait en deux phases. La première comprendrait l'exécution de recherches, de développement technique et d'études en vue d'établir une estimation ferme des coûts de revient. Elle durerait de 18 à 24 mois. La seconde concernerait la construction de l'installation et durerait de 1969 à 1973. On considère que la recherche et le développement technique concernant le programme de l'ING continueraient au cours des travaux de construction, mais qu'ils ne seraient pas aussi nécessaires pour déterminer les coûts de revient que la recherche et le développement technique menés à bien au cours de la première période.

Au cours des 18 ou 24 mois de la première période, aucune installation séparée importante ne serait construite. Comme le projet de l'ING a été conçu par les scientifiques de l'ÉACL, les travaux entrepris au cours de cette période seraient accomplis au mieux dans le cadre du CRNL. Cette méthode assurerait au programme le niveau de continuité nécessaire et désirable au cours de la phase décisive. Nous proposons que l'administrateur-directeur du programme soit également le président de Conseil de l'ING qui devrait être formé immédiatement. Ce Conseil surveillerait les travaux d'études de l'ING et analyserait les détails d'emplacement et d'organisation du NRI. Son président serait responsable envers le Conseil de l'ÉACL. On estime que les membres du Conseil de l'ING devraient être nommés par le gouvernement à l'exception du président, selon les recommandations d'un comité impartial (qui pourrait peut-être se composer de membres du Conseil des sciences et du Secrétariat des sciences). Ce comité impartial ferait un choix parmi les personnes proposées par les universités, l'industrie et le gouvernement.

Il est évident que ce Conseil de devrait pas se trouver directement aux commandes, car il ne serait pas présent pour régler les difficultés quotidiennes. Cependant, l'administrateur-directeur se référerait au Conseil de l'ING pour les questions d'importance majeure* et de conception, et le Conseil devrait pouvoir consulter directement le président et son conseil d'administration.

Le Comité pense toutefois qu'à long terme il faudrait organiser un institut national autonome des sciences nucléaires. Cet institut (le NRI) pourrait être instauré préférablement au début des grands travaux

* Ces questions comprendraient normalement l'étude du budget et les nominations aux postes responsables

de construction et prendre son essor de l'ÉACL à ce moment. Les détails de l'organisation devraient être mis au point par le Conseil de l'ING déjà en place, mais on peut considérer que le NRI serait muni d'un directeur et d'un conseil d'administration envers lequel le directeur serait responsable. Le Conseil d'administration du NRI serait constitué de représentants nommés impartialement par les universités, le gouvernement et l'industrie.

En raison du grand nombre possible d'utilisateurs venant des universités et de l'importance des intérêts industriels concernés, le Comité croit que le NRI agirait très efficacement comme institut autonome, complètement à part de la voie suivie par les recherches internes des organismes du gouvernement. Après l'instauration du NRI, ce dernier pourrait prendre des dispositions avec l'ÉACL au sujet de certains problèmes de construction, de l'extension future de l'installation et de son exploitation.

b) Relations avec les universités

Les initiateurs du projet de l'ING ont reconnu dès le début qu'une forte participation universitaire était nécessaire.⁴⁴

Ils ont également reconnu que l'obtention d'une collaboration entière sur un pied d'égalité des scientifiques et des ingénieurs universitaires réclamerait l'utilisation de méthodes différentes de celles qui prévalent actuellement au CRNL.

Au cours de la période précédant le début des travaux de construction d'importance majeure, la participation active des représentants des universités au Conseil de l'ING servirait au mieux les intérêts de ces établissements. Ils pourraient s'occuper non seulement des principales questions techniques, des questions d'emplacement et d'organisation du NRI, mais ils pourraient aussi s'assurer qu'on tient compte des installations expérimentales requises par les futurs utilisateurs universitaires.

Après l'instauration du NRI comme institut autonome, probablement au début des travaux de construction d'importance majeure, la présence de représentants des universités au Conseil d'administration du NRI assurerait que les intérêts de ces dernières et des utilisateurs de l'ING seraient pris en considération. Le fait que le directeur serait directement responsable envers le conseil en serait une assurance.

⁴⁴ "The AECL Study for an Intense Neutron Generator, Recommendations and Costs" (Étude de l'ÉACL au sujet d'un générateur de flux neutroniques intenses: recommandations et financement) FSD/ING-67, Chalk River, août 1966: III A p. 3 à 5.

Le Comité croit que les utilisateurs universitaires de l'ING devraient jouir de droits et d'avantages équivalents à ceux des chercheurs résidents du NRI. On devrait réserver à leur usage une partie convenable du budget du NRI, qui comprendrait des crédits pour les déplacements, ainsi que pour l'appareillage et les dépenses entraînées par les expériences. Les techniciens travaillant à plein temps pour l'Institut devraient être à la disposition des utilisateurs universitaires comme ils le sont pour les chercheurs résidents. Ce dernier privilège aurait l'avantage d'aider les chercheurs universitaires à surmonter au départ leurs difficultés d'utilisation d'une installation peu familière.

c) Relations avec les groupes de l'ÉACL s'occupant d'applications industrielles, et avec l'industrie.

Les travaux de recherches et de développement technique ne profitent pas tous au pays dans lequel il sont réalisés. On en aurait un exemple parfait si la majorité des chercheurs canadiens s'occupaient de biologie tropicale. Les travaux de recherches et de développement technique dans l'industrie ont généralement un effet direct sur l'économie; dans les universités ils contribuent largement à l'instruction et à la formation de scientifiques et d'ingénieurs capables, et ils leur sont nécessaires; les travaux de recherches et de développement technique menés dans les laboratoires des organismes du gouvernement ne semblent pas avoir toujours fait une contribution d'importance à l'économie. La réalisation de l'ING constitue indéniablement un gros investissement de temps et d'argent. Quelle que soit la qualité des objectifs visés par les recherches, il serait nécessaire de s'assurer que les travaux de recherches et de développement technique qui seraient menés à bien pendant et après la construction de l'ING bénéficieraient au maximum à l'économie.

Pour que ces travaux aient un effet puissant sur l'économie, il faudrait munir chaque découverte d'un mécanisme d'innovation et de développement. Il n'est pas suffisant de s'arrêter au stade du prototype. On doit s'occuper de préciser les besoins et l'importance du marché possible. Les caractéristiques du prototype doivent être ajustées aux exigences du marché et la chaîne directe entre production et consommation doit être établie.

Au cours de la période initiale de conception et de développement technique de l'ING, il serait très désirable que l'industrie soit parfaitement au courant du déroulement du programme. La meilleure façon d'y parvenir serait d'avoir des représentants des cercles dirigeants de l'industrie parmi les membres du Conseil de l'ING, comme

nous l'avons mentionné ci-dessus. Les mêmes effets seront produits par la présence ultérieure de ces représentants parmi les membres du Conseil d'administration du NRI. Elle aidera à répandre le maximum de connaissances technologiques avancées et de possibilités dans le domaine industriel, bien que le niveau de communication serait trop général pour être très efficace.

L'institution d'un groupe interne dans le NRI, qui posséderait à la fois des connaissances du marché et des capacités pour la conception et la réalisation technique, assurerait une transmission rapide et complète des données technologiques découlant des recherches menées avec l'ING. La mission dont le groupe serait chargé viserait à faire bénéficier l'économie nationale du maximum d'avantages découlant du fonctionnement de l'ING. Il accomplirait sa mission par les voies suivantes: 1) il assurerait l'obtention de recettes maximales de la vente d'isotopes produits par l'ING. 2) il passerait des contrats pour l'utilisation de l'ING par les firmes industrielles et des organismes publics au Canada et à l'étranger. 3) il tirerait profit des idées, des découvertes et des techniques mises au point par le NRI pendant et après la construction de l'ING, en passant des accords avec diverses sociétés industrielles ou avec les divisions commerciales de l'ÉACL, ce qui pourrait nécessiter d'autres recherches et des travaux de développement technique le cas échéant, ainsi que des opérations de production effective. En conséquence le groupe devra assumer un rôle actif et disposer de fonds pour investissements; il devra posséder des capacités pour faire l'étude des marchés et le dynamisme nécessaire pour réaliser des profits commerciaux; 4) il étudierait les futurs marchés et encouragerait l'extension des firmes canadiennes dans les directions qui les placeraient en position avantageuse pour pénétrer dans ces marchés au fur et à mesure qu'ils se développeraient; cette action pourrait nécessiter un partage des frais ou l'octroi de contrats de recherche et de développement technique à certaines industries dans des domaines particuliers*; 5) il devrait fonctionner comme bureau d'affaires en accordant des contrats à des industries, à des universités, et à des firmes d'ingénieurs-conseils pour la solution de problèmes techniques posés par la conception et l'exploitation de l'ING; cette action favoriserait l'établissement de rapports étroits avec les groupes intéressés. De bonnes liaisons devraient en général prévenir le chevauchement des programmes de ce groupe (ou de cette division) et des organismes hors du NRI. On espère que la formation d'un tel groupe aiderait à obtenir le

* Cette activité devrait s'accompagner d'une liaison adéquate avec les organismes publics intéressés, tels le Ministère de l'Industrie.

rendement maximal des investissements de l'État dans la recherche et le développement technique en fournissant un mécanisme d'introduction directe de l'industrie dans les nouveaux domaines profitables de la technologie.

2.7 EMPLACEMENT

a) Raisons en faveur de l'emplacement de Chalk River.

En étudiant les emplacements possibles pour l'installation proposée, le Comité croit que ses recommandations à ce sujet devraient se limiter à l'indication d'une préférence bien fondée pour la construction de l'ING soit à Chalk River, soit à un autre endroit éloigné de Chalk River, mais non déterminé. Il pense que les autres facteurs à prendre en considération se trouvent en dehors de son mandat.

Il se trouve un certain nombre de bonnes raisons pour installer l'ING à Chalk River. Nombre de ces arguments ont été présentés par le personnel du CRNL; ils indiquent l'intérêt qu'éprouvent les scientifiques pour le projet et dénotent leur familiarité avec les complexités de la recherche nucléaire. Ces arguments se divisent en gros en trois catégories: l'avantage que trouveraient les scientifiques et les ingénieurs présentement au CRNL à avoir l'ING à Chalk River; l'augmentation possible des coûts de construction au cas où l'ING serait érigé ailleurs; les bénéfices tirés des échanges réciproques entre les scientifiques travaillant avec l'ING et ceux du CRNL, particulièrement pour le programme électronucléaire.

Les autorités du CRNL soutiennent, au sujet de la première raison, que nombre de leurs scientifiques qui s'intéresseraient principalement à l'ING conserveraient certains intérêts dans divers programmes réalisés au CRNL, et souhaiteraient utiliser de temps en temps les installations présentes ou futures de Chalk River. Les physiciens spécialistes des neutrons qui travailleraient avec l'ING pourraient par exemple mener des expériences secondaires avec le NRX ou le NRU dont les flux neutroniques seraient dans ce cas suffisants, et les physiciens du noyau utilisant l'ING pourraient réaliser des expériences à l'aide de l'accélérateur Van de Graaf.⁴⁵

Ces scientifiques seraient mieux accommodés par l'érection de l'ING à Chalk River.

⁴⁵ D'autres exemples sont rapportés dans la publication "The AECL Study for an Intense Neutron Generator" (Étude d'un générateur de flux neutroniques intenses par l'ÉACL), FSD/ING-75, Chalk River 1966, p. 30.

Les raisons ci-dessus pourraient aussi s'appliquer, quoique à un degré moindre, aux scientifiques nouveaux venus engagés pour travailler avec l'ING, parce qu'ils pourraient également s'intéresser aux programmes menés à bien au CRNL et trouver que la proximité de ses installations est commode.

Les chercheurs universitaires n'ont pas utilisé largement les installations du CRNL dans le passé. Cependant les chercheurs universitaires qui feraient des travaux avec l'ING, et qui seraient libérés de leurs obligations universitaires pendant un an ou deux, pourraient se trouver aiguillés vers l'utilisation des installations du CRNL pour des recherches secondaires qu'ils n'auraient pas eu autrement l'occasion d'entreprendre. Dans ces conditions, ils pourraient trouver que la proximité des installations est désirable.

La seconde catégorie de raisons que le CRNL donne pour favoriser la construction de l'ING à Chalk River est surtout basée sur des considérations économiques. On indique par exemple que le coût d'achat et de préparation des terrains dans un autre lieu que Chalk River serait probablement plus élevé. Les terrains disponibles à Chalk River sont près de masses d'eau suffisantes pour le refroidissement des appareils; le sous-sol est en roc solide recouvert d'un mort-terrain de sable utilisable comme écran; on remarque cependant que le terrain est accidenté et qu'il y a des fondrières.⁴⁶

Les experts du CRNL pensent que l'ING nécessitera l'établissement d'une zone de sécurité de 3,000 acres alentour de l'appareil. Les terrains que l'EACL possède actuellement à Chalk River s'étendent sur 10,000 acres, et une grande partie serait disponible pour accommoder l'ING.

Les experts du CRNL déclarent aussi que nombre d'installations et de services existant dans leur complexe seraient accessibles au personnel de l'ING. Si ce dernier était construit ailleurs, dans la majorité des cas il faudrait ériger ces installations et fournir ces services. On peut mentionner les installations d'expédition de produits radioactifs (y compris des souterrains), un service d'entreposage des déchets radioactifs, des services d'approvisionnement et d'administration, certains services de génie et installations de mise au point, un service de protection contre l'irradiation, des salles blindées, des

⁴⁶ "The AECL Study for an Intense Neutron Generator; recommendations and costs" FSD/ING-67. Chalk River, août 1966, III-B, p. 8.

installations d'emmagasinage sous l'eau et de manutention, des laboratoires de radiochimie et de métallurgie des produits radioactifs, une bibliothèque, un service de renseignements et un centre de calcul.⁴⁷

Si l'ING était construit à Chalk River, il est évident que nombre d'installations et de services du CRNL devraient être étendus pour servir aux deux complexes. Cependant, G.A. Bartholomew⁴⁸ remarque "qu'en érigeant l'ING près du CRNL, les installations servant les deux complexes pourront avoir une capacité plus faible que si elles servaient les deux isolément."

En conséquence, l'installation de l'ING en un autre lieu que Chalk River nécessiterait des dépenses supplémentaires. Il est très difficile de déterminer actuellement à combien monterait ce supplément, égal à la différence entre le coût de l'extension des installations et des services du CRNL et le coût d'installations complètes et de services nouveaux en un autre emplacement. On devrait ajouter à cette somme toute différence de coût entre la préparation du terrain à Chalk River (y compris la partie non recouvrable des frais d'extension des logements et des services sociaux de Deep River) et l'achat et la préparation du terrain en un autre lieu.

La troisième catégorie de raisons fournies par les experts du CRNL pour soutenir la construction de l'ING à Chalk River s'appuie sur les bénéfices mutuels que les programmes actuels et futurs du CRNL et de l'ING tireraient de leur interaction. En particulier les travaux de recherches et de développement technique nécessaires à la conception et à la construction de l'ING, ainsi que les travaux expérimentaux ultérieurs, pourraient constituer une importante contribution scientifique et technique au programme électronucléaire du CRNL. Si l'ÉACL doit continuer à jouer un rôle dans l'industrie nucléaire canadienne, il est préférable que les scientifiques chargés de l'exécution des divers programmes de développement technique du CRNL aient les contacts les plus étroits avec le personnel de l'ING, car les premiers ont une excellente connaissance des problèmes pratiques, et les seconds ouvriront la voie vers de nouveaux domaines de la science et de la technologie nucléaires.

⁴⁷"The AECL Study for an Intense Neutron Generator; recommendations and costs" FSD/ING-67, Chalk River, août 1966. III-B, p. 7-8; "The AECL Study for an Intense Neutron Generator" FSD/ING-75, Chalk River, décembre 1966. p. 31-32.

⁴⁸"The AECL Study for an Intense Neutron Generator" FSD/ING-75, Chalk River, décembre 1966, p. 31.

b) Raisons en faveur d'un autre emplacement.

