



AECL-7761

ATOMIC ENERGY  
OF CANADA LIMITED



L'ÉNERGIE ATOMIQUE  
DU CANADA LIMITÉE

**THE INTEGRATED CANDU SYSTEM  
– AN INTERNATIONAL PERSPECTIVE**

**Le système intégré CANDU – une perspective internationale**

**J. DONNELLY**

Report IAEA-CN-42/36 presented at the IAEA International Conference on  
Nuclear Power Experience, Vienna, 13-17 September 1982

(Egalement disponible en français sous le numéro AECL-7761 F)

Chalk River Nuclear Laboratories

Laboratoires nucléaires de Chalk River

Chalk River, Ontario

September 1982 septembre

The papers presented by Canada are reproduced with permission of the International Atomic Energy Agency and the authors. They include:

IAEA-CN-42/36	AECL-7761	IAEA-CN-42/145	AECL-7767
IAEA-CN-42/68	AECL-7762	IAEA-CN-42/146	AECL-7768
IAEA-CN-42/141	AECL-7763	IAEA-CN-42/147	AECL-7769
IAEA-CN-42/91	AECL-7764	IAEA-CN-42/28	AECL-7770
IAEA-CN-42/142	AECL-7765	IAEA-CN-42/47	AECL-7771
IAEA-CN-42/143	AECL-7766	IAEA-CN-42/148	AECL-7772

ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED

THE INTEGRATED CANDU SYSTEM - AN INTERNATIONAL PERSPECTIVE

James Donnelly  
Atomic Energy of Canada Limited  
Ottawa, Ontario  
Canada

Report IAEA-CN-42/36 presented at the IAEA International Conference on  
Nuclear Power Experience, Vienna, 13-17 September 1982.

(Egalement disponible en français sous le numéro AECL-7761F)

Chalk River Nuclear Laboratories  
Chalk River, Ontario  
September 1982

AECL-7761

L'ENERGIE ATOMIQUE DU CANADA LIMITEE

LE SYSTEME INTEGRE CANDU - UNE PERSPECTIVE INTERNATIONALE

par

J. Donnelly

RESUME

L'année 1982 a marqué le 35<sup>e</sup> anniversaire de la mise en route du premier réacteur canadien de recherche et d'essai, le NRX. Le premier réacteur de puissance fonctionne de façon très satisfaisante depuis 20 ans. Le programme d'énergie nucléaire CANDU (CANada Deutérium Uranium) comprend une puissance installée de 5 000 MW(e), 8 500 MW(e) en cours de construction au Canada devant entrer en service d'ici 1990, de même que des projets engagés à l'étranger: en Argentine, en Corée et en Roumanie.

La base du programme canadien demeure le réacteur CANDU à uranium naturel et à eau lourde, dont la fiabilité, la sûreté et l'économie jouissent d'une réputation internationale croissante. Le succès de ce concept de réacteur exceptionnel est dû en grande partie à une approche intégrée appliquée à la planification, à l'ingénierie et à l'exploitation par l'EACL, les compagnies d'électricité, les constructeurs, les fabricants du combustible, et tous les autres secteurs de l'industrie. C'est cet ensemble intégré, qui ne dépend aucunement de l'enrichissement de l'uranium, que le Canada est à même d'offrir à d'autres pays disposant d'une capacité industrielle semblable.

Les plans pour l'avenir proposent de se baser sur les caractéristiques qui ont fait le succès du CANDU. L'emploi de l'eau lourde, le rechargement en marche et l'attention constante apportée à l'économie neutronique font que l'utilisation du combustible est la plus efficace de tous les réacteurs thermiques à passe unique. Quand ils seront requis, les évaluations actuelles indiquent qu'on pourra convertir le CANDU à des cycles de combustible plus avancés sans modification importante du concept de base. On envisage surtout le cycle du combustible au thorium afin de continuer d'assurer à long terme la fourniture d'énergie abondante et à bon marché.

L'EACL et ses partenaires de l'industrie et des compagnies d'électricité, avec l'aide du gouvernement, poursuivent activement d'autres projets nucléaires afin de permettre au Canada d'arriver à réduire sa dépendance du pétrole importé. Ces projets comprennent les mini-réacteurs pour le chauffage de centres commerciaux et l'utilisation de la chaleur industrielle des centrales nucléaires pour des applications agricoles et industrielles.

Le succès canadien à ce jour, de même que la réalisation des plans d'avenir, ne sont possibles que dans un climat de coopération entre les organismes fédéraux et provinciaux, qui s'est manifesté dans le récent accord sur la gestion des déchets et dans les projets de développement industriel de l'Ontario qui prévoit l'expansion de l'apport de l'énergie nucléaire.

(Egalement disponible en français sous le numéro AECL-7761F)

Laboratoires nucléaires de Chalk River

Chalk River, Ontario

1982 septembre

AECL-7761

## THE INTEGRATED CANDU SYSTEM - AN INTERNATIONAL PERSPECTIVE

## ABSTRACT

The year 1982 marks the 35th anniversary of the start-up of Canada's first research and test reactor, NRX. The first power reactor has been operating successfully for the past 20 years. With 5 000 MW(e) of domestic capacity installed, Canada's major CANDU (CANada Deuterium Uranium) nuclear power program has a further 8 500 MW(e) under construction in Canada for completion by 1990 as well as committed offshore projects in Argentina, Korea and Romania.

The foundation of Canada's program continues to be the natural-uranium, heavy-water, CANDU reactor which is gaining international recognition for its safety, economy and reliability. Success of this unique reactor concept is due largely to an integrated approach to planning, engineering and operation by AECL, the utilities, manufacturers, fuel fabricators and all other sectors of the industry. It is this total integrated package, without ties to uranium enrichment, that Canada is able to offer to other countries with similar industrial capability.

Future plans call for building on those characteristics that have made CANDU so successful. Use of heavy water, on-power refuelling and constant attention to neutron economy ensure the most efficient fuel use of any once-through thermal reactor. When time for change comes, current assessments indicate that it will be possible to convert to more efficient advanced fuel cycles without major changes to the basic CANDU design. Attention is being focussed on the thorium fuel cycle to ensure an abundant and continuing supply of low cost energy for the long term.

AECL and its industrial and utility partners, with support from government, are also actively pursuing other nuclear projects to help Canada achieve its goal of reducing dependence on imported oil. These include mini-reactors for heating large buildings and use of nuclear plants' process heat for industrial and agricultural applications.

Canada's nuclear successes to date as well as achievement of future plans are possible only in a climate of federal and provincial government support, evidence of which is found in a recent agreement on waste management and in Ontario's industrial development projects that include an expanded nuclear-energy contribution.

## 1. INTRODUCTION

The principal alternative to the Light Water Reactor (LWR) for the production of nuclear electricity is the Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR). Only one of the various designs produced, the CANDU (Canada Deuterium Uranium) reactor has been proven commercially on a large scale. The CANDU nuclear power stations have consistently achieved outstanding performance. The success of the CANDU design can be credited to the close collaboration of the research and development organization, the designer, the operators and the supply, manufacturing and construction industries from the initial stages of development through to the present day. The integrated approach was essential for the domestic development of a unique nuclear system in a country of modest technological resources such as Canada. The concentration of this effort on a single reactor type was made possible by the modular nature and constructional simplicity of the present CANDU system, and by the capability of meeting all foreseeable future needs through fuel cycle developments alone. Canada's ability to develop CANDU without the need for highly specialized or dedicated manufacturing facilities indicates the suitability of this technology for adoption by other reasonably advanced developing nations. The CANDU system, combining a domestic construction capability for the plants with natural uranium as fuel, offers to such countries the prospect of early self-reliance with continuing viability for the long term.

This year marks the 35th anniversary of the start-up of Canada's first research and test reactor, NRX. Twenty years ago Canada's first nuclear power station, the Nuclear Power Demonstration (NPD) came into operation, and just over ten years ago the first commercial nuclear generating station, Pickering A, began to produce electricity. This comparatively slow build-up to commercial nuclear power production, compared with the larger scale programs of some other countries, allowed many of the inevitable problems of a new technology to be solved in the development phase. It also allowed a thorough consolidation of design features and public safety criteria, the timely application of research and development, and the close coupling of the design to the principal customer's operating requirements. This integrated approach has continued throughout the history of the CANDU system, and has resulted in a nuclear power generating system that, once introduced, rapidly became established as the world leader for performance reliability. Commercial nuclear power stations in Canada, with a total installed capacity of 5 000 MW(e), operated with average annual load factors of over 86 per cent in 1981 and by the end of the year had produced a lifetime output of over 250 TWh of electricity [1]. Figure 1 compares CANDU performance over the past five years with that of other commercially available reactor types.

This paper examines the structure of the Canadian industry and the close interrelationship of the different sectors involved in CANDU development. The impact of the unique design features of CANDU reactors on reactor availability and safety, on fuel utilization, and on overall economics is discussed.

Future plans build on those characteristics that have made CANDU so successful. At the appropriate time, it will be possible to convert to more efficient advanced fuel cycles without having to introduce a completely new reactor type, such as the Fast Breeder Reactor (FBR). Use of thorium fuel cycles in CANDU reactors can ensure an abundant and continuing supply of low cost energy indefinitely.

## 2. INTEGRATED ORGANIZATION

The integration into a coherent program of the designers, the research and development organizations, the reactor development group, the prospective operators, the component manufacturers, the fuel and heavy-water supply industries was a key factor for this successful endeavour in Canada, a country of comparatively limited industrial resources.

Since 1952, when the initiative was taken to apply heavy-water reactor technology to what became CANDU, this integrated organization has evolved into a world-class industry. That initiative, although taken primarily by the Canadian federal government, acting through Atomic Energy of Canada Limited (AECL), met a ready response from Canadian electrical utilities that had already recognized the need for a new energy source. All aspects of research and development were controlled or co-ordinated by one organization, with considerable cross-fertilization within Canada and from other parts of the world. AECL took responsibility for developing the early research and power reactors, much of the fuel-cycle technology, and the industrial and medical applications of nuclear technology. From the very outset of this development, several Canadian utilities, led by Ontario Hydro, one of the largest electrical utilities in North America, participated in the endeavour through common development programs, attachment of technical personnel, and consultation at senior levels. Canadian manufacturers, universities and consultants were also brought into this close association of developers and utilities [2].

Ontario Hydro, having exploited available economic hydro-electric sites and without access to low-cost fossil fuels, has been CANDU's principal customer. Its participation resulted in a healthy emphasis on practicality, without sacrificing the fundamental economy of the design. Established design and procurement policies and procedures for conventional generating stations extended naturally into the nuclear power program, and resulted in a dispersed structure of highly qualified suppliers. Such a structure has had the advantage of encouraging broad industrial participation in the domestic nuclear program [3].

Throughout the development of CANDU, design decisions have drawn on the technical, economic and practical production knowledge of the various parts of the industry. In most cases, these decisions have proved well founded. As with any major technological development, there have been problems, but the basic design features have been effective in minimizing reactor downtime and associated cost penalties.

The participation of the major nuclear research organizations, the Chalk River Nuclear Laboratories and the Whiteshell Nuclear Research Establishment, is as important in the solution of problems that arise during operation of a mature plant as in the development of a new design. For any major technology it is essential to have such a response capability to correctly diagnose problems that inevitably arise and to provide effective solutions.

The result of this broadly based participation, dedicated to a thoroughly proven design concept, was that Canada, a country with only modest resources in manpower and industrial capability, became one of the very few countries in the world with home-grown, commercial, nuclear-power technology.

Several factors contributed to Canada achieving its position among the world leaders in nuclear power. Being in at the very start of reactor development helped attract skilled and dedicated workers. Canada established one of the world's first major nuclear research laboratories at Chalk River in 1945. The spirit of co-operation between AECL, as the concept sponsor, Ontario Hydro as the nuclear utility, and the manufacturing industry has been unequalled in programs elsewhere. Moreover, instead of dissipating its comparatively limited developmental resources on different reactor concepts, Canada concentrated on one specific reactor design. None of these conditions would have led to success, however, without the strong and consistent support of both federal and provincial governments.

The integrated approach in Canada covers the entire nuclear infrastructure from the mining and refining of uranium and the production of heavy water, to the management of nuclear wastes.

The specifically nuclear technology for each component of the CANDU system has been transferred to Canadian firms that had appropriate facilities and expertise. In this way, existing industrial technology has been incorporated into the nuclear systems while minimizing the need for investment in dedicated plant. At the same time, the existing firms have benefited from the new products, technologies and quality standards associated with CANDU. This broad industrial base, unique for a major reactor vendor, has allowed a large number of engineering organizations to contribute within a well-coordinated structure.



By incorporating the nation's nuclear laboratories into the commercial development infrastructure of Canada, the industry was assured of a highly developed technical base in support of the reactor design, the production of fuel, the manufacture of components, heavy water production and regulatory requirements. This support extends into the commercial stages of development and into plant operation in particular, thus avoiding many of the problems experienced elsewhere, where detailed feedback from the operating plants does not always receive a timely and adequate technical response, or where fundamental problems fail to be recognized.

A similar integrated approach has been adopted in CANDU projects outside Canada. All the major sectors participating in the domestic program (research, design, supply, manufacturing and operating) have contributed to the CANDU export projects, providing foreign customers with an organizational model on which to build their own programs. This arrangement provides an effective means for the direct transfer of the necessary technology between counterpart organizations.

