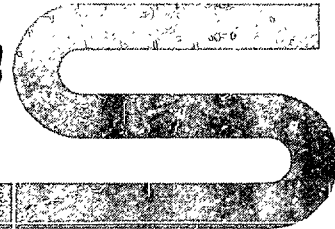


CONFERENCE INTERNATIONALE  
SUR L'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE  
ET SON CYCLE DU COMBUSTIBLE

SALZBOURG (AUTRICHE) • 2-13 MAI 1977



AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE ATOMIQUE

IAEA-CN-36/184

COMBUSTIBLE CANDU - QUINZE ANS D'EXPERIENCE DANS LES  
REACTEURS DE PUISSANCE

G.R. Fanjoy  
Services Nucléaires  
Ontario Hydro  
Toronto, Ontario

A.S. Bain  
L'Energie Atomique du Canada Limitée  
Laboratoires Nucléaires de Chalk River  
Chalk River, Ontario

Résumé

Le combustible CANDU (Canada Deutérium Uranium) est employé dans les réacteurs de puissance depuis 1962. Les analyses des statistiques de performance, lesquelles ont été complétées par des examens de combustible ayant séjourné dans des réacteurs de puissance et dans des boucles expérimentales, ont donné les résultats suivants:

- (a) une parfaite compréhension du comportement fondamental du combustible CANDU;
- (b) des données montrant que la haute utilisation prédite pour l'uranium a été atteinte: le coût du combustible, en 1976, de la centrale Pickering est de 1.2 m\$/kWh (dollars canadiens de 1976) pour un simple cycle de combustible, à passe unique, à base de bioxyde d'uranium naturel;
- (c) des critères de fonctionnement ayant permis d'obtenir un très faible taux de déféctuosité, à savoir 0.03% pour toutes les grappes et d'avoir le combustible CANLUB qui possède une intercouche de graphite entre le combustible et la gaine pour réduire les déféctuosités lors des augmentations de puissance;
- (d) la preuve que la courte longueur (500 mm) et la gaine repliable de la grappe CANDU sont une réussite et que le combustible peut fonctionner efficacement à haute puissance (la puissance linéique maximale des éléments extérieurs est  $58 \pm 15\%$  kW/m).

La participation active des fabricants d'électricité à tous les stades du développement du combustible a permis d'appliquer efficacement cette connaissance fondamentale. On a pu, ainsi, obtenir des spécifications appropriées pour le combustible, de bons délais d'approvisionnement, un chargement en temps voulu du réacteur et des renseignements concernant la performance réelle du combustible ont pu être envoyés aux concepteurs, aux développeurs et aux fabricants. A la fin du premier semestre de 1976,

plus de  $3 \times 10^6$  éléments individuels avaient été fabriqués au sein d'une industrie bien établie commercialement et ne craignant pas la concurrence et plus de  $2 \times 10^6$  éléments avaient été irradiés. Seulement six déficiences ont été attribuées à des matériaux en mauvais état ou à une malfaçon. En employant de l' $UO_2$  à haute densité ayant une faible teneur en humidité on a évité les déficiences que peuvent produire la contamination par l'hydrogène et la densification. Les travaux de développement concernant l' $UO_2$  et d'autres cycles de combustible (plutonium et thorium) sont poursuivis et du fait que les réacteurs CANDU sont rechargés en cours de marche, les grappes peuvent être insérées dans les réacteurs de puissance pour fins expérimentales. C'est pourquoi la conception des nouveaux combustibles peut être rapidement mise au point pour que la filière CANDU continue à fournir de l'énergie à bon compte avec une grande fiabilité.

## 1. INTRODUCTION

Le programme d'électricité nucléaire canadien [1,2] est fondé sur la filière CANDU-PHW<sup>1</sup>. L'emploi de l'eau lourde comme modérateur et caloporteur a permis de développer un réacteur qui offre une économie exceptionnelle de neutrons. Le combustible des réacteurs CANDU-PHW consiste en des grappes de bioxyde d'uranium naturel de 500 mm de longueur contenu dans une gaine en Zircaloy-4. Cette gaine, d'une épaisseur de 0.4 mm, dépend du support apporté par l' $UO_2$  qu'elle contient pour pouvoir résister à la pression du système de caloportage.