Le Comité reconnaît qu'il serait commode pour les scientifiques et les ingénieurs de l'ÉACL travaillant avec l'ING d'avoir les installations expérimentales du CRNL tout à proximité. Cependant comme le projet de l'ING s'est dès le début largement ouvert à la participation universitaire (professeurs, étudiants diplômés et chercheurs munis d'un doctorat), on doit également prendre en considération la commodité de ces chercheurs.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les chercheurs universitaires dégagés temporairement de leurs obligations envers leurs universités pourraient s'intéresser à l'utilisation du réacteur ou d'autres installations de recherches du CRNL. Ces scientifiques pourraient trouver commode d'avoir le CRNL tout près. On pense cependant que peu de chercheurs universitaires pourront faire un long séjour à l'installation de l'ING, et la plupart viendront pour des périodes plus courtes, quand ils auront des expériences particulières à réaliser, ou lorsqu'ils auront à prendre contact brièvement avec leurs étudiants diplômés ou avec les boursiers en recherche. C'est ce qui est généralement arrivé aux installations des grands accélérateurs américains, et il est probable que les choses se passeraient ainsi dans les installations canadiennes. Ces chercheurs viendraient de toutes les universités du Canada au Centre de l'ING et retourneraient chez eux assez fréquemment. Il leur serait beaucoup plus commode de venir au Centre de l'ING si celui-ci était située près d'un grand aéroport international relié par vol direct avec les principales villes canadiennes.

En ce qui concerne les commodités relatives des divers emplacements on peut soutenir que le personnel de l'ÉACL a plus de marge pour établir ses programmes que les membres des universités, et que l'emplacement de l'ING à Chalk River aurait plus d'inconvénients pour les chercheurs venant des universités qu'un autre emplacement n'en aurait pour le personnel de l'ÉACL.

Ce raisonnement est confirmé par l'étude des moyens de transport pour Deep River. Actuellement le moyen le plus commode d'y parvenir est de prendre un train du Pacifique Canadien à Ottawa. Le voyage est d'une durée de trois heures, et il n'y a qu'un seul train quotidien dans chaque sens, partant tard dans l'après-midi. Trois autobus quittent aussi Ottawa pour North Bay quotidiennement, et ils mettent de trois à trois heures et demie pour atteindre Deep River. Ce tableau des modes de transport illustre les restrictions et les inconvénients auxquels un visiteur universitaire très occupé serait soumis si l'ING était situé à Chalk River.

Cette situation des transports vers Deep River et à partir de cette communauté semble peu susceptible de changer vraiment dans un proche futur. Il y a peu de chance qu'un aéroport commercial s'installe près de Deep River ou d'une des villes avoisinantes pendant bien des années. L'établissement d'un service de trains ou d'autobus rapide et commode d'Ottawa ou d'une autre grande ville vers Deep River attendra qu'il se produise un bouleversement dans les moyens de communications actuels ou que la population de la région de Deep River augmente dans des proportions beaucoup plus fortes que l'installation de l'ING ne pourrait le susciter.

Les scientifiques et les ingénieurs employés par le Centre de l'ING pourraient bien trouver commode d'avoir les installations du CRNL à proximité pour y réaliser une partie de leurs programmes. Cependant ils s'intéresseraient principalement à l'ING et leur attention devrait s'y fixer. Il serait de très grande importance, au cours de la phase de construction de l'ING, d'établir des relations aussi étroites que possible entre le personnel scientifique chargé de l'ING et les firmes industrielles construisant les éléments de l'installation complète. Cette interaction serait nécessaire pour assurer que les éléments du générateur ont les caractéristiques exactes précisées dans les cahiers des charges, et aussi pour créer un milieu propice à l'échange des idées qui pourrait susciter des innovations industrielles. Après la construction de l'ING, les échanges entre son personnel scientifique et les spécialistes de l'industrie devraient se maintenir à un niveau élevé si l'on désire obtenir les avantages économiques maximaux des travaux de recherches et de développement technique réalisés avec le générateur de flux neutroniques intenses. Il n'y a aucun doute que cette force dans les influences réciproques serait obtenue plus facilement si les installations de l'ING étaient situées dans le voisinage d'une grande région industrielle plutôt que dans celle de Chalk River.

On a également d'excellentes raisons d'établir des relations étroites entre les scientifiques et les ingénieurs travaillant pour l'ING et les membres des facultés de génie des universités canadiennes, tant pendant qu'après la construction de l'ING. Une telle influence réciproque serait sans aucun doute très avantageuse pour le Programme de l'ING, l'ÉACL et les universités, comme les États-Unis l'ont montré par l'interaction entre le MIT et les Lincoln Laboratories, entre l'Université de Californie à Berkeley et les Lawrence Radiation Laboratories. Cette influence réciproque se produirait le

plus fortement si l'ING était située près d'une ou de plusieurs grandes universités, et dans le voisinage d'un grand aéroport*

Si l'ING est construit, il éveillera certainement l'intérêt des cercles scientifiques internationaux. Il est absolument certain que des avantages très précieux seraient obtenus par l'interaction entre les scientifiques et les ingénieurs travaillant à la réalisation du projet de l'ING et leurs homologues des installations telles que le CERN, le SLAC, le LAMPF et l'accélérateur à 200 milliards d'électron-volt qui doit être construit à Weston, Illinois. Il semble raisonnable de penser que cette interaction se produirait plus facilement si le Centre de l'ING était situé près d'un aéroport international plutôt qu'à Chalk River.

Si l'ING était construit en un autre lieu que Chalk River, l'ÉACL pourrait avec raison étudier les possibilités économiques d'utilisation d'un petit avion privé pour transporter les scientifiques entre le CRNL et l'ING. Si l'ING était construit à Chalk River, il serait difficile d'établir un tel service à partir d'un grand aéroport facilement accessible aux chercheurs universitaires venant de toutes les parties du Canada.

Si le Centre de l'ING était situé près d'une grande ville, il aurait, outre les avantages précédents, celui de pouvoir attirer les scientifiques d'élite avec plus de facilité que s'il était situé dans une localité plus isolée. Le succès du programme de l'ING dépendrait de la qualité des scientifiques y prenant part. Nombre de scientifiques et d'ingénieurs préfèrent vivre dans une région jouissant d'attraits culturels tels qu'une université, une salle de concert, des musées, des galeries d'art et des théâtres, ou même refusent de vivre ailleurs. Comme les scientifiques d'élite auront toujours nombre d'offres intéressantes qui leur permettraient de bien remplir leur vie professionnelle et leur besoins culturels, il est vraisemblable que le Centre de l'ING aurait de bien meilleures chances d'attirer un grand nombre de ces chercheurs s'il était situé près d'une grande ville.

Il existe également de bonnes raisons, au cas où l'ING serait construit, de choisir son emplacement dans le voisinage d'un centre possédant des commodités dans les deux langues, car peu de scientifiques et d'ingénieurs canadiens-français acceptent de vivre séparés de leur milieu culturel. La région de Chalk River n'offre rien de tel.

* La proximité d'une grande université fournirait également aux scientifiques et techniciens travaillant avec l'ING la possibilité d'utiliser la bibliothèque et le centre de calcul de l'université ce qui compenserait de la perte de certains avantages du voisinage du CRNL.

Dans les chapitres précédents, nous avons signalé que de nouvelles méthodes d'organisation devraient être utilisées pour assurer la participation universitaire la plus grande possible et les plus grands avantages économiques au Centre de l'ING. On peut soutenir qu'une telle organisation serait plus aisée à établir et à faire prospérer loin de la structure administrative du CRNL que tout près, car les exemples d'une administration déjà en place pourraient facilement servir de modèle au nouvel organisme dès ses premiers pas et le détourner involontairement de son objectif.

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, les spécialistes du CRNL déclarent que l'ING aura besoin d'une zone de sécurité de 3,000 acres alentour. Cependant un des ingénieurs-conseils du Comité expose comme suit l'expérience qu'il a acquise avec SLAC: «On doit établir une zone de sécurité large de 500 à 1,000 pieds autour de l'accélérateur, la partie la plus large devant entourer la cible. La superficie minimale de la zone atteindra donc 1,000 acres. Il faut prévoir également l'expansion future et l'espace nécessaire à d'autres appareils. On estime généralement qu'une distance de 500 à 1,000 pieds est suffisante pour entraîner un affaiblissement suffisant des radiations pour ne pas affecter les employés. La réduction de la largeur de la zone de sécurité obligerait à l'augmentation de l'épaisseur du blindage, et des coûts correspondants, de telle façon qu'on peut arriver à établir un compromis économique».

L'ING présente cependant un problème supplémentaire, quelque peu différent de ceux qui touchent les accélérateurs accompagnant habituellement les cibles émettrices de neutrons. Le générateur de neutrons présente beaucoup des problèmes que posent les réacteurs et devrait être situé en tenant compte des mêmes précautions que pour ceux-ci. L'ING a cependant pour lui un trait favorable: il ne présente pas de possibilité d'emballement produisant une forte génération d'énergie thermique comme certains réacteurs.

On pourrait également ajouter que si le générateur est sans danger pour le personnel travaillant au Centre, il sera sûr pour les personnes se trouvant en dehors de la zone de sécurité.

Les spécialistes du CRNL ont déclaré que le coût d'achat d'un terrain convenable hors de la région de Chalk River pourrait atteindre 3,000 dollars l'acre.⁴⁹

⁴⁹ "The AECL Study for an Intense Neutron-Generator; Recommendations and Costs" FSD/ING-67, Chalk River, août 1966; III-B, p.9

Il semble au Comité que ce chiffre soit trop élevé. Des terrains assez plats, situés sur la rive québécoise de l'Outaouais, à 45 minutes d'auto d'Ottawa, se vendent à raison de 50 dollars l'acre. Ce dernier chiffre est sans doute plutôt faible pour la plupart des emplacements dans les circonstances habituelles⁵⁰, mais il est parfaitement possible que des communes offrent des terrains à des prix intéressants, et peut être aussi de l'électricité à bas prix en échange des avantages économiques que la région tirerait de la présence du Centre de l'ING.

Les scientifiques et les ingénieurs américains ont déjà obtenu ces avantages lors de la construction de leurs grandes installations. Si l'ING devait être construit hors de la région de Chalk River, il serait possible de choisir son emplacement en permettant aux villes et aux communes de faire leurs offres, comme l'on y a procédé pour le choix de l'emplacement de l'accélérateur à 200 milliards d'électron-volt des É.-U. Le Comité ne favorise pourtant pas cette méthode, car elle pourrait faire intervenir des considérations politiques dans le choix déjà délicat de l'emplacement. Ce dernier présente bien des problèmes, car l'ING devrait avoir, outre les avantages mentionnés ci-dessus, un accès facile à une voie ferrée pour le transport sûr des produits radioactifs, et au réseau d'électricité à haute tension.

Lors du choix d'un emplacement pour l'ING il est bon de se souvenir que, selon le CRNL, ⁵¹«Les vallées de l'Outaouais et du Saint-Laurent présentent la possibilité de tremblements de terre, bien que des séismes d'une magnitude suffisante pour lézarder un bâtiment ne se produiront pas probablement une fois en 500 ans dans la région de Chalk River».

Si l'ING devait être construit dans la région de l'Outaouais ou du Saint-Laurent, il ne serait bon d'étudier cette question que pour l'établissement des plans des bâtiments et leur construction. Les techniques modernes de construction permettent d'ériger des bâtiments qui ne souffriraient que peu d'un séisme. Les ingénieurs civils font par exemple construire un grand barrage à cheval sur la faille de St Andreas en Californie de telle façon qu'il résisterait à un grand séisme. Les Lawrence Radiation Laboratories, à Berkeley en Californie, se trouvent également très près d'une faille active (il se

⁵⁰Dans certains endroits cependant, des terres de la Couronne pourraient être disponibles.

⁵¹«The AECL Study for an Intense Neutron-Generator; Recommendations and Costs'', FSD/ING-67, Chalk River, août 1966, III-B, p.8.

produit souvent un ou deux tremblements de terre perceptibles par an dans cette région).

Dans la section précédente, nous avons signalé que les experts du CRNL craignaient le surcroît de frais entraînés par la création de nouveaux services et l'érection de nouvelles installations au cas où l'ING serait construit loin de Chalk River, disant que l'extension des commodités existantes serait moins coûteux. Il faut cependant remarquer que les terrains proposés pour la construction de l'ING à Chalk River sont situés à 3 milles et demi du CRNL⁵² selon le tracé d'une route à construire.

Cette distance réduirait quelque peu les commodités d'utilisation des installations agrandies du CRNL et de ses services tant par le personnel du CRNL que par celui de l'ING. Il serait préférable de fournir aux utilisateurs de l'ING les installations et les services qui leur permettraient de tirer le maximum de leurs travaux avec l'ING. Ce ne serait pas le cas s'ils avaient à parcourir 3 milles et demi pour utiliser ceux qui seraient indispensables à leurs travaux. Il semble ainsi douteux qu'il y aurait tant d'avantages économiques à construire l'ING dans le voisinage du CRNL dans le but d'utiliser mutuellement les installations agrandies et les services du CRNL.

Il ne fait pas de doute que des frais additionnels seraient causés par l'érection de l'ING loin de Chalk River. Cependant cet accroissement des coûts* serait plus que contrebalancé par les avantages de la construction de l'ING près d'une grande ville possédant des industries, une ou plusieurs universités, des commodités culturelles et un aéroport international.

2.8 PROPOSITIONS AUTRES QU'UN GÉNÉRATEUR DE FLUX NEUTRONIQUES INTENSES

On ne peut faire l'évaluation des avantages d'un projet nécessitant de l'argent, de l'énergie et du talent sans le comparer à d'autres projets possibles. Nous avons donc estimé qu'il était indispensable d'examiner les mérites d'autres programmes qui ont été proposés.

Il n'est pas possible d'évaluer les mérites des projets qui, eux, non pas été proposés. Cette remarque n'est pas vide de sens, car elle

⁵²"The AECL Study for an Intense Neutron-Generator; Recommendations and Costs", FSD/ING-67, Chalk River, août 1966; III-A, p.4.

* Il est actuellement impossible d'estimer l'accroissement total sans étudier un emplacement particulier, mais on croit que la différence ne devrait pas dépasser 3 à 10 millions de dollars en tout.

attire l'attention sur le fait qu'en recherche scientifique il n'est pas fréquent qu'on rencontre un bon projet. Ce dernier réclame non seulement de l'inspiration scientifique ou un esprit original, mais aussi la connaissance des progrès réalisés dans les spécialités connexes, une bonne appréciation de l'intérêt que présente le projet pour atteindre les buts du laboratoire (ou de l'industrie, ou du pays), le jugement permettant d'évaluer les possibilités internes de l'organisme de recherche en fonction de la concurrence possible et des capacités financières pour calculer les dépenses nécessaires pour atteindre l'objectif. La réunion de tous ces éléments ne peut être l'effet d'une décision administrative. C'est pourquoi le Comité n'a pas cru qu'il pourrait soit se réunir pour concevoir des projets similaires, soit demander aux scientifiques du CRNL de lui dresser une liste d'autres projets séduisants. Il leur a demandé au contraire une liste des questions étudiées par le Comité des futures installations en 1963-1964, parmi lesquelles figurait l'ING, qui fut choisi pour étude plus détaillée. Cette liste, à laquelle était joint un sommaire des conclusions de l'étude, fut transmise au Comité par M.T.G. Church en novembre 1966. Les questions étudiées sont mentionnées ci-dessous, ainsi qu'une ou deux possibilités supplémentaires que les membres du Comité eurent l'occasion d'approfondir avec les scientifiques des laboratoires de Chalk River, au cours de leur visite au CRNL le 21 décembre 1966. Ces dernières possibilités sont étudiées en fonction du programme de l'ÉACL, comme prévu par l'étude originale du CRNL, bien que la conception de l'ING ait depuis pris de l'envergure.

1) Aucun projet de recherches à long terme.

L'ÉACL pourrait concentrer ses efforts sur le développement technique de réacteurs de type CANDU, peut-être en maintenant une petite équipe de recherches fondamentales au travail à l'aide d'installations de coût modéré comparables à celle que possèdent les universités. Les conséquences en seraient un déclin graduel de la position de pointe et de la réputation scientifique du Canada, la perte des meilleurs membres du personnel qui iraient travailler dans les universités, et à long terme le changement de la position de pays contribuant au perfectionnement des centrales électronucléaires et de la technologie des isotopes à celle de pays consommateur. Un certain esprit de pionnier des sciences nucléaires s'évanouirait de l'ÉACL, et peut-être de tout le Canada, si les scientifiques n'avaient pas le sentiment de participer à des programmes de recherches importants, à la pointe de la science et de la technologie, et si les chercheurs de talent attirés par ces grands programmes s'en allaient ailleurs. Le Comité n'a pas estimé que cette possibilité était désirable.