### 3. TECHNICAL FEATURES OF CANDU

The basic technical features of the CANDU reactor are well known: a pressure-tube design, with heavy water cooling and a separate heavy water moderator contained in a calandria, which uses natural uranium fuel.

The decision to use heavy water as moderator was made right at the beginning of the development program and was based on very fundamental physical principles [4]. The use of heavy water, combined with a very strong emphasis on neutron economy, provided the opportunity for using natural uranium as fuel. The choice of the pressure-tube design, instead of the pressure vessel concept, facilitated on-power fuelling, thereby contributing to neutron economy through the efficient removal of parasitic fission products.

The adoption of heavy water, natural uranium and pressure tubes, rather than light water, enriched uranium, and pressure vessels has resulted in far-reaching technical and economic benefits for the CANDU program.

#### 3.1 Heavy water

Although the cost of heavy water is high, make-up requirements are modest once the reactor is in service. Thus the cost is reflected mainly in the capital-cost component of the total unit energy cost and so is not subject to inflation. In fact, far from depreciating, the heavy water charge is reclaimable at the end of the reactor's useful life. (With light water moderator, it is the

fuel that is enriched, and hence expensive; the costs of enriching fuel are incurred continuously throughout the life of the reactor, and so are directly affected by inflation.)

The need to conserve expensive heavy water focussed attention from the start on its containment. CANDU developers were forced at an early stage to learn why valves leak and in so doing, developed better valves. They were forced to understand why pump seals fail and in so doing, developed better pump seals. They were forced to understand why boiler tubes fail and in so doing, developed both boiler designs that minimize vibration and wear and boiler water chemistry specifications that minimize problems due to corrosion. As a result, CANDU boiler tube failure rates are about one hundredth those in light water reactors [5]. The concern about potential heavy water leakage also forced an early development of fast and reliable techniques for non-destructive testing of components. These various measures not only saved heavy water, as intended, but they also helped to improve the stations' availability and to reduce occupational exposures to radiation [6].

Furthermore, the attention paid to component quality to prevent heavy-water leakage has contributed to safety in at least two ways. First, there have been very few component failures. Second, the heavy-water, leak-detection system provides early warning of potential safety problems. For example, the one serious component failure experienced in operating any of the CANDU stations, the pressure-tube cracks in Pickering units 3 and 4, was detected long before a safety problem could arise [7].

The quality of Canadian nuclear components is being further strengthened by a system of quality assurance that has drawn worldwide interest. The new quality assurance standards form a fully integrated series in which the program is tailored to suit the complexity of the particular task, covering every aspect of the management, design, manufacture, inspection and testing of the component [8].

Other features of the system design that were originally incorporated to conserve heavy water have since been found to have a beneficial effect on safety, by helping to avoid some of the problems that have been encountered elsewhere. For example, in the accident at Three Mile Island, when the core became over-pressurized, primary coolant was released through a relief valve to a low pressure tank. When the pressure relief valve failed to reclose, pressure built up in the relief tank causing a rupture disc to burst and primary coolant to spill out into the containment building [9]. In CANDU, if the primary cooling system becomes over-pressurized, the heavy water coolant is released through a relief valve to a tank in a closed circuit rated at the primary system pressure, from which the heavy water can be pumped back into the system. Thus, if the relief valve failed to reclose, the pressure in the total system would equalize, preventing loss of coolant to the containment.

### 3.2 Natural uranium

The opportunity to use natural uranium carried with it the obligation to exercise the strictest neutron economy if economic burnup were to be achieved. Thus, every design decision was reviewed in terms of its impact on fuel burnup. As a result, the CANDU reactor has the best uranium utilization of any commercially viable system yet developed, by a margin of about 20 per cent [10].

Current fuelling costs<sup>1</sup> for CANDU units within the Ontario Hydro system are about 2.5 m\$/kWh. This can be compared with an estimated 5.5 m\$/kWh for LWRs and 17 m\$/kWh for coal if these were to be operated under similar conditions in the same system<sup>2</sup> [11]. Even if the CANDU fuel costs were to increase at the normal rate of inflation, they are so low relative to fixed costs that the cost of electricity from a CANDU reactor is essentially inflation-proof. The same cannot be said for reactors using enriched uranium as fuel.

The emphasis on neutron economy focused attention on those few elements that nature has provided with low thermal-neutron capture-cross-sections. All others are rigorously excluded from CANDU fuel channels that, unlike those of LWRs, contain no extraneous mechanisms. CANDU fuel consists essentially of only uranium dioxide contained in a zirconium alloy, with only trace amounts of carbon and beryllium used in assembly of the fuel bundle. The use of these materials, complemented by a thorough understanding of their properties in reactor applications, has ensured freedom from corrosion problems.

The combination of heavy water and natural uranium results in an optimum design for the reactor core that is less compact than for LWRs. Consequently, there is more room between the fuel channels for control and shutdown mechanisms, allowing both mechanical and chemical devices to be used. In addition, the natural uranium fuel operates with a minimum of excess reactivity, simplifying the requirements for shutdown and control mechanisms. Similarly, the design has less stringent requirements for control of localized peaks in heat production.

Natural uranium is a widely distributed resource available to many countries that do not have other energy resources in abundance. The fuel for CANDU is simple to fabricate and is therefore relatively inexpensive. The use of natural uranium avoids the complications of criticality control during handling either before or after irradiation; the used fuel bundles can be closely packed in water-cooled storage without hazard.

---

<sup>1</sup> Canadian dollars are used throughout this paper.

<sup>2</sup> Assumes Ontario Hydro's costs for uranium and coal.

### 3.3 Pressure tubes

Originally, the pressure-tube design was chosen to ensure that subsequent scaling up of the initial, small units to a larger commercial size would not be limited by Canada's industrial capacity to build large pressure vessels.

The resulting design of a CANDU is basically modular, using proven components of standard design. Reactor power can, in principle, be increased by adding more pressure tubes. As a result of the modular design, at each stage during the reactor's development, full-scale testing has been possible at realistic reactor operating conditions.

Only later was it appreciated that the capacity for on-power fuelling, facilitated by the pressure tube design, gives the CANDU system an inherent advantage in availability of about 6 per cent over off-power fuelled reactors [12]. This and other causes have contributed to the remarkably high load factors enjoyed by domestic CANDU reactors, compared to all other power reactors over 150 MW(e) worldwide (Fig. 1). For capital-intensive plants, such as nuclear generating stations, an advantage in load factor produces a comparable advantage in electricity costs.

A most important safety feature arising directly from the choice of the pressure tube design is that the fuel would not be expected to melt, even in the event of a loss of coolant accident and the failure of the emergency coolant system [13]. In this unlikely event heat would be transferred by radiation to the low temperature moderator and the fuel temperature would never exceed the melting point. Thus, even though there could be a major release of fission products to the containment, the reactor core would retain its geometry. In addition, the ability, in a pressure-tube reactor, to detect and remove defective fuel shortly after the defect occurs reduces radioactive contamination of the primary circuit.

The pressure tube design lends itself readily to component replacement, although this has been required in only a few cases, to correct a manufacturing defect. The latest example was a pressure tube at Bruce unit 2. This developed a leak that was immediately detected. The pressure tube was replaced and the reactor returned to service within a month. There is no reason why all major components of a CANDU station, including the pressure tubes, could not be replaced, extending the station's life well beyond the thirty years now used in economic evaluation [7].

## 4. MANUFACTURING INDUSTRY

These above-described technical features of the CANDU design provided a solid foundation on which to build an independent, domestic nuclear industry. It is this capability, together with the outstanding performance of Canada's nuclear power stations

that has attracted international interest since the same approach can be readily adopted in any country that has reached a modest level of industrial capability. From the standpoint of manufacturing and construction, the system can be divided broadly into heavy water production, the fuel industry, and manufacture of components for the nuclear steam supply system.

#### 4.1 Heavy water production

One of the few specialized manufacturing areas is heavy water production. As far as degree of complexity and construction and operating skills are concerned [14], this is very similar to many processes in the petroleum and petro-chemical industries.

Heavy water production, along with the rest of the Canadian nuclear industry, benefited from an extensive development program, involving close collaboration between AECL, Ontario Hydro, the component manufacturers and the plant constructors. Considerable experience was gained over the development stages, and subsequent operating experience has been reflected in the impressive gains in productivity of Canadian heavy water plants. As a result, Canada now has the demonstrated capacity for large-scale production of heavy water, together with the ability to design and construct heavy water plants based on indigenous technology. Heavy water production is well within the capability of countries having domestic experience in the operation of chemical plants. Since the make-up requirements of a CANDU station are very small, only a modest production capacity is required if the initial inventory is provided by one of the established suppliers. In this way, a rapid independence from foreign producers can be achieved, if wished.

#### 4.2 Fuel industry

A fundamental and unique part of the integrated Canadian nuclear industry is the fuel industry consisting of uranium mining, refining and fuel manufacturing. The companies involved, both private and Crown Corporations, make a major contribution not only to Canada's, but also to the world's nuclear power program.

The fuel manufacturing process is simpler than many industrial operations and is not very capital intensive. The fuel bundles are small, to facilitate the on-load fuelling of the pressure tube reactor, so the unit production is large and advantage has been taken of mass-production and quality-control techniques. As a result, costs have been minimized. The estimated fixed capital investment is only about \$61 000 per worker (1981 dollars), while the cost of the fuel produced is only a fraction of that for other commercial reactor systems.

Conventional manufacturing processes are used throughout the fabrication of CANDU fuel, with custom-designed welding and brazing equipment for the final assembly of the fuel pins, and their assembly into bundles. Well over 300 000 fuel bundles have been made by three Canadian manufacturers, and the failure rate in service has been less than 0.2 per cent of all bundles irradiated. Most existing and potential customers for CANDU outside Canada have stated their intention of making their own nuclear fuel.

The fuel supply sector is described by Aspin et al. [15], while the design and performance of CANDU fuel is described by MacEwan et al. [16].

#### 4.3 Nuclear components

The Canadian nuclear component industry comprises many companies. These companies have produced a range of high quality components of proven performance that have contributed to a competitive and highly successful reactor system. The suppliers became close-coupled to the CANDU program at an early stage, often through development contracts with the research organization, the reactor designer or the utility.

None of the manufacturing processes involved in the construction of a CANDU reactor is fundamentally different from those required in other industrial applications. A good example is the welded construction of the calandria, one of the largest components of a CANDU reactor. For a standard 600 MW(e) design, the calandria is made from 28 mm thick stainless steel plate, and production is within the capability of normal, steel-industry facilities.

The incentive for any manufacturer to enter the nuclear component market is a combination of the new business opportunities and the spin-off benefits of adopting quality standards that are also applicable in the production of equipment for other high technology industries. In Canada the CANDU reactor, as well as providing cost-effective energy, has helped develop industrial, human and natural resources.

#### 4.4 Utilities' involvement

Once in its operational phase, a nuclear-electric generating station requires extensive technical support to ensure that it performs safely and economically. A range of support services, which are integrated, systematically applied and flexible, has been established to cope with any problems that arise, to perform regular testing and monitoring, to provide continuing feedback to the design and development organizations and to carry out the fundamental research necessary to develop improved nuclear materials, components and systems.

A major contribution to the integrated approach in Canada is made by the utilities, with Ontario Hydro, Hydro-Québec and New Brunswick Power all making an input to the Canadian nuclear program. For instance, Ontario Hydro has extensive operator training facilities, including advanced, computer-based, reactor-simulators, which are made available to other utilities preparing to use CANDU reactors, both in Canada and abroad. This utility also provides the services of experienced key personnel in the construction, commissioning and operating phases of a project, as well as in training the other utilities' staff.

## 5. INSTITUTIONAL ARRANGEMENTS

### 5.1 Licensing and regulatory control

In Canada, the Atomic Energy Control Board (AECB) regulates the use of nuclear materials and nuclear facilities. In its regulatory role, the AECB develops standards, assesses applications, issues licenses, and inspects facilities. The Board also funds certain research programs in support of its regulatory function, sometimes in cooperation with other bodies such as the International Atomic Energy Agency.

The basic approach taken by the AECB in all regulatory matters is that the licensee is primarily responsible for safety. AECB's role is to ensure that the responsibility is discharged. The onus is thus on the licensee to demonstrate, to the satisfaction of the Board, that his equipment and procedures meet the public safety criteria established by the Board; he must justify selection of a site, design, method of construction, and mode of operation of a facility. The AECB's approach has been described more fully by Snell [17]. The effectiveness of the CANDU system and the regulatory approach in protecting the public has been confirmed by several public hearings including the Cluff Lake Board of Inquiry [18], the Ontario Royal Commission on Electric Power Planning [19] and a Select Committee of the Ontario Legislature [20].

### 5.2 Government support

The federal government has consistently supported the development of nuclear technology since the outset of the program in Canada. This support has included funding most of the research and development activities and partially financing the first large commercial units in each province. Just as important, the government has recognized the need for nuclear energy as an essential component of the national energy supply. The government of Ontario, the province with the largest nuclear commitment, has similarly supported the development of this energy source from the beginning.