Chaque canal de combustible horizontal contient douze grappes disposées dans des positions numérotées de 1 à 12 à partir de l'extrémité du combustible neuf. Les réacteurs CANDU se prêtent extrêmement bien au combustible à l'uranium naturel et produisent plus d'électricité par kilogramme d'uranium extrait que tout autre réacteur commercial.

Au Canada, l'exploitation des réacteurs CANDU-PHW s'est limitée au réseau de l'Ontario Hydro. La construction de nouvelles centrales nucléaires continue à augmenter la capacité de l'Ontario et introduira prochainement l'exploitation commerciale de centrales nucléaires au Québec et au Nouveau-Brunswick, tandis que d'autres provinces montrent un certain intérêt dans la filière CANDU. Il y a également des centrales CANDU-PHW en service au Pakistan (KANUPP) et en Inde (RAPP).

L'Ontario Hydro, qui est une entreprise de service public, assurera à l'Ontario une capacité de pointe garantie de 20,300 MWe à la fin de l'année 1976. Son programme nucléaire consiste en 2284 MWe provenant de centrales CANDU-PHW actuellement en service (Tableau I) et en 2881 MWe de centrales en construction ou projetées. Le présent exposé donnera un aperçu du programme de développement du combustible et de l'expérience acquise par l'Ontario Hydro au cours des dernières quinze années.

## 2. GESTION DU COMBUSTIBLE

Dans cet exposé, l'expression "gestion du combustible" sera utilisée pour englober toutes les activités associées au cycle du combustible, y compris les aspects commerciaux et techniques ayant trait à l'achat, à l'inspection, au transport, à l'usage, au stockage et au retraitement des matériaux, ainsi qu'à la gestion des déchets.

---

<sup>1</sup>Canada Deuterium Uranium - Pressurized Heavy Water

Le cycle à passe unique du combustible à l'uranium naturel, tel qu'utilisé dans les réacteurs CANDU-PHW, a été développé et est continuellement amélioré par une équipe intégrée réunissant l'Energie Atomique du Canada Limitée (EACL), l'Ontario Hydro, la Compagnie Générale Electrique du Canada et la Westinghouse Canada Limitée.

Les premiers stages de ce travail, c'est-à-dire avant la commercialisation des centrales nucléaires, ont été réalisés en grande partie par les laboratoires de recherche et de développement. Puis, au fur et à mesure que le programme a pris de l'ampleur, l'Ontario Hydro s'est familiarisée avec tous ces domaines à un point tel qu'elle peut maintenant s'occuper de tous les aspects de la gestion du combustible. Il existe encore aujourd'hui une étroite liaison entre tous les membres de l'équipe et cette collaboration entre les différents groupes a été un facteur important dans le développement d'un combustible économique à rendement élevé.

Dans un tel esprit de collaboration, le programme de gestion du combustible de l'Ontario Hydro peut être décrit comme suit:

- (1) Familiariser le personnel avec tous les aspects de la gestion du combustible.
- (2) Définir les besoins de l'Ontario Hydro, en apportant de nouvelles idées pour la recherche et le développement, en fournissant les fonds nécessaires pour des programmes spécifiques, en soumettant le combustible expérimental à des essais dans les centrales nucléaires, en choisissant des grappes de combustible irradié pour examen de post-irradiation et en commandant cet examen.
- (3) Acheter de l'uranium brut sous contrat à long terme (environ 10 - 15 ans).
- (4) Acquérir les services de conception et de fabrication nécessaires à la conversion de l'uranium brut en grappes de combustible finies en quantités commerciales (environ 2000 mégagrammes d'U).
- (5) Inspecter toutes les phases de la fabrication du combustible.
- (6) Etablir et gérer un système de comptabilité des matériaux nucléaires pour répondre aux besoins de contrôle gouvernemental, physique et monétaire.
- (7) Développer et employer des méthodes de programmation du combustible dans les réacteurs. Analyser les problèmes possibles et résoudre les problèmes de combustible dans les centrales nucléaires.
- (8) Stocker et transporter le combustible irradié, y compris le stockage intérimaire loin des centrales.
- (9) Seconder l'EACL dans ses programmes de stockage à long terme du combustible irradié, de gestion des déchets et d'utilisation du combustible recyclé dans les réacteurs CANDU (retraitement y compris).