2) Construction d'un ING de faible coût.

Il n'y a aucun doute que si quelque découverte technologique permettait la génération d'un flux de neutrons d'une intensité convenable par spallation à la moitié du coût de l'ING, par exemple, cette possibilité serait très attrayante, non seulement pour l'ÉACL, mais aussi pour plusieurs autres organismes scientifiques dans d'autres pays.

La réalisation d'un générateur de flux de neutrons plus faibles permettrait encore l'obtention de faisceaux de mésons et la poursuite de recherches sur le mécanisme de la spallation et de la génération électrique, mais ne constituerait pas de progrès par rapport aux réacteurs à flux neutroniques intenses utilisés en recherche sur les neutrons, sur l'état solide, ou en essai des matériaux, et n'offrirait aucun avantage par rapport aux réacteurs pour la production des isotopes. Il semble que l'obtention de flux d'une intensité supérieure à celle que les réacteurs fournissent permette de multiplier les avantages obtenus. Des conséquences similaires découlent de la réduction de l'intensité moyenne du flux, quand une densité de 10^{16} neutrons/cm²/sec. n'est obtenue que par bouffées. Les possibilités d'essais des matériaux et la production des isotopes en souffrent ainsi que les possibilités de réalisation des expériences, leur rapidité et leur précision. Le Dr Lewis attache une importance considérable aux possibilités de produire des radio-isotopes à bon marché, car ces derniers pourraient payer les frais d'obtention des flux les plus intenses de neutrons.

3) Réalisation de l'ING après un plus long délai d'études, ou par paliers successifs.

Les scientifiques du CRNL estiment que le temps est venu de construire l'ING, et que si nous ne le faisons pas, d'autres le feront avant longtemps. La plus grande partie de l'élan scientifique et de la considération qu'apporteraient les premiers résultats seraient perdues en se présentant en second, ainsi que l'avance technique pour la réalisation des applications possibles. Le Dr R.E. Taylor a déclaré qu'un programme intensif de réalisation durant relativement peu de temps permettrait de construire le Centre de l'ING au moindre coût. Une équipe scientifique d'élite pleine d'enthousiasme est capable d'accomplir un meilleur ouvrage en moins de temps et pour moins d'argent qu'un groupe avançant son petit bonhomme de chemin de façon méthodique et ordonnée. L'alternative est cependant difficile à choisir. On voit bien que le choix prématuré d'une voie déterminée pourrait

engager le programme dans des difficultés dont la résolution exigerait de fortes dépenses.

4) Réalisation de l'ING conjointement avec un autre pays.

On a pensé qu'un autre pays, tel que les É.-U., pourrait s'intéresser à la réalisation en commun de l'ING, réduisant ainsi les frais incombant au Canada. Cette méthode a été utilisée avec succès dans le passé, quand les É.-U. achetaient le plutonium produit par le réacteur NRU, et qu'ils passaient des contrats pour l'utilisation de boucles d'essai dans les réacteurs NRX, NRU et Whiteshell. De fait, le président de l'ÉACL a eu des conversations avec les dirigeants de l'USAEC à ce sujet l'année dernière. M. Gray a déclaré ce qui suit: «... bien qu'ils soient fortement intéressés par le projet de l'ING, et qu'ils nous pressent d'en entreprendre la réalisation, ils ne peuvent prendre en considération pendant deux ans au moins le financement d'un projet conjoint..... On a apparemment imposé des limites strictes à leur budget, et ils ont pris des engagements si lourds dans ce domaine qu'ils ne pourraient entreprendre de financer un autre projet sans devoir abandonner l'un de leurs engagements actuels.» Le personnel scientifique de l'ÉACL n'était aucunement partisan de cette collaboration en raison des problèmes inévitables posés par la codirection, particulièrement quand des applications commerciales sont en vue et qu'il s'agit d'utiliser les recettes de la vente des isotopes radioactifs. Ces problèmes ne se posent pas de façon aussi aiguë dans un programme de recherches uniquement fondamentales comme celui du CERN. Les difficultés seraient encore surmontables tant que l'un des participants serait clairement dans une position dominante, mais les dirigeants du CRNL désiraient que ce partenaire soit le Canada, et ne savaient pas si une collaboration dans ces conditions serait acceptée par un autre pays. Le Comité en a conclu que cette possibilité devrait être évitée, bien qu'on puisse la prendre à nouveau en considération.

5) La fusion thermonucléaire.

En 1963, les scientifiques du CRNL en sont arrivés aux conclusions suivantes:

“L'étude du problème de la fusion contrôlée est encore loin de prouver que la production à grande échelle d'énergie par fusion des noyaux d'hydrogène est réalisable. Cependant de nombreux pays mènent d'actifs programmes de recherches dans ce domaine et font de sérieux progrès en obtenant par la même occasion de nouvelles connaissances

technologiques et scientifiques sur le comportement des plasmas. Le Comité du CRNL recommande que l'ÉACL constitue une petite équipe pour entreprendre des recherches dans ce domaine et étudie la construction d'une machine de taille moyenne. Cependant aucune idée nouvelle n'a été suggérée, et les chances de succès n'ont pu être évaluées."

Il semblait qu'en 1966, après les déceptions initiales, les physiciens de la fusion étaient un peu plus optimistes, mais il n'y a aucune indication permettant d'évaluer le délai nécessaire pour parvenir à quelque découverte décisive. De sorte qu'en pénétrant en ce domaine le CRNL débiterait sans avantage concurrentiel, en espérant qu'une voie originale s'ouvrirait ultérieurement. D'un autre côté, l'ING utiliserait une technologie dont les fondations sont similaires. Les diverses technologies des courants ioniques intenses, des faisceaux intenses de particules à haute énergie, des libérations de fortes quantités d'énergie dans de petits volumes, des champs haute fréquence à haute énergie, des grands électroaimants, des appareils à vide, etc., sont tous très proches de la technologie de la fusion telle qu'elle s'est développée jusqu'à présent. Le programme de l'ING mettrait donc le CRNL en bonne position pour pénétrer dans le domaine de la fusion thermonucléaire et une méthode pratique apparaissait, et même le programme de l'ING pourrait révéler une nouvelle voie pratique de réalisation

6) Surrégénérateurs.

Les spécialistes du CRNL en sont arrivés aux conclusions suivantes:

"Le domaine des réacteurs rapides a une très grande importance potentielle. Actuellement, nous ne recommandons pas que le Canada entreprenne un effort important seul en ce domaine. Les raisons sont les suivantes: i) il n'est pas certain que le Canada ait un besoin précis de réacteurs rapides avant quelques décennies; ii) la position concurrentielle des réacteurs rapides au Canada au cours des trois ou quatre prochaines décennies est très incertaine; iii) même si la position concurrentielle des réacteurs rapides techniquement développés était favorable, il serait nécessaire d'investir de très fortes sommes dans le développement technique. Le montant que le Canada dépenserait dans un effort isolé serait trop grand pour pouvoir être justifié à présent. Le Canada devrait entreprendre un effort modeste d'étude des problèmes des réacteurs rapides pour se maintenir au

courant de l'évolution de ce domaine, et pour se trouver en position d'entreprendre rapidement un effort considérable au cas où il deviendrait clairement désirable."

Comme les publications du CRNL l'ont exposé, on aura besoin de toutes façons pendant très longtemps de réacteurs de conversion efficaces tels le CANDU pour compléter les réacteurs rapides et les sur-régénérateurs. Comme d'autre part le rendement économique des sur-régénérateurs semble incertain dans le contexte canadien, il semble qu'il serait de mauvaise stratégie d'investir de vastes sommes dans le développement technique des surrégénérateurs. Comme le Canada ne peut espérer exceller dans tous les domaines des sciences nucléaires, il semble de bien meilleure stratégie de se spécialiser dans les réacteurs de conversion ou les quasi-surrégénérateurs à eau lourde pour la durée prévisible d'un marché continu et pendant aussi longtemps qu'ils répondront aux besoins canadiens, tout en poursuivant un programme de recherches qui pourrait entraîner des innovations évitant les difficultés techniques posées par les surrégénérateurs et dépassant les progrès de ces derniers. Cependant l'ING peut garder des voies utilement ouvertes à la technologie des surrégénérateurs. Les deux technologies s'occupent des problèmes de l'endommagement des matériaux, du pompage du métal fondu caloporteur, de l'extraction de fortes quantités d'énergie thermique produites dans de faibles volumes. Le programme de l'ING pourrait contribuer très utilement à l'essai des matériaux et des éléments d'appareils soumis à des flux intenses de neutrons rapides comme il s'en produit dans les surrégénérateurs.

7) Transport d'énergie a longue distance

"Les oléoducs et gazoducs transmettent l'énergie sous forme de combustible avec une telle efficacité que la génération d'électricité aux puits de pétrole ou de gaz, suivie d'un transport par câbles à haute tension ne peut atteindre le rendement des centrales thermiques alimentées par ces combustibles. Le transport de grandes quantités d'énergie électrique dépassant 1,000 mégawatts, sur des distances dépassant probablement 1,000 milles devrait être effectué plus économiquement par des lignes à haute tension en courant continu qu'en courant alternatif. Il existe au Canada très peu de centrale hydroélectrique et de centre de consommation d'énergie qui devraient être reliés par des lignes à haute tension en courant continu. Si le Canada doit exporter de l'énergie électrique vers les É.-U., l'emploi de lignes à courant continu à très haute tension deviendra nécessaire. Bien que

les matériaux supraconducteurs possèdent des possibilités prodigieuses de transport de courant, on ne peut les considérer comme des concurrents sérieux des lignes à haute tension habituelles en raison des coûts extrêmement élevés du refroidissement par l'hélium ou l'azote. Comme le domaine du transport d'énergie électrique est bien exploré et que les perfectionnements seraient utiles surtout pour les centrales hydroélectriques éloignées, les progrès dans ce domaine ne contribueraient pas à l'amélioration ou à l'expansion des centrales électronucléaires. Il semble donc que les recherches dans ce domaine devraient être menées par les compagnies d'énergie électrique. Nous ne recommandons pas la participation directe de l'ÉACL."

Des études récentes montrent que les lignes de transport d'énergie électrique par supraconducteurs pourraient devenir économiques lors du transport de quantités d'énergie atteignant 100,000 MW sur quelques centaines de milles. (R.L. Garwin, J. Matisoo, comptes rendus de l'IEEE 55, 538-548, avril 1967). D'autres études ont donné de bonnes raisons de relier les divers réseaux canadiens en un ensemble national (D. Cass-Beggs, "Economic Feasibility of Trans-Canada Electrical Interconnection", Engineering Journal, janvier 1961). Ces possibilités indiquent que quelques travaux de recherches et de développement technique sur la transmission d'énergie devraient être entrepris quelque part au Canada, peut-être même dans le cadre du CRNL, mais qu'il est difficile d'en faire l'objet d'un grand programme pour le CRNL. Il signifierait l'abandon à long terme des recherches sur les centrales électronucléaires, et celui de la production commerciale des isotopes, à l'exception de quelques travaux menés à l'aide des réacteurs de puissance. Les possibilités d'expansion commerciale seront d'ailleurs bientôt limitées par les possibilités de production. En outre, la réalisation d'un tel programme dans un domaine sans rapport avec l'énergie nucléaire n'utiliserait nullement les avantages que possède le Canada en personnel scientifique, installations, expérience et réputation.

8) Les piles à combustible*.

"La bibliographie des piles à combustible donne l'impression très nette que la technologie, le matériel, le rendement économique et en général l'étude des applications sont largement en avance sur la compréhension des phénomènes physiques et chimiques fondamentaux se produisant dans ces piles et particulièrement dans les piles à haute

* W.C. Leith, dans son ouvrage, "Resources for Man" récapitule brièvement le niveau technologique de cet appareil et des suivants. (p. 113-121). Lindsay Press, Ltd, 1966.

température. Aucune étude fondamentale de la nature et même du déroulement de la plus simple réaction aux électrodes n'est disponible. Même le transport des ions dans les divers électrolytes n'est que fort mal compris. La nature du phénomène d'activation de l'oxygène à la surface de l'électrode est très douteuse. On n'a pas complètement élucidé les lents phénomènes qui se produisent à l'électrode d'hydrogène, et aucune explication satisfaisante n'existe des variations marquées des courants d'échange aux diverses électrodes. Il ne manque donc pas de sujets intéressants pour la recherche dans ce domaine, qui pourraient donner des résultats bénéfiques. Il semble donc avantageux de former une petite équipe de recherches au CRNL pour étudier ces problèmes fondamentaux. Un physicochimiste et un physicien des métaux suffiraient peut-être à former le groupe. Certaines des questions à étudier sont en relation directe avec la production d'eau lourde par électrolyse et sa purification, et l'ÉACL pourrait tout naturellement s'y intéresser en dehors des applications des piles à combustible. Le groupe de recherches serait en bonne position pour surveiller les nouveautés de ce domaine en pleine évolution, permettant ainsi à l'ÉACL de s'intéresser spécifiquement à la technologie des piles à combustible s'il se produisait des découvertes ici ou ailleurs."

Il semble nécessaire de réunir un groupe plus nombreux que proposé pour progresser dans ce domaine qui, en outre, offre deux inconvénients pour l'ÉACL. Tout d'abord, on peut lui opposer les mêmes raisons que précédemment: il n'y a aucun rapport avec les centrales électronucléaires ou la technologie des matériaux radioactifs. Deuxièmement, comme certains types de piles à combustible ont potentiellement des applications très nombreuses dans la propulsion des camions, des autos, des autobus, dans la maison, etc., l'intérêt commercial devrait inciter les grandes firmes industrielles à entreprendre un large effort de recherches appliquées et l'action du gouvernement serait peu appropriée. En d'autres mots, l'ÉACL ferait un pas de clerc en choisissant un programme qui pourrait l'opposer directement à la General Motors ou à Ford.

9) Magnétohydrodynamique.

"Un ensemencement convenable des gaz de combustion portés à 2500° K peut leur assurer une conductivité convenable dans les conduits d'un convertisseur magnétohydrodynamique. On peut atteindre de telles températures par des techniques bien connues. Les É.-U. et le Royaume-Uni ont entrepris l'exécution d'importants programmes de recherches dans ce domaine. L'ÉACL a peu de raison de s'occuper

des convertisseurs magnétohydrodynamiques. Les seuls réacteurs qui paraissent capables de porter leur circuit caloporteur à ces températures nécessaires pour actionner ces machines améliorées sont ceux à circuit caloporteur gazeux. La plus haute température prévue pour un caloporteur gazeux de tout type de réacteur dont nous ayons entendu parler est de 2400°F (1600°K). Si un autre type de réacteur était utilisé, il semble que le circuit caloporteur devrait fonctionner selon le cycle de Rankine. Dans chaque cas les ingénieurs rencontreraient des difficultés pour doter le courant gazeux d'une conductivité convenable. La conductivité à l'équilibre des gaz ensemencés (c'est-à-dire l'argon ou l'hélium) est insuffisante en dessous de 2000°K . L'avenir des convertisseurs magnétohydrodynamiques dont les gaz sont chauffés par un réacteur dépend donc de la possibilité d'utiliser des flux d'électrons qui ne sont pas en équilibre thermique avec le gaz. De nombreux travaux sont en cours dans ce domaine, et il y a de bons espoirs de succès. Le mécanisme qu'on préfère est l'élévation de la température électronique par le champ électrique induit du conduit. Les difficultés rencontrées pour trouver un matériau convenable pour les parois du conduit seraient moins difficiles à surmonter dans le cas d'un convertisseur utilisant la chaleur d'un réacteur que s'il utilisait des gaz de combustion, mais elles resteraient quand même redoutables."

L'ÉACL pourrait entreprendre des recherches à petite échelle, mais utiles quand même, au sujet des conductivités hors d'équilibre des gaz stationnaires soumis à des champs électrique et magnétique. Ce sujet a quelque rapport avec les travaux concernant les chambres d'ionisation qui ont été réalisés ici. L'étude des problèmes les plus intéressants que posent les gaz s'écoulant dans un champ magnétique nécessiterait l'emploi d'appareillage plus complet. Une étude technique des convertisseurs magnétohydrodynamiques demanderait des appareils de grande capacité. Il est probable que les travaux concernant la dynamique des gaz, dont l'exécution est nécessaire au développement technique d'un convertisseur magnétohydrodynamique, s'effectueraient en dehors des domaines familiers aux scientifiques de l'ÉACL, tant sur le plan théorique que sur le plan pratique."

