L'AIDE-MÉMOIRE

DU NUCLÉAIRE AU CANADA

2019

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE 3

Message du président 4
Sommaire exécutif 5
Historique du nucléaire au Canada 6

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DANS LE MONDE ET AU CANADA 9

L'énergie nucléaire dans le monde 10
Les réacteurs nucléaires dans le monde 11
L'énergie nucléaire au Canada 13
Sources d'électricité par province 15
La centrale nucléaire de Bruce 16
La centrale nucléaire de Darlington 17
La centrale nucléaire de Pickering 18
La centrale nucléaire de Point Lepreau 19
La réfection des centrales nucléaires du Canada 20

L'ENVIRONNEMENT ET L'ÉCONOMIE 21

L'énergie nucléaire et l'environnement 22
Tendances rétrospectives des émissions de CO_2 dans le monde 23
Les objectifs du Canada en matière de changements climatiques 24
Le nucléaire et les objectifs de développement durable de l'ONU 25
L'empreinte terrestre du nucléaire 27
Le nucléaire et l'économie canadienne 28
La production d'uranium 29
Le coût de l'énergie nucléaire 30

L'URANIUM ET LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES 31

L'uranium 32
Conversion de l'uranium en combustible pour les réacteurs CANDU 33
Les méthodes d'exploitation minière de l'uranium 34
L'industrie minière de l'uranium au Canada 35
La puissance de l'uranium 36
Le fonctionnement de la fission nucléaire 37
Les réacteurs nucléaires 38
Les réacteurs CANDU 39
Les réacteurs CANDU à l'échelle mondiale 40
Types de réacteurs de puissance exploités dans le monde 42
Les réacteurs de prochaine génération et les combustibles avancés 43
Les petits réacteurs modulaires 44

LES DÉCHETS RADIOACTIFS ET LES MOYENS DE TRANSPORT 45

Les déchets radioactifs 46
Le combustible irradié 47
La gestion du combustible irradié 48
La société de gestion des déchets nucléaires 49
Dépôt géologique en profondeur 50
Le transport 51
Types d'emballage 52

SCIENCE ET TECHNOLOGIE NUCLÉAIRES 53

Science et technologie nucléaires au Canada 54
Radioisotopes et demi-vies 55
La médecine nucléaire 56
Radiothérapie et stérilisation 57
Irradiation des aliments 58
Applications agricoles des rayonnements 59
Inspections industrielles 60
Jauges et traceurs industriels 61
Dessalement nucléaire 62
Moyens de déplacement fonctionnant à l'énergie nucléaire 63
Les biens de consommation 64
Autres utilisations de la technologie nucléaire 65
Les centres de recherche nucléaire 66
La recherche sur la fusion thermonucléaire 68

RAYONNEMENT, SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET RÉGLEMENTATION 69

Le rayonnement 70
Le rayonnement de fond 71
Mesure et effets du rayonnement 72
Les effets du rayonnement sur le corps 73
La sûreté nucléaire 74
La réglementation nucléaire 75
Le rôle de la CCSN 76
La sécurité sur les chantiers 77
La cybersécurité 78

LES RESSOURCES 79

Testez vos connaissances 80
Établissements postsecondaires canadiens dotés d'un programme de recherche nucléaire 81
Autres ressources 82
À propos de l'ANC 83
Participez à la conversation parlons nucléaire 84

L'information figurant dans la présente publication se fonde sur des données disponibles en octobre 2018.

SOMMAIRE

MESSAGE DU PRÉSIDENT

Je suis honoré de vous présenter l'édition 2019 de l'Aide-mémoire du nucléaire au Canada.

Au fil des années, cet aide-mémoire est devenu un ouvrage de référence notoire sur l'énergie nucléaire au Canada comme à l'étranger.

Le nucléaire est essentiel dans la lutte contre le changement climatique. Au Canada, l'énergie nucléaire, en remplaçant l'usage de combustibles fossiles, permet d'éviter 80 millions de tonnes d'émissions de CO_2 par année, ce qui équivaut à retirer 15 millions de véhicules de la circulation.

Pourtant, le nucléaire a bien plus d'atouts que le simple fait de fournir de l'énergie propre, sûre, fiable et abordable : il joue un rôle dans la médecine, l'industrie, la sécurité des aliments et de l'eau, la recherche et l'innovation, et bien plus encore.

Des millions de vies sont sauvées grâce à la médecine nucléaire. Les radioisotopes produits dans les réacteurs CANDU du Canada sont utilisés pour diagnostiquer et traiter diverses maladies, dont le cancer.

L'industrie nucléaire canadienne soutient 60 000 emplois directs et indirects dans tout le pays. Ce sont des hommes et des femmes qui exploitent l'uranium, conçoivent des réacteurs, produisent de l'électricité et participent au progrès des connaissances scientifiques et technologiques du Canada.

J'espère que l'édition 2019 de cet aide-mémoire vous sera utile et je vous encourage à le diffuser largement.

John Barrett

Président et chef de la direction
Association nucléaire canadienne

SOMMAIRE EXÉCUTIF

L'édition 2019 de l'Aide-mémoire du nucléaire au Canada déborde de renseignements à jour sur le nucléaire au Canada et partout dans le monde. Voici un aperçu des informations que vous y trouverez.

- Il y a 453 réacteurs nucléaires actuellement en exploitation dans le monde. Le Canada abrite 19 réacteurs de puissance qui assurent 14,6 % de la production nationale d'électricité.
- Au total, 57 réacteurs sont en cours de construction dans le monde, principalement dans les économies émergentes comme la Chine et l'Inde. De plus, 150 réacteurs ont été commandés ou sont en cours de planification, tandis qu'il est envisagé d'en construire 335 autres.
- La production d'énergie nucléaire permet de réduire les émissions de CO_2 dans le monde, qui ont atteint un niveau record en 2017, soit 32,5 milliards de tonnes.
- Le nucléaire est la source d'énergie la plus efficace par rapport à la superficie utilisée. Il est au moins 15 fois plus efficace que les sources renouvelables telles que les énergies éolienne et solaire.
- L'industrie nucléaire injecte plus de six milliards de dollars par an dans l'économie canadienne. Au total, elle emploie 60 000 Canadiens, directement ou indirectement.
- Le Canada est un chef de file mondial en matière d'approvisionnement en uranium. La majeure partie de l'extraction minière d'uranium canadien s'effectue dans le nord de la Saskatchewan, qui renferme les plus riches gisements à forte teneur en uranium au monde.
- Le Canada a fait œuvre de pionnier en concevant l'un des premiers réacteurs nucléaires, le CANDU. Quarante-six réacteurs CANDU, ou issus de la technologie CANDU, sont actuellement en exploitation dans le monde.
- La technologie nucléaire est largement employée dans la médecine et dans l'industrie. Au Canada, plus de 1,5 million d'examens diagnostiques et 15 000 traitements de radiothérapie sont effectués chaque année.
- L'industrie nucléaire canadienne est l'une des industries les plus sûres et les plus rigoureusement réglementées au monde.

HISTORIQUE DU NUCLÉAIRE AU CANADA

1908 Le prix Nobel de chimie est décerné à Ernest Rutherford pour son travail sur la décroissance radioactive réalisé à l'Université McGill de Montréal (Québec).

1930 Gilbert A. Labine découvre le premier gisement d'uranium au Canada, au Grand lac de l'Ours (Territoires du Nord-Ouest).

1940 George C. Laurence conçoit l'un des premiers réacteurs nucléaires au monde, au Conseil national de recherches Canada (CNRC) à Ottawa (Ontario).

1944 Le CNRC commence à construire la première installation de recherche nucléaire à Chalk River (Ontario).

1945 La pile expérimentale d'énergie zéro (ZEEP – Zero Energy Experimental Pile) fait du Canada le deuxième pays à contrôler la réaction de fission nucléaire

1946 La Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) est créée en tant qu'organisme fédéral de réglementation du secteur nucléaire au Canada.

1947 Le réacteur national de recherche expérimental (NRX – National Research Experimental), le plus puissant du monde, entre en service à Chalk River.

1951 Deux équipes distinctes dirigées par Harold E. Johns et Roy Errington construisent les deux premiers appareils de radiothérapie au cobalt 60 du monde. Le premier traitement contre le cancer par radiothérapie externe est administré à London (Ontario). Onze jours plus tard, on administre le second à Saskatoon (Saskatchewan).

1952 Énergie atomique du Canada Limitée (EACL) est créée en tant que société d'État fédérale.

1952 Le réacteur NRX subit des dommages au cœur lors d'un accident – il s'agit du premier accident du genre. Quatorze mois plus tard, on procède au redémarrage du réacteur qui a été décontaminé et reconstruit.

1954 Wilfrid B. Lewis amorce le développement du réacteur nucléaire CANDU en collaboration avec EACL, Ontario Hydro et la Compagnie générale électrique du Canada.

1957 Le réacteur national de recherche universel (NRU – National Research Universal) entre en service à Chalk River.

1962 Le réacteur nucléaire de démonstration (NPD – Nuclear Power Demonstration), premier réacteur canadien de puissance et prototype des réacteurs CANDU, entre en exploitation à Rolphton (Ontario). Il a une puissance de 20 MWe.

1964 EACL met au point le premier stérilisateur commercial au cobalt 60 pour les aliments et les fournitures médicales.

1967 La centrale Douglas Point, première centrale nucléaire canadienne de calibre commercial, entre en exploitation à Kincardine (Ontario). Elle a une puissance de 220 MWe.

1972 Le premier réacteur CANDU à l'extérieur du Canada entre en exploitation à la centrale Rajasthan 1 (Inde).

1973 Les quatre réacteurs de la centrale Pickering A entrent en exploitation. Leur puissance totalise 2 060 MWe, ce qui en fait la centrale nucléaire la plus puissante du monde à l'époque.

1982 Les centrales Pointe Lepreau (Nouveau-Brunswick) et Gentilly 2 (Québec) entrent en exploitation. Elles ont chacune une puissance de 635 MWe.

1994 Le prix Nobel de physique est décerné à Bertram N. Brockhouse pour ses recherches sur la diffusion neutronique menées à Chalk River.

1996 La Chine acquiert deux réacteurs CANDU. À l'époque, il s'agit du plus important contrat commercial passé entre deux pays.

2000 La Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN), créée en vertu de la Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires, remplace la CCEA en tant qu'organisme de réglementation nucléaire au Canada.

2002 La Loi sur les déchets de combustible nucléaire est adoptée. Elle prévoit la création de la Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN). Le gouvernement fédéral approuvera en 2007 la méthode de gestion adaptative progressive proposée par la SGDN pour le stockage à long terme du combustible nucléaire irradié.

2011 Les services commerciaux d'EACL sont acquis par CANDU Énergie Inc., filiale appartenant en propriété exclusive à SNC-Lavalin. EACL demeure une société d'État fédérale.

2012 Deux réacteurs nucléaires de la centrale de Bruce A sont remis en service après avoir été rénovés. La centrale nucléaire de Bruce devient alors la plus grande centrale nucléaire en exploitation au monde.

2015 Le prix Nobel de physique est décerné à Arthur B. McDonald de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (Ontario) pour avoir démontré que les neutrinos possèdent une masse.

2015 Canadian National Energy Alliance (CNEA), organisme du secteur privé, s'engage par contrat à gérer et à exploiter l'EACL et la renomme Laboratoires Nucléaires Canadiens (LNC).

2016 SNC-Lavalin annonce la création d'une coentreprise avec la China National Nuclear Corporation (CNNC) et la compagnie d'électricité Shanghai Electric Group Company Limited visant à construire des réacteurs CANDU à cycle de combustible avancé en Chine et à l'étranger.

2016 L'Ontario commence la réfection de 10 de ses 19 réacteurs nucléaires – le plus gros projet en matière d'énergie propre en Amérique du Nord.