### 3. UTILISATION DU COMBUSTIBLE

Avant de pouvoir adopter un programme de chargement du combustible, il faut disposer d'un système bien établi permettant de calculer le taux

de combustion et la puissance des grappes, de même que les variations de puissance qui se produiront pendant l'opération de chargement. Le travail consistant ensuite à prendre les grappes de combustible et à les insérer dans le réacteur pour en extraire le plus de chaleur possible, comprend plusieurs étapes importantes, à savoir:

- (1) L'établissement des limites du combustible, telles que la puissance des grappes et des canaux.
- (2) L'identification des canaux devant être chargés. Normalement, on insère huit nouvelles grappes de manière à ce que les grappes se trouvant dans les positions à faible puissance 1 et 2 soient mises dans des positions à puissance élevée, à ce que les grappes des positions 3 et 4 soient placées dans des positions à faible puissance et à ce que les grappes des positions 5 à 12 soient déchargées.
- (3) La solution des problèmes de combustible, s'il y a lieu.

Un groupe de personnes, ne travaillant pas normalement à la centrale même, doit définir les limites dans lesquelles le combustible doit fonctionner. Des critères sont déterminés pour le taux de combustion, la puissance des grappes de combustible, les variations de puissance, la température et la pression du système de caloportage, etc. Les travaux visant à exprimer la probabilité de défektivité du combustible en fonction de la puissance, des variations de puissance et du taux de combustion des grappes de combustible se poursuivent [3].

Afin d'identifier les canaux devant être rechargés [4,5,6], il faut établir des règles de base qui seront suivies par le personnel de la centrale dans la programmation du combustible; il faut développer et utiliser des codes machines tridimensionnels qui suivront continuellement chaque forme de flux neutronique du réacteur et fourniront des informations utiles au personnel de la centrale, telles que la puissance et le taux de combustion des grappes et, enfin, il faut connaître les anomalies particulières à chaque réacteur:

- irrégularités du système de manutention du combustible,
- canaux de combustible ne pouvant pas accepter de combustible temporairement,
- besoins extraordinaires de réactivité,
- autres anomalies affectant la programmation du combustible.

Le personnel de la centrale utilise les limites du combustible, les critères de défektivité et les principes de programmation du combustible pour établir les instructions détaillées destinées aux équipes de la centrale pour le chargement du combustible neuf et le stockage du combustible irradié. Les critères de défektivité sont importants en ce qu'ils fournissent des données quantitatives sur les probabilités de défektivité du combustible qui peuvent être évaluées par rapport aux autres aspects de l'exploitation de la centrale.

L'opérateur d'une centrale doit bien comprendre l'interaction qu'il y a entre le combustible et les autres parties de la centrale comme, par exemple, les générateurs de vapeur. Il doit être en mesure de reconnaître des problèmes inattendus et de faire appel à des experts en

fabrication, conception et recherche qui sauront vite identifier le problème, effectuer les examens, essais et analyses nécessaires et recommander des solutions pratiques et efficaces. Le rendement maximal du combustible dépend de ce genre de connaissances et de compétence. Un exemple, mettant en cause le réacteur 1 de la centrale de Pickering, sera discuté plus tard.

#### 4. RENDEMENT DU COMBUSTIBLE

##### 4.1 Programme de développement

Le programme de développement du combustible des réacteurs CANDU a commencé par l'irradiation d'éléments simples dans des boucles du réacteur NRX aux Laboratoires Nucléaires de Chalk River [7], puis par l'essai de grappes de combustible complètes [8]. Lors de ce programme, 304 grappes et 445 éléments simples ont été irradiés à de faibles et hautes puissances jusqu'à des taux de combustion trois fois supérieurs à celui auquel sera soumis le combustible à l'uranium naturel dans les réacteurs CANDU-PHW.