Pickering units 1 and 2 started up in 1971 and 1972 respectively. From their inception, these units achieved high capacity factors, and the Pickering station, shown in Fig. 2, quickly became the leader in performance of any nuclear station in the world. With the jump in oil prices in 1973 and later the rise in coal prices, the economic return on the investment proved large. This return was shared by the equity partners (the federal and Ontario governments and Ontario Hydro) in proportion to the risk capital invested [21].

The Canadian federal government, certain provincial governments and the nuclear industry, are working together to produce an agreed policy on radioactive waste disposal, covering all types of waste, from uranium tailings to wastes from used CANDU fuel. The work on management of mine and mill tailings is described by Haw [22]. AECL has been authorized to expand its work on the management of wastes arising from nuclear-electric generation by undertaking a 10-year program, funded at \$30 million a year. The objective of this program is to establish that safe and permanent disposal of these wastes can be achieved by deep underground burial in stable rock formations, after suitable immobilization.

In the nuclear power field, the federal government has stressed its continuing requirement for a strong safeguards policy in the export market so that the benefits of peaceful nuclear energy can continue to be made available to those countries willing to forego possible applications to weapons. Canada, with many other countries, participated in the International Nuclear Fuel Cycle Evaluation (INFCE), whose purpose was to explore the best means of making nuclear energy available to supply the world's energy needs while at the same time minimizing the risk of nuclear weapons proliferation.

The possibility of federal support for provincial programs involving nuclear plants dedicated to the export of electricity is being examined. The federal government has encouraged, and participated in, consultation with governments, utilities and industry on this question.

## 6. EXPORT EXPERIENCE

Canada's entry into the export market, as with most of the world's nuclear reactor suppliers, was delayed until the establishment of full-scale reactor operating experience in the domestic market. That experience rapidly indicated CANDU's good performance and low costs. Thus, despite Canada's relatively late entry into world markets, CANDU has caused considerable interest in other countries, including even some with an existing nuclear program. The CANDU system has been particularly attractive to countries wishing to develop eventual self-sufficiency in nuclear-electric supply; the simplicity of the system opens the possibility of complete domestication of the entire industry.



The countries to which Canada is currently supplying major nuclear power projects, the Republic of Korea, Argentina and Romania, all have started to establish a nuclear-industry infrastructure capable of integrating the research, construction and operating phases as in Canada.

Canadian utilities have traditionally assumed the project management function themselves. With export sales, however, AECL provides those services requested by the customer, such as taking turnkey responsibility either for just the nuclear steam plant, as in Argentina, or for the complete nuclear power station, as in Korea. The turnkey approach is frequently used in the international marketplace for first-of-a kind projects in developing countries, but it is a little early yet to determine whether this is preferable to a more cooperative approach. In a growing number of cases, both established and new customers want to establish their own nuclear manufacturing and construction capability. Thus, technology-transfer agreements are playing a significant role in current negotiations.

The Canadian nuclear industry has gained valuable experience in operating in a foreign environment from its export projects. Canada's first large-scale CANDU export was negotiated with Argentina in 1974. This 600 MW(e) reactor, Cordoba, is scheduled for completion in 1983. Experience in the Republic of Korea indicates the very creditable construction times that can be achieved. The commercial contract for the supply of a standard single-unit 600 MW(e) CANDU nuclear generating station at Wolsung was signed in 1975. Due to delays introduced by subsequent negotiations on financing and safeguards, the supply contract did not become effective until 1976. First concrete was poured in November 1977. Build-up of the commissioning team began in December 1980. Progress with construction, and training of operators, maintenance personnel and management has been rapid, and the station is due to produce first power by the end of this year.

Agreements signed between AECL and Romenergo of Romania include the supply of engineering and procurement services for the first two 600 MW(e) CANDU nuclear steam plants and a licence to use CANDU technology in Romania for subsequent stations. Canadian manufacturers have been asked to tender on components for the first CANDU reactor committed by Romania. As Romenergo is the licensee, it is at the same time seeking the transfer of manufacturing technology to Romanian companies. Romania has scheduled its first two units for completion about 1986 and 1989, respectively. The timetable for future reactor commitments in the Romanian program will depend upon the country's early experience, the availability of resources, and its need for more electricity. Although Canadian supplies to the first and second Romanian reactors will be substantial, the Canadian manufacturing contribution will progressively decrease as Romanian capability expands.

In 1979, the organization of CANDU industries (OCI) was formed to provide a focal point for industrial cooperation between the private sector of the Canadian nuclear industry and purchasers of the CANDU system. OCI's membership includes all of the Canadian privately owned companies which provide the major manufactured components and services for the CANDU system. OCI functions separately from AECL, but collaborates closely in establishing CANDU facilities in other countries. This organization allows the experience gained by various industries in the Canadian nuclear program to be integrated into design, marketing and technology-transfer agreements.

In licensing the CANDU reactor design abroad, AECL usually retains (at least for the first units committed by the licensee) major control over the supply of the reactor core and associated equipment, such as reactivity mechanisms. While AECL owns design specifications and other documentation, the use of which it can licence, manufacturing technology resides with Canadian industry. In supporting AECL initiatives for design licensing in countries such as Mexico and Romania, Canadian companies have to decide whether to transfer their manufacturing technology to foreign firms by licence or by sale. Either way, of course, they wish to be assured of equipment supply for one or preferably two reactor units along with the transfer of their technology, and of securing the Canadian domestic market against the possibility of imports from licensees.

Canadian utilities, and Ontario Hydro in particular, have established a world-wide reputation for quality engineering, timely execution of construction projects, safe and reliable commissioning and operation of plants, and training of operating staff - all of which has resulted in a nuclear power plant performance record that is second to none. Ontario Hydro stands ready to share this expertise and experience with prospective CANDU owners.

## 7. FUTURE PROSPECTS

Beyond the 600 MW(e) units now being commissioned at Point Lepreau and Gentilly, the order books for Canadian nuclear manufacturers at present include work for 12 CANDU units for the Bruce B, Pickering B, and Darlington stations in Canada, a total of 8 500 MW(e) of new capacity. But in common with other countries, Canada has reduced its nuclear construction plans since the mid-1970s because of slow electricity demand growth. Forecasts made even five years ago now appear to be optimistic [23]. The slow growth in electricity demand, however, is a result of economic recession rather than a change in energy patterns [24]. Economic recovery can be expected to accelerate the demand for electricity, with the substitution of electricity for oil giving additional impetus. Thus, recent load-growth experience provides an inadequate basis for planning and the present slack period can be seen as an opportune time to ensure that electricity will be available to displace oil and to fuel the eventual economic recovery.

Last year, Ontario Premier William G. Davis unveiled an action program to create economic growth through the 1980s by a \$1.5 billion development strategy for Ontario [25]. One of the six major areas in the five-year program of the Board of Industrial Leadership and Development (BILD) is the development of nuclear energy to substitute for oil whenever practical, both as electricity and as process heat. Ontario Hydro is already a world leader in the application of nuclear process heat through its use of this energy source as the most economic for its Bruce Heavy Water Plants.

Development of the CANDU reactor to ratings of 950 MW(e) has now been completed to meet the requirements of those countries with electrical systems sufficiently developed to cope with such large blocks of generating capacity. This modification uses essentially the same components as the Bruce A reactor, the only extrapolation beyond current experience being a slight increase in the sizes of the fuelling-machine magazine and of the pumps [26]. Studies have shown that the same design can be readily extended to 1 250 MW(e) and beyond, at least to 2 000 MW(e). This exploration is being paralleled at the other end of the scale by the uprating of the small AECL research reactor SLOWPOKE to provide heating for large buildings or complexes [27].

For the longer term, the main objective of the research and development program is to provide assurance that the supply of nuclear fuels will be sufficient for the indefinite future.

With the current method of once-through fuelling (storing the used fuel intact) CANDU is already the most efficient reactor type with respect to uranium utilization. Those countries with CANDU reactors and assured access to enriched uranium could use low enriched uranium (around 1% uranium-235) to increase the fuel utilization by a further 30 per cent. At the present costs of uranium and enrichment services there would also be a slight reduction in the cost of electricity produced.

Any fuelling arrangements significantly more conserving of uranium will require fuel recycling, whether with CANDU or any other reactor type. For any reactor type the simplest form of fuel recycling involves returning to the reactor the plutonium recovered from used fuel with some fresh uranium. In the case of CANDU reactors the energy obtainable from a given amount of uranium can be doubled by these means.

Most countries basing their nuclear programs on LWRs are preparing for the eventual introduction of Fast Breeder Reactors (FBRs), as the only means available for a major extension of nuclear resources. Breeder reactors do not offer something for nothing, as suggested by the slogan that "they produce more fuel than they consume". Rather, the reason for serious interest in them is that they consume so little fuel that the cost of the product (electricity) is virtually independent of the cost of the feed material (uranium).

What is less widely appreciated is that CANDU reactors, if operated with thorium as a feed material, enjoy a similar ability to decouple product cost from feed cost. This circumstance is due to a combination of intrinsic nuclear properties and the intense emphasis on neutron economy throughout the design of this reactor.

To start up a CANDU reactor fuelled with thorium an initial inventory of fissile material must be provided. This could consist of plutonium recovered from used fuel from uranium-fuelled CANDUs or of enriched uranium. Either way, the amount needed per unit of installed electrical generating capacity is comparable to that needed as initial inventory for a fast breeder reactor. Thereafter, most of the fissile material in fuel fed to the reactor would be uranium-233 recovered from irradiated thorium discharged from the reactor. If small amounts of fissile material are needed to top up the supply of uranium-233 they could be obtained from the same sources as for the fissile inventory. In the very long term, any small amounts of fissile material needed might be obtained from the surplus produced by FBRs or by electronuclear breeding [28, 29].

Over the past years an experimental program has investigated what would be required of fuel reprocessing, radioactive fuel fabrication and fuel design for a CANDU reactor operating on a thorium fuel cycle. Further experience with pilot plants would be required before commitment of commercial plants, but enough has already been established to provide confidence that a thorium fuel cycle could be available when needed.

Thus, countries with CANDU stations do not face the necessity of introducing the new and challenging technology of FBRs, with their associated industrial infrastructure.

In a world where the future demand for nuclear fuels cannot be predicted accurately, a particularly valuable characteristic of the CANDU system is its ability to offer a complete spectrum of possible thorium fuel cycles. In principle, the fuel cycle can be optimized for minimum electricity costs in the light of actual costs for uranium and recycling services. The range of thorium fuel cycles and their cost implications are discussed by Critoph [30].

## 8. SUMMARY

Experience shows that the early fundamental choices of heavy water as moderator and natural uranium as fuel imposed a discipline on CANDU design that has led to outstanding performance. The integrated structure of the industry in Canada, incorporating development, design, supply, manufacturing and operation functions has reinforced this performance, and has provided a basis on which to continue development in the future. These same fundamental characteristics of the CANDU program open up prospects for

further improvements in economy and resource utilization through increased reactor size and the development of the thorium fuel cycle.

Nuclear energy, through fuel recycling, offers the prospect of a world no longer limited by energy supply. Only the CANDU system can already put a cost ceiling on this energy, because it is based on a commercially proven reactor that can remain viable indefinitely. CANDU reactors operating on a thorium fuel cycle could provide virtually inexhaustible electricity at a cost no more than 50 per cent higher (in constant dollars) than the present low cost of nuclear electricity in Canada -- in other words, for less than what many people in other countries are already paying for electricity.

#### REFERENCES

- [1] HOWLES, L.R., Nuclear Station Achievement, Nucl. Eng. Intl. 27, 324 (1982) 14.
- [2] HURST, D.G., WOOLSTON, J.E., Government, Utilities, Industry and Universities: Partners for Nuclear Development in Canada and Abroad, 4th U.N. Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva (1971), also Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-3988 (1971).
- [3] HOWIESON, J., The Canadian Nuclear Industry, 4th U.N. Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva (1971), also Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-3978 (1971).
- [4] LEWIS, W.B., Possibilities of Generating Atomic Electric Power at Competitive Rates, Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-178 (1955).
- [5] TATONE, O.S., PATHANIA, R.S., Steam Generator Tube Performance: Experience with Water Cooled Nuclear Power Reactors During 1980, Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-7689 (1982).
- [6] LeSURF, J.E., BARBER, D., SENNEMA, L.J., TAYLOR, G.F., Occupational Radiation Exposure at Canadian CANDU Nuclear Power Stations, paper no. IAEA-CN-42/147, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna (1982).
- [7] PERRYMAN, E.C.W., Pickering Pressure Tube Cracking Experience, Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-6059 (1976).
- [8] MAXWELL, R.B., SIMMONS, R.B.V., Integrated Standards Set by Canada, Nucl. Eng. Intl. 27 323 (1982) 28.
- [9] The Need for Change: The Legacy of TMI, Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island, US Government Printing Office, (1979).
- [10] HATCHER, S.R., Prospects of Future CANDU Fuel Cycles, Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-6334 (1979).
- [11] McCONNELL, L.G., et al., Economics of CANDU-PHW, Ontario Hydro Rep. NGD-10(1981), Toronto (1982).
- [12] McCONNELL, L.G., WOODHEAD, L.W., FANJOY, G.R., CANDU Operating Experience, paper no. IAEA-CN-42/68, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna (1982).