2018 Arrêt définitif du réacteur national de recherche universel (NRU), en service depuis plus de 60 ans.

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

DANS LE MONDE ET AU CANADA

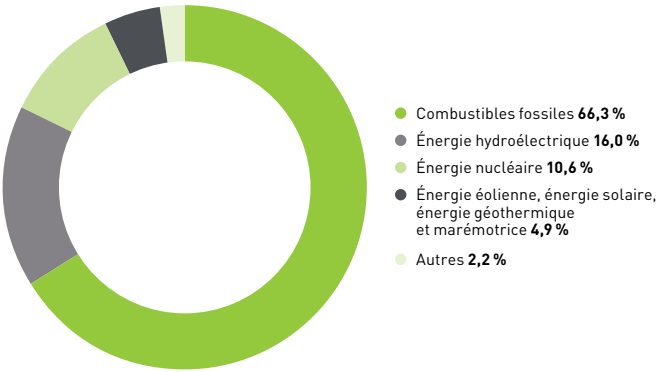
L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DANS LE MONDE

En 2017, le nucléaire assurait 10,6 % de la production mondiale d'électricité. Elle est la principale source de production d'énergie à faible émission de carbone dans le monde après l'énergie hydroélectrique.

Avec une part de 66,7 %, les combustibles fossiles sont de loin la source de production d'électricité la plus largement utilisée. Le charbon représente dans ce chiffre environ les deux tiers, et le gaz naturel environ le tiers.

Les sources d'énergie renouvelables, autres que l'énergie hydroélectrique, dont l'éolien, le solaire, le géothermique et le marémoteur, assurent ensemble 4,9 % de la production mondiale d'électricité.

SOURCES D'ÉLECTRICITÉ DANS LE MONDE EN 2017



SOURCE • U.S. Energy Information Administration. « International Energy Statistics », 2018. https://www.eia.gov/beta/international/data/browser/.

LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES DANS LE MONDE

Il y a 453 réacteurs nucléaires actuellement exploitables dans le monde, qui ont une capacité utile de production d'environ 400 GWe.

- Ce nombre comprend les 42 réacteurs japonais qui ont été mis hors service peu après l'accident de Fukushima survenu en 2011. Depuis octobre 2018, neuf réacteurs ont été raccordés au réseau de nouveau, sept seront fermés et 17 autres ont fait une demande de redémarrage.
- Ce nombre comprend également les sept réacteurs allemands qui ont été déconnectés après Fukushima. L'Allemagne prévoit la mise hors service progressive de tous ses réacteurs nucléaires d'ici 2022.

Au total, 57 réacteurs sont construction dans le monde, principalement dans les économies émergentes comme la Chine et l'Inde.

En outre, plus de 150 réacteurs ont été commandés ou sont en cours de commande, tandis qu'il est envisagé d'en commander 335 autres.

SOURCE • IAEA Power Reactor Information System. « Operational & Long-Term Shutdown Reactors », 2018. https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx.

RÉACTEURS NUCLÉAIRES ACTUELLEMENT EN EXPLOITATION

PAYS	RÉACTEURS	PUISSANCE NETTE (MWE)	PART DES COMBUSTIBLES (%)
Afrique du Sud	2	1 860	6,7
Allemagne	7	9 515	11,6
Argentine	3	1 633	4,5
Arménie	1	375	32,5
Belgique	7	5 918	49,9
Brésil	2	1 884	2,7
Bulgarie	2	1 926	34,3
Canada	19	13 554	14,6
Chine	42	38 331	3,9
Corée du Sud	24	22 494	27,1
Espagne	7	7 121	21,2
États-Unis	99	99 952	20,1
Finlande	4	2 769	33,2
France	58	63 130	71,6
Hongrie	4	1 889	50,0
Inde	22	6 255	3,2
Iran	1	915	2,2
Japon	42	39 752	3,6
Mexique	2	1 552	6,0
Pakistan	5	1318	6,2
Pays-Bas	1	482	2,9
République tchèque	6	3 930	33,1
Roumanie	2	1 300	17,7
Royaume-Uni	15	8 918	19,3
Russie	37	28 264	17,8
Slovaquie	4	1 814	54,0
Slovénie	1	688	39,1
Suède	8	8 622	39,6
Suisse	5	3 333	33,4
Taïwan	6	5 052	9,3
Ukraine	15	13 107	55,1
Total	**453**	**394 836**	

SOURCE • IAEA Power Reactor Information System. « Operational & Long-Term Shutdown Reactors », 2018. https://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx.

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE AU CANADA

Le Canada compte 19 réacteurs nucléaires actuellement en exploitation dans quatre centrales.

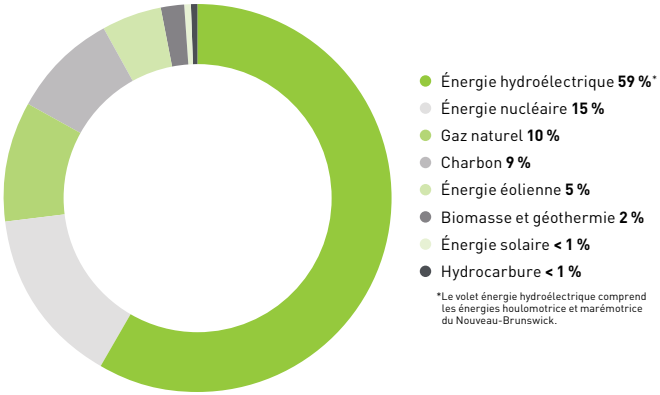
En 2016, l'énergie nucléaire a assuré environ 15 % de la production canadienne d'électricité.

L'hydroélectrique, la source d'énergie la plus utilisée au Canada, a assuré environ 59 % de la production nationale d'électricité en 2016.

La filière du charbon a été éliminée en Ontario en 2014, mais elle demeure très répandue ailleurs au pays.

Les sources d'énergie renouvelables non électriques ont assuré environ 7 % de la production canadienne d'électricité en 2016.

SOURCES D'ÉLECTRICITÉ AU CANADA EN 2016



SOURCE • Office national de l'énergie. « Profils énergétiques des provinces et territoires — Canada », 2018. https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmprfls/cda-fra.html.

LES RÉACTEURS DE PUISSANCE DU CANADA

CENTRALE	ÉTAT	PUISSANCE NETTE (MWE)	MISE EN SERVICE
Bruce A: Réacteur 1	En exploitation	760	1977
Bruce A: Réacteur 2	En exploitation	760	1976
Bruce A: Réacteur 3	En exploitation	750	1977
Bruce A: Réacteur 4	En exploitation	750	1978
Bruce B: Réacteur 5	En exploitation	817	1984
Bruce B: Réacteur 6	En exploitation	817	1984
Bruce B: Réacteur 7	En exploitation	817	1986
Bruce B: Réacteur 8	En exploitation	817	1987
Darlington: Réacteur 1	En exploitation	878	1990
Darlington: Réacteur 2	En exploitation	878	1990
Darlington: Réacteur 3	En exploitation	878	1992
Darlington: Réacteur 4	En exploitation	878	1993
Douglas Point	Fermé	206	1967
Gentilly-1	Fermé	250	1971
Gentilly-2	Fermé	635	1983
Pickering A: Réacteur 1	En exploitation	515	1971
Pickering A: Réacteur 2	Fermé	515	1971
Pickering A: Réacteur 3	Fermé	515	1972
Pickering A: Réacteur 4	En exploitation	515	1973
Pickering B: Réacteur 5	En exploitation	516	1982
Pickering B: Réacteur 6	En exploitation	516	1983
Pickering B: Réacteur 7	En exploitation	516	1984
Pickering B: Réacteur 8	En exploitation	516	1986
Point Lepreau	En exploitation	660	1982
Centrale de Rolphton	Fermé	22	1982

LE SAVIEZ-VOUS?

LA PRODUCTION DU PARC NUCLÉAIRE CANADIEN EST SUFFISANTE POUR ALIMENTER PLUS DE 10 MILLIONS DE MÉNAGES!

SOURCE • IAEA Power Reactor Information System. « Canada », 2018. https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CA.

SOURCES D'ÉLECTRICITÉ PAR PROVINCE

Les sources d'énergie varient considérablement d'une province à l'autre.

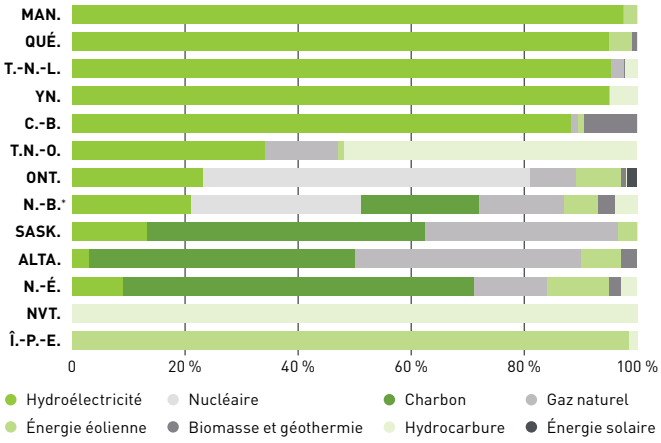
En 2016, l'énergie nucléaire a assuré environ 58 % de la production d'électricité de l'Ontario et 30 % de celle du Nouveau-Brunswick.

L'énergie hydroélectrique est la principale source d'électricité de la Colombie-Britannique, du Manitoba, du Québec, de Terre-Neuve-et-Labrador et du Yukon.

Les combustibles fossiles continuent de fournir la grande partie de l'électricité de l'Alberta, de la Saskatchewan, de la Nouvelle-Écosse, du Nunavut et des Territoires du Nord-Ouest.

La production d'électricité de l'Île-du-Prince-Édouard provient à 98 % de parcs éoliens, mais cette province importe encore environ 60 % de son électricité du Nouveau-Brunswick.

SOURCES D'ÉLECTRICITÉ PAR PROVINCE EN 2016



*Au Nouveau-Brunswick, l'énergie hydroélectrique comprend les énergies houlomotrice et marémotrice.

SOURCE • Office national de l'énergie. « Profils énergétiques des provinces et territoires — Canada », 2018. https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmprfls/cda-fra.html.

LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE BRUCE

La centrale nucléaire Bruce est la centrale en exploitation la plus puissante du monde. Elle est située sur la rive du lac Huron, à 190 km du centre-ville de Toronto (Ontario). Elle a commencé à alimenter le réseau d'électricité en 1976.

Avec ses huit réacteurs totalisant une puissance de 6 288 MWe, tous en exploitation actuellement, la centrale nucléaire Bruce a produit une quantité record de kWh en 2017. Cette quantité d'électricité est suffisante pour alimenter 5,4 millions de ménages en Ontario. (En moyenne, un ménage de l'Ontario consomme environ 9 000 kWh par an.)

PUISSANCE : 6 288 MWE

NOMBRE DE MÉNAGES ONTARIENS ALIMENTÉS : 5,4 MILLIONS

MISE EN EXPLOITATION : 1976

ACTUELLEMENT LA CENTRALE NUCLÉAIRE EN EXPLOITATION LA PLUS PUISSANTE DU MONDE!

SOURCE • Commission de l'énergie de l'Ontario. « Defining Ontario's Typical Electricity Customer », 14 avril 2016. https://www.oeb.ca/sites/default/files/uploads/Report_Defining_Typical_Elec_Customer_20160414.pdf.

LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE DARLINGTON

La centrale de Darlington occupe le deuxième rang parmi les centrales nucléaires canadiennes. Elle est située sur la rive du lac Ontario, à 60 km du centre-ville de Toronto (Ontario).

Avec ses quatre réacteurs actuellement en exploitation, totalisant une puissance de 3 512 MWe, la centrale de Darlington a produit 25,8 milliards de kWh en 2016, assez pour alimenter plus de 2,8 millions de ménages de l'Ontario.

Le réacteur 2 a été arrêté en octobre 2016 pour réfection à mi-vie. Depuis octobre 2018, la réfection est à moitié achevée, en avance sur le calendrier et en deçà du budget prévu.

PUISSANCE : 3 512 MWE

NOMBRE DE MÉNAGES ONTARIENS ALIMENTÉS : 2,8 MILLIONS

MISE EN EXPLOITATION : 1990

LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE PICKERING

À l'achèvement du réacteur 4 en 1973, la centrale de Pickering A était la plus puissante du monde. Elle est située à 30 km du centre-ville de Toronto (Ontario).

De nos jours, dotés d'une puissance de 3 094 MWe, les six réacteurs de Pickering A et B ont produit 21,5 milliards de kWh en 2016, assez pour alimenter 2,4 millions de ménages de l'Ontario.

La centrale de Pickering comptait huit réacteurs jusqu'à l'arrêt définitif des réacteurs 2 et 3 en 1997.