Ainsi l'emploi des techniques magnétohydrodynamiques pour réaliser des gains marginaux dans les centrales thermiques n'est pas très intéressant, si même il est possible. Les réacteurs nucléaires qui semblent le mieux convenir aux techniques de conversion magnétohydrodynamique sont du type à caloporteur gazeux, dont l'ÉACL n'a guère l'occasion de s'occuper. Cependant, les possibilités de conversion magnétohydrodynamique de l'énergie thermique des réacteurs

demeurent à l'ordre du jour. Des doutes ont été exprimés au cours des deux années passées sur le futur des recherches en magnétohydrodynamique; toutefois, un exposé récent affirme le contraire ("MHD in a Nuclear Gas-Turbine Cycle", "Engineering", 10 février 1967, p. 209-211). Outre les points exposés ci-dessus, les questions soulevées par la conversion magnétohydrodynamique sont très semblables à celles que pose la fusion thermonucléaire.

10) Convertisseurs Thermo-ioniques et Thermo-électriques.

"On a déjà réalisé nombre de recherches dans les domaines de la conversion directe d'électricité, qui semble avoir les plus grandes possibilités, sans toutefois obtenir des rendements concurrentiels. Il est probable que tout progrès technologique modifiant notablement la situation actuelle deviendrait bientôt connu. En conséquence nous ne recommandons pas la réalisation d'un programme important dans les circonstances actuelles. Cependant des recherches à une échelle relativement modeste pourraient apporter une contribution valable à certains secteurs, ou tout au moins éliminer certaines méthodes. On devrait commencer un programme d'études des caractéristiques thermo-électriques de quelques composés à haute température, y compris les effets du rayonnement et de l'introduction d'impuretés. Les travaux en cours au CRNL devraient être poursuivis pour établir une fois pour toutes si l'oxyde d'uranium peut être un candidat sérieux aux applications de recouvrement. On devrait également commencer les travaux préliminaires sur les contacts électriques, l'isolement électrique et la diffusion atomique dans les conditions physiques régnant à l'intérieur des réacteurs, car la réalisation d'un convertisseur placé à l'intérieur d'un réacteur nécessitera la connaissance de ces facteurs."

Le Comité soutient ces conclusions. Les recherches en thermo-électricité concernent fondamentalement les matériaux. Si on en trouve qui conviennent (nous ne savons pas s'il en existe), ils susciteront un intérêt considérable dans les cercles industriels. Toute découverte déterminante serait immédiatement exploitée par des firmes industrielles jouissant de solides moyens technologiques, particulièrement aux É.-U. pour répondre à une multitude d'applications à petite échelle. Un laboratoire de recherches pourrait chercher le matériau magique sans jamais le trouver. Il pourrait aussi le découvrir et se retrouver brusquement les mains vides, à cause des autres laboratoires dont les scientifiques se précipiteraient pour trouver les applications payantes. Il ne serait pas sage de réaliser un grand effort

dans ce domaine, et même s'il était à conseiller, ce seraient les laboratoires industriels qui seraient les mieux outillés pour le faire. La conversion thermo-ionique, en tant que technique de conversion de l'énergie, se trouve dans une phase également douteuse. Cependant l'ING pourrait être considéré comme un appareil thermo-ionique géant qui mettrait les scientifiques de l'ÉACL dans un état de préparation convenable pour exploiter toute découverte dans ce domaine.

Conclusions

Le Comité a été ainsi conduit à conclure que parmi toutes les possibilités considérées, l'ING se détache comme convenant le mieux à un important programme de recherches à long terme bien relié aux programmes actuels et futurs de l'ÉACL. Ce dernier représente dans ce cas le lieu géométrique des sciences nucléaires appliquées et de la technologie nucléaire au Canada. Pendant que nous avons étudié un certain nombre de possibilités, comme elles l'ont été par le comité du CRNL en fonction des programmes de l'ÉACL, le projet de l'ING a pris plus d'envergure, englobant les ressources universitaires. Le projet de l'ING jouirait alors d'avantages supplémentaires constituant ainsi le foyer des influences réciproques entre les recherches universitaires, les recherches de l'ÉACL et les objectifs technologiques du pays.

APPENDICES

Appendice I

“L’ETUDE DE LA MACHINE ING”

Article reproduit de

Physics in Canada, volume 22, no 5, hiver 1966.

Bons offices de l’Association Canadienne des Physiciens.

L'ÉTUDE DE L'ING

G. A. BARTHOLOMEW et P. R. TUNNICLIFFE

L'étude de l'ÉACL intitulée "La proposition d'un Générateur de flux neutroniques intenses" remonte déjà à trois ans. C'est donc dire que le projet est connu de beaucoup de lecteurs de *Physics in Canada*. Les détails techniques de l'étude figurent dans un récent document¹. Le présent article en expose les traits saillants. L'étude est le fruit du travail de plusieurs chercheurs de l'ÉACL et de la précieuse collaboration de certains de leurs collègues des universités et de l'industrie canadiennes.

Le Générateur peut servir à plusieurs usages. Au coeur même de l'appareil se situe la source de neutrons obtenue par le bombardement continu d'une cible faite d'un mélange eutectique de Pb-Bi au moyen d'un faisceau de 65mA de protons de 1 GeV. Un réservoir d'eau lourde entoure la cible et ralentit les neutrons résultant de la spallation et de l'évaporation, de façon à produire un flux de neutrons thermiques de 10^{16} cm⁻² sec⁻¹. Cependant, il est possible d'utiliser en même temps tout le faisceau ou une partie du même faisceau à d'autres fins, notamment pour produire des faisceaux secondaires de neutrons, mésons et neutrinos rapides. On étudie aussi la possibilité d'obtenir des faisceaux de protons plus lents.

Le projet est réalisable, bien qu'il atteigne presque les limites de la technologie actuelle. Des progrès considérables s'imposeront dans un grand nombre de domaines des sciences appliquées et du génie. C'est donc dire que, non seulement le projet sera utile à plusieurs secteurs de la recherche fondamentale, mais encore apportera-t-il un puissant stimulant à la technologie industrielle.

On estime que la première étape des travaux, soit la mise en place de l'accélérateur et des installations servant à produire le flux de neutrons thermiques et le faisceau de pions, sera terminée en 1974,

¹Étude de l'ÉACL portant sur la construction d'un Générateur de flux neutroniques intenses, rapport n° 2600 de l'ÉACL (1966), Bureau de diffusion des documents scientifiques, Énergie Atomique du Canada Limitée, Chalk River, Ontario.

les autres installations venant s'ajouter au cours des cinq années suivantes.

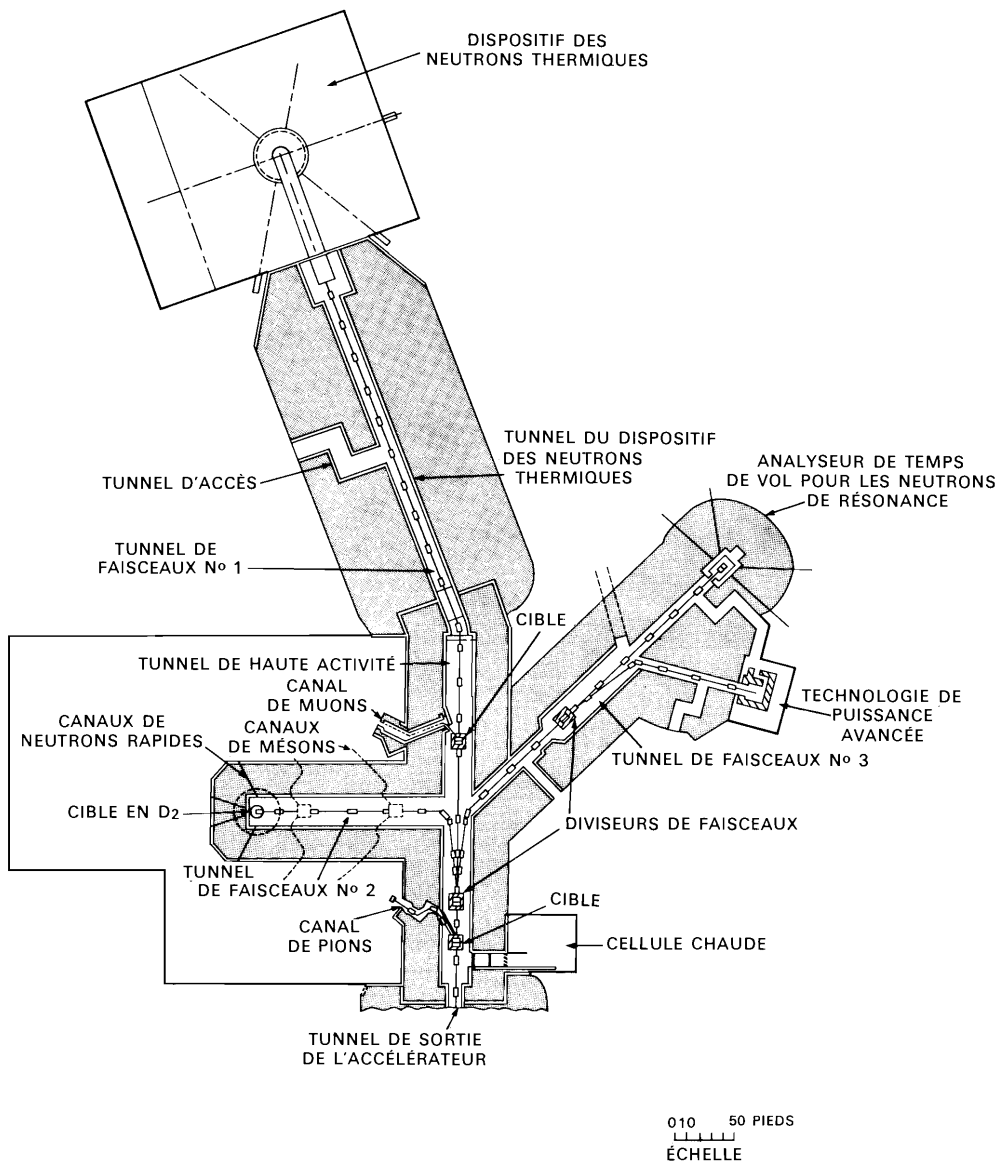
Le Gouvernement à déjà été saisi des résultats de l'étude ING et d'une proposition pour la mise en oeuvre du projet. Le Conseil des sciences étudie présentement la proposition et devrait formuler ses recommandations bientôt.

Le projet ING doit, dans l'esprit de ses promoteurs, permettre de répondre à un besoin de faisceaux neutroniques à flux initiaux plus considérables que ceux que fournissent les réacteurs à flux élevés (NRU, 2×10^{14} ; HFBR, 7×10^{14} ; HFIR, $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$). L'étude de l'état solide et de l'état liquide par diffusion inélastique de neutrons, et des matières nucléaires, par fission, capture de neutrons et autres réactions, nécessite des flux puissants pour assurer des progrès constants. Des flux plus puissants sont aussi nécessaires afin de répondre à la demande de radio-isotopes pour les applications médicales et industrielles ainsi que pour la recherche. Il est difficile, avec des réacteurs, de produire des flux de l'ordre de $10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ dans les tubes de faisceaux, à cause des limites qu'imposent l'échauffement au centre du réacteur et la consommation de combustible. Le procédé dit de spallation comporte plusieurs avantages, dont le principal est une baisse sensible de la chaleur produite par neutron libéré.

Depuis l'envoi de l'étude à l'impression,¹ le choix s'est porté sur un accélérateur linéaire comme étant l'appareil le plus apte à produire le faisceau de protons. On étudie maintenant la possibilité d'adapter les plans du Laboratoire scientifique de Los Alamos relatives à sa propre installation de physique des mésons, pour arriver à un cycle utile de 100 p. 100, à 65 mA. L'appareil idéal aura une longueur d'un mille environ et exigera quelque 125 MW d'énergie électrique. Environ la moitié de cette énergie sera transmise au faisceau. Le tableau I présente les principaux paramètres d'un prototype.

Tableau I - Paramètres de l'accélérateur

Source ionique:	Duoplasmatron à courant continu de 130 mA	
Injecteur:	Voltage en courant continu de 750 KV	
SECTIONS DE L'ACC. LIN.	SECTION "ALVAREZ"	SECTION DU GUIDE D'ONDES
Longueur (pi.)	600	4200
Énergie (MeV)	165	975
Fréquence (MHz)	200	800
Pertes de H.F. (MW)	6.9	20.9
Puissance magnétique (MW)	0.5	1.2



Système de transport des faisceaux.

Figure 1 CIBLES DE L'ING ET DISPOSITION DES EXPÉRIENCES.

Au sortant de l'accélérateur, le faisceau pénètre dans la zone des cibles de l'ING telle qu'illustrée à la fig. 1. La presque totalité

du faisceau de 65 mA est dirigée vers la cible à neutrons thermiques. Des cibles minces pour la production de mésons sont interposées dans le faisceau dans la galerie à forte irradiation. Environ 1 mA est dévié du faisceau principal, à angle droit vers la gauche, et entre dans un autre tunnel pour former le faisceau n° 2. Ce dernier sert à des expériences de physique sur les mésons et les neutrons rapide. Un autre, le faisceau n° 3, dont le courant est environ 0.1 mA ou moins au besoin, est séparé du faisceau principal et dirigé vers la droite à 45° en direction de l'installation de temps d'envol pour les neutrons de résonance. Un séparateur de faisceau inséré sur le parcours du faisceau n° 3 dirige environ 1 mA vers l'installation de technologie avancée des sources d'énergie. Des canaux à faisceaux secondaires, ménagés dans les parois de la galerie d'activité intense et de celui du faisceau n° 2, permettent d'extraire des faisceaux de mésons, de neutrons et, au besoin, de protons.

Le tableau II présente les données caractéristiques de rendement des faisceaux secondaires.