- [13] MENELEY, D.A., HANCOX, W.T., LOCA Consequence Predictions in a CANDU-PHWR, paper no. IAEA-CN-42/145, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna (1982).
- [14] BRADLEY, J.K., et al., Heavy Water Supply Program Planning, Nucler Conference (1981), Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-7507 (1981).
- [15] ASPIN, N., WILLIAMS, R.M., DAKERS, R.G., Canada's Uranium Future, Based on Forty Years of Development, paper no. IAEA-CN-42/142, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna (1982).
- [16] MacEWAN, J.R., NOTLEY, M.J.F., WOOD, J.C., GACESA, L., CANDU Fuel: Past, Present and Future, paper no. IAEA-CN-42/143, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna (1982).
- [17] SNELL, V.G., Safety of CANDU Nuclear Power Stations, Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-6329 (1979).
- [18] BAYDA, Justice E.D., The Cluff Lake Board of Inquiry Final Report (1978).
- [19] PORTER, A., The Report of the Royal Commission on Electric Power Planning (1980).
- [20] Select Committee on Ontario Hydro Affairs, Ontario Ministry of Government Services, Toronto (1980).
- [21] Nuclear Policy Review Background Papers, Energy, Mines and Resources Canada Rep. ER 81-2E (1980).
- [22] HAW, V.A., RITCEY, G.M., SKEAFF, J.M., DAVÉ, N., SILVER, M., Uranium Tailings Research at the Canada Centre for Mineral and Energy Technology, paper no. IAEA-CN-42/91, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna (1982).
- [23] FOSTER, J.S., RUSSELL, S.J., CANDU - Canadian Experience and Expectations with the Heavy Water Reactor, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power and its Fuel Cycle, Salzburg, (1977), also Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-5707 (1977).
- [24] MELVIN, J.G., Electricity and the Canadian Economy, Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-7501 (1981).
- [25] Building Ontario in the 1980's, Ontario Board of Industrial Leadership and Development (1981).
- [26] KNOX, R.A., A Larger Version of CANDU Design for World Markets, Nucl. Eng. Intl. 26 314 (1981) 43.
- [27] HILBORN, J.W., GLEN, J.S., Small Reactors for Low-Temperature Heating, Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-7438 (1981).
- [28] LEWIS, W.B., Large-Scale Nuclear Energy from the Thorium Cycle, 4th U.N. Int. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva (1971), also Atomic Energy of Canada Limited Rep. AECL-3980 (1971).
- [29] DONNELLY, J., HART, R.G., "Future Development in Heavy Water Reactors in Canada", Proc. of the 9th Japan, United Kingdom, Italy, Canada Exchange Meeting on Heavy Water Reactor Technology, Tokyo (1982).
- [30] CRITOPH, E., Alternative Breeder and Near-Breeder Systems, paper no. IAEA-CN-42/28, IAEA Int. Conf. on Nuclear Power Experience, Vienna (1982).

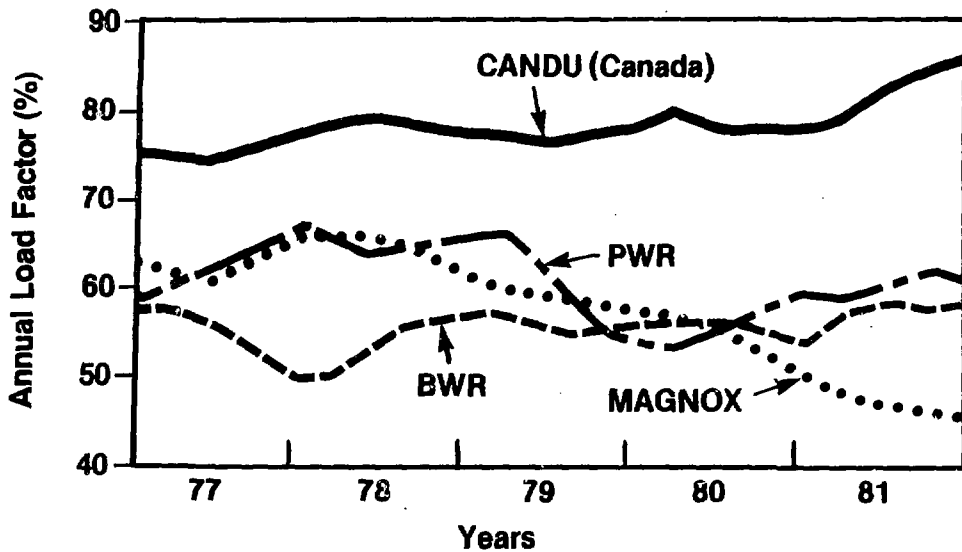


FIG. 1 COMPARISON OF AVERAGED ANNUAL LOAD FACTORS FOR REACTORS IN COMMERCIAL OPERATION WORLDWIDE, GREATER THAN 150 MW(E).



FIG. 2 VIEW OF THE PICKERING NUCLEAR GENERATING  
STATION IN MAY 1981.



**ISSN 0067 - 0367**

**To identify individual documents in the series  
we have assigned an AECL- number to each.**

**Please refer to the AECL- number when re-  
questing additional copies of this document**

**from**

**Scientific Document Distribution Office  
Atomic Energy of Canada Limited  
Chalk River, Ontario, Canada  
K0J 1J0**

**Price \$3.00 per copy**

**ISSN 0067 - 0367**

**Pour identifier les rapports individuels faisant  
partie de cette série nous avons assigné  
un numéro AECL- à chacun.**

**Veuillez faire mention du numéro AECL- si  
vous demandez d'autres exemplaires de ce  
rapport**

**au**

**Service de Distribution des Documents Officiels  
L'Énergie Atomique du Canada Limitée  
Chalk River, Ontario, Canada  
K0J 1J0**

**Prix \$3.00 par exemplaire**

**AECL-7761F**

**ATOMIC ENERGY  
OF CANADA LIMITED**



**L'ÉNERGIE ATOMIQUE  
DU CANADA LIMITÉE**

**LE SYSTÈME INTÉGRÉ CANDU  
– UNE PERSPECTIVE INTERNATIONALE**

**The Integrated CANDU System – An International Perspective**

**J. DONNELLY**

**Rapport IAEA-CN-42/36 présenté à la Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience avec  
l'énergie nucléaire, à Vienne, les 13-17 septembre 1982.**

*(Also obtainable in English as AECL-7761)*

**Chalk River Nuclear Laboratories**

**Laboratoires nucléaires de Chalk River**

**Chalk River, Ontario**

**September 1982 septembre**

Les rapports présentés par le Canada sont reproduits avec la permission de l'Agence internationale de l'énergie atomique et les auteurs. Ils comprennent :

IAEA-CN-42/36	AECL-7761F	IAEA-CN-42/145	AECL-7767F
IAEA-CN-42/68	AECL-7762F	IAEA-CN-42/146	AECL-7768F
IAEA-CN-42/141	AECL-7763F	IAEA-CN-42/147	AECL-7769F
IAEA-CN-42/91	AECL-7764F	IAEA-CN-42/28	AECL-7770F
IAEA-CN-42/142	AECL-7765F	IAEA-CN-42/47	AECL-7771F
IAEA-CN-42/143	AECL-7766F	IAEA-CN-42/148	AECL-7772F

L'ENERGIE ATOMIQUE DU CANADA LIMITEE

LE SYSTEME INTEGRE CANDU - UNE PERSPECTIVE INTERNATIONALE

James Donnelly  
L'Energie Atomique du Canada, Limitée  
Ottawa, Ontario  
Canada

Rapport IAEA-CN-42/36 présenté à la Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience avec l'énergie nucléaire, à Vienne, les 13-17 septembre 1982.

(Also obtainable in English as AECL-7761)

Laboratoires nucléaires de Chalk River  
Chalk River, Ontario  
1982 septembre

AECL-7761F

ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED

THE INTEGRATED CANDU SYSTEM - AN INTERNATIONAL PERSPECTIVE

by

J. Donnelly

ABSTRACT

The year 1982 marks the 35th anniversary of the start-up of Canada's first research and test reactor, NRX. The first power reactor has been operating successfully for the past 20 years. With 5 000 MW(e) of domestic capacity installed, Canada's major CANDU (CANada Deuterium Uranium) nuclear power program has a further 8 500 MW(e) under construction in Canada for completion by 1990 as well as committed offshore projects in Argentina, Korea and Romania.

The foundation of Canada's program continues to be the natural-uranium, heavy-water, CANDU reactor which is gaining international recognition for its safety, economy and reliability. Success of this unique reactor concept is due largely to an integrated approach to planning, engineering and operation by AECL, the utilities, manufacturers, fuel fabricators and all other sectors of the industry. It is this total integrated package, without ties to uranium enrichment, that Canada is able to offer to other countries with similar industrial capability.

Future plans call for building on those characteristics that have made CANDU so successful. Use of heavy water, on-power refuelling and constant attention to neutron economy ensure the most efficient fuel use of any once-through thermal reactor. When time for change comes, current assessments indicate that it will be possible to convert to more efficient advanced fuel cycles without major changes to the basic CANDU design. Attention is being focussed on the thorium fuel cycle to ensure an abundant and continuing supply of low cost energy for the long term.

AECL and its industrial and utility partners, with support from government, are also actively pursuing other nuclear projects to help Canada achieve its goal of reducing dependence on imported oil. These include mini-reactors for heating large buildings and use of nuclear plants' process heat for industrial and agricultural applications.

Canada's nuclear successes to date as well as achievement of future plans are possible only in a climate of federal and provincial government support, evidence of which is found in a recent agreement on waste management and in Ontario's industrial development projects that include an expanded nuclear-energy contribution.

(Also obtainable in English as AECL-7761)

Chalk River Nuclear Laboratories  
Chalk River, Ontario  
1982 September

AECL-7761F

## LE SYSTEME INTEGRE CANDU - UNE PERSPECTIVE INTERNATIONALE

## RESUME

L'année 1982 a marqué le 35<sup>e</sup> anniversaire de la mise en route du premier réacteur canadien de recherche et d'essai, le NRX. Le premier réacteur de puissance fonctionne de façon très satisfaisante depuis 20 ans. Le programme d'énergie nucléaire CANDU (CANada Deutérium Uranium) comprend une puissance installée de 5 000 MW(e), 8 500 MW(e) en cours de construction au Canada devant entrer en service d'ici 1990, de même que des projets engagés à l'étranger: en Argentine, en Corée et en Roumanie.

La base du programme canadien demeure le réacteur CANDU à uranium naturel et à eau lourde, dont la fiabilité, la sûreté et l'économie jouissent d'une réputation internationale croissante. Le succès de ce concept de réacteur exceptionnel est dû en grande partie à une approche intégrée appliquée à la planification, à l'ingénierie et à l'exploitation par l'EACL, les compagnies d'électricité, les constructeurs, les fabricants du combustible, et tous les autres secteurs de l'industrie. C'est cet ensemble intégré, qui ne dépend aucunement de l'enrichissement de l'uranium, que le Canada est à même d'offrir à d'autres pays disposant d'une capacité industrielle semblable.

Les plans pour l'avenir proposent de se baser sur les caractéristiques qui ont fait le succès du CANDU. L'emploi de l'eau lourde, le rechargement en marche et l'attention constante apportée à l'économie neutronique font que l'utilisation du combustible est la plus efficace de tous les réacteurs thermiques à passe unique. Quand ils seront requis, les évaluations actuelles indiquent qu'on pourra convertir le CANDU à des cycles de combustible plus avancés sans modification importante du concept de base. On envisage surtout le cycle du combustible au thorium afin de continuer d'assurer à long terme la fourniture d'énergie abondante et à bon marché.

L'EACL et ses partenaires de l'industrie et des compagnies d'électricité, avec l'aide du gouvernement, poursuivent activement

d'autres projets nucléaires afin de permettre au Canada d'arriver à réduire sa dépendance du pétrole importé. Ces projets comprennent les mini-réacteurs pour le chauffage de centres commerciaux et l'utilisation de la chaleur industrielle des centrales nucléaires pour des applications agricoles et industrielles.

Le succès canadien à ce jour, de même que la réalisation des plans d'avenir, ne sont possibles que dans un climat de coopération entre les organismes fédéraux et provinciaux, qui s'est manifesté dans le récent accord sur la gestion des déchets et dans les projets de développement industriel de l'Ontario qui prévoit l'expansion de l'apport de l'énergie nucléaire.

## 1. INTRODUCTION

L'alternative principale au réacteur à eau légère (LWR) pour la production d'électricité nucléaire est le réacteur à eau lourde pressurisée (PHWR). Seul, parmi les divers concepts PHWR, le réacteur CANDU (CANada Deutérium Uranium) a fait ses preuves commercialement, à grande échelle. Les centrales nucléaires CANDU ont régulièrement atteint des performances exceptionnelles. On peut attribuer le succès du concept CANDU à l'étroite collaboration entre les organismes de recherche et développement, les concepteurs, les exploitants et les industries de construction, de fabrication et d'approvisionnement depuis le début jusqu'à aujourd'hui. L'approche intégrée était essentielle pour qu'un pays disposant de ressources technologiques modestes, tel que le Canada, puisse développer lui-même une filière nucléaire exceptionnelle. La nature modulaire et la simplicité de construction du système CANDU actuel, et sa capacité de faire face à tous les besoins futurs prévisibles par le seul développement du cycle de combustible, ont permis de concentrer les efforts sur un type unique de réacteur. Que le Canada ait pu développer le CANDU sans avoir recours à des installations de fabrication hautement spécialisées, ou spécialement conçues, indique que cette technologie est susceptible d'être adoptée sans difficulté par d'autres pays dont le développement est assez avancé. Le système CANDU, qui combine la possibilité d'être construit au pays même et l'utilisation de l'uranium naturel comme combustible, offrent à ces pays la perspective de suffire rapidement à leurs besoins et de réaliser une viabilité à long terme.