Les six réacteurs restants seront en exploitation jusqu'en 2024, où ils seront fermés.

PUISSANCE : 3 094 MWE

NOMBRE DE MÉNAGES ONTARIENS ALIMENTÉS : 2,4 MILLIONS

MISE EN EXPLOITATION : 1971

LA CENTRALE NUCLÉAIRE DE POINT LEPREAU

La centrale nucléaire Pointe Lepreau est située au Nouveau-Brunswick, à une trentaine de kilomètres au sud-ouest de Saint John. Son réacteur a été le premier CANDU 6 à produire de l'électricité sur une base commerciale.

Après une réfection visant à prolonger sa durée de vie utile, la centrale nucléaire a été remise en exploitation en novembre 2012. Aujourd'hui, elle assure environ 30 % de la production d'électricité du Nouveau-Brunswick.

Dotée d'une puissance de 660 MWe, Pointe Lepreau a produit 5,2 milliards de kWh en 2017, assez pour alimenter 300 000 ménages du Nouveau-Brunswick. (La consommation moyenne d'un ménage au Nouveau-Brunswick est d'environ 17 000 kWh par an.)

PUISSANCE : 660 MWE

NOMBRE DE MÉNAGES ALIMENTÉS AU NOUVEAU-BRUNSWICK : 300 000

MISE EN EXPLOITATION : 1983

SOURCE • Office national de l'énergie. « Profils énergétiques des provinces et territoires — Nouveau-Brunswick », 2018. https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmprfls/nb-fra.html.

LA RÉFECTION DES CENTRALES NUCLÉAIRES DU CANADA

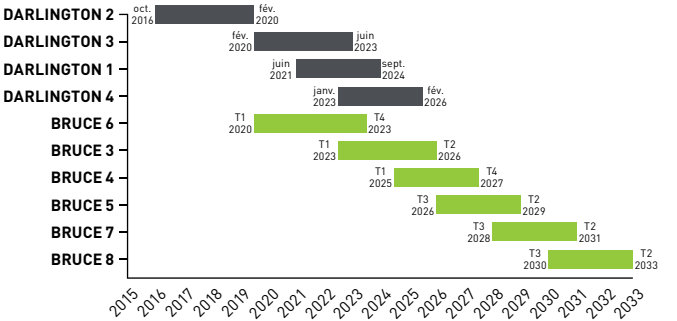
Il est possible de prolonger la durée de vie d'une centrale nucléaire de plusieurs décennies grâce à des projets de réfection visant à moderniser et à améliorer l'équipement et les systèmes importants afin de soutenir l'exploitation à long terme.

Le Canada a entrepris la réfection de dix de ses 19 réacteurs nucléaires afin de prolonger leur durée de vie utile de 30 années. Ces projets de réfection devraient s'échelonner sur une quinzaine d'années et créer des milliers d'emplois.

La réfection du réacteur de la centrale Pointe Lepreau et des réacteurs 1 et 2 de la centrale Bruce est déjà terminée. Ces trois réacteurs ont été remis en service en 2012.

Selon une étude réalisée par le Conference Board du Canada, les avantages économiques découlant de la réfection des quatre réacteurs de la centrale Darlington et des 30 années et plus d'exploitation qui s'ensuivront atteindront 89,9 milliards de dollars.

DÉROULEMENT DE LA RÉFECTION DE CENTRALES NUCLÉAIRES



SOURCES • Ontario Power Generation. « Darlington Refurbishment Project », 2018, p. 8. https://www.opg.com/darlington-refurbishment/whats-involved/Documents/DRP_ScopeProgramBook.pdf.

Bruce Power. « BPRIA Backgrounder », 3 décembre 2015. http://www.brucepower.com/bpria-backgrounder/.

Conference Board du Canada. « Poursuite de l'exploitation de la centrale nucléaire de Darlington : analyse de retombées sur l'économie de l'Ontario », 2016, p. 12.

L'ENVIRONNEMENT ET **L'ÉCONOMIE**

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET L'ENVIRONNEMENT

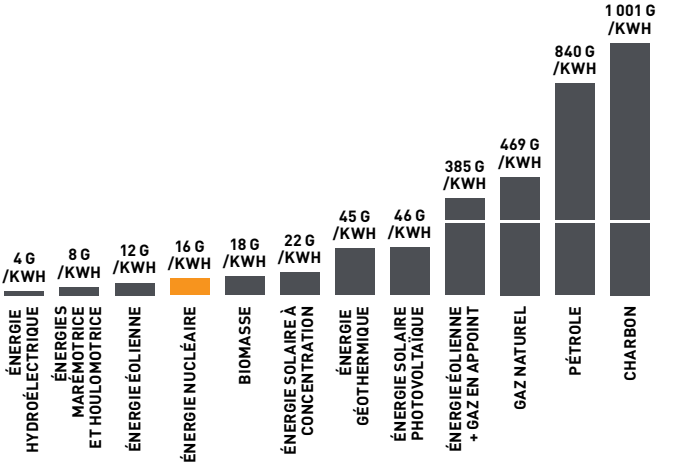
Tous les modes de production d'électricité génèrent une certaine quantité de CO_2 et d'autres gaz à effet de serre (GES), même lorsqu'ils ne brûlent pas de combustibles fossiles. Par exemple, il faut du ciment et des véhicules pour construire la centrale ou l'installation, et chacun laisse une empreinte carbone.

Lorsque l'on considère tout le cycle de vie de la production d'électricité, ce qui comprend la construction, l'extraction minière, l'exploitation et le déclassement, l'énergie nucléaire se classe parmi les technologies disponibles les plus propres.

L'énergie hydroélectrique est une source d'électricité à faibles émissions de carbone, mais elle n'est possible que dans des régions où de grandes quantités d'eau vive sont exploitables.

Les énergies éolienne et solaire sont également des sources d'électricité à faible émission de carbone, mais elles ont besoin d'une source d'appoint environ 80 % du temps pour alimenter un réseau. L'appoint utilisé le plus souvent est le gaz naturel, qui augmente considérablement les émissions de CO_2.

CYCLE DE VIE DES ÉMISSIONS DE CO_2 PAR SOURCE D'ÉNERGIE



SOURCE • Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. « Sources d'énergie renouvelables et atténuation du changement climatique », 2011, p. 190. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf.

TENDANCES RÉTROSPECTIVES DES ÉMISSIONS DE CO_2 DANS LE MONDE

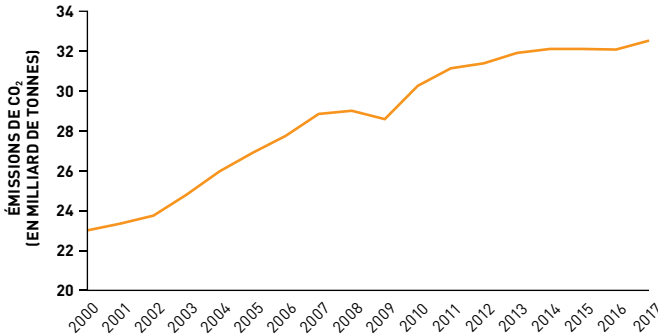
Les émissions globales de CO_2 ont atteint un niveau record en 2017, soit 32,5 milliards de tonnes.

L'usage du combustible fossile est la première source d'émissions de CO_2.

En remplaçant toutes les centrales au charbon et au gaz naturel par des centrales nucléaires, qui produisent une énergie à faible émission de carbone, on ferait baisser les émissions mondiales de CO_2 de près de 13 milliards de tonnes par an.

Dès aujourd'hui, en remplaçant le charbon et le gaz naturel, l'énergie nucléaire aide à éviter l'émission d'environ 2,2 milliards de tonnes de CO_2 par an. C'est autant que si l'on retirait environ 480 millions d'automobiles de la route – soit plus de la moitié des voitures de tourisme dans le monde entier!

ÉMISSIONS DE CO_2 DANS LE MONDE DEPUIS 2000



LE SAVIEZ-VOUS?

EN REMPLAÇANT LE CHARBON ET LE GAZ NATUREL PAR LE NUCLÉAIRE, NOTRE CLIMAT REVIENDRAIT À CE QU'IL ÉTAIT IL Y A PLUS DE DEUX DÉCENNIES!

SOURCES • International Energy Agency. « Global Energy & CO_2 Status Report », 2018. https://www.iea.org/geco/emissions/.

World Nuclear Association. « Greenhouse Gas Emissions Avoided through Use of Nuclear Energy », 2018. http://www.world-nuclear.org/nuclear-basics/greenhouse-gas-emissions-avoided.aspx.

Ressources naturelles Canada. « Facteurs ayant des répercussions sur le rendement du carburant », 2018. https://www.rncan.gc.ca/energie/efficacite/transports/21013.

LES OBJECTIFS DU CANADA EN MATIÈRE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

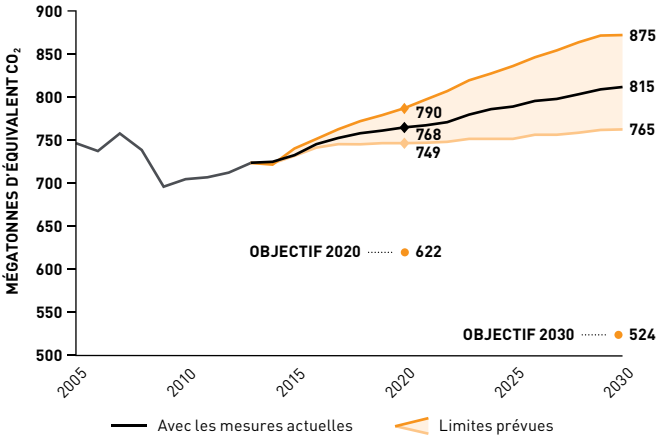
Le changement climatique est une des plus grandes menaces de notre ère.

Aux termes de l'Accord de Paris de 2015, le Canada, comme 194 autres pays, a accepté de passer à une économie à faibles émissions de carbone et s'est engagé à atteindre des objectifs de réduction des gaz à effet de serre arrêtés par pays.

Avec les mesures actuelles, il est peu probable qu'il atteigne ses objectifs de 2020 ou de 2030.

Afin de réduire sensiblement ses émissions, le Canada doit tirer parti de toutes les sources d'énergie à faibles émissions de carbone disponibles, y compris le nucléaire.

PRÉVISIONS DU CANADA EN MATIÈRE D'ÉMISSIONS DE GES



SOURCE • Environnement et Changement climatique Canada. « Émissions canadiennes de GES », 2018. http://ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&xml=8BAAFCC5-A4F8-4056-94B1-B2799D9A2EE0.

LE NUCLÉAIRE ET LES OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ONU

L'industrie nucléaire canadienne contribue à atteindre 9 des 17 objectifs de développement durable (ODD) de l'ONU, qui visent à assurer la prospérité des pays développés et à améliorer les conditions de vie dans les pays en développement à l'horizon 2030.

2 : Faim « zéro »

La technologie nucléaire aide à protéger les végétaux contre les ravageurs et à améliorer la résilience des cultures aux maladies et au changement climatique.

3 : Bonne santé et bien-être

La technologie nucléaire est utilisée pour diagnostiquer et traiter des maladies, y compris le cancer.

6 : Eau propre et assainissement

La technologie nucléaire peut aider à éliminer les contaminants des eaux usées, pour une réutilisation de l'eau sans risque.

7 : Énergie propre et d'un coût abordable

L'énergie nucléaire est l'une des formes d'énergie les moins chères et aucun GES n'est émis lors de sa production.

9 : Industrie, innovation et infrastructure

L'industrie nucléaire étudie de façon innovante les options énergétiques et les améliorations technologiques pour l'avenir.

13 : Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques

Aucun GES n'est émis lors de la production de l'énergie nucléaire, ce qui réduit l'incidence de l'activité humaine sur le climat.

14 : Vie aquatique

La technologie nucléaire permet d'observer l'état des océans, pour mieux les comprendre et les protéger.

15 : Vie terrestre

La technologie nucléaire est utilisée pour l'évaluation des risques environnementaux, dans le but de protéger les forêts et d'inverser la tendance à l'appauvrissement de la biodiversité.

17 : Partenariats pour la réalisation des objectifs

Depuis longtemps déjà, l'industrie nucléaire collabore avec les parties prenantes pour trouver des solutions aux problèmes d'ordre mondial.