Tableau II – Installations génératrices de mésons et de nucléons à grande énergie

MÉSONS CONTINUS (Faisceau 1)	
Cibles	0.1 g cm ⁻² Be
Canal des pions, rendement pour 65 mA	10 ⁸ – 10 ⁹ s ⁻¹ (300 ± 14) MeV π ± à 40 pi.
Canal des muons, rendement pour 65 mA	10 ⁸ – 10 ⁹ cm ⁻² s ⁻¹ (300 ± 14) MeV μ ± à 100 pi.
MÉSONS PULSÉS (Faisceau 2)	
Cible	– 100g cm ⁻² C
Rendements pour un courant moyen de 1 mA	10 ⁹ – 10 ¹⁰ s ⁻¹ (150 ± 8) MeV π ± à 40 pi. 10 ⁷ – 10 ⁸ cm ⁻² s ⁻¹ à l'arrêt μ ± à 50 pi.
NEUTRONS RAPIDES (Faisceau 2)	
Cible	D ² liquide, 400g cm ⁻² Bi
Rendement pour un courant moyen de 1 mA	5 × 10 ⁷ cm ⁻² s ⁻¹ sous 14 MeV, à 1,000 MeV, à 20 pi. 5 × 10 ⁷ cm ⁻² s ⁻¹ , 200 MeV à 50 pi.
NEUTRONS DE RÉSONANCE	
Cible	Pb + modérateur mince de H ²
Intensité des neutrons à la fin d'une trajectoire de 66 mètres	0.3 cm ⁻² sec ⁻¹ eV ⁻¹ , à 1 keV
Possibilité de trajectoires atteignant 1 km de longueur	

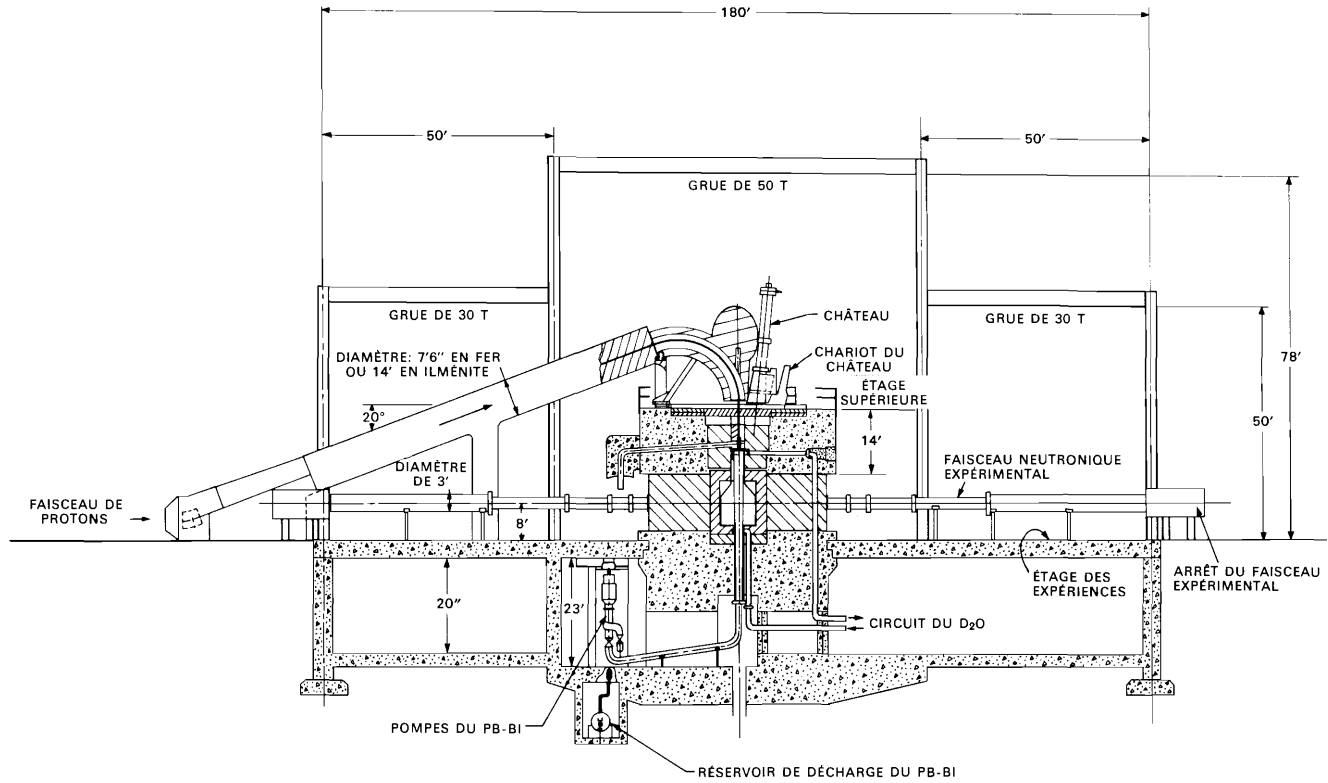


Figure 2 COUPE TRANSVERSALE DU DISPOSITIF DES NEUTRONS THERMIQUES.

Tableau III – Caractéristiques de l'installation de la cible émettrice de neutrons thermiques

Équipement	Diamètre
5 tubes à faisceaux tangentiels (dont 4 à accès vertical)	10 cm
1 tube traversier à accès vertical	20 cm
1 tube à faisceau radial	10 cm
2 tubulures pneumatiques	10 cm
45 tubulures hydrauliques	4 cm
5 chaussettes verticales	15 cm
1 couverture de cobalt	
Flux maximum disponible	$10^{16} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Intensité de la source	$8 \times 10^{18} \text{ n s}^{-1}$
Diamètre de la cible	20 cm
Épaisseur du multiplicateur au béryllium	20 cm
Épaisseur du modérateur au D ₂ O	100 cm
Épaisseur du blindage au niveau du tube à faisceau	450 cm, fer
Quantité et débit du fluide Pb-Bi	105,000 liv. 4560 liv. s ⁻¹
Température du fluide Pb-Bi	max. de 450°C. min. de 325°C
Puissance du faisceau	65 MW
Puissance dans la cible	39 MW
Puissance dans le modérateur	16 MW
Puissance dans le blindage	9 MW
Énergie de liaison des particules chargées	1 MW

Les sources de mésons pulsés et de neutrons rapides se comparent à celles de l'installation de physique des mésons de Los Alamos, mais les sources de mésons continues constituent une caractéristique unique du Générateur de flux neutroniques intenses. Ces divers faisceaux de grande intensité faciliteront beaucoup les recherches sur la structure et les interactions nucléaires. La source de neutrons de résonance dépassera en rendement toutes les installations actuelles dans ce domaine et rivalisera aisément avec les autres qui sont projetées. L'installation de technologie avancée des sources d'énergie, alimentée par le faisceau n° 3 (fig. 1), servira à des études sur la régénération électro-nucléaire de matières fissiles. Il sera possible de construire, dans diverses parties du complexe, d'autres installations consacrées à l'étude des dommages causés par les radiations, à la recherche médicale au moyen de nucléons et de mésons de grande énergie, ainsi qu'à des expériences sur les neutrinos.

L'installation de la cible émettrice de neutrons thermiques illustrée à la figure 2 est une construction cylindrique semblable à un réacteur, munie de tubes d'irradiation verticaux et de tubes à faisceaux placés horizontalement et débouchant d'un caisson central modérateur au D_2O . Un anneau permettant l'irradiation du cobalt entoure le caisson. La cible de Pb-Bi est liquéfiée et circule dans un tube vertical en Zircaloy traversant le modérateur en son milieu. Un anneau de béryllium entourant la cible assure une certaine multiplication des neutrons. Le faisceau de protons est dirigé par le système de transfert du faisceau vers le haut où blindage et ensuite vers le bas dans la cible. Le métal liquide circule dans un échangeur de chaleur situé sous le plancher. Le tableau III présente les principaux paramètres de l'installation.

Pour l'avenir plus lointain, le projet ING permettra plusieurs étonnantes possibilités, comme celles d'ajouter un anneau de stockage pour pulser au maximum le faisceau de 65 mA, une cible régénératrice de puissance pour la production élevée d'électricité et de matières fissiles, ainsi qu'un autre accélérateur permettant de porter une partie du faisceau à de grandes énergies.

La conception et l'utilisation du Générateur devraient être favorisés par le projet TRIUMF qui débutera plus tôt. L'expérience acquise dans le maniement et le blindage des faisceaux intenses de protons, et dans les techniques de la physique des énergies intermédiaires sera précieuse. Les échanges d'idées, au cours de l'étude et de la construction des installations, devraient être profitables aux deux projets. Lorsqu'ils fonctionneront, les accélérateurs se compléteront dans leurs champs d'application, comme le montrent déjà les différentes gammes de courant et d'énergie des faisceaux.

Appendice II

RAPPORT DES EXPERTS-CONSEILS

BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY
ASSOCIATED UNIVERSITIES, INC.
UPTON, L.I., N. Y. 11973
TEL.: CODE REGIONAL 516, YAPHANK 4-6262

DÉPARTEMENT DE L'ACCÉLÉRATEUR

Le 13 février 1967

Monsieur R. W. Jackson,
Bureau du Conseil privé,
Secrétariat des sciences,
Ottawa, Ontario, Canada

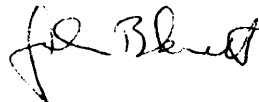
Monsieur,

Depuis que je vous ai écrit la dernière fois, j'ai demandé aux métallurgistes de notre Département de génie nucléaire d'étudier les plans de l'ÉACL en vue de doter d'une cible de métal liquide l'accélérateur du Générateur de flux neutroniques intenses. MM. Gurinsky et Weeks ont rédigé un mémoire à ce sujet. Vous en trouverez copie ci-joint. J'en adresse aussi un exemplaire à M. Lewis, à Chalk River.

Je continue toujours à craindre l'accumulation, à la longue, d'instabilités dans un faisceau continu. De nouvelles instabilités de caractère quadrupole ou d'un ordre supérieur font actuellement l'objet de discussions dans divers centres. Il serait bon, à mon avis, que les théoriciens du Centre d'études nucléaires de Chalk River se tiennent en rapports, à ce sujet, avec des experts comme Fred Mills (Université du Wisconsin), Ernest Courant (Brokhaven), Andy Sessler et Jackson Laslett (Lawrence Radiation Laboratory), Bob Gluckstem (Université du Massachusetts) et avec l'équipe du Stanford Linear Accélérateur Center. Ces spécialistes se réunissent périodiquement, quoique de façon irrégulière, et je suis certain qu'ils accueilleront avec plaisir vos représentants à ces rencontres.

Je ne vois pas, pour le moment, ce que je pourrais faire de plus sans étudier votre projet beaucoup plus en détail.

Veuillez accepter, monsieur, avec mes meilleurs vœux, de succès dans cette entreprise, l'assurance de ma haute considération.



John P. Blewett

JPB/yew
cc: R. Taylor

BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY

MÉMOIRE

Le 31 janvier 1967

À: MM. J. P. BLEWETT ET J. M. HENDRIE

DE: MM. D. H. GURINSKY ET J. R. WEEKS

OBJET: CIBLE DE Bi-Pb PROPOSÉE POUR
LE PROJET ING

A notre avis, la compatibilité des matériaux entre la cible de Pb-Bi et le tube de la cible est vitale pour la réalisation du Générateur de flux neutroniques intenses (ING). La présente proposition nous semble valable, compte tenu du peu de renseignements disponibles au sujet de la résistance à la corrosion du Nb (niobium) en présence du mélange eutectique de Pb-Bi (plomb et bismuth). Les températures et différences de températures ne sont pas excessives. Toutefois, l'échauffement rapide du métal liquide dans la zone-cible, ainsi que sa grande vitesse, indiquent qu'il pourrait bien se produire un grave problème de corrosion, même si la solubilité de Nb dans Pb-Bi est de 0.1 ppm à 450°C. En outre, le Fe et le Nb forment plusieurs composés intermétalliques stables qui pourraient aggraver la corrosion en se déposant sur des surfaces de Nb ou d'acier. Il nous semble donc qu'il faudrait examiner soigneusement la question des matériaux avant d'établir le plan définitif du Générateur. Il conviendrait aussi d'étudier les propriétés d'autres matériaux connus pour leur plus grande résistance que Nb à la corrosion par Pb-Bi, particulièrement le molybdène (Mo). Il faudrait songer également à la possibilité d'utiliser une surface de fer sur le zirconium (Zr).

Nous pensons que le seul tube-cible acceptable doit être fabriqué par cofilage et scellé à la chaleur. La brasure au beryllium (Be) produira probablement, lorsque le tube sera en service, un joint très fragile, par suite de la production d'hélium à l'interface. Il serait de beaucoup préférable d'utiliser une matière forgée pour le blindage du tube au lieu de compter sur un revêtement quelconque comme barrière contre la corrosion. Le mélange de Pb-Bi doit rester à tout prix éloigné du tube de Zr-2. Peut-être le tube-cible pourrait-il être conçu de

façon qu'il soit remplaçable. Il conviendrait aussi d'ajouter un amalgame de mercure et de zirconium au mélange de Pb-Bi, afin de nettoyer le circuit.

On peut douter de la suggestion d'employer un "piège froid" pour précipiter les solutés. Les succès remportés par Cygan à l'Al n'a rien à voir ici, car Cygan a travaillé sur des circuits sales (remplis d'oxydes), et son piège froid n'a fait en somme qu'éliminer des accumulations de Bi_2O_3 du conduit froid. Les auteurs ont traité de cette question¹. Le recours à un piège froid est peut-être efficace pour éliminer les solutés du métal liquide, mais il augmente la différence de température (ΔT) du système, ce qui a ensuite pour effet d'accroître le danger de corrosion dans les parties où la température est élevée. Au lieu d'un piège froid, il vaudrait mieux employer un désoxydant soluble, comme le mercure, permettant de réduire suffisamment l'activité de l'oxygène pour qu'il ne réagisse pas avec le niobium. Il faudrait songer aussi à la possibilité d'un apport de zirconium par injection dans la partie la plus froide de la boucle comme anticorrosif soluble.

L'emploi d'aciers pour les circuits du Pb-Bi, en se basant sur leur réaction au Bi en présence d'anticorrosifs à des températures beaucoup plus fortes, comme on a fait dans le cas des figures VII-24-6, n'est pas à conseiller. La constatation de l'activité carbonique, par exemple, dépend de la faculté du carbone contenu dans l'acier de se déplacer vers l'interface et de réagir à cet endroit pour former des pellicules protectrices de ZrC, de sorte qu'en l'absence d'anticorrosifs, l'activité carbonique peut être beaucoup moins grande. L'effet de chrome (Cr), illustré dans ces figures, est de même attribuable en partie à la réduction de l'activité carbonique découlant de la plus forte teneur en chrome, et en partie aussi seulement, à la solubilité légèrement plus forte du chrome que du fer dans le bismuth. La stabilité accrue des pellicules d'oxydes sur les surfaces d'acier à plus grande teneur en chrome a en fait incité beaucoup de chercheurs à recommander l'emploi d'aciers à plus forte teneur en chrome dans le cas des systèmes non protégés contre la corrosion. Toutefois, si l'intention est d'ajouter du zirconium au Pb-Bi, comme on le laisse entendre ci-haut, les aciers choisis sont probablement fort convenables.

Il y aurait peut-être lieu d'utiliser un réfrigérant secondaire de Pb-Bi plutôt que le NaK proposé, puisqu'il éviterait le danger de réaction du NaK avec H_2O et de contamination du réfrigérant primaire par

¹ J. R. Weeks et D. H. Gurinsky, *Solid-Liquid Reactions in Bi et Na, Liquid Metals and Solidification*, ASM Cleveland (1958), p. 113-114.

par NaK. Il élimine aussi la possibilité de fortes réactions exothermiques NAK-Pb-Bi. Il ne devrait pas être difficile d'assurer une température minimale de 150°C dans le système à l'arrêt du Générateur, et la conception de l'échangeur métal liquide-eau s'en trouverait grandement simplifiée.

Voici d'autres menus commentaires plus particuliers:

Page 46 – Remplacer, pour le blindage du tube-cible, le Ni par le Nb. Le flux de 20 pi. / sec à la cible peut causer, dans le vide, de graves dommages dûs à la cavitation. Il faudrait étudier soigneusement ce problème.

Page 51, 1^{er} paragraphe – La référence 21 se rapporte à l'emploi du Bi neutralisé et non du Pb-Bi.

Page 51, 4^e paragraphe – Le tantale (Ta) convient mieux à la fabrication des soufflets et est également insoluble dans le métal liquide. Cette remarque s'applique aussi au passage vers le bas de la page 75.

Page 76, 1^{er} paragraphe – Comment retirer le métal liquide des soufflets? Pb-Bi devrait facilement mouiller le Mo ou le Ta.

Page 77, 2^e et 3^e paragraphes – Voir les remarques générales ci-dessus au sujet de l'emploi d'un piège froid. Ce dernier ne devrait pas éliminer Nb du Pb-Bi!

Page 77, 4^e paragraphe – 2 ppm est la valeur de saturation de Fe dans le Bi à 325°C. Le chiffre de 0.3 ppm, donné au tableau VII-A-9, est la meilleure estimation de Fe dans le mélange eutectique de Pb-Bi.

Page 81, 3^e paragraphe – une brasure au Be ne devrait pas résister très bien aux neutrons!

RAPPORT SUR LES ÉVALUATIONS DES COÛTS DE CONSTRUCTION DE L'ING

par R.E. Taylor

SOMMAIRE

Les méthodes actuelles d'évaluation des coûts de construction de l'ING semblent tout à fait adéquates. Des modifications à l'appareil qui entraîneront des changements dans les évaluations, sont en cours d'étude, particulièrement dans la partie de l'appareil où pénètre le faisceau de protons après son passage dans l'accélérateur proprement dit. Le coût de chaque appareil semble un peu plus élevé qu'il n'aurait été aux États-Unis. Il semble possible de construire l'ING pour les sommes mentionnées dans le FSD/ING-67, et il est possible que les coûts de construction puissent être inférieurs à ceux qui ont été mentionnés.

La construction de l'ING et des installations expérimentales entraînerait l'érection d'autres installations et la construction d'autres appareils d'expérimentation dont le coût n'est pas englobé dans les présentes évaluations. Des sommes considérables seraient investies dans ces installations au cours de la période de construction de l'ING.

Si l'ING n'était pas installé à Chalk River, il serait nécessaire de revoir les présentes évaluations, et le calendrier des travaux serait sans nul doute modifié.