Cette année marque le 35<sup>e</sup> anniversaire de la mise en route du premier réacteur de recherche et d'essai du Canada, le NRX. Il y a vingt ans, la première centrale nucléaire canadienne, munie du réacteur de démonstration NDP, a été mise en exploitation et, il y a un peu plus de dix ans, la première centrale nucléaire commerciale, Pickering A, a commencé à produire de l'électricité. Ce développement relativement lent jusqu'à la production commerciale d'électricité nucléaire, comparé aux programmes plus ambitieux d'autres pays, a permis de résoudre au cours de la phase de développement les inévitables problèmes associés à une technologie nouvelle. Il a également permis de consolider les caractéristiques du concept et les critères de sûreté du public, et d'assortir de façon étroite le concept aux besoins d'exploitation du client. Cette approche intégrée a été poursuivie tout au long de l'histoire

de la filière CANDU et a donné un système de production d'énergie nucléaire qui, une fois introduit, s'est rapidement révélé le premier au monde sur le plan de la fiabilité de la performance. Les centrales nucléaires du Canada, disposant d'une puissance installée de 5 000 MW(e), ont fonctionné avec des facteurs de charge annuels moyens de plus de 86% en 1981 et, à la fin de l'année, elles avaient produit depuis leur mise en route plus de 250 TWh d'électricité [1]. La figure 1 compare la performance du CANDU au cours des cinq dernières années avec celles des autres types de réacteurs commerciaux.

Cette communication examine la structure de l'industrie canadienne et les relations étroites entre les divers secteurs participant au développement du CANDU. Elle traite également de l'impact des caractéristiques particulières de la filière CANDU sur la sûreté et la disponibilité des réacteurs, l'utilisation du combustible et les facteurs économiques globaux.

Les plans pour l'avenir reposent sur les caractéristiques qui ont assuré le succès des réacteurs CANDU. Lorsque le moment sera venu, on pourra passer à des cycles de combustible avancés plus efficaces sans qu'on ait à introduire un type de réacteur entièrement nouveau, tel que le réacteur surgénérateur rapide (FBR). L'utilisation de cycles de combustible au thorium dans les réacteurs CANDU peut assurer indéfiniment la fourniture d'une énergie abondante et à bon marché.

## 2. ORGANISATION INTEGREE

L'intégration, dans un programme cohérent, des concepteurs, des organismes de recherche et de développement, du groupe de développement des réacteurs, des exploitants potentiels, des fabricants d'éléments et des industries de fourniture du combustible et d'eau lourde a été un facteur-clé du succès de cette entreprise au Canada, pays dont les ressources industrielles sont relativement limitées.

Depuis 1952, quand il fut décidé d'appliquer la technologie des réacteurs à eau lourde à ce qui deviendrait la filière CANDU, cette organisation intégrée est devenue une industrie de classe mondiale. Cette décision, bien que prise surtout par le Gouvernement fédéral du Canada, agissant par l'entremise de l'Energie Atomique du Canada, Limitée (EACL), fut des mieux reçues par les compagnies d'électricité canadiennes qui avaient déjà pris conscience de la nécessité d'une nouvelle source d'énergie. Tous les aspects de la recherche et du développement furent contrôlés ou coordonnés par un seul organisme, avec un apport mutuel considérable venant du Canada comme de l'étranger. L'EACL fut chargée de développer les premiers réacteurs de recherche et de puissance, une grande partie de la technologie du cycle de combustible, et des applications industrielles et médicales de la technologie nucléaire. Dès le tout début de ce développement, plusieurs compagnies d'électricité canadienne, et en premier lieu Ontario Hydro, l'une des plus importantes compagnies d'électricité de l'Amérique du nord, participèrent à l'entreprise grâce à des programmes de développement



communs, à l'affectation de personnel technique, et à des consultations aux niveaux élevés. Les fabricants, les universités et les consultants canadiens participèrent également à cette association étroite de développeurs et de compagnies d'électricité [2].

Ontario Hydro, ayant exploité les sites hydroélectriques économiquement disponibles et n'ayant pas accès à des combustibles fossiles à bon marché, a été le principal acheteur des réacteurs CANDU. Sa participation a été bénéfique, mettant l'accent sur le côté pratique sans sacrifier l'économie fondamentale du concept. Les politiques et procédures d'étude et d'approvisionnement en usage pour les centrales électriques classiques ont été naturellement étendues aux programmes d'énergie nucléaire; il en est résulté une structure diversifiée de fournisseurs hautement qualifiés. Une telle structure a eu l'avantage d'encourager une vaste participation de l'industrie au programme nucléaire national [3].

Tout au long du développement des réacteurs CANDU, les décisions de conception ont fait appel aux compétences techniques, économiques et de manufacturières des divers secteurs industriels. Dans la plupart des cas, ces décisions se sont révélées être bien fondées. Comme pour tout développement technique important, des difficultés sont survenues, mais les caractéristiques de base du concept ont minimisé les périodes d'arrêt des réacteurs et les dépenses qui en résultent.

La participation des plus importants organismes canadiens de recherche nucléaire, à savoir les Laboratoires nucléaires de Chalk River et l'Etablissement de recherches nucléaires de Whiteshell, est tout aussi importante pour résoudre les difficultés qui surviennent au cours de l'exploitation d'une centrale qu'au cours du développement d'un nouveau concept. Pour toutes les technologies importantes, il est essentiel de pouvoir diagnostiquer correctement les difficultés qui surviennent inévitablement et de trouver des solutions efficaces.

Le résultat de la participation de ces nombreux partenaires, à un concept ayant fait si nettement ses preuves, est que le Canada, pays dont les ressources en main d'oeuvre et la capacité industrielle ne sont que modestes, est devenu l'un des rares pays disposant de leur propre technologie de production d'énergie nucléaire commerciale.

Plusieurs facteurs ont permis au Canada de prendre place parmi les chefs de file mondiaux de l'énergie nucléaire. D'avoir été un des premiers pays à développer un réacteur a attiré une main d'oeuvre qualifiée et spécialisée. Le Canada a créé ses premiers importants laboratoires de recherche nucléaire à Chalk River en 1945. L'esprit de coopération régnant entre l'EACL, en tant que responsable du projet, Ontario Hydro, en tant que compagnie d'électricité et l'industrie manufacturière n'a été égalé par aucun autre programme au monde. De plus, au lieu de dissimuler ses ressources de développement relativement limitées sur divers concepts de réacteurs, le Canada s'est concentré sur un seul concept particulier. Aucune de ces conditions n'aurait garanti le succès,

toutefois, sans l'appui vigoureux et sans défaillance du Gouvernement fédéral et des Gouvernements provinciaux.

Au Canada, l'approche intégrée s'étend à l'ensemble de l'infrastructure nucléaire, depuis l'extraction et le raffinage de l'uranium et la production d'eau lourde, jusqu'à la gestion des déchets nucléaires.

La technologie spécifiquement nucléaire de chacun des éléments de la filière CANDU a été transférée à des sociétés canadiennes disposant des compétences et des installations appropriées. De cette façon, on a incorporé la technologie industrielle existante aux systèmes nucléaires tout en minimisant le coût des investissements nécessaires pour des usines spécialisées. En même temps, les sociétés existantes ont bénéficié des nouveaux produits, des nouvelles technologies et des nouvelles normes de qualité associées à la filière CANDU. Cette vaste base industrielle, unique en son genre pour un important fournisseur de réacteurs, a permis à un grand nombre d'entreprises techniques d'apporter leur contribution dans le cadre d'une structure bien coordonnée.

En incorporant les laboratoires nucléaires du pays à l'infrastructure du développement commercial du Canada, l'industrie nucléaire était assurée d'une base technique très développée pour l'étude des réacteurs, la production du combustible, la fabrication des éléments, la production de l'eau lourde et les règlements. Cet appui s'étend aux phases commerciales du développement et en particulier à l'exploitation des centrales, évitant ainsi bien des problèmes qui se sont produits ailleurs, où les données détaillées venant des centrales en exploitation ne reçoivent pas toujours le traitement technique approprié en temps voulu, ou bien, où des problèmes fondamentaux sont ignorés.

On a adopté une approche intégrée semblable pour les projets CANDU à l'étranger. Tous les principaux secteurs participant au programme canadien (recherche, étude, approvisionnement, fabrication et exploitation) ont contribué aux projets CANDU pour l'exportation, fournissant au client étranger un modèle d'organisation pour établir leurs programmes. Ces dispositions offrent une façon efficace de transférer directement la technologie nécessaire entre les organismes homologues.

### 3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA FILIERE CANDU

Les caractéristiques techniques fondamentales du réacteur CANDU sont bien connues: un concept à tubes de force refroidis par eau lourde, comportant un modérateur (eau lourde) séparé, contenu dans une cuve, et utilisant l'uranium naturel comme combustible.

On a décidé d'utiliser l'eau lourde comme modérateur dès le début du programme de développement et cette décision reposait sur des principes physiques fondamentaux [4]. L'emploi de l'eau lourde, combiné à une économie neutronique poussée, a permis d'utiliser l'uranium naturel comme combustible. Le choix d'un concept à tubes de force, au lieu d'un concept à cuve pressurisée,

facilitait le rechargement en marche et contribuait donc à l'économie neutronique en enlevant efficacement les produits de fission parasites.

L'adoption de l'eau lourde, de l'uranium naturel et des tubes de force plutôt que de l'eau légère, de l'uranium enrichi et des cuves pressurisées a procuré des avantages techniques et économiques d'une grande portée pour le programme CANDU.

### 3.1 L'eau lourde

Bien que le coût de l'eau lourde soit élevé, une fois le réacteur en service l'appoint nécessaire est modeste. Ainsi, le coût de l'eau lourde est inclus dans les dépenses en capital et il n'est donc pas soumis à l'inflation. En fait, loin de se déprécier, la charge d'eau lourde est récupérable à la fin de la durée de vie utile du réacteur. (Avec les modérateurs constitués d'eau légère, c'est le combustible qui est enrichi et par conséquent coûteux; il faut payer pour enrichir le combustible tout au long de la vie du réacteur et, par conséquent, les coûts sont directement affectés par l'inflation).

La nécessité de conserver l'eau lourde coûteuse, a amené à considérer son confinement dès le début du programme. Les développeurs du programme CANDU ont dû découvrir très tôt pourquoi les vannes fuyaient et, ce faisant, ils ont développé des vannes plus étanches. Ils ont dû chercher pourquoi les joints de pompe perdent leur efficacité et, ce faisant, ils ont développé des joints de pompe plus fiables. Ils ont dû trouver pourquoi les tubes de générateurs de vapeur deviennent défectueux et, ce faisant, ils ont mis au point des types de générateurs de vapeur qui réduisent les vibrations et l'usure au minimum et des spécifications pour les conditions chimiques de l'eau qui réduisent au minimum les problèmes dus à la corrosion. De ce fait, les taux de défaillance des tubes de générateurs de vapeur CANDU sont environ le centième de ceux des réacteurs à eau légère [5]. L'inquiétude au sujet des fuites d'eau lourde potentielles a également provoqué le développement de techniques rapides et fiables d'essais non-destructifs des composants. Ces diverses mesures n'ont pas seulement permis d'économiser l'eau lourde, comme on le désirait, mais elles ont également aidé à améliorer la disponibilité des centrales et à réduire l'exposition des travailleurs aux rayonnements [6].

De plus, le fait d'avoir veillé à la qualité des composants pour prévenir les fuites d'eau lourde, a contribué à la sûreté d'au moins deux façons. Premièrement, très peu de défaillances de composants se sont produites. Deuxièmement, le système de détection des fuites d'eau lourde prévient bien à l'avance que des difficultés de sûreté pourraient se produire. Par exemple, la seule défaillance sérieuse d'un composant qui se soit jamais produite dans les centrales CANDU en exploitation, à savoir la fissuration des tubes de force des réacteurs Pickering 3 et 4, a été détectée bien avant qu'elle ne puisse devenir dangereuse [7].

La qualité des composants nucléaires canadiens est encore renforcée par un système d'assurance de la qualité qui a attiré

l'attention du monde entier. Les nouvelles normes d'assurance de la qualité constituent une série cohérente dans laquelle le programme est adapté à la complexité d'une tâche donnée, couvrant tous les aspects de la gestion, de l'étude, de la fabrication, de l'inspection et des essais du composant [8].