Des spécifications techniques du combustible ont été établies et mises en vigueur afin qu'aucune défectuosité ne puisse se produire par suite de la formation d'hydrures localisés sur la gaine, de la densification de l' $UO_2$  ou par une déformation inacceptable donnant lieu à des arêtes vives sur la mince paroi de la gaine. Des quelques deux millions d'éléments simples qui ont été irradiés dans les réacteurs CANDU-PHW, seulement six ont fait défaut à cause d'erreurs de fabrication. Aucun défaut n'a été constaté dans les neuf millions de brasures au zirconium-5% béryllium.

Le peu de longueur des grappes et leur disposition horizontale a permis d'éliminer les problèmes tels que l'affaissement des piles de pastilles et la friction longitudinale, de même que les problèmes associés aux grandes cavités pour gaz de fission.

##### 4.2 Rendement du combustible des réacteurs de puissance

Le rendement du combustible des réacteurs CANDU-PHW exploités par l'Ontario Hydro est indiqué au Tableau 1.

Plus de 80% de toutes les défectuosités de grappes dans les quatre réacteurs de Pickering ont eu lieu en 1971-1972. Depuis novembre 1972, seulement 19 grappes ont fait défaut à Pickering, ce qui correspond à un taux de 0.03%, soit bien au-dessous de l'objectif de 0.1%. L'effet sur le fonctionnement de la centrale a été négligeable. Les défectuosités consistent typiquement en de petites fissures n'affectant qu'un ou deux des 28 éléments d'une grappe.

Les concentrations de I-131 dans le système de caloportage sont mesurées régulièrement et sont en général de 10 à 15  $\mu Ci/kg$  d'eau lourde (0.4-0.6 MBq/kg) à la puissance stationnaire [9]. Il est difficile d'établir une relation entre la teneur en iode et les éléments défectueux et cette relation repose en grande partie sur une évaluation technique. On croit, toutefois, qu'il y aurait typiquement environ deux éléments défectueux dans chaque réacteur.

A souligner que nous considérons la teneur de I-131, de 10 à 15  $\mu\text{Ci}/\text{kg}$  (0.4-0.6 MBq/kg) comme étant minime. Nous ne prenons aucune mesure spécifique pour localiser les grappes défectueuses ou pour les décharger. Leur effet sur le fonctionnement de la centrale est négligeable et l'iode est restreint au circuit de caloportage.

La plupart des défauts du combustible se sont produits lors des premiers stades de l'exploitation de Douglas Point et de Pickering <sup>2</sup>. Le personnel des centrales a directement contribué à l'établissement de méthodes d'exploitation visant à réduire au minimum les problèmes causés par les défauts de combustible, en identifiant les causes des défauts et en sortant systématiquement les grappes défectueuses. L'incident, survenu en 1971-1972 dans le réacteur 1 de Pickering, a clairement mis en évidence la compétence du personnel d'exploitation de la centrale.

Le réacteur 1 avait atteint sa criticité en février 1971 et, vers la fin du troisième trimestre de cette même année, la concentration en iode du système de caloportage avait augmenté considérablement par suite des défauts du combustible causés, croyait-on, par une erreur dans la séquence d'insertion des barres de commande au cobalt. La première mesure prise fut de rétablir la séquence prévue, ce qui a eu pour résultat de réduire les augmentations de puissance du combustible. A la mi-1972, une révision de la séquence avait réduit encore davantage les augmentations de puissance et éliminé presque entièrement les possibilités de défauts dus au mouvement des barres de commande au cobalt. L'analyse de la puissance des grappes a conduit à la prédiction des canaux qui devraient contenir le combustible défectueux et de la position des grappes défectueuses qui devraient être les positions 5 à 8.

Les canaux considérés comme contenant des grappes défectueuses furent rechargés suivant le cycle de rechargement à huit grappes. Mais, les niveaux d'iode continuèrent à augmenter, indiquant ainsi que de nouvelles grappes devenaient défectueuses. Cela était dû aux augmentations de puissance résultant du cycle de chargement à huit grappes et à la puissance anormalement élevée des canaux occasionnée par un flux neutronique plus élevé produit par l'insertion de nouvelles grappes dans les canaux environnants qui furent rechargés pour remplacer les grappes défectueuses.