Il sera possible de donner des évaluations des coûts de construction plus sûres quand certains aspects de conception fondamentaux auront été précisés. La chose prendra du temps et demandera nombre de travaux de recherches et de développement technique.

REMARQUES GÉNÉRALES AU SUJET DES COÛTS DE CONSTRUCTION DE L'ING

La plus grande partie du programme d'études jusqu'aujourd'hui concernait le cyclotron à orbites séparées (SOC), type qu'on a abandonné en faveur de l'accélérateur linéaire (LINAC) d'une longueur

d'un mille. Selon moi, les évaluations des coûts de construction risquent d'être entachés d'erreurs importantes tant que des travaux de génie plus détaillés du LINAC n'auront pas été réalisés. Cette remarque ne signifie pas que les évaluations actuelles augmenteront nécessairement au fur et à mesure que les travaux de génie avanceront. S'il s'agissait d'une simple installation de recherches en physique aux États-Unis, je crois que les coûts de construction seraient quelque peu plus faibles que ceux qui ont été mentionnés, sous réserve que l'installation soit construite au coût minimal, et sans prendre en considération les bénéfices ultérieurs qu'en tirerait l'industrie, etc. Le programme de production envisagé pour l'ING m'empêche de concevoir simplement la situation, et pourrait nécessiter des investissements plus élevés qu'autrement, en vue d'avoir des frais d'exploitation plus légers dans l'avenir. Les coûts réels de construction de l'accélérateur, d'un dispositif simple de transmission du faisceau et de la cible émettrice de neutrons ont seuls été détaillés parmi les éléments de la machine fondamentale. Certaines autres dépenses découlant de la construction de l'ING n'ont pas été étudiées. Si l'USAEC finançait l'exécution d'un projet de cette importance, elle fournirait les fonds sous les quatre rubriques suivantes:

- 1) *Frais d'études* pour payer de petits contrats de mise au point des concepts et de recherches conduisant à des projets. Ces travaux chevaucheraient quelque peu avec ceux de la rubrique suivante.
- 2) *Recherches et développement technique* des pièces nécessaires à la construction de l'accélérateur.
- 3) *Construction*. Il s'agirait là des coûts réels de l'installation (et de l'usine connexe le cas échéant). Ce montant est souvent mentionné. Celui de SLAC atteint 114 millions de dollars.
- 4) *Développement technique et construction* des appareils et installations de recherches nécessaires à l'utilisation efficace de l'accélérateur.

Tous ces frais interviennent avant que la construction ne soit terminée. Les frais de recherches et développement technique des pièces et de développement technique et construction des appareils de SLAC ont atteint un peu moins de 50 pour cent du montant de la rubrique n° 3. Je ne pense pas que ces proportions seraient aussi élevées pour les installations de l'ING. Cependant les expériences étant réalisées à un niveau énergétique plus élevé nécessiteraient un appareillage plus important, et ces catégories entraîneraient des dépenses considérables.

Certains frais de la rubrique n° 4 pourraient être payés par le budget du programme normal de l'ÉACL, et leur affectation ici est faite du point de vue comptable. C'est pourquoi un changement du lieu d'implantation de l'ING entraînerait des frais portés à cette rubrique.

Je pense que les frais de recherches et de développement technique de l'accélérateur et de la cible émettrice de neutrons seraient plutôt élevés, en raison de la forte augmentation de l'énergie du faisceau. Il est encore possible qu'une grande partie de ces dépenses puisse être payée par les fonds de l'ÉACL pour frais d'exploitation.

Au cours de mon entrevue avec le Comité, j'ai mentionné l'influence de considérations de perfection sur les coûts de construction du Centre de l'ING. L'accélérateur peut être construit de différentes façons pour différents prix de revient. On peut établir les plans d'une installation pour un usage minimal si les questions de sûreté de fonctionnement et de facilité d'emploi ne sont pas primordiales, ou encore un Centre à l'échelle nationale où l'on attacherait une grande importance à la production sûre des faisceaux, où de nombreux services seraient disponibles en vue d'une utilisation maximale de l'installation. J'ai l'impression que les désirs des autorités de l'ÉACL à Chalk River se trouvent à mi-chemin entre les deux, qu'elles insistent fortement sur le fonctionnement assuré de l'accélérateur, mais qu'elles n'ont pas considéré qu'il serait utile de développer à l'excès les appareils annexes d'expérience de la machine de base, à l'exception de la cible émettrice de neutrons. Il est clair que les scientifiques de l'ÉACL voudraient obtenir une grande souplesse de l'orientation ultérieure, permettant de mettre en marche des programmes d'expérimentation au fur et à mesure que le besoin s'en ferait sentir. Les prévisions d'expansion des appareils d'utilisation du faisceau de neutrons qui complèteraient le Centre sont beaucoup moins précis actuellement que ceux de la machine de base et de nouveaux concepts de fonctionnement modifieraient radicalement ce chapitre du budget. Je pense que les coûts décroîtraient au cours de la période de transition précédant la période d'achèvement, en comparaison des évaluations actuelles du FSD/ING-67.

Je crois qu'il existe actuellement deux principales causes d'imprécision des évaluations des coûts de construction.

- 1) Il s'est écoulé une durée trop courte depuis le moment où l'on a décidé d'adopter l'accélérateur linéaire. La réalisation d'autres travaux de génie et d'essais des éléments principaux tels que l'amplifon servant de guide d'ondes et l'alliage eutectique

binaire plomb-bismuth permettraient d'établir des évaluations plus précises.

2) Toute série d'évaluations est nécessairement reliée au choix d'un emplacement déterminé. Un changement d'emplacement nécessiterait une nouvelle étude des conditions déterminant les évaluations; certains plans devraient être refaits en fonction des conditions géologiques du lieu; il pourrait y avoir certains frais d'acquisition des terrains; le complexe de l'ING ne disposerait plus de certaines installations nécessaires présentes à Chalk River, et dont le FSD/ING-67 faisait état.

QUESTIONS PARTICULIÈRES POSÉES PAR LE COMITÉ

A) Possibilité de réalisation technique

Je ne peut trouver aucune raison fondamentale rendant impossible la construction de l'ING tel qu'il est actuellement conçu. Le niveau technologique est insuffisant dans certains domaines et il faudra entreprendre des travaux de développement technique. Il me semble que le problème le plus important concernant l'accélérateur est celui de la fourniture d'une puissance haute fréquence suffisante. Aucun dispositif actuel ne réalise la conversion de courant continu en courant haute fréquence avec l'efficacité exceptionnelle et la très grande sûreté de fonctionnement indispensable. Il faudrait commencer très bientôt un intense programme d'études de l'amplifitron pour s'assurer qu'il convient à l'emploi prévu et qu'il est sûr. Certains travaux préliminaires sont déjà en cours à Chalk River. On peut déterminer si l'appareil convient par des essais de débit sur cavité résonnante, comme l'a exposé le Dr Blewett. La sûreté d'emploi sera beaucoup plus difficile à établir. L'accélérateur linéaire de Stanford a été en fonctionnement partiel depuis presque un an, et ses klystrons ont fonctionné l'équivalent de 500,000 heures de marche d'un seul klystron. Six cent panes se sont produites, mais il est encore très difficile d'évaluer avec précision la vie utile des tubes. Comme l'amplifitron a été calculé pour avoir une vie utile de 10,000 heures (deux ans) il est évident qu'on ne peut établir un programme raisonnable d'essais pour déterminer leur vie utile réelle. Il est parfaitement justifié de mesurer cette durée par d'autres moyens.

Il sera nécessaire de prendre des décisions fondamentales au sujet des appareils haute fréquence au début des travaux d'études, et

de décider si les sections individuelles de l'accélérateur seront alimentées par un seul tube, ou s'il sera possible d'ajouter à un coût raisonnable des unités de secours, ou encore si une alimentation multilatérale à partir d'un générateur à tubes multiples pourrait fonctionner. Cette décision sera très importante pour le fonctionnement sûr de l'ING.

Il se peut que des études parallèles des divers systèmes puissent être poussées assez loin, bien que cette méthode doive accroître les frais de recherches et de développement technique.

Une autre caractéristique de l'ING, qui me paraît devoir soulever de nombreuses difficultés, est que la cible émettrice de neutrons serait constituée de métal fondu. Je ne vois pas d'alternative à cette méthode, et je pense qu'un important programme d'expérimentation devrait être exécuté aussitôt que possible pour l'essai de circuits pour métaux fondus et de la forme du tube-cible, et pour la simulation de la création d'impuretés au cours du bombardement par protons. L'ÉACL 2600 prouve que les problèmes posés par la cible ont été soigneusement étudiés par les scientifiques des laboratoires de Chalk River.

Le Dr Blewett a mentionné qu'il faudrait exécuter de nombreux travaux de développement technique de la source d'ions et se préoccuper des instabilités possibles du faisceau.

La seule autre question que je me pose ne concerne pas les possibilités de réalisation: l'installation terminée doit jouir à un haut degré d'un fonctionnement sûr. On y parviendra à la suite de travaux d'électrotechnique avancée, et les coûts initiaux de certains composants seront peut-être élevés.

B) Zone de sécurité

Cette question a été évoquée lors de la mention du choix possible d'autres emplacements que Chalk River, peut-être dans des régions peuplées.

Une zone de 500 pieds de large doit être prévue alentour de l'accélérateur s'élargissant à 1000 pieds autour de la cible. Il faut également prendre en considération les possibilités futures d'expansion et prévoir l'espace nécessaire aux installations connexes. On estime généralement qu'une largeur de 500 à 1000 pieds suffit à entraîner une atténuation suffisante des radiations pour que les employés n'en souffrent pas. Une zone de sécurité plus étroite obligerait à utiliser un blindage plus coûteux, de telle façon qu'on doit réaliser un compromis économique.

L'ING présente un autre problème, quelque peu différent de celui qui affecte l'accélérateur habituel d'une cible émettrice de neutrons. L'ING est beaucoup plus proche des réacteurs et devrait être érigé en tenant compte des exigences de ces derniers. Il y a cependant un trait favorisant l'ING: la possibilité de génération massive et accidentelle d'énergie thermique que présentent certains réacteurs n'y existe pas.

C) Calendrier des travaux

Le Comité a demandé mon avis sur la durée du programme de recherches et de développement technique et celle de construction de l'ING. On ne peut probablement pas séparer nettement ces deux périodes, et certains travaux de recherches et de développement technique seront certainement en cours le jour de l'inauguration. Je pense que la plupart de ces travaux seront cependant réalisés au cours des trois premières années suivant l'approbation du projet, et que dès maintenant il existe des domaines où un effort de recherches et de développement technique complèterait ce qui se fait dans les laboratoires de Chalk River. Dans l'état actuel des choses, si le projet est rapidement approuvé, je pense que le calendrier des travaux portera 1974 comme année d'achèvement du Centre, au plus tard peut-être 1975. Je crois qu'un effort pour mener les travaux à un rythme encore plus rapide serait fructueux et réduirait le coût total de l'entreprise.

Le choix d'un autre emplacement que Chalk River retarderait certainement la date de l'achèvement.

Remarque: En estimant les coûts de construction et les délais, j'ai considéré que le développement technique du matériel se ferait sous la responsabilité principale d'un groupe de scientifiques résidents. J'ai entendu dire, tant à Ottawa qu'à Chalk River, que la construction de l'ING pourrait aider au développement de recherches de l'industrie, et que ce serait un objectif valable même si les coûts de construction s'en trouvaient accrus. Il est possible de dépenser de vastes sommes si l'on désire favoriser l'expansion de l'industrie canadienne dans le but de lui faire produire une large part des éléments de l'ING.

J'ai malheureusement observé que de nombreux fournisseurs industriels ne montrent pas autant d'habileté dans les travaux de développement technique que les scientifiques des laboratoires de sciences fondamentales. Ce fait est peut-être dû à l'habitude d'octroyer le contrat au plus bas soumissionnaire et à l'imprécision du cahier des

charges lors de la description du produit. Ces remarques ne signifient pas que les laboratoires de l'industrie ne devraient pas entreprendre de travaux de développement technique, ou que les laboratoires de sciences fondamentales ont toujours des succès dans ces mêmes travaux. Je pense toutefois qu'une ligne de conduite encourageant le groupe responsable à susciter des travaux de développement technique à l'extérieur pourrait entraîner une augmentation notable des coûts de réalisation d'un programme de l'importance de celui de l'ING.

D) Effectifs

Il me semble difficile de traiter les questions relatives aux effectifs scientifiques et aux coûts d'exploitation. L'importance des effectifs est primordiale pour que l'entreprise suive son calendrier des travaux tout en se maintenant dans les limites de son budget. Le nombre de scientifiques et techniciens mentionné dans le FSD/ING-67 pour la période de construction semble assez faible, mais la publication mentionne qu'une forte proportion des travaux de génie pour des éléments de l'ING serait exécutée par des ingénieurs de l'extérieur. Le personnel d'exploitation semble lui aussi être peu nombreux, mais la prospective a été établie en convenant que le centre de l'ING ferait partie d'un complexe de laboratoires déjà existant, et que le personnel ne s'occuperait pas du soutien technique nécessaire aux expérimentateurs venant de l'extérieur. Je pense que le Centre de l'ING terminé pourrait accommoder environ 150 scientifiques docteurs ès sciences.

Je ne crois pas pouvoir traiter mieux de ce sujet sans posséder de renseignements beaucoup plus complets.

COÛTS DE CONSTRUCTION DE LA GALERIE DE GUIDAGE DU FAISCEAU ET DES INSTALLATIONS D'EXPÉRIMENTATION

Mon sujet principal d'études résidait dans le domaine des systèmes de guidage du faisceau. Cette partie est devenue un élément minuscule de l'installation fondamentale et la conception de l'ING complet change radicalement. C'est pourquoi il me semble qu'une étude des coûts de construction de la galerie de guidage de l'ING complet ne serait guère fructueuse. J'ai ajouté le présent paragraphe traitant de la galerie de guidage de l'installation fondamentale, montrant que les évaluations faites par les spécialistes de l'ÉACL s'accordent assez bien avec les coûts d'installations similaires du SLAC.

A) Galerie à forte irradiation, cible émettrice de neutrons lents.

J'ai signalé au Comité que divers articles semblent évalués à des prix indûment élevés. Au cours de ma visite à Chalk River, j'ai appris que les spécialistes s'occupaient de reviser tant les coûts de construction que les plans de la galerie de guidage du faisceau de l'installation fondamentale. Quelques nouvelles conceptions sont apparues, dont l'étude pourrait modifier considérablement les idées actuelles. On m'a transmis quelques évaluations préliminaires des coûts de construction de la galerie à forte irradiation, de la galerie de la cible à neutrons lents, et du système de guidage du faisceau. Ces nouvelles évaluations indiquent des montants fortement réduits pour les électro-aimants et l'alimentation en courant continu. Elles se basent sur des plans plus raisonnables. Les nouvelles évaluations du coût des installations mentionnées ci-dessus sont inférieures de 3 millions de dollars par rapport aux anciennes.

Je crois que les économies réalisées seraient partiellement annulées en raison des faits suivants:

- 1) Les bâtiments deviennent en général plus complexes et coûteux au fur et à mesure que les travaux de génie avancent.
- 2) La galerie de guidage du faisceau aura besoin probablement de dispositifs de soutien et d'alignement complexes qui pourraient ajouter 200,000 dollars au coût de l'appareil.
- 3) Il n'apparaît pas clairement que le réseau de distribution en courant continu et le câblage du réseau de contrôle et de commande aient été inclus dans les évaluations. On ne peut établir de devis précis avant que le plan de l'accélérateur ne soit précisé (emplacement des cabines de commande, par exemple). Ces coûts pourraient atteindre au maximum 10 pour cent du coût total de la galerie de guidage du faisceau.
- 4) Bien que les prix indiqués pour les appareils soient égaux ou plus élevés que ceux des appareils que je connais, je pense qu'on devrait tenir compte de la protection de l'installation contre les radiations. Il est également possible de régler le faisceau reçu en vue d'éviter toute perte notable au cours du guidage chacune de ces méthodes coûterait de l'argent. En résumé, je pense qu'une galerie de guidage du faisceau de la machine fondamentale pourrait être réalisée pour beaucoup moins d'argent qu'il n'est indiqué dans le FSD/ING-67, la différence atteignant peut-être 2 millions de dollars.