D'autres caractéristiques de l'étude des systèmes initialement adoptées pour conserver l'eau lourde se sont révélées, depuis, être précieuses du point de vue de la sûreté en permettant d'éviter quelques-unes des difficultés rencontrées par d'autres pays. Par exemple, lors de l'accident de Three Miles Island, lorsqu'une surpression s'est produite dans le coeur, le caloporteur primaire s'est écoulé par une vanne de sûreté dans un réservoir à basse pression. La vanne de sûreté ne s'étant pas refermée, la pression est montée dans le réservoir de détente et a provoqué l'éclatement d'un disque de rupture et le caloporteur primaire s'est répandu dans l'enceinte de confinement [9]. Dans les réacteurs CANDU, s'il y a une surpression dans le système de caloportage primaire, l'eau lourde du caloporteur s'écoule par l'intermédiaire d'une vanne de sûreté dans un réservoir faisant partie d'un circuit fermé et pouvant supporter la pression du système primaire et, de là, on peut pomper à nouveau l'eau lourde vers le système. Ainsi, si la vanne de sûreté ne se referme pas, la pression de l'ensemble du système est égalisée et il ne se produit aucune fuite de caloporteur dans l'enceinte de confinement.

### 3.2 Uranium naturel

L'emploi de l'uranium naturel obligeait à réaliser la plus rigoureuse économie neutronique afin d'obtenir un taux de combustion économique. Ainsi, il a fallu examiner chaque aspect de la conception pour considérer son influence sur ce taux. De ce fait, le réacteur CANDU a la meilleure utilisation de l'uranium de tous les systèmes commercialement utilisables développés jusqu'à présent, et, ceci, avec une marge d'environ 20% [10].

Le coût actuel<sup>1</sup> du combustible des réacteurs d'Ontario Hydro est d'environ 2.5 m\$/kWh. On peut le comparer avec des coûts estimés de 5.5 m\$/kWh pour les LWR et de 17 m\$/kWh pour les centrales au charbon qu'on exploiterait dans des conditions similaires dans le même système<sup>2</sup> [11]. Même si le coût du combustible CANDU devait suivre le taux courant d'inflation, il est si faible par rapport aux coûts fixes que le coût de l'électricité produite par les réacteurs CANDU est essentiellement à l'abri de l'inflation. On ne peut en dire autant des réacteurs utilisant l'uranium enrichi comme combustible.

Le soin apporté à l'économie neutronique a attiré l'attention sur les quelques éléments ayant, naturellement, une faible section efficace de capture de neutrons thermiques. On a rigoureusement exclu tous les autres des canaux de combustible CANDU qui,

---

<sup>1</sup>Dans cette communication, les coûts sont donnés en dollars canadiens.

<sup>2</sup>Coûts de l'uranium et du charbon utilisés par Ontario Hydro.

contrairement aux LWR, ne comportent aucun mécanisme ne s'y rapportant pas. Le combustible CANDU consiste essentiellement en dioxyde d'uranium contenu dans une gaine en alliage de zirconium ne contenant que des traces de carbone et de béryllium utilisés pour assembler les grappes de combustible. L'utilisation de ces matériaux complétée par une connaissance approfondie de leurs propriétés dans les applications nucléaires, a permis d'éviter les problèmes de corrosion.

La combinaison de l'eau lourde et de l'uranium naturel a permis d'avoir un concept optimum de coeur de réacteur moins compact que celui des LWR. Par conséquent, il y a davantage d'espace entre les canaux de combustible pour les mécanismes de contrôle et d'arrêt, ce qui permet d'avoir recours à des dispositifs mécaniques et chimiques. De plus, le combustible à base d'uranium naturel fonctionne avec un minimum de réactivité excédentaire, ce qui simplifie les besoins en mécanismes d'arrêt et de contrôle. De même, le concept a des exigences moins rigoureuses pour le contrôle des pics localisés de production de chaleur.

L'uranium naturel est une ressource qu'on trouve dans de nombreux pays ne disposant d'aucune autre source énergétique en abondance. La fabrication du combustible CANDU est simple et, par conséquent, relativement bon marché. L'emploi de l'uranium évite les complications de contrôle de la criticité au cours de la manutention avant ou après l'irradiation; on peut placer les grappes de combustible irradié très près l'une de l'autre, dans les bassins de stockage, sans danger.

### 3.3 Tubes de force

A l'origine, on avait adopté un concept à tubes de force de façon à ce que, en passant des petits réacteurs du début aux réacteurs commerciaux plus puissants, on ne soit pas limité par la capacité industrielle du Canada de construire des cuves de réacteur pressurisées de grandes dimensions.

Le concept CANDU qui en a résulté, est fondamentalement modulaire et utilise des composants d'une conception standard ayant fait leurs preuves. La puissance des réacteurs peut, en principe, être augmentée en augmentant le nombre de tubes. Du fait de la conception modulaire, on a pu procéder à des essais en grandeur naturelle à chaque étape du développement du réacteur, dans les conditions réalistes de son fonctionnement.

Ce n'est que plus tard qu'on s'est aperçu que la possibilité de recharger le réacteur en cours de marche, opération facilitée par le concept à tubes de force, donnait au système CANDU un avantage de disponibilité inhérent de l'ordre de 6% sur les réacteurs rechargés à l'arrêt [12]. Ceci, et d'autres raisons, ont contribué aux facteurs d'utilisation remarquablement élevés réalisés par les réacteurs CANDU au Canada, par rapport à tous les autres réacteurs de puissance de plus de 150 MW(e) dans le monde (fig. 1). Lorsqu'il s'agit d'installation nécessitant de gros capitaux, telles que les centrales nucléaires, un bon facteur d'utilisation produit des coûts d'électricité avantageux.

Une très importante caractéristique de sûreté découlant directement du choix du concept à tubes de force est que le combustible ne fondrait pas, même dans le cas d'un accident de perte de caloporteur et de défaillance du système de refroidissement d'urgence [13]. Dans ce cas très improbable, la chaleur serait transférée par radiation au modérateur à basse température et la température du combustible n'excéderait en aucun cas le point de fusion. Ainsi, bien qu'un important dégagement de produits de fission dans l'enceinte de confinement pourrait se produire, le coeur du réacteur garderait sa géométrie. De plus, la possibilité, dans un réacteur à tubes de force, de déceler et d'enlever le combustible défectueux peu après que le défaut se soit produit, réduit la contamination radioactive du circuit primaire.

Le concept à tubes de force se prête facilement au remplacement des composants, bien que ceci n'ait été nécessaire que dans très peu de cas, pour rectifier un défaut de fabrication. Le dernier cas s'est produit dans le réacteur Bruce 2 où une fuite a été immédiatement détectée. On a remplacé le tube de force et le réacteur a été remis en service en moins d'un mois. Il n'y a aucune raison pour que tous les principaux composants d'une centrale CANDU, y compris les tubes de force, ne puissent pas être remplacés, prolongeant ainsi la vie de la centrale bien au-delà des trente ans sur lesquels on base actuellement les évaluations économiques [7].

#### 4. INDUSTRIE MANUFACTURIERE

Les caractéristiques techniques du concept CANDU qu'on vient de décrire ont formé une base solide sur laquelle on a établi une industrie nucléaire nationale indépendante. C'est cette capacité et la performance exceptionnelle des centrales nucléaires canadiennes qui retiennent l'attention du monde entier puisque tout pays ayant atteint un niveau de compétence industrielle modeste peut aisément adopter la même approche. Du point de vue de la construction et de la fabrication, on peut diviser le système, grosso modo, en production d'eau lourde, industrie du combustible, et fabrication des composants du système de production de vapeur nucléaire.

##### 4.1 Production d'eau lourde

L'un des quelques domaines de fabrication spécialisée est celui de la production de l'eau lourde. Du point de vue complexité et compétence, les procédés de production de l'eau lourde sont très semblables à ceux de l'industrie pétrochimique ou de l'industrie pétrolière.

La production de l'eau lourde, de même que le reste de l'industrie nucléaire canadienne, a bénéficié d'un programme de développement considérable requérant une étroite collaboration entre l'EACL, Ontario Hydro, les fabricants de composants et les constructeurs des centrales. On a acquis une expérience considérable au cours des stades de développement et l'expérience d'exploitation qui a suivi a reflété les progrès impressionnants de la productivité des usines d'eau lourde canadiennes. De ce fait, le Canada dispose d'une capacité éprouvée de production d'eau lourde à

grande échelle, de même que les moyens de concevoir et de construire des usines d'eau lourde basées sur la technologie du pays. La production de l'eau lourde est très accessible aux pays ayant l'expérience d'exploitation d'usines chimiques. Puisque la quantité d'appoint nécessaire à une centrale CANDU est très faible, une production modeste suffit si le stock initial est fourni par un fournisseur établi. De cette manière, on peut rapidement parvenir à s'affranchir des producteurs étrangers, si on le désire.

#### 4.2 Industrie du combustible

Un élément fondamental et unique en son genre de la structure nucléaire intégrée du Canada est l'industrie du combustible qui comprend l'extraction et le raffinage de l'uranium et la fabrication du combustible. Les sociétés privées et les entreprises d'Etat qui participent à ces travaux apportent une importante contribution non seulement au programme nucléaire canadien mais à celui du monde entier.

Le procédé de fabrication du combustible est plus simple que bien des opérations industrielles et n'exige pas de capitaux énormes. Les grappes de combustible sont petites, afin de faciliter le rechargement en cours de marche du réacteur à tubes de force, si bien que le nombre de grappes fabriquées est considérable et on a eu recours aux techniques de production de masse et de contrôle de la qualité, ce qui a minimisé les coûts. Les immobilisations estimées sont de l'ordre de seulement 61 000 dollars par travailleur (dollars 1981) et le combustible produit ne coûte qu'une fraction de celui des autres filières de réacteurs commerciaux.

On a recours à des procédés de fabrication classiques tout au long de la fabrication du combustible CANDU, et à des systèmes de soudage et de brasage spécialement conçus pour l'assemblage final des éléments combustibles et leur mise en grappes. Les trois fabricants canadiens ont fabriqué bien au-delà de 300 000 grappes de combustible, et le taux de défaillance en service a été de moins de 0.2% de toutes les grappes irradiées. La plupart des acheteurs étrangers de réacteurs CANDU ont exprimé l'intention de fabriquer leur propre combustible nucléaire.

Le secteur des approvisionnements en combustible est décrit par Aspin, et al. [15] et le concept et la performance du combustible CANDU est décrit par MacEwan, et al. [16].

#### 4.3 Composants nucléaires

L'industrie canadienne des composants nucléaires regroupe de nombreuses entreprises qui ont produit une vaste gamme de composants de haute qualité ayant fait leurs preuves et contribué à la réalisation d'une filière de réacteur compétitive qui a eu beaucoup de succès. Les fournisseurs ont été associés de très près au programme CANDU dès le début, souvent à l'aide de contrats de développement passés avec l'organisme de recherche, le concepteur du réacteur, ou la compagnie d'électricité.

Aucun des procédés de fabrication employés dans la construction d'un réacteur CANDU ne diffère fondamentalement de ceux utilisés dans d'autres applications industrielles. Un bon exemple est la construction soudée de la cuve, l'un des plus importants composants du réacteur CANDU. La cuve d'un réacteur standard de 600 MW(e) est faite de plaques d'acier inoxydable de 28 mm d'épaisseur et sa fabrication est à la portée d'une industrie métallurgique normale.

L'intérêt, pour un fabricant, de se lancer dans le marché des composants nucléaires est la combinaison de nouvelles occasions de vente et des avantages découlant de l'adoption de normes de qualité également applicables à la production d'équipement pour d'autres industries à technologie avancée. Au Canada, le réacteur CANDU a non seulement fourni de l'énergie à un coût intéressant mais il a contribué au développement des ressources naturelles, humaines et industrielles.

#### 4.4 Participation des compagnies d'électricité

Une fois la phase d'exploitation atteinte, une centrale électronucléaire exige un soutien technique considérable pour fonctionner de façon sûre et économique. On a créé une gamme de services de soutien qui sont intégrés, systématiquement appliqués et flexibles, pour faire face aux problèmes qui pourraient survenir, pour effectuer les essais et les contrôles périodiques, pour renseigner continuellement les organismes d'étude et de développement et pour effectuer les recherches fondamentales nécessaires au développement de systèmes, composants et matériaux nucléaires.

Au Canada, la contribution des compagnies d'électricité à cette approche intégrée a été importante, Ontario Hydro, Hydro-Québec et la Commission électrique du Nouveau-Brunswick ayant toutes participé au programme nucléaire. Par exemple, Ontario Hydro dispose d'importantes installations de formation d'opérateurs, comprenant des simulateurs de réacteurs informatisés, qui sont à la disposition d'autres compagnies d'électricité au Canada et à l'étranger se préparant à utiliser le réacteur CANDU. Ontario Hydro fournit aussi les services de personnel-clé expérimenté pour les phases de construction, de mise en service et d'exploitation d'une centrale, de même que pour la formation du personnel d'autres compagnies d'électricité.

### 5. DISPOSITIONS INSTITUTIONNELLES

#### 5.1 Octroi des permis et contrôles réglementaires

Au Canada, la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) réglemente l'emploi des matières et des installations nucléaires. A ce titre, la CCEA établit les normes, évalue les demandes de permis, émet les permis et inspecte les installations. La Commission finance également certains programmes de recherche liés à ses fonctions de contrôle, parfois en coopération avec



d'autres organismes comme l'Agence internationale de l'énergie atomique.