L'EMPREINTE TERRESTRE DU NUCLÉAIRE

Le nucléaire est la source d'énergie offrant le meilleur rendement par superficie de terrain : elle ne nécessite que 2,4 km^2/TWh par an, en incluant tous les aspects de la production tels que l'extraction minière et la fabrication de combustible.

D'autres options à faibles émissions de carbone, comme l'énergie solaire, l'hydroélectricité et l'énergie éolienne, requièrent une superficie beaucoup plus grande, soit 37 km^2/TWh, 54 km^2/TWh et 72 km^2/TWh par an, respectivement.

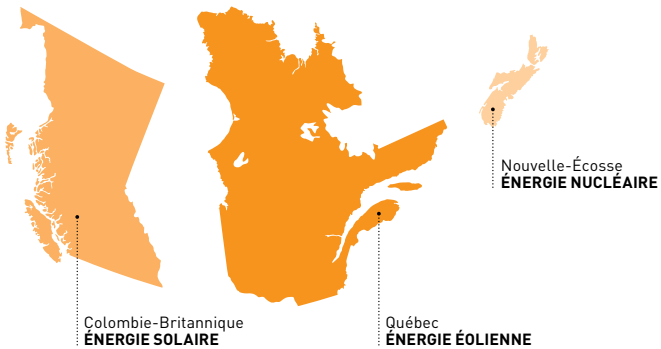
Pour produire 100 % de l'énergie mondiale à partir d'une seule source, le nucléaire aurait besoin d'une superficie équivalente à la Nouvelle-Écosse; le solaire occuperait toute la Colombie-Britannique, tandis que l'éolien nécessiterait presque l'ensemble du Québec.

En raison de sa faible empreinte terrestre, le nucléaire a un effet tout à fait minime sur les habitats naturels.

Les effects des éoliennes sur les oiseaux et les chauves-souris ont été bien documentés, tout comme l'incidence des barrages hydroélectriques sur les écosystèmes aquatiques.

L'extraction de combustibles fossiles a un effet dévastateur sur les forêts, les pâturages et les réservoirs d'eau.

UTILISATION DU TERRITOIRE NÉCESSAIRE AU RAVITAILLEMENT MONDIAL EN ÉLECTRICITÉ



SOURCE • McDonald, Robert, et al. « Energy Sprawl or Energy Efficiency: Climate Policy Impacts on Natural Habitat for the United States of America », PLoS ONE, 2009, p. 4. http://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0006802&type=printable.

LE NUCLÉAIRE ET L'ÉCONOMIE CANADIENNE

La technologie nucléaire fait partie intégrante de toute économie avancée. Elle soutient la médecine, la science des matériaux, la fabrication de pointe, la sécurité alimentaire et la production d'énergie.

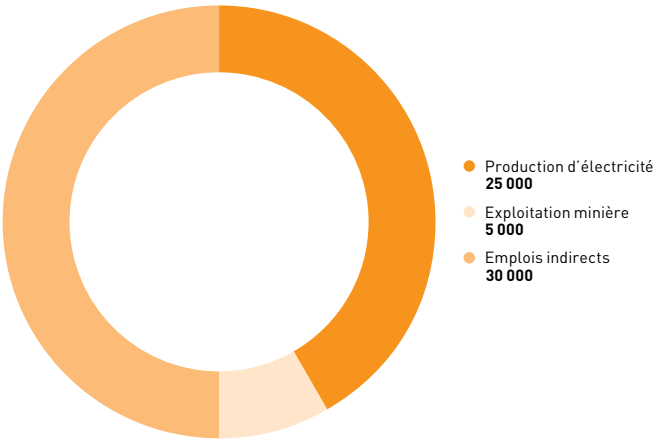
L'industrie du nucléaire crée un total de 60 000 emplois directs et indirects au Canada, dont beaucoup d'emplois de haute technologie et bien rémunérés.

Près de 200 entreprises canadiennes fournissent des produits ou des services à l'industrie nucléaire.

Les occasions d'emploi pour les nouveaux diplômés abondent. Comme beaucoup de travailleurs du nucléaire se rapprochent de la retraite, l'industrie est impatiente d'attirer de nouveaux travailleurs ayant des compétences et expériences diverses.

L'industrie nucléaire canadienne génère plus de 6 milliards de dollars de revenus par an.

EMPLOIS CRÉÉS PAR LE NUCLÉAIRE AU CANADA



SOURCE • Canadian Manufacturers & Exporters. « Nuclear: A Canadian Strategy for Energy, Jobs, and Innovation », 2012, p. 7.

LA PRODUCTION D'URANIUM

Avec ses deux sociétés d'exploitation d'uranium, Cameco et Orano Canada, le Canada est le deuxième producteur mondial d'uranium.

Le pays exporte 85 % de l'uranium qu'il exploite.

L'uranium exporté injecte 1,2 milliard de dollars dans l'économie canadienne par an.

L'exploitation d'uranium est l'un des principaux employeurs des populations autochtones de la Saskatchewan.

PRODUCTION DES MINES D'URANIUM DANS LE MONDE EN 2016

PAYS	TONNES D'U PRODUITES	% DE LA PRODUCTION MONDIALE
Kazakhstan	24 575	39
Canada	14 039	23
Australie	6 315	10
Namibie	3 654	6
Niger	3 479	6
Russie	3 004	5
Ouzbékistan	2 404	4
Chine	1 616	3
États-Unis	1 125	2
Ukraine	1 005	2
Autre	1 152	2

LE SAVIEZ-VOUS?

LE CANADA POSSÈDE PLUS DE 500 000 TONNES DE RÉSERVES D'URANIUM CONFIRMÉES!

SOURCES • Ressources naturelles Canada. « À propos de l'uranium », 2018. https://www.rncan.gc.ca/energie/uranium-nucleaire/7696.

Ressources naturelles Canada. « L'industrie nucléaire canadienne et ses retombées économiques », 2018. https://www.rncan.gc.ca/energie/uranium-nucleaire/7716.

World Nuclear Association. « World Uranium Mining Production », 2018. http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx.

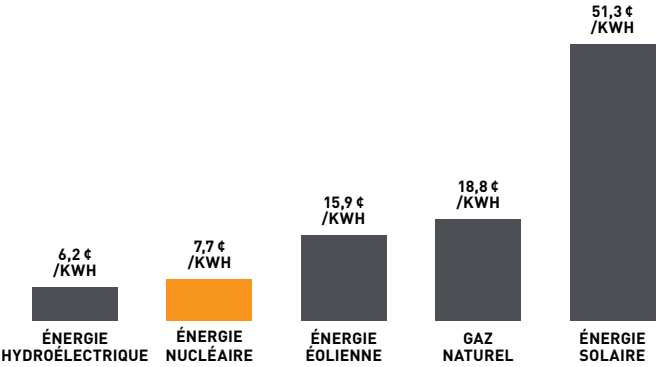
LE COÛT DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Le nucléaire demeure l'une des sources d'électricité les plus abordables dans le monde.

Bien que les centrales nucléaires nécessitent un important investissement initial, leur longue durée de vie et leurs faibles coûts en combustible, exploitation et entretien permettent de produire une énergie bon marché à long terme.

En Ontario, seule l'hydroélectricité a un coût par kWh inférieur à celui du nucléaire. Le gaz naturel et l'éolien sont environ deux fois plus chers que le nucléaire, tandis que le solaire est plus de six fois plus cher.

COÛT DE L'ÉNERGIE SELON LA SOURCE EN ONTARIO EN 2018



LE SAVIEZ-VOUS?

PLUS DE LA MOITIÉ DU COÛT DU NUCLÉAIRE EST ATTRIBUABLE À LA CONSTRUCTION DES INSTALLATIONS. UNE FOIS CONSTRUIT, LE NUCLÉAIRE A DES COÛTS DE COMBUSTIBLE ET D'ENTRETIEN TRÈS FAIBLES, CE QUI PERMET D'ASSURER LA STABILITÉ DES PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ SUR LA DURÉE DE VIE DE LA CENTRALE (PLUS DE 60 ANS).

SOURCE • Commission de l'énergie de l'Ontario. « Regulated Price Plan Supply Cost Report », 2018, p. 16. https://www.oeb.ca/sites/default/files/RPP-Supply-Cost-Report-20180501-20190430-correction.pdf.

L'URANIUM ET

LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

L'URANIUM

L'uranium est l'un des nombreux éléments radioactifs présents dans la nature. Ce métal lourd, à peu près aussi commun que l'étain, se trouve dans la plupart des sols et des roches à une concentration d'environ deux à quatre parties par million.

Comme d'autres éléments, l'uranium se présente sous diverses formes appelées « isotopes ».

Son isotope le plus courant est l'uranium 238 ou ^{238}U (99,28 %), suivi de l'uranium 235 ou ^{235}U (0,71 %). Le nombre qui accompagne le symbole « U » indique la masse atomique de l'isotope.

^{235}U est le principal isotope de l'uranium utilisé pour produire de l'électricité, car il est fissile (c'est-à-dire qu'il est facilement « fissionné »). La fission de ^{235}U en fragments plus petits libère 100 millions de fois plus d'énergie que la rupture d'une liaison chimique au cours de la combustion.

MINERAI D'URANIUM

LE SAVIEZ-VOUS?

LES RÉACTEURS CANDU UTILISENT ^{235}U À SA CONCENTRATION NATURELLE (0,71 %). D'AUTRES TYPES DE RÉACTEURS UTILISENT ^{235}U ENRICHI À UNE CONCENTRATION D'ENVIRON 3 % OU PLUS.

CONVERSION DE L'URANIUM EN COMBUSTIBLE POUR LES RÉACTEURS CANDU

Exploitation

Il existe trois façons d'extraire le minerai d'uranium du sol : l'exploitation de mines à ciel ouvert, l'exploitation minière souterraine et la lixiviation in situ.

Concentration

Le minerai est broyé dans un concentrateur, puis réduit en une boue fine. Cette boue est ensuite lixiviée à l'aide d'une solution acide afin de séparer l'uranium des autres minerais, puis on l'épure en vue d'obtenir de la poudre d'oxide d'uranium.

Raffinage

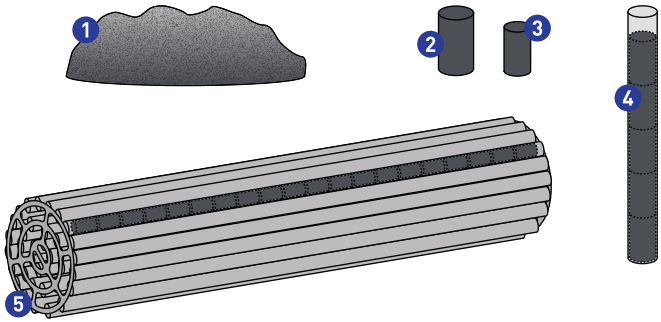
On utilise des processus chimiques pour débarrasser l'oxide d'uranium de ses impuretés, ce qui permet de produire du trioxyde d'uranium de grande pureté.

Conversion

Le trioxyde d'uranium est transformé en dioxyde d'uranium.

Fabrication de combustible

La poudre de dioxyde d'uranium (1) est pressée pour former des pastilles cylindriques (2), lesquelles seront cuites à haute température en vue d'obtenir un produit fini aux dimensions précises (3). Ces pastilles sont alors introduites dans des tubes de combustible (4), lesquels sont ensuite assemblés en grappes de combustible pour réacteur prêtes-à-l'emploi (5).



LES MÉTHODES D'EXPLOITATION MINIÈRE DE L'URANIUM

Il existe trois façons d'exploiter le minerai d'uranium :

L'exploitation de mines à ciel ouvert est employée lorsque les gisements d'uranium se trouvent près de la surface. Cela implique de retirer une couche de terre et de stériles, puis de creuser une fosse pour accéder au minerai. Les parois de la fosse sont aménagées en gradins afin de prévenir les affaissements.

L'exploitation minière souterraine est la méthode à privilégier lorsque les gisements se trouvent à grande profondeur. Elle implique de forer un puits vertical selon la profondeur à laquelle se trouve le minerai, puis de percer un nombre de tunnels afin de pouvoir accéder directement au minerai.