B) Comparaison des coûts des galeries de guidage du faisceau

	ING	SLAC
Édifice et bouclier biologique des parois	3,000 dollars par pied	3,500 dollars par pied

Remarque:

Je crois que le tracé actuel de l'ING coûterait un peu plus cher que celui de SLAC. Il se peut que ce genre de travaux soit moins coûteux au Canada qu'aux É.-U.

Installations de fourniture de courant continu	200 dol. par kW	divers, de 50 à 350 dol.
--	--------------------	-----------------------------

Remarque:

les coûts de construction dépendent des dimensions des appareils. Le montant de 200 dol. par kW semble élevé, en raison peut-être de l'absence de fournisseurs canadiens.

Installation du système à vide	divers, de 157 à 182 dol. par pied	supérieur à 400 dol. par pied
--------------------------------	--	-------------------------------------

Remarque:

les coûts de ces installations au SLAC me semblent difficilement justifiables. Il se peut que les coûts de ces installations pour l'ING soient plus bas en fonction du nombre moindre de télécommandes.

Électro-aimants	---	---
-----------------	-----	-----

Remarque:

les prix mentionnés pour ceux de l'ING sont des prix de catalogue. Si une protection contre les radiations est nécessaire, les coûts augmenteront considérablement.

Réseau de contrôle et de commande	10 pour cent du coût total de la galerie de guidage	environ 10 pour cent du coût total du système de transfert du faisceau
-----------------------------------	---	--

Remarque:
c'est peut-être la catégorie où les coûts sont les plus difficiles à évaluer. Les coûts réels d'installation pour le SLAC ont dépassé largement les évaluations.

Dispositifs de soutien et d'alignement	aucun devis séparé	environ 5 pour cent du total
--	--------------------	------------------------------

Grues

Remarque:
les grues sont très semblables, ainsi que les estimations.

Travaux du bureau d'études	10 à 15 pour cent du total	13 pour cent du total
----------------------------	----------------------------	-----------------------

Atelier de câblage	aucun devis séparé	environ 8 pour cent du total
--------------------	--------------------	------------------------------

La ressemblance entre ces montants m'inspire confiance dans les méthodes d'évaluation des coûts de construction. Cependant le tracé de l'installation n'est pas encore complet, et c'est le facteur déterminant des coûts.

Les montants pour imprévus mentionnés dans le FSD/ING-67 sont probablement adéquats. Aucun des montants mentionnés ci-dessus pour les composants de l'ING ne tient compte des imprévus.

C) Galerie de guidage du faisceau dans l'installation complète

L'étude des coûts mentionnés dans le FSD/ING-67 ne serait guère fructueuse, en raison des études en cours sur nombre de nouveaux concepts. Je crois qu'une installation fonctionnant convenablement pour le guidage du faisceau peut être construite au coût mentionné dans le FSD/ING-67. Je crois que certains frais attribués au budget

de l'installation complète devraient l'être à celui de l'appareil fondamental, afin que la transition vers l'installation complète se réalise aussi simplement que possible. Lorsque les plans de l'appareil fondamental seront prêts, on pourrait peut-être débiter son budget de 5 à 10 pour cent des frais supplémentaires à engager pour obtenir l'installation complète.

Les séparateurs de faisceaux présentent des problèmes redoutables exigeant de nombreux travaux de recherches et de développement technique, dont la complexité dépendra des caractéristiques désirées des faisceaux isolés.

D) Cible émettrice de neutrons thermiques

Cette cible est de conception très complexe, et sa technologie se fonde sur celle des réacteurs plutôt que sur celle des accélérateurs. L'emploi de métaux fondus pour subir l'impact du faisceau a été étudié pour le SLAC, puis abandonné en raison des nombreux travaux de recherches et de développement technique nécessaires. Il ne semble pas y avoir d'alternative à l'emploi de ce dispositif avec l'ING. Je crois que le Dr Blewett a demandé l'avis des spécialistes du réacteur de Brookhaven. On devrait commencer les travaux sur un prototype de cette cible le plus tôt possible, en étudiant à fond les problèmes de corrosion.

E) Installations d'expérimentation

Les devis montrés décrivent des bâtiments contenant peu d'appareils ou même aucun. Je suis certain que la SECO est mieux qualifiée que moi pour cette évaluation.

Appendice III

RAPPORT DU MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE

DEPARTMENT
OF
INDUSTRY



MINISTÈRE
DE
L'INDUSTRIE

REFER TO FILE NO.
MENTIONNER LE DOSSIER

BUREAU DU CONSEILLER EN RECHERCHE INDUSTRIELLE

RAPPORT PRÉSENTÉ AU CONSEIL DES SCIENCES
CONCERNANT L'INFLUENCE DU
PROGRAMME DE L'ING SUR
L'INDUSTRIE CANADIENNE.

Le rapport a été préparé
par R.K. Brown et I.S. McLeish

Ottawa, Canada,
le 3 mars 1967

Remerciements

Les matériaux nécessaires à la préparation du présent rapport proviennent des sources suivantes:

Le Laboratoire nucléaire de Chalk River de l'ÉACL

The Shawinigan Engineering Company

et 13 firmes canadiennes spécialisées.

Les matériaux ont été recueillis et classés par les Directions de l'Électricité et de l'Électronique, des Machines, et des Matières premières du Ministère de l'Industrie.

I.S. McLeish, du Bureau du Conseiller en recherche industrielle a coordonné et classifié les données, et a également contribué à leur analyse et à leur interprétation.

R.K. Brown,
Bureau du Conseiller en
recherche industrielle

INFLUENCE DU PROGRAMME DE L'ING SUR L'INDUSTRIE CANADIENNE

SOMMAIRE

- 1) Le coût de préparation du terrain, de construction des bâtiments et d'établissement des services de soutien s'établirait à 47 millions de dollars. La totalité des travaux peut être exécutée par des firmes canadiennes existantes.
- 2) Le coût du complexe d'appareils constituant l'ING atteindrait 67 millions de dollars. Les firmes canadiennes pourraient réaliser 80 pour cent de cet ensemble.
- 3) Les travaux de génie et d'administration relatifs au complexe d'appareils coûteraient 11.8 millions de dollars. On considère que les firmes canadiennes sont capables d'accomplir la majeure partie de travail.
- 4) Ces frais subiront probablement des rajustements inflationnistes de 25 pour cent.
- 5) Il sera nécessaire de réaliser de nouvelles études et travaux de développement technique d'une partie (75 pour cent en valeur) des éléments composant l'ING, soit pour un montant de 48 millions de dollars. Une dépense supplémentaire de 6 à 10 millions de dollars pour couvrir le prix de gros matériel et les frais de développement technique sera probablement causée par cette nécessité.
- 6) L'industrie canadienne accepte de collaborer à la mise au point et à la fabrication des unités fonctionnelles de l'ING si les charges totales incombent au gouvernement. Cependant, à une seule exception importante près, elle voit peu de possibilités d'ouvrir des débouchés permanents sur les bases de la technologie mise au point pour l'ING, en dehors de la physique nucléaire.

1.0 Introduction

Le présent rapport a été établi à la suite d'une intervention du Dr O.M. Solandt, président du Conseil des sciences, demandant que

le Ministère de l'Industrie aide le Conseil des sciences dans son étude du projet de construction d'un générateur à flux neutroniques intenses (ING) pour études en physique nucléaire, présenté par l'Énergie atomique du Canada, limitée (ÉACL).

1.1 *Portée du rapport* – On a demandé aux spécialistes du Ministère de l'Industrie d'évaluer l'influence que la réalisation du projet pourrait avoir sur l'industrie canadienne, tant en cours d'étude que de construction du Centre, et en fonction des résultats ultérieurs du programme de recherches. Notre étude s'est limitée à cet aspect seul de l'évaluation du projet de l'ING.

En raison des limitations imposées tant par les délais que par le manque de personne, il n'a pas été possible de prendre contact avec toutes les industries intéressées et d'en titer les données pertinentes. L'enquête a été limitée à 13 firmes qui comprennent celles que les spécialistes du Ministère considèrent comme les plus directement intéressées. Le manque de données précises et le manque de temps ont empêché les enquêteurs d'examiner en détail les problèmes particuliers qui pourraient se présenter au cours de l'étude et de la production des unités fonctionnelles de l'ING. En conséquence nombre de renseignements présentés à l'annexe B représentent des estimations basées sur une connaissance superficielle des exigences techniques. Les estimations du coût des différentes unités fonctionnelles sont largement fondées sur les renseignements obtenus par la Shawinigan Engineering Compagny Ltd, et on les considère aussi précises que possible au stade actuel.

2.0 Le Centre de l'ING

Le Centre proposé est grand et complexe, et on a estimé qu'il fallait le diviser en deux éléments principaux pour atteindre les buts de la présente étude:

- 1) Le terrain et les bâtiments abritant le complexe d'appareils et les services de soutien.
- 2) L'appareil lui-même, y compris la cible et les installations auxiliaires d'expérience.

2.1 Le terrain, les bâtiments et les services de soutien présentent des exigences que l'industrie canadienne peut parfaitement contenter, et ils ne posent pas de problème particulier, à

l'exception des exigences spéciales de protection biologique, de ventilation, de filtration et d'autres mesures de protection du personnel. L'industrie canadienne a déjà résolu ces problèmes auparavant pour de nombreuses installations produisant de fortes irradiations, et ne devrait pas rencontrer de difficulté en recommençant.

L'annexe A donne le détail des coûts de construction concernant l'alinéa 1) (terrain, bâtiments et services de soutien). Les dépenses totales atteindraient 47 millions de dollars à répartir sur cinq années (soit 9.2 millions par an) si l'on considère que les bâtiments et les services de soutien devraient être terminés deux ans avant la mise en exploitation du générateur. L'effet sur l'économie de l'industrie concernée de cet rapport annuel de 9.2 millions de dollars ne serait guère différent de celui qui serait produit par l'apport de la même somme destinée à la construction de logements ou de bureaux. Il est entendu que les plans des bâtiments prévoient une régulation complexe de la température, de l'humidité et de la ventilation, et incluent des dispositifs avertisseurs de toute défaillance des régulateurs d'ambiance dans les zones dangereuses. Les pratiques habituelles en construction de logements et de bureaux devront être modifiées pour suivre un cahier des charges beaucoup plus strict au sujet de la régulation d'ambiance.

2.2 Le complexe d'appareils de l'ING – En étudiant l'ING lui-même, nous avons séparé les frais d'achat et d'installation des éléments de l'appareil des frais de génie et d'administration. Les premiers, qui atteignent 66 millions de dollars, représentent environ 50 pour cent du coût total du Centre de l'ING (126 millions de dollars sans les rajustements inflationnistes). Les coûts des principales unités fonctionnelles de l'ING, avec leur détail le cas échéant, sont indiqués à l'annexe B.

Outre les questions posées par le Conseil des sciences, un certain nombre de questions supplémentaires furent formulées dans le but d'obtenir les renseignements nécessaires. La liste complète (Annexe D) a été utilisée comme base du rassemblement des données. Les réponses obtenues sont indiquées à l'annexe B en face de chaque unité fonctionnelle. Certaines réponses nécessitant des études durant plusieurs mois n'ont pas été portées dans le tableau. Cependant le paragraphe 3.0 donne une étude générale de ces articles.

Le total des frais de bureaux d'études et d'administration a été estimé à 11.7 millions de dollars, ou environ 16 pour cent du coût total du Centre de l'ING. Ils comprennent des frais d'administration estimés à 4.5 pour cent. Les travaux de génie comprennent des études d'ensemble et des plans précis de chaque unité fonctionnelle. Ils seront établis en deux phases successives. Le CRNL réunira un groupe d'environ 30 ingénieurs qui établiront un plan directeur en y mentionnant des détails suffisants pour leur permettre de surveiller efficacement les travaux. La plus grande partie des études seront cependant réalisées par un certain nombre de firmes liées par contrat avec l'ÉACL, à raison d'une par unité fonctionnelle. On estime que l'ensemble de ces firmes emploiera environ 120 ingénieurs pour exécuter ce travail. L'effectif total d'ingénieurs, tant pour le CRNL que pour les industries, passera d'environ 60 en 1968 à un maximum de 150 en 1970, pour retomber à 25 vers 1974. On a l'intention de ne prendre en considération que la candidature de firmes canadiennes pour la réalisation des installations les plus importantes et le CRNL ne s'attend pas à rencontrer la moindre difficulté pour trouver des entrepreneurs acceptables. Il pourrait être nécessaire cependant de confier certaines études spécialisées à une firme américaine.

On doit noter que les rubriques suivantes de l'annexe B ont les significations suivantes:

- 1) Coût – il s'agit de l'évaluation du coût, généralement par les spécialistes de l'ÉACL ou de la Shawinigan Engineering. Le montant indiqué n'englobe pas le facteur de rajustement inflationniste qu'on estime à 25 pour cent.
- 2) Participation canadienne – Il s'agit du pourcentage estimé en valeur du montant des articles qui peuvent être construits au Canada avec les moyens industriels actuels. Une exception est constituée par les tubes à haute fréquence indiqués à l'annexe B. Les dirigeants d'une firme canadienne ont déclaré qu'ils étaient disposés à ajouter 20,000 pieds carrés de superficie à leurs ateliers et à faire les investissements nécessaires en fours et en pompes à vide à leurs propres frais. Comme cette offre précise concernait un article déterminé, on a estimé qu'il serait préférable de l'ajouter au montant des articles d'origine canadienne.

- 3) Possibilités de l'industrie pour les études et le développement technique – Il s'agit là des travaux que l'industrie pourrait entreprendre avec ses installations et son personnel actuels.
- 4) Débouchés possibles – Il s'agit des marchés qui pourraient s'ouvrir au Canada et à l'étranger.

L'industrie canadienne estime pouvoir fabriquer les éléments du complexe d'appareils de l'ING pour un montant total de 51 millions de dollars, soit 80 pour cent du coût total comme l'indique l'annexe B. On doit étudier soigneusement cette affirmation. Il n'y a aucun doute que l'industrie canadienne pourrait concevoir et fabriquer la plus grande partie du générateur. Cependant cette réalisation en majorité canadienne nécessiterait l'installation de gros équipement supplémentaire, l'amélioration des possibilités techniques, l'augmentation des effectifs des bureaux d'études et de développement technique dans une proportion qui n'a pas été déterminée. Les investissements supplémentaires en matériel devraient atteindre de 4 à 8 millions de dollars, et les chefs d'industrie ont fait savoir que des recherches techniques seraient nécessaires pour la réalisation de pièces d'un montant atteignant de 75 à 80 pour cent du total. Il est difficile d'estimer l'accroissement des coûts causés par ces investissements supplémentaires, par rapport au prix du matériel acheté hors du Canada.

3.0 Nécessité d'accroître les possibilités des firmes industrielles

Les réponses données aux questions traitant des nécessités exposées ci-dessus au sujet de l'augmentation des effectifs scientifiques et techniques, des travaux de recherches et de développement technique, et des installations de fabrication et d'essais, ont toujours été exprimées au conditionnel. En général les dirigeants des firmes canadiennes se sont montrés prêts à établir des installations de recherche et de développement technique, à engager du personnel supplémentaire et à établir de nouveaux ateliers de fabrication si le gouvernement canadien voulait en payer le coût total, et seulement dans ce cas. Un bon exemple se trouve dans le domaine des pompes à vide, ou l'on estime qu'il faudrait fournir des subventions atteignant des centaines de milliers de dollars pour que les firmes canadiennes puissent fabriquer des pièces pour plus de 50 pour cent du montant pertinent.

Deux exceptions sont apparues parmi cette réaction générale à la nécessité de réaliser des études techniques. La première, déjà mentionnée, concernait le domaine des tubes surpuissants à haute fréquence. Une firme canadienne a offert d'étendre la superficie de ses ateliers et de faire de larges investissements à ses propres frais. Les frais d'études techniques des tubes, atteignant de 1 à 2 millions de dollars, seraient à la charge de l'État fédéral.

La seconde exception concerne le domaine des électro-aimants (éléments quadrupolaires) nécessaires à l'accélérateur et au guide du faisceau. Il n'existe pas actuellement de fabricant canadien de cet article, mais une firme accepterait d'en entreprendre la construction. Bien que certains spécialistes pensent qu'on pourrait construire ces aimants sans autres études techniques, à l'exception de celles concernant l'isolation par anodisation de l'aluminium, cette opinion n'est pas partagée par les scientifiques du CRNL. La remarque mentionnée au paragraphe 4.2 s'applique ici, et on pense que les candidats fabricants n'ont aucune idée des exigences très précises concernant le champ magnétique, qui doit être extrêmement stable, parfaitement uniforme, et entièrement reproductible d'un aimant à l'autre. On croit qu'un montant considérable d'études techniques serait nécessaire pour la réalisation de ces électro-aimants.