Le réacteur 1 de Pickering fut arrêté en mai 1972, ainsi que prévu, pour des raisons autres que les défauts du combustible. Lorsque les données relatives à la puissance des grappes individuelles furent disponibles quelques semaines avant l'arrêt, il devint évident que le chargement des canaux à puissance maximale aurait pu causer les défauts des grappes déplacées des positions 1 et 2 et mises aux positions 9 et 10. Etant donné qu'au moment de la conception, il fut décidé de ne pas installer d'équipement de détection des grappes défectueuses dans le réacteur, la position de ces dernières fut déterminée surtout par l'analyse de leur rendement.

---

<sup>2</sup>Ces incidents n'ont eu que des effets mineurs sur le bon fonctionnement des centrales.

Une liste des grappes soupçonnées d'être défectueuses a été dressée en ordre décroissant de probabilité en se basant sur les critères de défektivité et sur le calcul du taux de combustion et de la puissance des grappes dans le réacteur avant et après le rechargement. Les canaux ont été chargés dans l'ordre établi dans cette liste pendant l'arrêt du réacteur afin d'en éliminer le combustible défectueux. Toutes les grappes retirées ont été inspectées dans la piscine du combustible épuisé. Des défauts ont été découverts dans les grappes 9 et 10 des canaux prédits. Puis, le rechargement fut arrêté lorsque trois canaux successifs n'ont révélé aucune grappe défectueuse. Presque toutes les grappes défectueuses du réacteur 1 furent localisées et retirées ainsi que l'indique le niveau d'iode extrêmement bas mesuré lors du démarrage du réacteur.

Cet incident nous a donné de nombreuses leçons dont les plus utiles sont les suivantes:

- L'importance de pouvoir analyser le rendement des grappes avec suffisamment de précision pour permettre de prédire la position des grappes défectueuses.
- La nécessité de surveiller constamment le niveau de radioactivité dans le système de caloportage pour assurer rapidement la détection de problèmes.
- L'importance de pouvoir effectuer des inspections sur place.
- L'importance d'avoir un programme de recherche et de développement qui permette de déterminer rapidement la cause des défektivités et un personnel compétent capable d'appliquer les solutions aux problèmes sans tarder.

Les données relatives au combustible défectueux ont été analysées sur une base statistique. Des critères ont été formulés par corrélation de la probabilité d'un défaut avec le taux de combustion du combustible, la puissance maximale, l'augmentation de puissance et le temps de fonctionnement en puissance [3]. L'application de ces corrélations a permis de réduire considérablement le taux de défektivité jusqu'au niveau actuel de 0.03%.

#### 4.3 Programmes de recherche et de développement actuels

Les modifications apportées à la gestion du combustible ont pratiquement éliminé tous les défauts de combustible à la centrale de Pickering. Mais il nous reste encore à comprendre la cause des défauts et à développer un combustible acceptant plus facilement les augmentations de puissance, ce qui donnerait lieu à des marges d'exploitation plus grandes. Un programme mis sur pied en 1971 a démontré que les défauts étaient probablement dus à la fissuration des gaines par corrosion sous contrainte induite par l'iode aux endroits de fortes contraintes, par exemple dans les fissures et éclats des pastilles ou dans les arêtes circonférentielles formées aux interfaces pastille/pastille [10,11].

Environ vingt versions différentes du combustible de référence ont été irradiées dans les réacteurs de recherche de l'EACL. Plusieurs ont été rejetées rapidement après qu'il fut établi que leur taux de défektivité était semblable à celui du combustible de référence. Une plus grande ductilité initiale de la gaine a été recommandée pour le combustible neuf de la centrale de Douglas Point, mais il fut démontré, par l'essai et le rendement d'un tel combustible, que ce changement ne constituait pas une solution au problème [12]. En 1972, des essais ont révélé que le dépôt d'une couche de graphite sur la surface intérieure de la gaine assurait un fonctionnement sans défektivité (voir Figure 1). Le combustible avec revêtement au graphite, appelé CANLUB, devint alors le combustible de référence.