La récupération sur place (ou lixiviation in situ) consiste à dissoudre le minerai d'uranium dans un gisement souterrain, en y injectant des solutions facilitant l'extraction, puis en les pompant vers la surface afin d'en extraire l'uranium dissous. Bien qu'elle ne soit pas encore utilisée au Canada, cette méthode d'exploitation minière est celle qui connaît le plus grand essor.

IMAGE • Cameco

L'INDUSTRIE MINIÈRE DE L'URANIUM AU CANADA

Presque tout l'uranium canadien est extrait et concentré dans le nord de la Saskatchewan, dans la région du bassin d'Athabasca.

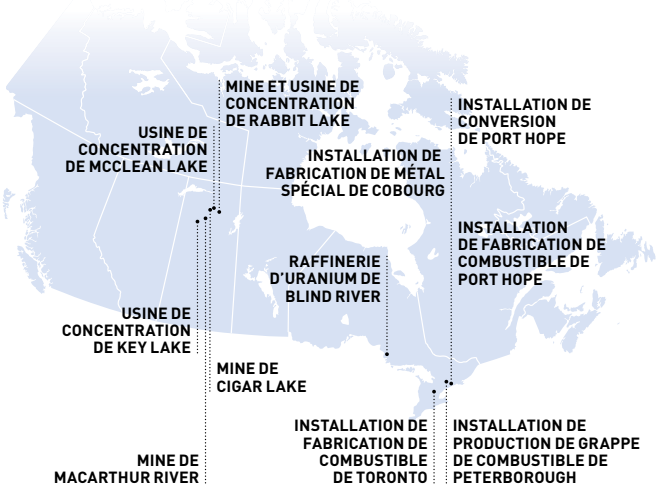
Le Canada renferme les plus riches gisements à forte teneur en uranium au monde, dont la concentration en uranium est plus de cent fois supérieure à la moyenne mondiale.

Blind River (Ontario) abrite la seule raffinerie d'uranium au Canada. Détenue et exploitée par Cameco, elle est la plus importante installation du genre au monde.

Port Hope (Ontario) abrite la seule usine de conversion d'uranium au Canada. Celle-ci est également détenue et exploitée par Cameco.

On trouve également des usines qui transforment la poudre d'uranium naturel et assemblent des grappes de combustible pour réacteur CANDU à Port Hope (Cameco), à Toronto et à Peterborough (BWXT Nuclear Energy Canada).

CARTOGRAPHIE DES INSTALLATIONS DE PRODUCTION D'URANIUM AU CANADA



LA PUISSANCE DE L'URANIUM

La fission nucléaire est une source d'énergie très efficace, ce qui fait que les réacteurs nucléaires consomment très peu de combustible.

Chaque pastille d'uranium pèse environ 20 grammes, et il en faut moins de dix pour alimenter en électricité un ménage canadien moyen pendant un an.

Pour produire la même quantité d'électricité qu'une pastille de 20 grammes d'uranium, il faudrait brûler 400 kilogrammes de charbon ou 410 litres de pétrole ou 350 mètres cubes de gaz naturel.

COMBUSTIBLE NÉCESSAIRE À LA PRODUCTION DE LA MÊME QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ

20 G D'URANIUM | **400 KG DE CHARBON** | **410 L DE PÉTROLE** | **350 M^3 DE GAZ NATUREL**

GRAPPE DE COMBUSTIBLE POUR RÉACTEUR CANDU

IMAGE • Société de gestion des déchets nucléaires

LE FONCTIONNEMENT DE LA FISSION NUCLÉAIRE

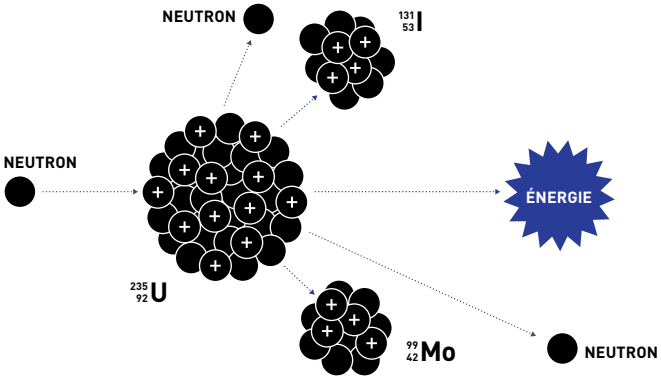
Les deux principaux isotopes de l'uranium, soit ^{235}U et ^{238}U, sont relativement stables avant le chargement du combustible dans le réacteur, c'est-à-dire qu'ils n'émettent pas beaucoup de rayonnement – si peu que l'on peut manutentionner sans danger les grappes de combustible inutilisées.

Toutefois, lorsqu'un atome de ^{235}U et un neutron s'entrechoquent, l'atome se fissionne en plusieurs fragments, dont deux ou trois neutrons supplémentaires. Il dégage alors de la chaleur, qui peut être transformée en électricité.

Ces neutrons supplémentaires entrent en collision avec d'autres atomes de ^{235}U à proximité, si bien que la réaction se poursuit. Les réacteurs nucléaires contrôlent cette réaction en chaîne de manière à obtenir l'état stable souhaité.

Ce processus génère également d'autres isotopes plus petits, tels l'iode 131, le césium 137 et le molybdène 99, qui trouvent des applications utiles dans les domaines médical et industriel.

FISSION NUCLÉAIRE



LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Un réacteur nucléaire est une machine à vapeur très perfectionnée qui actionne un alternateur. C'est l'énergie libérée par la réaction de fission qui produit la chaleur pour générer la vapeur.

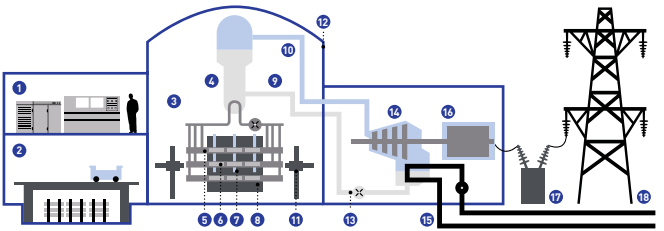
Le combustible d'uranium, le modérateur et le caloporteur sont trois composants essentiels d'un réacteur nucléaire.

Selon le type de réacteur, l'uranium utilisé peut être naturel (0,71 % de ^{235}U) ou enrichi (de manière que la part de ^{235}U est de 3 % ou plus).

Le modérateur, matériau léger comme l'eau, ralentit les neutrons sans les absorber. Le ralentissement des neutrons libérés au cours de la fission accroît la possibilité de fission supplémentaire.

Le caloporteur est un fluide qui circule dans le cœur du réacteur et permet l'absorption et le transfert de la chaleur produite par la fission nucléaire. Il permet également de maintenir la température du combustible dans les limites acceptables.

SCHÉMA DU RÉACTEUR CANDU



1. Salle de commande
2. Gestion du combustible usé
3. Cœur du réacteur
4. Générateur de vapeur (chaudière)
5. Caloporteur (eau lourde)
6. Combustible (uranium)
7. Barres de commande
8. Modérateur (eau lourde)
9. Eau
10. Vapeur
11. Appareil de chargement du combustible
12. Blindage
13. Condenseur
14. Turbine à vapeur
15. Eau de refroidissement du condenseur
16. Générateur électrique
17. Transformateur
18. Réseau électrique

LES RÉACTEURS CANDU

Le réacteur « CANDU » (CANada Deutérium Uranium) se nomme ainsi parce qu'il a été conçu au Canada et qu'il utilise de l'oxyde de deutérium (aussi appelé « eau lourde ») comme modérateur et caloporteur ainsi que de l'uranium comme combustible.

Les réacteurs CANDU sont les seuls qui utilisent comme combustible de l'uranium naturel – c'est-à-dire non enrichi – ou, moyennant certaines modifications, de l'uranium recyclé, un mélange de combustibles, et du thorium.

On peut recharger les réacteurs CANDU sans arrêter la réaction, alors que la plupart des autres réacteurs doivent être mis à l'arrêt avant le rechargement.

Les réacteurs CANDU sont particulièrement sûrs. Leurs systèmes de sûreté sont indépendants du reste de la centrale. En outre, trois dispositifs d'urgence sont prévus pour chaque composant de sûreté clé (on emploie souvent les termes « redondance » ou « défense en profondeur » pour désigner les mesures de sûreté multiples). Ces dispositifs renforcent la sûreté générale, tout en permettant de tester le système de sûreté pendant que le réacteur fonctionne à plein régime.

LE DEVANT DU RÉACTEUR CANDU À LA CENTRALE BRUCE A

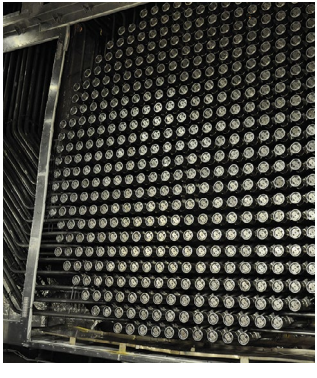


IMAGE • Bruce Power

LE SAVIEZ-VOUS?

UN SEUL RÉACTEUR CANDU PEUT ÊTRE ALIMENTÉ EN URANIUM RECYCLÉ EN PROVENANCE DE QUATRE RÉACTEURS À EAU LÉGÈRE SANS COMBUSTIBLE SUPPLÉMENTAIRE!

LES RÉACTEURS CANDU À L'ÉCHELLE MONDIALE

Le Canada a exporté des réacteurs CANDU en Argentine, en Chine, en Inde, au Pakistan, en Roumanie et en Corée du Sud. Au total, il y a 34 réacteurs CANDU dans le monde, dont 30 sont actuellement en exploitation.

À cela s'ajoutent les 16 réacteurs construits en Inde d'après la technologie CANDU mais non considérés comme de véritables réacteurs CANDU sur le plan technique.

CERNAVODA (ROUMANIE)

EMBALSE (ARGENTINE)

QINSHAN (CHINE)

WOLSONG (CORÉE DU SUD)

IMAGES • SNC-Lavalin

RÉACTEURS CANDU ET RÉACTEURS CONÇUS D'APRÈS LA TECHNOLOGIE CANDU À L'ÉCHELLE MONDIALE

RÉACTEUR	RÉACTEUR(S)	ÉTAT	PUISSANCE NETTE (MWE)
Bruce Power	8 réacteurs CANDU	En exploitation	6 288
Darlington	4 réacteurs CANDU	En exploitation	3 512
Pickering	6 réacteurs CANDU	En exploitation	3 094
	2 réacteurs CANDU	Fermé	1 030
Point Lepreau	1 réacteur CANDU	En exploitation	660
Gentilly-2	1 réacteur CANDU	Fermé	635
Cernavoda (Roumanie)	2 réacteurs CANDU	En exploitation	1 300
Emblase (Argentine)	1 réacteur CANDU	En exploitation	600
Karachi (Pakistan)	1 réacteur CANDU	En exploitation	90
Kaiga (Inde)	4 réacteurs conçus d'après la technologie CANDU	En exploitation	808
Kakrapar (Inde)	2 réacteurs conçus d'après la technologie CANDU	En exploitation	404
Madras (Inde)	2 réacteurs conçus d'après la technologie CANDU	En exploitation	410
Narora (Inde)	2 réacteurs conçus d'après la technologie CANDU	En exploitation	404
Rajasthan (Inde)	1 réacteur CANDU	En exploitation	187
	1 réacteur CANDU	Fermé	90
	4 réacteurs conçus d'après la technologie CANDU	En exploitation	808
Tarapur (Inde)	2 réacteurs conçus d'après la technologie CANDU	En exploitation	980
Qinshan (Chine)	2 réacteurs CANDU	En exploitation	1 354
Wolsong (Corée du Sud)	4 réacteurs CANDU	En exploitation	2 576

SOURCE • IAEA Power Reactor Information System. « Country Statistics », 2018. https://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryStatisticsLandingPage.aspx.

TYPES DE RÉACTEURS DE PUISSANCE EXPLOITÉS DANS LE MONDE

Les réacteurs CANDU sont de type réacteur à eau sous pression. Ils font partie des nombreux types de réacteurs de puissance exploités à l'heure actuelle dans le monde.

La concentration de l'uranium utilisé comme combustible, ainsi que le type de modérateur et de caloporteur employés dans le cœur, varient selon le réacteur.