Outre les trois conditions mentionnées ci-dessus, il est probable que d'autres nécessités apparaîtront. Il semble probable que les techniques spéciales de soudage devront faire l'objet d'études, ainsi que les techniques de manutention et de pompage de l'alliage eutectique plomb et bismuth et les méthodes de production et de fabrication des des pièces de zirconium. On n'a fait aucune étude de ces besoins.

4.0 Débouchés possibles

4.1 Il semble que seulement deux des produits dérivant des travaux d'exécution du programme de l'ING sont susceptibles d'avoir un débouché ailleurs. Les voici:

- 1) les générateurs surpuissants de haute fréquence dans les domaines de la Défense nationale, des ondes décimétriques, du chauffage et du séchage haute fréquence;
- 2) La production du zirconium et fabrication des pièces en zirconium pour l'industrie nucléaire.

Les techniques mentionnées à l'alinéa 1) ci-dessus trouvent des débouchés commerciaux parmi les utilisateurs industriels de

micro-ondes, qui disposent actuellement de tubes d'une puissance de 25 kW. Des tubes d'une puissance de 500 kW les intéresseraient vivement et les engageraient dans de nouvelles applications industrielles. Un autre débouché possible se trouve dans le domaine du brouillage radioélectrique militaire. La firme estime qu'il se trouve un débouché possible d'un million de dollars annuellement dans ces deux domaines.

Un troisième produit, les pompes à vide, trouverait quelques débouchés au Canada, mais la concurrence des industries des É.-U. et d'outre-mer est puissante. Les possibilités de se tailler une place sur les marchés mondiaux devrait faire l'objet d'études.

4.2 Technologies nouvelles. À l'exception des deux exemples mentionnés ci-dessus, il ne semble pas que d'autres techniques exploitables commercialement découleraient de la fabrication des éléments de l'ING. Cependant l'amélioration des technologies existantes ne doit pas être négligée, car elle est exploitable. L'effet bénéfique des études, des travaux de développement technique et de fabrication des éléments de l'ING sur les capacités techniques et la qualité de la production des firmes industrielles concernées serait très important.

Le cahier des charges très strict et le haut rendement exigé tant des pièces que de l'installation complète prendra un certain nombre de firmes par surprise, tout comme lors de l'exécution des programmes spatiaux. Ces firmes se diront tout à fait capables de faire face aux exigences de l'ING dans certains domaines parce qu'elles le croiront. Mais cependant, au moment de réaliser l'appareil, la firme concernée pourra bien découvrir qu'elle est incapable d'y parvenir sans d'autres études et travaux de développement technique, un meilleur contrôle de la qualité de la fabrication, ou même tous les deux. Il est bon de rapporter deux exemples:

1) *Batteries d'accumulateurs aux cadmium et nickel pour Alouette-1.*

Un cahier des charges détaillé avait été fourni au fabricant, et de longues explications avaient été données oralement par l'ingénieur des sources d'énergie de la DRTE à l'ingénieur en chef de la firme. Le fabricant avait accepté de fournir des accumulateurs conformes au cahier des charges. Malgré des précautions, 75 pour cent des accumulateurs livrés ont été rejetés. Ce n'est qu'après des discussions acerbes que le directeur de la

firme concernée reconnut la qualité insuffisante du produit. Des améliorations décisives ne furent réalisées que lorsque les méthodes de production de la firme et ses techniques de contrôle eurent été modifiées fortement sous la direction du personnel scientifique et technique de la DRB.

2) *Pompes à fluide caloporteur*

La majorité des pompes fournies pour emploi dans les réacteurs nucléaires du Canada n'ont pas répondu au dé- but aux conditions d'emploi et ont dû subir des modifica- tions.

De nombreux autres exemples du même problème sont connus. Cette remarque n'a pas pour but de critiquer l'industrie canadienne, car la situation est similaire aux États-Unis. Cependant le résultat d'une telle adaptation de la part de l'industrie est bénéfique; elle entraîne l'amélioration obligatoire des possibilités des firmes, l'élévation de la compétence du personnel technique, le durcissement du contrôle de la qualité, et l'amélioration des méthodes de fabrication. Sans aucun doute, l'accroissement des possibilités des firmes leur ouvre de nouveaux débouchés et constitue en lui-même un avantage financier.

5.0 Participation de l'industrie canadienne

L'industrie canadienne accepte de prendre part aux études techniques et à la fabrication des éléments de l'ING si le programme est entièrement financé par l'État. En outre, les chefs d'industrie concernés ont exposé leur optimisme au sujet de l'ouverture de débouchés dans les deux seuls domaines mentionnés au paragraphe 4.0. Cependant, les dirigeants de l'industrie en général ont exposé leurs réserves et leur incertitude au sujet de l'expansion commerciale à long terme et de la réalisation de nouveaux produits en fonction des nouvelles capacités et technologies découlant de leur participation à la construction de l'ING. On doit remarquer à ce sujet que cette situation n'est pas particulière au Canada, et que des réactions identiques ont été enregistrées dans d'autres pays lorsqu'on a voulu construire de grands centres scientifiques.

L'opinion des chefs d'industrie est que peu de bénéfices à long terme découleront de la participation de l'industrie canadienne à la construction de l'ING.

6.0 Effets possibles des recherches accomplies avec l'ING sur l'économie industrielle canadienne.

On a recueilli aucun renseignement au cours de la présente étude qui permette de se former une opinion sur cette question. Il est probable que la recherche sur les matériaux à l'aide du flux intense de neutrons constituera une importante utilisation. Mais on ne peut rarement prédire des résultats imprévus.

Un des résultats du fonctionnement et, en partie, des travaux de recherche sera l'isolement de nouveaux isotopes. Ces derniers qui sont vendus par la Division des produits commerciaux de l'ÉACL, représentent un débouché d'environ 8 millions de dollars par an. Vingt pour cent de ce montant sont attribuables aux ventes de la matière première, l'isotope lui-même. Si les débouchés continuaient à se développer au même rythme qu'actuellement, soit vingt pour cent par an, le chiffre d'affaires concernant les isotopes atteindrait 100 millions de dollars vers 1980. Si cette croissance était soutenue pendant sept ans par des méthodes de vente dynamiques, l'importance des débouchés atteindrait déjà 28.5 millions de dollars, produisant un revenu de 5.7 millions de dollars pour le Centre de l'ING. Les nouvelles applications, les nouveaux dispositifs et les nouveaux services qui réclameront les isotopes devront être activement développés pour en élargir le marché.

Enfin, il ne nous a pas été possible de découvrir une relation directe entre ce projet et l'exploitation future de centrales électronucléaires par l'ÉACL ou l'industrie canadienne. Il existe évidemment toujours la possibilité d'une découverte en physique nucléaire qui créerait de nouvelles possibilités d'extraction de l'énergie du noyau, mais il ne semble pas que ce soit un des objectifs de l'ING.

7.0 Conclusions

7.1 On peut établir avec quelque confiance l'influence à court terme des travaux de conception, d'études techniques, de fabrication et de construction des divers éléments du Centre de l'ING.

7.1.1 Les firmes canadiennes pourraient fournir une forte proportion, soit 80 pour cent en valeur, des éléments du générateur de neutrons. Les délais ne permettent pas de déterminer quels seraient les éléments et les matériaux qui devraient être achetés hors du Canada. La réalisation d'une telle participation de l'industrie canadienne nécessiterait des investissements supplémentaires en matériel atteignant

de 4 à 8 millions de dollars, et le complexe d'appareils de l'ING coûterait considérablement plus que si les éléments étaient achetés dans un marché concurrentiel.

7.1.2 Quelques études techniques d'appareils, représentant 75 pour cent du montant total, seront nécessaires pour qu'ils soient conformes aux exigences des cahiers des charges. Le choix de fournisseurs canadiens obligera à réaliser quelques études techniques supplémentaires et une mise au courant plus complète que si les appareils étaient achetés dans un marché concurrentiel. Ces dépenses supplémentaires ne sont pas mentionnées dans les sommaires de l'annexe B.

7.2 Il est beaucoup plus difficile d'évaluer l'influence à long terme des nouvelles possibilités et nouvelles techniques acquises au cours de la construction et grâce aux résultats des recherches entreprises avec l'ING, et en conséquence toute conclusion est sujette à caution.

7.2.1 Un programme comme celui de l'ING, où les études d'ensemble et travaux de génie sont très importants, offre à l'industrie de gros avantages sous forme de développement de capacités additionnelles pour la conception des grands ensembles. Cette possibilité peut être utilisée pour mener à bien d'autres programmes si l'équipe de conception est conservée et si la firme a les moyens d'entreprendre des travaux ou de trouver des contrats d'études dans des domaines connexes. En ce qui concerne l'ING cependant, il est difficile d'apprécier comment on pourrait tirer le maximum d'avantages de l'expérience acquise par l'équipe.

7.2.2 À une exception près, les dirigeants de l'industrie ont montré peu d'optimisme au sujet des possibilités d'ouvrir de nouveaux débouchés importants à la suite de leur participation à la construction de l'ING. Il se peut que cette attitude reflète les difficultés qu'ils éprouvent à relier le programme de l'ING avec les besoins industriels dans le domaine de l'énergie électronucléaire et avec leurs intérêts.

7.3 Les avantages à court terme qui découleront des dépenses annuelles de 20 à 30 millions de dollars pendant sept à dix ans produiront sans aucun doute des effets secondaires dont la technologie industrielle bénéficiera.

APPENDICE A
ÉVALUATION DES COÛTS DE L'ING – INSTALLATIONS DE BASE

(en millions de dollars)

(Réf. ING 78 décembre 66)	Construction et travaux de génie	Équipement immobilier (chauffage, ventilation, refroidissement)	Réseau électrique (fourniture et distribution de courant alternatif)	Total pour terrain et bâtiments	Éléments de l'ING	Total par article
A. Coûts de construction						
1. Aménagement du terrain				1.7489		
2. Injecteur	.3393	.0957	.0434	.478	1.170	1.648
3. Galerie haute fréquence	1.6135	5.787	1.6135	9.014	31.566	40.580
4. Accélérateur	3.6158	--	.7798	4.3956	11.550	15.9456
5. Appareillage mécanique – Salles	.6061	--	--	.6061	--	.6061
6. Centre principal de commande	.2474	--	--	.2474	--	.2474
7. Appareil d'étude des mésons	.3109	.203	.0384	.5523	.100	.6523
8. Galerie à forte irradiation	1.4966	.0361	.0375	1.5702	3.351	4.9212
9. Galerie d'accès à la cible	.4899	.1001	.0346	.6246	1.1138	1.7384
10. Cible émettrice de neutrons lents	3.7804	1.1745	.2514	5.2063	9.0669	14.2732
11. Bureaux et laboratoires	2.700	.300	--	3.000	--	3.000
12. Circuit caloporteur	--	--	--	1,260	--	1.260
13. Services publics et services de soutien	--	--	--	4,9207	--	4.9207
14. Taxe de vente	--	--	--	.210	--	.210
B. IMPRÉVUS	2.5423	2.3089	.8396	6.6279	8.9596	15.5775
(changements imprévus)	.9271					
COÛT TOTAL DE COMPLEX DE L'ING.					66.8773	
C. TRAVAUX DE GÉNIE ET ADMINIS- TRATION						
				6.5778	11.7696	18.3374
TOTAUX				47.0202	78.6469	125.6671

APPENDICE B
SOMMAIRE DES RENSEIGNEMENTS OBTENUS AU SUJET
DES ÉLÉMENTS PRINCIPAUX DE L'ING

	Coût en millions de dollars	Participation canadienne		Possibilités de l'industrie pour les études et le développement technique	Débouchés possibles	Nouvelle technologie	Application des nouvelles technologies
		%	\$				
<i>DIRECTION DES MACHINES</i>							
Pompes à vide	2.5	50%	1.25	L'industrie des É.U. dispose d'une technologie au point.	faibles	--	--
Pompes	.16	85%	.14	Aucun. L'industrie des É.U. dispose d'une technologie au point.	faibles	--	--
Échangeurs de chaleur	.38	85%	.32	Aucun. L'industrie des É.U. dispose d'une technologie au point.	faibles	--	--
TOTAL	3.04		1.71				

APPENDICE B (suite)

198

	Coût en millions de dollars	Participation canadienne		Possibilités de l'industrie pour les études et le développement technique	Débouchés possibles	Nouvelle technologie	Application des nouvelles technologies
		%	\$				
<i>DIRECTION DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE L'ÉLECTRONIQUE</i>							
Appareils électroniques de faible puissance	5.0	60%	3.0	Pas d'études ou de développement techniques par l'industrie	pas de données	--	seulement pour des programmes similaires
Traitement des données							
Instruments et systèmes de commande							
Électro-aimants	2.5	0	0	nécessaire pour mettre au point le procédé d'anodisation des deux faces de la bande d'aluminium	très étroit	--	très petite
Sources d'électricité	2.12	70%	1.48	rien de prévu	pas de données	pas de données	pas de données
Haute fréquence (à l'exception des tubes)	23.0	95%	21.9	nécessaire			
Tubes haute fréquence							
Amplitrans	3.-8.	95%	12.4	nécessaire	Générateurs d'ondes décimétriques pour un million de dollars par an.	Tubes H.F. idem à haute puissance	
Klystrons	.6-2.						
Basse fréquence	1.-3.						
TOTAL	45.6		38.9				

*DIRECTION DES MATIÈRES
PREMIÈRES*

Accélérateur (Sections d'Alvarez et guide d'ondes)	8.0	90%	7.2	nécessaire	Production de zirconium et fabrication d'articles en Zr pour l'industrie nucléaire
Cible					
Plomb et bismuth	.38	100%	.38		
Blindage (fer et béton)	3.68	100%	3.68		
Réservoir du modérateur (tuyaux et tubes en Zr)	.42	100%	.42		
Tube cible contenant l'alliage Pb-Bi	.29	100%	.29		
Eau lourde	1.30	100%	1.30		
Béryllium	.094	-	-		
TOTAL	14.16		10.29		
TOTAL GÉNÉRAL	62.80	80%	50.90		

QUESTIONS POSÉES PAR LE CONSEIL DES SCIENCES

- 1) Quelle proportion du total représentent les dépenses pour la réalisation de l'ING qui seront faites au Canada en paiement des produits dont l'industrie canadienne dispose et des services qu'elle peut offrir?
- 2) Quelle proportion du total représentent les dépenses faites au Canada qui seront affectées à la mise au point de produits et à l'établissement de services qui n'existent pas actuellement, y compris les possibilités de recherches et d'études techniques? Quels seraient les investissements nécessaires pour la création de ces moyens, et comment seraient-ils financés?
- 3) Quelle proportion du total représentent les dépenses qui iront à l'industrie des É.-U.?
- 4) Quel serait l'avenir des moyens nouveaux dont l'industrie canadienne serait ainsi dotée? Y aurait-il des débouchés futurs du même genre? Y aurait-il de nouveaux débouchés?
- 5) Quelles sont les intentions des dirigeants des firmes canadiennes envers leur participation au programme de construction de l'ING?
- 6) Que pensez-vous des effets possibles des recherches menées à l'aide de l'ING sur l'économie industrielle canadienne? après 10 ans? après 20 ans? après 30 ans?

**RENSEIGNEMENTS PARTICULIERS NÉCESSAIRES À L'ÉTUDE
DU MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE CONCERNANT LE GENRE DE
L'ING**

- 1) Coût
- 2) Fournisseurs possibles
- 3) Participation canadienne à la construction
- 4) Importance de la participation industrielle à la conception et au développement techniques
- 5) Nécessité de travaux supplémentaires en recherches et études techniques. Type, nature, et coût

- 6) Nécessité d'installations supplémentaires de fabrication et d'essai. Type, nature et coût
- 7) Nécessité d'effectifs supplémentaires de scientifiques et de techniciens
- 8) Débouchés possibles pour les nouveaux produits
- 9) Nouvelles technologies nécessaires
- 10) Débouchés possibles des applications commerciales de la nouvelle technologie
- 11) Intérêt manifesté par les industries canadiennes