Nous ne disposons pas encore de données suffisantes pour pouvoir évaluer quantitativement le combustible CANLUB. Il est toutefois évident que le rendement du combustible a été amélioré et notre tâche actuelle consiste à déterminer jusqu'à quel point. Conjointement avec le développement du combustible CANLUB, d'autres conceptions ont été mises à l'essai, à savoir l'application de couches de siloxane au lieu de graphite [11], la modification de la géométrie des pastilles [13] et l'insertion de disques au graphite entre les pastilles [14].

#### 5. COUT DU COMBUSTIBLE

L'approvisionnement en combustible a fait l'objet d'offres compétitives à prix fixes pour les services de conception et de fabrication détaillés. Cette saine concurrence, a porté le coût du combustible de Pickering à 67 \$/kg U, y compris l' $UO_2$  et les frais de chargement à 1.2 m\$/kWh, chiffres donnés en dollars canadiens 1976.

Le coût du combustible et les frais de chargement sont basés sur le cycle de l'uranium naturel à passe unique, la valeur du combustible irradié étant nulle. Aucun crédit n'est accordé à la valeur potentielle du plutonium qui y est contenu.

Le coeur des réacteurs CANDU a très peu de matériaux parasites. La grande utilisation de l'uranium qui s'ensuit, exprimée en kWh par unité d'uranium naturel extrait, est fixée avec un niveau de confiance élevé. Même en cas d'escalade du prix de l'uranium, le coût du combustible CANDU restera compétitif aux autres types de réacteurs.

#### 6. AUTRES CYCLES DE COMBUSTIBLE

Grâce à leur économie de neutrons, leur chargement en cours de marche et leurs courtes grappes de combustible, les réacteurs CANDU offrent un grand degré de flexibilité et d'adaptation à d'autres conceptions et cycles de combustible. Des études préliminaires indiquent que des cycles de combustible au plutonium et au thorium [15] pourraient être incorporés dans les réacteurs actuels moyennant quelques modifications mineures aux éléments et systèmes de contrôle/commande du réacteur.



Des programmes d'irradiation du combustible ont été entrepris dans le but de développer d'autres cycles de combustible, notamment au thorium et au plutonium, pour utilisation possible dans les années 1990.

## 7. CONCLUSION

L'expérience acquise ces dernières quinze années a montré que le combustible CANDU a su répondre aux besoins des réacteurs actuellement en service. Si l'on en juge par les résultats des programmes de développement en cours, nous pouvons être assurés que le combustible des réacteurs futurs, qu'ils soient basés sur les cycles à l'uranium naturel ou recyclé, sera tout aussi satisfaisant que celui utilisé aujourd'hui.

Ces quinze années d'expérience ont également montré la valeur réelle du travail en équipe. On peut ainsi souligner l'importance de la communication et de la collaboration entre tous ceux qui travaillent dans un même but, c'est-à-dire les opérateurs, les fabricants, les concepteurs et les chercheurs.

## 8. REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier sincèrement les groupes d'étude du combustible de l'Energie Atomique du Canada Limitée, de l'Ontario Hydro, de la Compagnie Générale Electrique du Canada Limitée et de la Westinghouse Canada Limitée. Nos remerciements sont également adressés à MM. L.L. Brodie et R.K. Lo pour la description des problèmes de combustible et de leur solution dans le réacteur 1 de Pickering.

## REFERENCES

- [1] SMITH, H.A., "A review of the development and status of CANDU nuclear power plant", (Proc. Eur. Nucl. Conf. Paris, April 1975).
- [2] FOSTER, J.S., RUSSELL, S.I., "CANDU - Canadian experience and expectations with the heavy water reactor", paper 179 at this conference.
- [3] PENN, W.J., LO, R.K., WOOD, J.C., CANDU fuel-power ramp performance criteria, Nucl. Technol. (submitted for publication August 1976).
- [4] BROWN, R.A., "Fuel scheduling", (Proc. Can. Nucl. Assoc. 14th Ann. Conf. Montreal, 1974), 74-CNA-700, Can. Nucl. Assoc., Toronto (1974) paper CNA-74-TS-3.
- [5] BRENCIAGLIA, G., BROWN, R.A., McCORMACK, G.R., "Fuel scheduling experience of Ontario Hydro's CANDU-PHW reactors", Trans. Am. Nucl. Soc. (June 1976).