Le type de réacteur le plus courant au monde est celui à eau sous pression – 297 des 453 réacteurs nucléaires de puissance actuellement en exploitation dans le monde.

DIFFÉRENCES ENTRE LES DIVERS TYPES DE RÉACTEURS

TYPE DE RÉACTEUR	COMBUSTIBLE	MODÉRATEUR	CALOPORTEUR	QUANTITÉ
Réacteur à eau sous pression	UO_2 enrichi	Eau	Eau	297
Réacteur à eau bouillante	UO_2 enrichi	Eau	Eau	75
Réacteur à eau lourde sous pression	UO_2 naturel	Eau lourde	Eau lourde	49
Réacteur à eau ordinaire modéré au graphite	UO_2 enrichi	Graphite	Eau	15
Réacteur refroidi au gaz	U naturel et UO_2 enrichi	Graphite	Dioxyde de carbone	14
Réacteur surgénérateur à neutrons rapides	PuO_2 et UO_2	Aucun	Sodium fondu	3

LE SAVIEZ-VOUS?

LES RÉACTEURS À EAU SOUS PRESSION OU RÉACTEURS DU TYPE « CANDU » REPRÉSENTENT ENVIRON 11 % DES RÉACTEURS DE PUISSANCE À L'HEURE ACTUELLE. C'EST AU CANADA ET EN INDE QU'ILS SONT LE PLUS FRÉQUEMMENT UTILISÉS.

SOURCE • World Nuclear Association. « Nuclear Power Reactors », 2018. http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx.

LES RÉACTEURS DE PROCHAINE GÉNÉRATION ET LES COMBUSTIBLES AVANCÉS

L'innovation continue fait en sorte que le nucléaire reste l'une des meilleures options en matière d'énergie propre, fiable et abordable.

En 2002, le Forum international Generation IV a été mis en place pour superviser l'élaboration de six nouvelles technologies de réacteurs, à savoir :

1. Réacteurs rapides refroidis au gaz
2. Réacteurs rapides refroidis au plomb
3. Réacteurs à sels fondus
4. Réacteurs rapides refroidis au sodium
5. Réacteurs refroidis à l'eau supercritique
6. Réacteurs à très haute température

Tous les six réacteurs offrent des améliorations par rapport aux réacteurs existants, y compris la flexibilité de la production, la variation des options de combustible et la réduction des flux de déchets.

Quatre des six réacteurs conviennent à la production d'hydrogène ou d'autres types de chaleur industrielle, en plus de la production d'électricité.

Les combustibles avancés comprennent entre autres le thorium, l'uranium de retraitement et le combustible oxyde mixte.

Le thorium est un élément naturel plus abondant dans la nature que l'uranium. Plusieurs types de réacteurs peuvent déjà utiliser le thorium.

L'uranium de retraitement est celui qui a été récupéré du combustible nucléaire irradié et traité en vue d'être réutilisé. Il permet de réduire le volume des déchets hautement radioactifs.

Le combustible oxyde mixte est fabriqué à partir du plutonium récupéré du combustible nucléaire irradié et de l'uranium appauvri. De plus, il fournit un moyen d'utiliser et d'éliminer le plutonium de qualité militaire.

SOURCE • The Generation IV International Forum. « Generation IV Systems », 2018. https://www.gen-4.org.

LES PETITS RÉACTEURS MODULAIRES

Les petits réacteurs modulaires (PRM) sont des appareils modernes dont la conception permet de les construire économiquement dans des conditions similaires à celles d'une usine (plutôt qu'entièrement sur place). Leur puissance est de l'ordre d'environ 1 à 300 MWe.

Parmi les possibilités que présentent les PRM au Canada, il y a la production d'électricité pour des collectivités éloignées ou plus petites, la production de chaleur industrielle pour l'industrie primaire (p. ex. le Cercle de feu de l'Ontario ou les sables bitumineux de l'Alberta) et la contribution aux réseaux électriques.

Le déploiement de PRM au Canada permettrait de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre, puisque, dans bien des cas, la production de combustibles fossiles sera remplacée par le nucléaire.

Les PRM pourraient également avoir une incidence socioéconomique positive sur le Canada à mesure que le pays participe à l'élaboration et au déploiement de cette technologie.

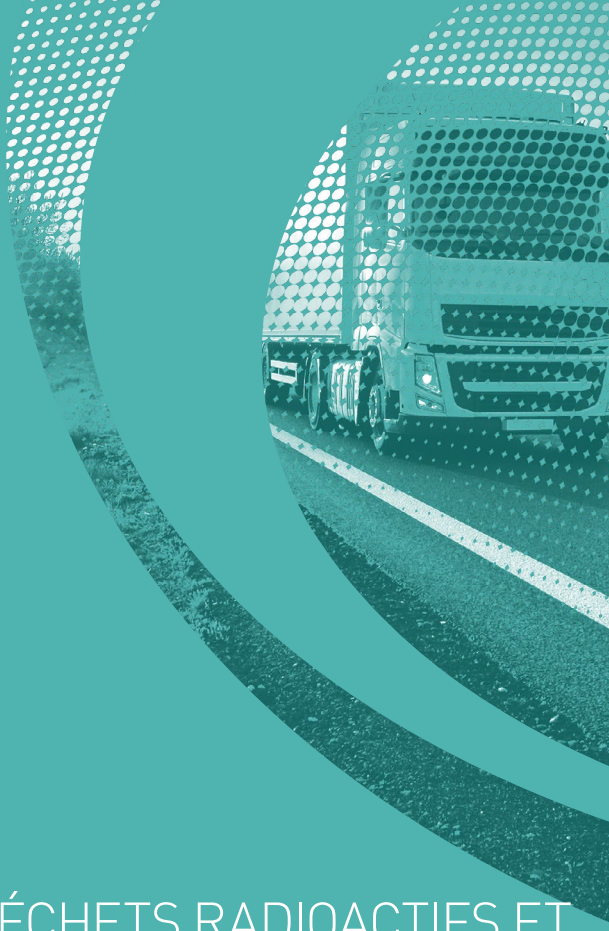
Actuellement, plus de 45 types de PRM sont en cours de développement, et quatre PRM sont déjà en phase de construction en Argentine, en Russie et en Chine.

Le Canada est déjà reconnu internationalement comme un marché à la réglementation favorable aux PRM. Une précoce position de chef de file pourrait assurer une part significative du marché mondial estimé entre 400 et 600 milliards de dollars pour la technologie de PRM.

DIAGRAMME DU PRM DE TERRESTRIAL ENERGY

IMAGE • Terrestrial Energy

SOURCE • Agence internationale de l'énergie atomique. « Petits réacteurs modulaires », 2018. https://www.iaea.org/fr/themes/petits-reacteurs-modulaires.



LES DÉCHETS RADIOACTIFS ET

LES MOYENS DE TRANSPORT

LES DÉCHETS RADIOACTIFS

Les solides, liquides ou gaz issus de la postproduction émettant un rayonnement sont des déchets radioactifs.

Ces déchets proviennent de l'activité industrielle générée par les mines d'uranium, les usines de concentration, les centrales nucléaires, les installations de recherche et les installations de soins de santé.

Il existe quatre catégories de déchets radioactifs :

Les déchets radioactifs en provenance de mines d'uranium et d'usines de concentration se composent de stériles de l'extraction minière d'uranium et de résidus issus des procédés de concentration de l'uranium. Les stériles sont le matériau extrait d'une mine afin de pouvoir accéder au minerai d'uranium. Les résidus sont ce qui reste du minerai une fois que l'on en a extrait l'uranium à l'aide de procédés chimiques.

Les déchets radioactifs de faible activité (DRFA) comprennent des articles comme les têtes de balai à franges, les chiffons, les gants et d'autres vêtements de protection susceptibles d'avoir été contaminés pendant leur utilisation au travail. Au Canada, plus de 98 % du volume des déchets radioactifs sont des DRFA.

Les déchets radioactifs de moyenne activité (DRMA) comprennent des articles qui ont été en contact plus direct avec des matières radioactives telles que les résines échangeuses d'ions ou les composants d'un réacteur.

Les déchets radioactifs de haute activité (DRHA) consistent en du combustible irradié. Ce type de déchet est généré par des centrales nucléaires et est fortement radioactif.

LES DÉCHETS RADIOACTIFS AU CANADA

CATÉGORIE DE DÉCHETS	STOCKS FIN 2016
Stériles	169 000 000 tonnes
Résidus de concentration	218 000 000 tonnes
Déchets radioactifs de faible activité (DRFA)	2 359 385 m^3
Déchets radioactifs de moyenne activité (DRMA)	33 155 m^3
Déchets radioactifs de haute activité (DRHA)	11 089 m^3

SOURCE • Ressources naturelles Canada. « Inventaire des déchets radioactifs au canada », 2016. https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/uranium-nuclear/17-0467%20Canada%20Radioactive%20Waste%20Report_access_f.pdf.

LE COMBUSTIBLE IRRADIÉ

L'expression « combustible nucléaire irradié » désigne le combustible retiré d'un réacteur nucléaire après utilisation.

On retire les grappes de combustible du réacteur lorsque la concentration de ^{235}U à l'intérieur devient trop faible pour entretenir une réaction de fission au niveau de puissance souhaité.

Le combustible retiré du réacteur est immergé dans une piscine de stockage pendant sept à dix ans, le temps qu'il refroidisse et que sa radioactivité diminue.

Après environ dix ans, les grappes de combustible nucléaire émettent moins de 0,01 % de la chaleur qu'elles dégageaient dans le réacteur.

Une fois les grappes suffisamment refroidies, on les transfère dans un grand silo de stockage à sec en béton qui les protège tout en confinant le rayonnement et où elles continuent de refroidir.

Le combustible irradié peut être recyclé et réutilisé, mais le Canada n'a pas adopté cette dernière pratique. Plusieurs programmes nucléaires recyclent le combustible avec succès, notamment en France.

TRAVÉE DE COMBUSTIBLE IRRADIÉ À LA CENTRALE BRUCE B

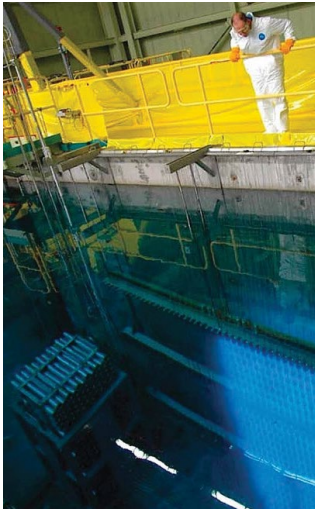


IMAGE • Bruce Power

LE SAVIEZ-VOUS?

SEULEMENT 1 % ENVIRON DE L'ÉNERGIE POTENTIELLE DE L'URANIUM EST CONSOMMÉE AVANT LE RETRAIT DU COMBUSTIBLE DU RÉACTEUR. C'EST POURQUOI LES SCIENTIFIQUES NE CONSIDÈRENT PAS LE COMBUSTIBLE IRRADIÉ COMME UN « DÉCHET ».

LA GESTION DU COMBUSTIBLE IRRADIÉ

Au Canada, tout le combustible nucléaire irradié est placé dans des installations de stockage autorisées.

Des mesures de sécurité rigoureuses sont mises en œuvre afin que les grappes de combustible irradié stockées ne présentent aucun danger pour la santé de la population.

Le stockage du combustible nucléaire irradié est géré par les services publics et les laboratoires qui en sont propriétaires. Il est réglementé, autorisé et surveillé de près par la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) en étroite collaboration avec l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

La Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) gère le stockage à long terme du combustible nucléaire irradié au Canada.

CONTENEUR D'ENTREPOSAGE DU COMBUSTIBLE IRRADIÉ

IMAGE • Ontario Power Generation

LE SAVIEZ-VOUS?

LE NUCLÉAIRE EST TELLEMENT PUISSANT QUE SI TOUTE L'ÉLECTRICITÉ QUE VOUS PUISSIEZ JAMAIS CONSOMMER ÉTAIT PRODUITE AINSI, LES DÉCHETS TIENDRAIENT DANS UNE CANNETTE DE BOISSON GAZEUSE!

LA SOCIÉTÉ DE GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES

En 2002, la Société de gestion des déchets nucléaires (SGDN) a été créée en réponse à la législation fédérale, afin d'élaborer une approche de gestion pour le suivi à long terme du combustible nucléaire irradié au Canada.