L'approche fondamentale adoptée par la CCEA en ce qui concerne les questions de réglementation est que le détenteur du permis est le premier responsable de la sûreté. Le rôle de la CCEA est d'assurer que cette responsabilité est assumée. Il incombe donc au détenteur du permis de prouver à la Commission que son équipement et ses procédures satisfont aux critères de sûreté du public établis par la Commission; il doit justifier le choix d'un site, de l'étude, du mode de construction et d'exploitation de ses centrales. Snell [17] a décrit plus en détail l'approche de la CCEA. L'efficacité du système CANDU et les contrôles réglementaires pour la protection du public ont été confirmées par plusieurs auditions publiques tenues, entre autres par la Commission d'enquête de Cluff Lake [18] la Commission royale d'enquête de l'Ontario sur la planification de l'électricité [19] et un comité spécial de la Législature ontarienne [20].

## 5.2 Soutien du Gouvernement

Depuis le début du programme canadien, le Gouvernement fédéral a toujours soutenu le développement de la technologie nucléaire. Ce soutien a pris la forme du financement de la plupart des travaux de recherche et développement et, du financement partiel des premières grandes centrales nucléaires dans chaque province. Le fait que le Gouvernement considère que l'énergie nucléaire est un élément important des ressources énergétiques nationales est également important. Le Gouvernement de l'Ontario, la province la plus engagée dans le nucléaire, a aussi appuyé le développement de cette source d'énergie dès le début.

Les réacteurs Pickering 1 et 2 furent mis en service en 1971 et 1972, respectivement. Ces réacteurs obtinrent immédiatement des facteurs d'utilisation élevés, et la centrale de Pickering (voir Figure 1) devint rapidement la première centrale nucléaire du monde au point de vue performance. Avec la montée en flèche du prix du pétrole en 1973 et, plus tard, avec l'accroissement du prix du charbon, les bénéfices financiers qu'on a retiré de cette centrale ont été très considérables. Le Gouvernement fédéral, le Gouvernement de l'Ontario et Ontario Hydro ont participé à ces bénéfices au prorata de leurs investissements [21].

Le Gouvernement fédéral canadien, certaines provinces et l'industrie nucléaire collaborent pour établir une politique commune d'évacuation des déchets radioactifs s'appliquant à tous les types de déchets, depuis les déchets miniers jusqu'aux déchets de combustible CANDU irradié. Haw décrit les travaux sur la gestion des déchets miniers et de raffinage [22]. L'EACL a été autorisée à étendre ses travaux sur la gestion des déchets provenant de la production nucléaire de l'électricité en entreprenant un programme de 10 ans avec un budget annuel de 30 millions de dollars. L'objectif de ce programme est d'établir la possibilité d'évacuer les déchets de façon sûre et permanente en les enfouissant profondément dans des formations de roche stable, après les avoir convenablement immobilisés dans une gangue.

Dans le domaine de l'énergie nucléaire, le Gouvernement fédéral a insisté sur son adhérence à une politique stricte de garanties nucléaires pour les ventes à l'étranger afin que les avantages de l'énergie nucléaire continuent à être accessibles aux nations consentant à renoncer aux applications militaires possibles. Le Canada a participé avec de nombreux autres pays, à l'évaluation internationale du cycle de combustible nucléaire (INFCE) qui avait pour but de rechercher les meilleurs moyens d'utiliser l'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins énergétiques du monde tout en réduisant le risque de la prolifération des armes nucléaires.

Le Gouvernement fédéral étudie la possibilité de subventionner des programmes provinciaux de construction de centrales nucléaires destinées à produire de l'électricité pour l'exportation. Le Gouvernement fédéral a encouragé les consultations entre les provinces, les compagnies d'électricité et l'industrie à ce sujet et il a lui-même participé à ces consultations.

#### 6. EXPERIENCE EN EXPORTATION

Le Canada, comme la plupart des fournisseurs mondiaux de réacteurs nucléaires, a attendu d'avoir acquis une expérience d'exploitation des réacteurs à une échelle commerciale dans le pays-même avant de rechercher des marchés à l'étranger. Cette expérience a rapidement fait connaître les excellentes performances et le coût modéré des réacteurs CANDU. Ainsi, bien que le Canada ait fait une entrée sur le marché international relativement tardive, les réacteurs CANDU ont été l'objet d'un intérêt considérable dans d'autres pays, y compris même certains disposant déjà d'un programme nucléaire. Le système CANDU a été particulièrement intéressant pour les pays désirant devenir un jour indépendants sur le plan de la production de l'énergie électronucléaire; la simplicité du système permet d'envisager l'établissement d'industries nucléaires entièrement nationales.

Les pays auxquels le Canada fournit actuellement d'importants programmes nucléaires, la République de Corée, l'Argentine et la Roumanie, ont tous commencé à mettre en place l'infrastructure d'une industrie nucléaire capable d'intégrer les phases de recherche, de construction et d'exploitation, comme le fait le Canada.

Les compagnies d'électricité canadiennes ont traditionnellement assumé elles-mêmes la gestion des projets. Par contre, à l'étranger, l'EACL fournit au client les services qu'il demande, comme par exemple la fourniture de la chaudière nucléaire seulement, comme en Argentine, ou d'une centrale nucléaire complète comme en Corée. L'approche "clé en main" est souvent employée sur le marché de l'exportation pour le premier projet construit dans un pays en développement mais il est encore trop tôt pour déterminer si une approche plus coopérative est préférable. Dans des cas de plus en plus nombreux, les clients anciens et nouveaux désirent créer leur propre capacité de fabrication et de construction

nucléaires. Les accords de transfert de technologie jouent donc un rôle important dans les négociations en cours.

Les projets d'exportation ont permis à l'industrie nucléaire canadienne d'acquérir une expérience précieuse dans un milieu étranger. La première importante exportation de réacteur CANDU fut négociée avec l'Argentine en 1974. L'achèvement de ce réacteur de 600 MW(e), Cordoba, est prévu pour 1983. L'expérience en République de Corée indique qu'on peut réaliser des temps de construction très honorables. Le contrat commercial pour la construction d'une centrale à un réacteur standard CANDU de 600 MW(e) à Wolsung fut signé en 1975. A la suite de délais résultant de négociations ultérieures sur le financement et les garanties nucléaires, le contrat de fourniture n'est entré en vigueur qu'en 1976 et la première coulée de béton a eu lieu en novembre 1977. La mise sur pied de l'équipe de mise en service a commencé en décembre 1980. Les progrès accomplis en construction, en formation des opérateurs, du personnel de maintenance et des cadres ont été rapides et on prévoit que la centrale produira sa première électricité à la fin de cette année.

Les accords passés entre l'EACL et Romenergo, en Roumanie, prévoient la fourniture de l'ingénierie et des services d'approvisionnement pour les deux premières chaudières nucléaires CANDU de 600 MW(e) et un permis d'exploitation de la technologie CANDU en Roumanie pour les centrales ultérieures. On a demandé aux fabricants canadiens de faire des soumissions pour les composants du premier réacteur à construire en Roumanie. Romenergo, détenant le permis d'exploitation, désire en même temps que la technologie de fabrication soit transférée à des sociétés roumaines. La Roumanie prévoit que les deux premiers réacteurs seront achevés vers 1986 et 1989, respectivement. La construction des autres réacteurs futurs dépendra de l'expérience qu'aura acquis ce pays, de ses ressources et de ses besoins en électricité. Bien que les fournitures canadiennes pour les deux premiers réacteurs roumains seront considérables, elles diminueront progressivement au fur et à mesure que la capacité de la Roumanie augmentera.

En 1979, l'Organisation des industries CANDU (OCI) fut formée pour centraliser la coopération industrielle entre le secteur privé de l'industrie nucléaire canadienne et les acheteurs du système CANDU. Les membres de l'OCI sont tous des sociétés privées canadiennes qui fournissent des composants fabriqués et des services pour le système CANDU. L'OCI est un organisme indépendant de l'EACL mais coopère étroitement avec elle pour établir des installations CANDU dans d'autres pays. Cet organisme permet d'intégrer l'expérience acquise par diverses industries, grâce à leur participation au programme nucléaire canadien, à l'étude, à la commercialisation et aux accords de transfert de technologie.

Lorsque l'EACL octroie des permis de construction de réacteurs CANDU à l'étranger, elle conserve d'ordinaire (du moins pour les premiers réacteurs construits par le détenteur de la licence) le principal contrôle sur la fourniture du coeur du réacteur et de l'équipement connexe, comme les mécanismes de réactivité. Bien que l'EACL soit propriétaire des spécifications du concept et des autres

documentations, dont elle peut accorder le droit d'exploitation, la technologie de fabrication appartient à l'industrie canadienne. Lorsqu'elle appuie les efforts de l'EACL pour l'octroi de permis à l'étranger, comme au Mexique ou à la Roumanie, les sociétés canadiennes ont à décider si elles préfèrent transférer leur technologie de fabrication à des sociétés étrangères par voie de licence ou de vente. Dans l'un ou l'autre cas, bien sûr, elles veulent être assurées de pouvoir fournir l'équipement nécessaire à un ou, de préférence, deux réacteurs en même temps que le transfert de leur technologie et à se garantir, en ce qui concerne le marché canadien, contre la possibilité d'importations venant de détenteurs étrangers de licences.

Les compagnies d'électricité canadiennes, Ontario Hydro en particulier, ont acquis une réputation mondiale grâce à la qualité de leur ingénierie, à l'exécution de leurs travaux en temps voulu, à la mise en service et à l'exploitation sûres et fiables de leurs centrales et à la formation adéquate de leur personnel d'exploitation. C'est un fait que se sont toutes ces qualités qui ont permis aux réacteurs CANDU d'avoir une performance record sans égal dans le monde. Ontario Hydro est prête à fournir ses connaissances et son expérience aux futurs propriétaires de centrales CANDU.

## 7. PERSPECTIVES D'AVENIR

Au delà des réacteurs de 600 MW(e) dont la mise en service est en cours à Point Lepreau et à Gentilly, les commandes de réacteurs au Canada se chiffrent maintenant à 12 réacteurs CANDU destinés aux centrales Bruce B, Pickering B et Darlington, soit une capacité nouvelle totale de 8 500 MW(e). Mais, comme les autres pays, le Canada a réduit ses prévisions de construction de centrales nucléaires depuis le milieu des années 1970 à cause du ralentissement de la demande d'électricité. Les prévisions faites il y a tout juste cinq ans, semblent aujourd'hui optimistes [23]. Le ralentissement de la demande d'électricité, toutefois, résulte de la récession de l'économie plutôt que d'une modification des habitudes sur le plan de l'énergie [24]. Le rétablissement de l'économie aura certainement pour conséquence d'accélérer la demande d'électricité augmentée encore par le remplacement du pétrole par l'électricité. Ainsi, on ne peut baser la planification sur l'expérience de l'accroissement de la charge récente et on peut considérer la période creuse actuelle comme le bon moment pour faire en sorte qu'on disposera de l'électricité nécessaire pour remplacer le pétrole et pour favoriser l'éventuel redressement économique.

L'an dernier, le Premier ministre de l'Ontario, M. William G. Davis, a annoncé un programme de mesures destinées à promouvoir la croissance économique au cours de la décennie 1980 grâce à une stratégie de développement en Ontario devant se chiffrer à 1,5 milliards de dollars. L'un des six principaux objectifs du plan quinquennal du BILD (Board of Industrial Leadership and Development) est le développement de l'énergie nucléaire pour remplacer le pétrole le plus possible comme source de chaleur industrielle et d'électricité. Ontario Hydro est déjà l'un des

chefs de file mondiaux dans l'application de la chaleur industrielle nucléaire grâce à l'emploi de cette énergie très économique pour son usine d'eau lourde de Bruce.

Le développement du réacteur CANDU jusqu'à une puissance de 950 MW(e) maintenant achevé va permettre de satisfaire aux besoins des pays disposant d'un réseau électrique suffisamment développé pour absorber des centrales d'une puissance aussi élevée. Cette variante fait essentiellement appel aux mêmes composants que le réacteur Bruce A, la seule extrapolation inusitée étant un léger accroissement des dimensions du magasin de la machine de chargement du combustible et des pompes [26]. Selon les études, on peut facilement accroître la puissance du concept jusqu'à 1 200 MW(e) et au-delà, au moins jusqu'à 2 000 MW(e). A l'autre extrémité de l'échelle, on poursuit des recherches similaires afin d'augmenter la puissance du petit réacteur de recherche de l'EACL, SLOWPOKE, pour assurer le chauffage de grands bâtiments ou de groupes de bâtiments [27].

A long terme, le principal objectif du programme de recherche et développement est de faire en sorte que l'approvisionnement en combustibles nucléaires soit suffisant pour un avenir lointain.

Avec la méthode de chargement à passe unique actuellement utilisée (le combustible épuisé étant stocké sans traitement) le réacteur CANDU est déjà le plus efficace en ce qui concerne l'utilisation de l'uranium. Les pays disposant de réacteurs CANDU et d'un accès sûr à de l'uranium enrichi pourraient utiliser de l'uranium légèrement enrichi (environ 1% d'uranium-235) afin d'accroître l'utilisation du combustible d'environ 30%. Au coût actuel de l'uranium et de l'enrichissement le coût de l'électricité produite serait également légèrement réduit.