- [6] FANJOY, G.R., BODIE, L.L., PAGE, R.D., TARASUK, W.R., DEBMAN, H.R. "Canadian nuclear fuel operating experience", Commercial Nuclear Fuel Technology Today (Proc. Joint Topical Meeting Toronto, April 1975) paper 75-CNA/ANS-100.
- [7] ROBERTSON, J.A.L., BAIN, A.S., BOOTH, A.H., HOWIESON, J., MORISON, W.G., ROBERTSON, R.F.S., "Behaviour of uranium dioxide reactor fuel", Peaceful Uses of Atomic Energy (Proc. 2nd UN Int. Conf. Geneva 1958) 6, UN, New York 655.
- [8] BAIN, A.S., PAGE, R.D., FANJOY, G.R., TARASUK, W.R., HOWIESON, J., "Performance and evolutionary development of CANDU fuel" (Proc. Eur. Nucl. Conf. Paris, April 1975).
- [9] NEIL, B.J.C., Radionuclide Concentrations in Pickering NGS Heat Transport Systems Part 2: Iodine-131 and Iodine-133 Concentrations During 1972, Ontario Hydro Research Division Rep. 76-205-K (May 1976).
- [10] WOOD, J.C., Factors affecting stress corrosion cracking of Zircaloy in iodine vapour, J. Nucl. Mater., 45 (1972/1973) 105.
- [11] BAIN, A.S., WOOD, J.C., COLEMAN, C.E., "Fuel designs to eliminate defects on power increases", Nuclear Fuel Performance (Proc. BNES Conf. London, October 1973).
- [12] HARDY, D.G., BAIN, A.S., "The influence of metallurgical variables on the performance of Zircaloy fuel sheathing", Zirconium in the Nuclear Industry (3rd Int. Conf. Quebec, August 1976).
- [13] CARTER, T.J., The Effects of UO<sub>2</sub> Pellet Shapes on Strain Induced in Collapsible Zircaloy Fuel Cladding, presentation to American Ceramic Society, Cincinnati, May 1976.
- [14] LEWIS, W.B., DURET, M.F., CRAIG, D.S., VEEDER, J.I., BAIN, A.S., "Large scale nuclear energy from the thorium cycle", Peaceful Uses of Atomic Energy (Proc. 4th UN Int. Conf. Geneva 1971) 9, UN, New York 239.
- [15] CRITOPH, E., "The thorium fuel cycle in water moderated reactor systems", Nuclear Power and Its Fuel Cycle (Int. Conf. Salzburg, Austria, May 1972).

TABLEAU I RENDEMENT DU COMBUSTIBLE DE L'ONTARIO HYDRO

CENTRALE	GRAPPE IRRADIEES	GRAPPE DEFECTUEUSES	% GRAPPE DEFECTUEUSES
NPD (22 MWe)	3 844	12 <sup>(2)</sup>	0.31
DOUGLAS POINT (206 MWe)			
Avant le 1 jan. 1972	7 169	66	0.92
Après le 1 jan. 1972	10 492	25	0.24
PICKERING (4 x 514 MWe)			
Réacteur 1	21 978	99	0.45
Avant le 1 nov. 1972	6 938	91	1.31
Après le 1 nov. 1972	19 720	8	0.04
Réacteur 2	20 406	1	0.01
Réacteur 3	15 128	6	0.04
Réacteur 4	12 592	4	0.03
Pickering - Total	70 104	110 <sup>(3)</sup>	0.16
Pickering - Total après le 1 nov. 1972	67 846	19	0.03

(1)  $\text{Pourcentage de grappes défectueuses} = \frac{\text{Total des grappes défectueuses déchargées}}{\text{Total des grappes irradiées}} \times 100\%$

(2) Seulement 4 grappes ont fait défaut dans les conditions de service normales. Les 8 autres étaient des grappes expérimentales.