La SGDN a sollicité les citoyens, les travailleurs du savoir et les peuples autochtones à travers tout le Canada pour mettre au point une approche répondant aux priorités et aux objectifs des Canadiens. En 2007, le gouvernement du Canada a choisi le plan de Gestion adaptative progressive (GAP) pour le Canada. La SGDN est responsable de la mise en œuvre de ce plan.

L'aboutissement du plan GAP est le confinement et l'isolement centralisés du combustible nucléaire irradié dans un dépôt géologique en profondeur. Le projet n'ira de l'avant que si les communautés concernées, à savoir les communautés locales des Premières nations et des Métis, ainsi que les communautés environnantes, collaborent à la mise en œuvre du projet.

Le processus de sélection des sites est axé sur les communautés et conçu de manière à veiller, avant toute chose, à ce que le site sélectionné soit sûr et sécuritaire. Pour cela, des études techniques et sociales détaillées doivent être réalisées afin de réduire progressivement les options pour aboutir à un site de prédilection unique à l'horizon 2023.

Un plan de transport sûr, sécuritaire et socialement acceptable doit aussi être mis au point.

Selon la loi, les producteurs de combustible nucléaire irradié doivent financer l'intégralité de la mise en œuvre du plan canadien.

LE SAVIEZ-VOUS?

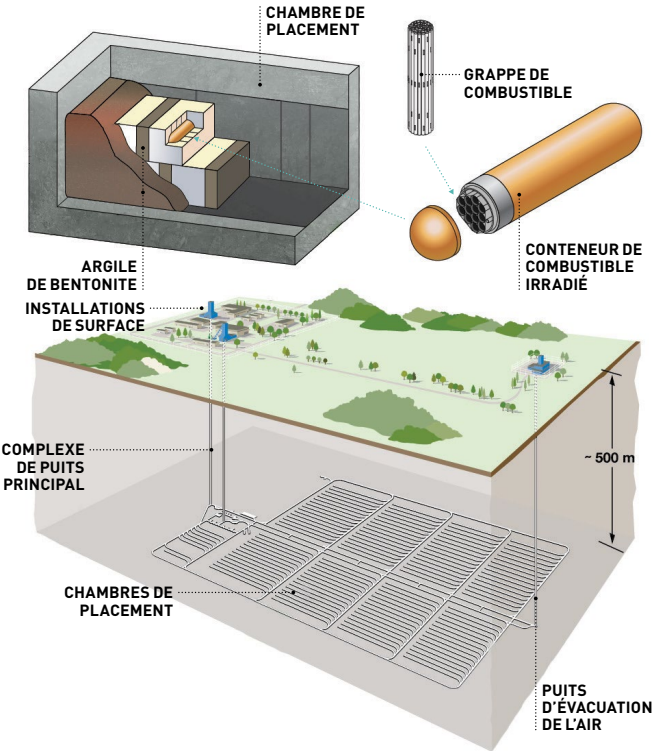
COMME L'EXIGE LA LOI SUR LES DÉCHETS DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE, LES PRODUCTEURS DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE IRRADIÉ ONT D'ORES ET DÉJÀ CONTRIBUÉ À DES FONDS EN FIDUCIE QUI ASSURENT LA GESTION À LONG TERME DU COMBUSTIBLE IRRADIÉ DU CANADA.

DÉPÔT GÉOLOGIQUE EN PROFONDEUR

Le combustible nucléaire sera entreposé dans un conteneur sécuritaire à environ 500 mètres sous la surface du sol dans une couche géologique profonde.

Grâce aux conteneurs de haute technologie et à la protection assurée par la formation géologique sécuritaire, ni le public ni l'environnement ne seront exposés au rayonnement.

SCHÉMA DE DÉPÔT GÉOLOGIQUE EN PROFONDEUR



SOURCE • Société de gestion des déchets nucléaires.
« Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment », mai 2016.
https://www.nwmo.ca/~/media/Site/Reports/2016/06/08/10/03/APM_REP_00440_0015_R001.ashx?la=en.

LE TRANSPORT

Chaque année, environ 20 millions de cargaisons de matières radioactives transitent dans le monde par transport routier, ferroviaire et maritime.

Le Canada possède une vaste expérience quant au transport des matières faisant partie du cycle du combustible nucléaire – y compris en ce qui concerne le transport du minerai d'uranium, des grappes de combustible, de l'eau tritiée et du combustible irradié. Il en va de même pour le transport d'autres matières telles que les radioisotopes.

En voici quelques-unes des mesures qui contribuent à la gestion sécuritaire des matières radioactives :

- Ingénierie sécuritaire des véhicules et contenants
- Personnel rigoureusement formé et dûment qualifié
- Suivi des stocks et reddition des comptes
- Organismes de réglementation professionnels indépendants
- Analyse et examen détaillés des incidents

Le transport sécuritaire des matières nucléaires est sous la responsabilité commune de la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) et de Transports Canada.

À ce jour, au Canada, aucun accident générant des émissions radioactives susceptibles d'être nocives pour la santé humaine ou l'environnement n'est jamais survenu pendant le transport.

LE SAVIEZ-VOUS?

SEULEMENT 5 % DES CARGAISONS DE MATIÈRES RADIOACTIVES SONT LIÉES AU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE. LE RESTE SE RATTACHE À DES DOMAINES TELS QUE LA MÉDECINE, L'AGRICULTURE, L'INDUSTRIE ET LA RECHERCHE.

SOURCES • Agence internationale de l'énergie atomique. « La sécurité du transport », 2018. https://www.iaea.org/fr/themes/la-securite-du-transport.

World Nuclear Transport Institute. « Nuclear Power », 2018. https://www.wnti.co.uk/nuclear-transport-facts/facts-figures.aspx.

TYPES D'EMBALLAGE

Pour l'emballage des matières radioactives, le Canada a adopté les normes de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), en fonction des caractéristiques des matières qu'ils renferment :

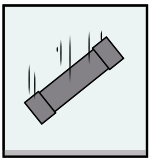
Les emballages industriels et exceptés suffisent pour les matières de faible activité, comme le minerai d'uranium.

Les emballages de type A sont conçus pour résister à des accidents mineurs et servent au transport de matières d'activité moyenne, comme les radioisotopes.

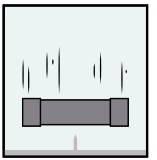
Les emballages de type B sont des châteaux de transport robustes et très sécuritaires utilisés pour le transport de combustible irradié et de déchets fortement radioactifs. Ces colis sont soumis à des essais rigoureux, notamment des épreuves de chute libre, des épreuves de perforation, des épreuves thermiques, des épreuves d'immersion.

Les emballages de type C offrent la plus grande protection contre les accidents. Ils sont utilisés pour le transport de matières dangereuses comme le plutonium et peuvent survivre le largage d'un avion en altitude de croisière.

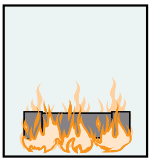
ESSAIS D'EMBALLAGE DE TYPE B



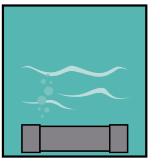
CHUTE LIBRE
chute libre de 9 mètres (30 pieds) sur une surface rigide



PERFORATION
chute libre d'un mètre (40 pouces) sur une tige d'acier



THERMIQUE
30 minutes de feu enveloppant à 800°C (1475°F)



IMMERSION
immersion de 8 heures dans l'eau

SCIENCE ET

TECHNOLOGIE NUCLÉAIRES

SCIENCE ET TECHNOLOGIE NUCLÉAIRES AU CANADA

La science et la technologie nucléaires font partie intégrante de la capacité de génie et de fabrication de notre pays. C'est pourquoi le gouvernement du Canada et l'industrie nucléaire canadienne investissent depuis longtemps dans le génie et la fabrication nucléaires.

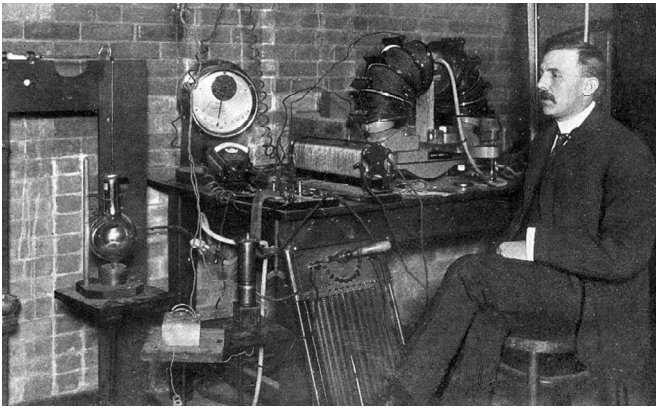
Des recherches sur le nucléaire sont menées dans les laboratoires et les universités ou sur le site des réacteurs de recherche partout dans le pays.

Le Canada est depuis toujours un chef de file de la recherche nucléaire. D'ailleurs, quatre chercheurs se sont vus décerner des prix Nobel pour leurs travaux dans le domaine réalisés au Canada :

- Ernest Rutherford en 1908 pour ses travaux menés à l'Université McGill sur la décroissance radioactive
- Richard E. Taylor en 1990 pour les premières découvertes sur les quarks en physique des particules
- Bertram N. Brockhouse en 1994 pour la mise au point de nouvelles techniques de diffusion neutronique
- Arthur B. McDonald en 2015 pour la découverte des oscillations de neutrinos qui montre que les neutrinos ont une masse

D'un bout à l'autre du Canada, la technologie nucléaire joue un rôle important dans presque tous les domaines techniques tels que la médecine, les aliments, l'agriculture, l'industrie, les ressources en eau et les produits de consommation.

ERNEST RUTHERFORD À MCGILL EN 1905



RADIOISOTOPES ET DEMI-VIES

La technologie nucléaire repose sur l'utilisation de radioisotopes – c'est-à-dire d'isotopes radioactifs d'un élément.

Tous les isotopes d'un élément donné ont le même nombre de protons dans leur noyau atomique mais un nombre différent de neutrons.

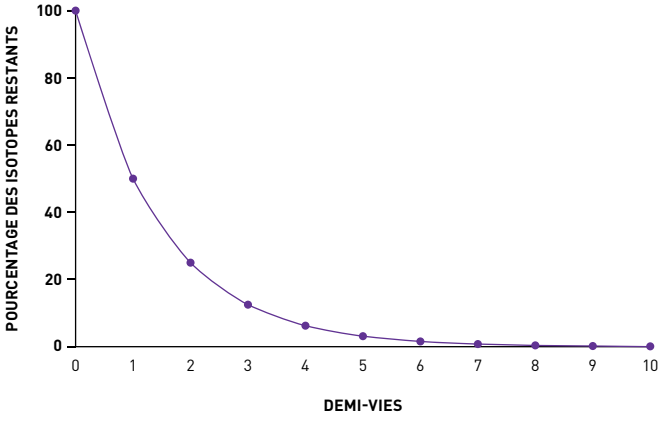
Les radioisotopes sont des isotopes qui ont un nombre instable de neutrons et qui sont soumis à un changement (ou « décroissance ») pour devenir stables, processus au cours duquel ils émettent des rayonnements.

Une demi-vie correspond au temps nécessaire pour la décroissance de la moitié d'un radioisotope. Plus la demi-vie est courte, plus l'isotope décroît rapidement, plus il est radioactif.

Le radioisotope de l'uranium utilisé pour produire le combustible, le radioisotope ^{235}U, a une demi-vie de 704 millions d'années. Cette demi-vie est très longue, ce qui explique pourquoi les grappes de combustible non utilisées peuvent être manipulées sans risque.

Les radioisotopes couramment utilisés en médecine incluent le cobalt 60, dont la demi-vie est de 5,27 ans, et le technétium 99, dont la demi-vie est de six heures.