Tout cycle de combustible dont l'utilisation de l'uranium serait considérablement plus efficace exigerait le recyclage du combustible, que ce soit pour CANDU ou d'autres filières. Pour un type quelconque de réacteur, la forme de recyclage la plus simple consiste à recharger le réacteur avec le plutonium récupéré dans le combustible épuisé, additionné d'uranium frais. Dans le cas des réacteurs CANDU, on peut ainsi doubler l'énergie qu'on retire d'une quantité d'uranium donnée.

La plupart des pays dont le programme nucléaire repose sur les réacteurs à eau légère se préparent à l'introduction éventuelle des réacteurs surgénérateurs rapides (FBR), comme étant le seul moyen dont on dispose pour augmenter considérablement les ressources nucléaires. Les réacteurs surgénérateurs ne donnent rien pour rien, comme le porte à croire le slogan "Ils produisent plus de combustible qu'ils n'en consomment"; mais la raison pour laquelle on s'y intéresse autant est qu'ils consomment si peu de combustible que le coût de l'électricité produite est virtuellement indépendant du coût de l'uranium.

Ce qu'on sait moins, c'est que les réacteurs CANDU, si on utilise le thorium comme combustible, sont également capables de rendre le coût de l'électricité indépendant du coût du combustible.

Ceci est dû à la combinaison de propriétés nucléaires intrinsèques et de l'attention portée à l'économie neutronique au cours de l'étude du réacteur.

Pour mettre en marche un réacteur CANDU alimenté au thorium on doit fournir un stock original de matière fissible. Ceci peut être du plutonium récupéré dans du combustible CANDU irradié, ou dans de l'uranium enrichi. Dans l'un ou l'autre cas, la quantité nécessaire par unité de puissance électrique installée se compare au stock initial nécessaire à un surgénérateur rapide. Ensuite, la plus grande partie de la matière fissile utilisée pour alimenter le réacteur serait de l'uranium-233 provenant du thorium irradié déchargé du réacteur. Si l'on a besoin de petites quantités de matière fissible pour compléter le stock d'uranium-233, on peut les obtenir des mêmes sources que le stock fissile. A très long terme, les petites quantités de matière fissile nécessaires pourraient provenir soit du surplus produit par le FBR ou par surgénération électronucléaire [28,29].

Au cours des dernières années, on a consacré un programme expérimental à l'étude de ce qu'un réacteur CANDU utilisant le cycle au thorium exigerait en termes de retraitement, de fabrication de combustible radioactif et d'études du combustible. Il faudrait davantage d'expérience avec des centrales-pilotes avant de passer aux centrales commerciales, mais on en sait déjà assez pour être assuré de disposer d'un cycle de combustible au thorium quand il deviendra nécessaire.

Ainsi, les pays disposant de centrales CANDU n'ont pas à envisager l'adoption de la nouvelle et difficile technologie des réacteurs FBR, ni de l'infrastructure industrielle qu'ils exigent.

Dans un monde où on ne peut prédire avec précision la demande future en combustibles nucléaires, une caractéristique particulièrement précieuse de la filière CANDU est sa capacité d'offrir une gamme complète de cycles au thorium possibles. En principe, on peut optimiser le cycle de combustible pour obtenir des coûts de l'électricité minimaux à la lumière des coûts actuels de l'uranium et des services de recyclage. Critoph passe en revue la gamme des cycles de combustible au thorium et leur impact financier [30].

## 8. RESUME

L'expérience révèle que les premiers choix de base de l'eau lourde comme modérateur et de l'uranium naturel comme combustible ont imposé une certaine discipline au concept CANDU qui a résulté en des performances exceptionnelles. La structure intégrée de l'industrie nucléaire au Canada, incorporant les fonctions de développement, d'étude, d'approvisionnement, de fabrication et d'exploitation a encore amélioré ces performances et a fourni une base au développement futur. Ces mêmes caractéristiques fondamentales du programme CANDU ouvrent des perspectives pour l'amélioration de l'économie et de l'utilisation des ressources

grâce à l'augmentation de la taille du réacteur et le développement du cycle de combustible au thorium.

L'énergie nucléaire, grâce au recyclage, ouvre la perspective d'un monde non astreint aux contraintes qu'imposent des ressources énergétiques limitées. Seul le système CANDU peut d'ores et déjà limiter le coût de cette énergie, puisqu'il repose sur un réacteur qui a fait ses preuves en exploitation commerciale et qui restera viable indéfiniment. Les réacteurs CANDU utilisant un cycle de combustible au thorium pourraient fournir une quantité d'électricité virtuellement illimitée à un prix qui ne dépasserait pas plus de 50% (en dollars constants) le bas prix actuel de l'électricité nucléaire au Canada - en d'autres termes, à un meilleur prix que celui déjà payé par beaucoup de gens dans les autres pays.

#### REFERENCES

- [1] HOWLES, L.R., Nuclear Station Achievement, Nucl. Eng. Intl. 27, 324 (1982) 14.
- [2] HURST, D.G., WOOLSTON, J.E., Gouvernement, compagnies d'électricité, industries et universités: partenaires dans le développement nucléaire au Canada et à l'étranger, 4<sup>e</sup> conférence internationale des Nations unies sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique, Genève (1971). Egalement rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-3988 (1971).
- [3] HOWIESON, J., L'industrie nucléaire canadienne, 4<sup>e</sup> conférence internationale des Nations unies sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique, Genève (1971). Egalement rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-3978 (1971).
- [4] LEWIS, W.B., Possibilité de production de l'électricité nucléaire à des prix compétitifs, Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-178 (1955).
- [5] TATONE, O.S., PATHANIA, R.S., Performance des tubes de générateurs de vapeur: l'expérience des réacteurs de puissance refroidis à l'eau en 1980. Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-7689 (1982).
- [6] LeSURF, J.E., BARBER, D., SENNEMA, L.J., TAYLOR, G.F., Exposition professionnelle aux rayonnements dans les centrales électronucléaires CANDU. Communication n° IAEA-CN-42/147, Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience acquise dans le domaine nucléoénergétique, Vienne (1982).
- [7] PERRYMAN, E.C.W., L'expérience sur la fissuration des tubes de force de Pickering, Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-6059 (1976).
- [8] MAXWELL, R.B., SIMMONS, R.B.V., Integrated Standards Set by Canada, Nucl. Eng. Intl. 27 323 (1982) 28.
- [9] The Need for Change: The Legacy of TMI, Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island, US Government Printing Office, (1979).
- [10] HATCHER, S.R., Perspectives des cycles de combustible CANDU de l'avenir, Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-6334 (1979).

- [11] McCONNELL, L.G., et al., Economics of CANDU-PHW, Ontario Hydro Rep. NGD-10(1981), Toronto (1982).
- [12] McCONNELL, L.G., WOODHEAD, L.W., FANJOY, G.R., L'expérience d'exploitation des centrales CANDU, Communication n° IAEA-CN-42/68, Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience acquise dans le domaine nucléoénergétique, Vienne (1982).
- [13] MENELEY, D.A., HANCOX, W.T., Prédiction des conséquences d'un LOCA dans les CANDU-PHWR, Communication n° IAEA-CN-42/145, Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience acquise dans le domaine nucléoénergétique, Vienne (1982).
- [14] BRADLEY, J.K., et autres, Planification du programme des ressources en eau lourde, Conférence Nucléaire (1981), Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-7507 (1981).
- [15] ASPIN, N., WILLIAMS, R.M., DAKERS, R.G., L'avenir de l'uranium du Canada après quarante années de développement, Communication n° IAEA-CN-42/142, Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience acquise dans le domaine nucléoénergétique, Vienne (1982).
- [16] MacEWAN, J.R., NOTLEY, M.J.F., WOOD, J.C., GACESA, M., Le combustible CANDU: le passé, le présent, l'avenir, Communication n° IAEA-CN-42/143, Conférence internationale de l'EACL sur l'expérience acquise dans le domaine nucléoénergétique, Vienne (1982).
- [17] SNELL, V.G., La sûreté des centrales électronucléaires CANDU, Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL- 6329 (1979).
- [18] BAYDA, Justice E.D., The Cluff Lake Board of Inquiry Final Report (1978).
- [19] PORTER, A., The Report of the Royal Commission on Electric Power Planning (1980).
- [20] Select Committee on Ontario Hydro Affairs, Ontario Ministry of Government Services, Toronto (1980).
- [21] Vue générale de la participation financière du Gouvernement fédéral au programme nucléaire canadien. Energie, Mines et Ressources, Canada ER 81-2E (1980).
- [22] HAW, V.A., RITCEY, G.M., SKEAFF, J.M., DAVE, N., SILVER, M., La recherche sur les déchets provenant de l'extraction de l'uranium au Centre de technologie de l'énergie et des minéraux du Canada, Communication n° IAEA-CN-42/91, Conférence internationale de l'EACL sur l'expérience acquise dans le domaine nucléoénergétique, Vienne (1982).
- [23] FOSTER, J.S., RUSSELL, S.J., CANDU - l'expérience et les espérances canadiennes avec les réacteurs à eau lourde, Conférence internationale de l'AIEA sur l'énergie nucléaire et son cycle de combustible, Salzbourg (1977). Egalement rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-5707 (1977).
- [24] MELVIN, J.G., L'électricité et l'économie canadienne, Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-7501 (1981).
- [25] Building Ontario in the 1980's, Ontario Board of Industrial Leadership and Development (1981).
- [26] KNOX, R.A., A Larger Version of CANDU Design for World Markets, Nucl. Eng. Intl. 26 314 (1981) 43.



- [27] HILBORN, J.W., GLEN, J.S., Des petits réacteurs pour le chauffage à basse température, Rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-7438 (1981).
- [28] LEWIS, W.B., La production d'énergie nucléaire à grande échelle avec le cycle au thorium. 4<sup>e</sup> Conférence internationale sur les utilisations pacifiques de l'énergie atomique, Genève (1971). Egalement rapport de l'Energie Atomique du Canada, Limitée, AECL-3980 (1971).
- [29] DONNELLY, J., HART, R.G., Future Development in Heavy Water Reactors in Canada", Proc. of the 9th Japan, United Kingdom Italy, Canada Exchange Meeting on Heavy Water Reactor Technology, Tokyo (1982).
- [30] CRITOPH, E., Systèmes surgénérateurs et quasi-surgénérateurs, Communication n° IAEA-CN-42/28, Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience acquise dans le domaine nucléoénergétique, Vienne (1982).

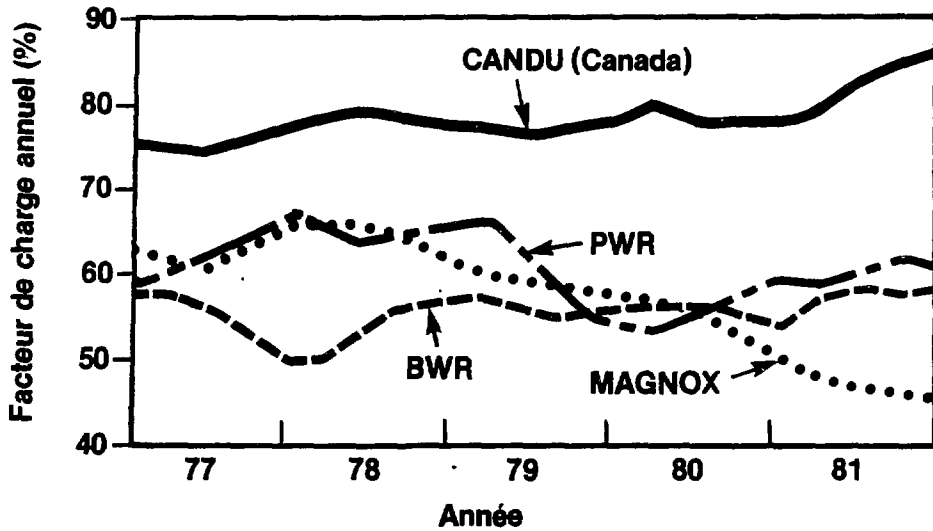


FIG. 1 COMPARAISON DES FACTEURS ANNUELS D'UTILISATION DES REACTEURS DE PLUS DE 150 MW(e) EN SERVICE COMMERCIAL DANS LE MONDE

FIGURES

FIG. 1 Comparaison des facteurs annuels d'utilisation des réacteurs de plus de 150 MW(e) en service commercial dans le monde.

FIG. 2 Vue de la centrale nucléaire de Pickering en mai 1981.



FIG. 2 VUE DE LA CENTRALE NUCLEAIRE DE PICKERING  
EN MAI 1981

**ISSN 0067 - 0367**

To identify individual documents in the series  
we have assigned an AECL- number to each.

Please refer to the AECL- number when re-  
questing additional copies of this document

from

**Scientific Document Distribution Office  
Atomic Energy of Canada Limited  
Chalk River, Ontario, Canada  
K0J 1J0**

**Price \$3.00 per copy**

**ISSN 0067 - 0367**

*Pour identifier les rapports individuels faisant  
partie de cette série nous avons assigné  
un numéro AECL- à chacun.*

*Veuillez faire mention du numéro AECL- si  
vous demandez d'autres exemplaires de ce  
rapport*

au

**Service de Distribution des Documents Officiels  
L'Énergie Atomique du Canada Limitée  
Chalk River, Ontario, Canada  
K0J 1J0**

**Prix \$3.00 par exemplaire**