(3) Les concentrations d'iode montrent qu'il peut y avoir 1 ou 2 défauts dans chaque réacteur de Pickering; ces défauts ne sont pas compris dans le total.

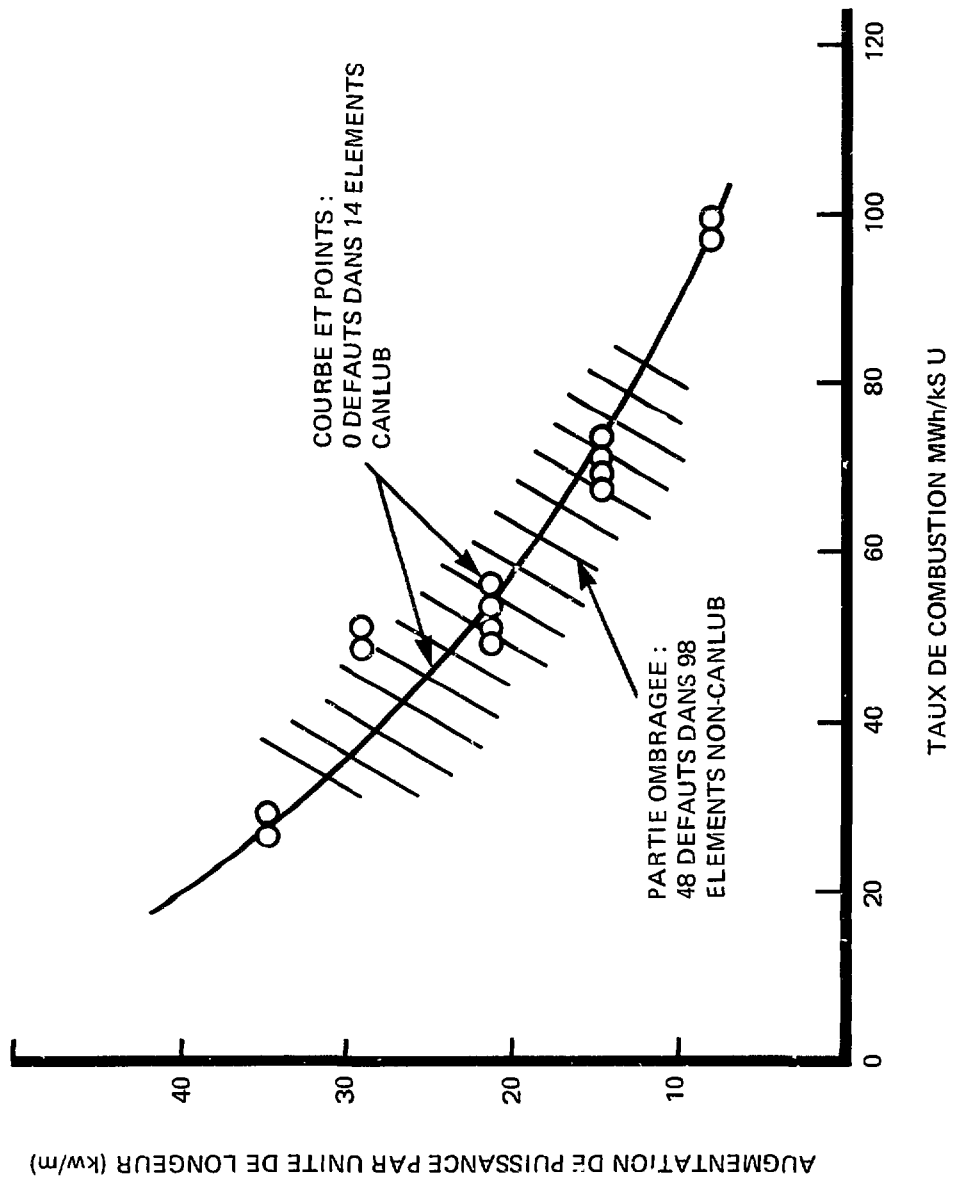


FIGURE 1 ESSAIS NRU COMPARANT LES DEFAUTS ENTRE LES ELEMENTS CANLUB ET NON-CANLUB DANS LA PENTE DE PUISSANCE DONNEE