DÉCROISSANCE RADIOACTIVE



LA MÉDECINE NUCLÉAIRE

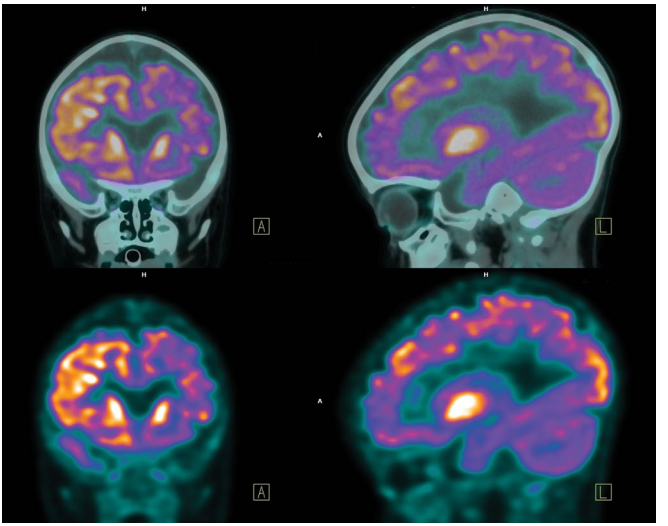
La médecine nucléaire utilise les rayonnements pour le diagnostic et pour déterminer les différents stades d'une maladie, notamment du cancer.

La médecine nucléaire fonctionne par injection d'un radioisotope dans le corps du patient. Cet isotope s'accumule dans les tissus cibles et émet des rayonnements captés par un détecteur situé à l'extérieur du corps.

Plus de 1,5 million d'imageries diagnostiques sont réalisées chaque année au Canada.

Le radioisotope le plus couramment utilisé en médecine nucléaire est le technétium 99, qui est produit à 35 % au Canada.

IMAGERIE DIAGNOSTIQUE DU CERVEAU



SOURCE • Instituts de recherche en santé du Canada. « Imagerie médicale », 2018. http://www.cihr-irsc.gc.ca/f/40539.html.

RADIOTHÉRAPIE ET STÉRILISATION

La radiothérapie est une technique couramment employée pour le traitement du cancer. Elle consiste à soumettre des parties spécifiques du corps à un rayonnement afin de détruire les cellules cancéreuses.

La radiothérapie peut être réalisée soit en externe par irradiation, soit en interne par injection de radioisotope.

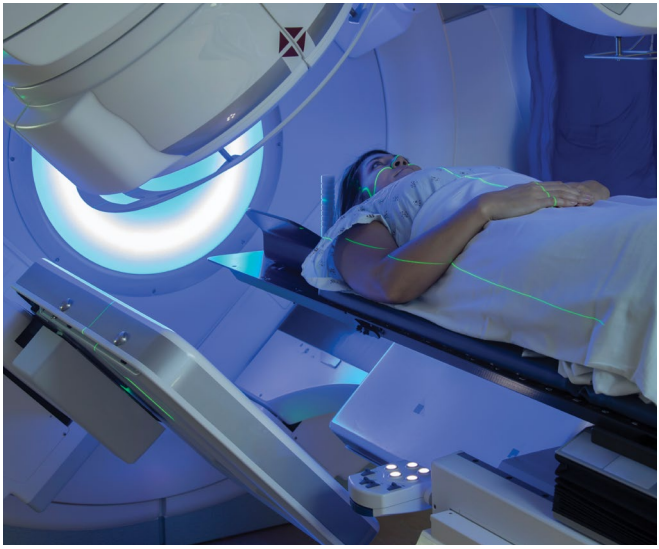
Environ 15 000 doses thérapeutiques sont administrées chaque année au Canada.

Le cobalt 60 est le radioisotope le plus fréquemment employé en radiothérapie. Plus de 70 % de l'approvisionnement mondial provient de centrales nucléaires canadiennes.

Les hôpitaux utilisent également le cobalt 60 pour stériliser du matériel médical comme les blouses, les gants, les masques, les seringues et les implants.

La stérilisation par rayonnement est moins chère que la stérilisation thermique traditionnelle. Elle ne cause pas de dommages dus à la chaleur et s'avère plus sûre, puisqu'elle peut être réalisée après conditionnement des éléments à stériliser.

PATIENT SOUMIS À UNE RADIOTHÉRAPIE



IRRADIATION DES ALIMENTS

L'irradiation des aliments est le processus consistant à utiliser des rayonnements pour tuer les bactéries, les insectes et les parasites susceptibles de causer des maladies alimentaires.

De plus, l'irradiation des aliments allonge la durée de conservation des aliments en détruisant les micro-organismes responsables de l'altération des aliments et en ralentissant le processus de mûrissement.

Plus de 60 pays, dont le Canada, irradient des produits alimentaires tels que la viande, les fruits, les légumes, les céréales et les épices.

L'entreprise canadienne Nordion fabrique la plupart des irradiateurs de aliments utilisés dans le monde.

SCHÉMA D'UN IRRADIATEUR

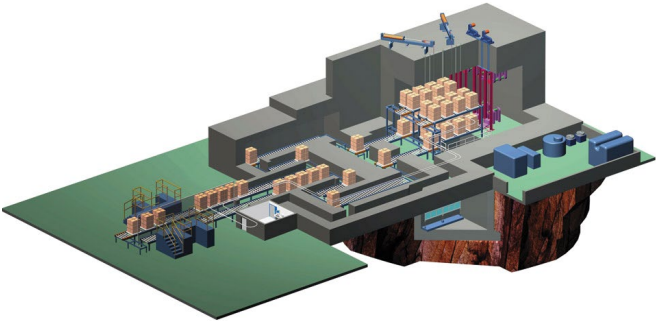


IMAGE • Nordion

LE SAVIEZ-VOUS?

DES ANNÉES DE RECHERCHE ONT DÉMONTRÉ QUE LES ALIMENTS IRRADIÉS SONT AUSSI SÛRS ET NOURRISSANTS QUE LES ALIMENTS CONSERVÉS PAR CONGÉLATION OU MIS EN CONSERVES!

APPLICATIONS AGRICOLES DES RAYONNEMENTS

Des rayonnements sont utilisés dans l'agriculture pour produire des variétés végétales plus souhaitables et réduire les pertes de cultures dues aux insectes.

Ces variétés végétales sont produites en exposant les graines à des rayonnements afin d'induire des modifications génétiques, selon un processus appelé sélection par mutation.

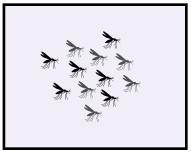
La sélection par mutation est utilisée depuis plusieurs dizaines d'années pour créer des cultures plus productives, nutritives, adaptées aux climats difficiles et résistantes aux ravageurs. Plus de 3 200 variétés végétales ont été mises au point de cette manière.

Les rayonnements sont aussi utilisés pour contrôler les populations d'insectes, par le biais de la Technique de l'insecte stérile (TIS).

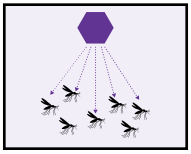
La TIS est une alternative aux pesticides respectueuse de l'environnement, qui consiste à élever, stériliser et relâcher des insectes mâles dans la nature, où ils s'accouplent avec des femelles mais n'engendrent aucune descendance.

Certains engrais contiennent des traces d'éléments radioactifs, qui déterminent les taux d'absorption des nutriments et améliorent la gestion de l'eau et des engrais.

TECHNIQUE DE L'INSECTE STÉRILE

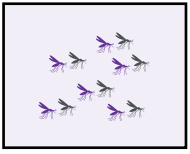


Les moustiques sont élevés en masse

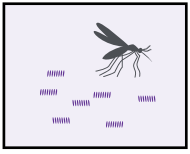


Les moustiques mâles sont isolés et stérilisés

Les mâles stérilisés sont relâchés dans la nature



Les mâles stérilisés s'accouplent avec des femelles sauvages



Les femelles sauvages pondent des oeufs infertiles

SOURCE • Agence internationale de l'énergie atomique. « Sélection par mutation », 2018. https://www.iaea.org/fr/themes/selection-par-mutation.

INSPECTIONS INDUSTRIELLES

On utilise des matières radioactives pour examiner la structure moléculaire et macroscopique des matériaux, sans les endommager ni les modifier. Il s'agit d'une forme de contrôle non destructif.

Comme les rayons X, les rayons gamma traversent les objets et créent une image de ces objets sur une pellicule, de manière à en révéler les défauts.

Entre autres applications, ces images nucléaires permettent :

D'étudier certains composants d'aéronef essentiels tels que les rotors, les ailes et les trains d'atterrissage, afin de réduire le risque de défaillance en vol;

D'examiner la structure des moteurs automobiles afin de les rendre plus fiables et de réduire le risque de défauts;

D'améliorer la structure de surface d'implants médicaux tels que les stimulateurs cardiaques, afin d'optimiser leur compatibilité avec le corps humain;

D'analyser des tuyaux et autres composants pétroliers et gaziers, afin de réduire le risque de défauts et donc de fuites et de contribuer à la bonne santé des personnes et de l'environnement; et

De mettre au point des systèmes avancés d'administration de médicaments, pour les rendre plus efficaces et réduire les effets indésirables associés.

JAUGES ET TRACEURS INDUSTRIELS

Une jauge nucléaire est un dispositif qui utilise une source radioactive pour détecter rapidement les caractéristiques d'un objet, telles que son épaisseur, sa densité ou sa composition chimique.

Il y a deux principaux types de jauges : fixes ou portatives.

Les jauges fixes sont généralement utilisées dans des installations de production pour contrôler et surveiller la qualité des produits.

Les jauges portatives sont amenées sur les chantiers pour différentes raisons, parmi lesquelles :

- L'analyse des parois des trous creusés afin d'identifier les dépôts minéraux;
- La recherche de cavités souterraines ou d'autres formations susceptibles de rendre instable un site de construction; et
- La détermination de la densité d'asphalte dans un revêtement afin d'optimiser la durée de vie de la route, la résistance à l'orniérage et la durabilité globale.

Des radioisotopes sont utilisés comme traceurs afin d'étudier les taux de mélange et d'écoulement de différents liquides, poudres et gaz, mais aussi pour localiser les fuites.

Les traceurs peuvent aider à caractériser les ressources en eau souterraine et de surface, notamment en ce qui concerne leur âge, leur provenance, leur distribution et leurs interconnexions, ainsi qu'à identifier les débits de rejet et vitesses de sédimentation.

HYGROMÈTRE / JAUGE DE DENSITÉ

IMAGE • Humboldt Scientific

LE SAVIEZ-VOUS?

LA COMMISSION CANADIENNE DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (CCSN) RÉGLEMENTE LA POSSESSION, L'UTILISATION, LE CONDITIONNEMENT, LE TRANSPORT, LE STOCKAGE, L'IMPORTATION ET L'EXPORTATION DE TOUS TYPES DE SUBSTANCES NUCLÉAIRES, Y COMPRIS LES JAUGES NUCLÉAIRES.

DESSALEMENT NUCLÉAIRE

La plupart des Canadiens ont la chance de pouvoir accéder facilement à une source d'eau douce. À l'inverse, de nombreuses régions du monde manquent d'eau potable.

Près de 19 000 usines de dessalement ont été construites dans 150 pays pour produire de l'eau potable.

La plupart de ces usines de dessalement sont alimentées par la combustion de combustibles fossiles, ce qui contribue à l'augmentation des émissions de GES.

Les usines nucléaires de dessalement utilisent quant à elles la chaleur de petits réacteurs nucléaires pour évaporer l'eau, éliminant le sel et les débris.

Bien qu'il existe plusieurs méthodes de dessalement, le dessalement nucléaire offre une chaleur non émettrice de carbone et un faible coût de carburant.

Plusieurs usines nucléaires de dessalement à capacité réduite et de démonstration sont actuellement en cours d'exploitation mais aucune commercialisation à grande échelle n'a été réalisée jusqu'à présent.

ENFANT BUVANT DE L'EAU POTABLE

LE SAVIEZ-VOUS?

ON ESTIME QU'UNE PERSONNE SUR CINQ DANS LE MONDE N'A PAS ACCÈS À L'EAU POTABLE.

SOURCES • International Desalination Association. « Dessalement par les numéros », 2018. http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/.

World Nuclear Association. « Desalination », 2018. http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-desalination.aspx.

MOYENS DE DÉPLACEMENT FONCTIONNANT À L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Navigation spatiale

L'énergie nucléaire est utilisée pour la navigation spatiale depuis 1961.

Des générateurs thermiques à radioisotopes (GTR) sont utilisés dans la plupart des missions spatiales. La chaleur générée par la décroissance d'une source radioactive, souvent du plutonium, est utilisée pour produire de l'électricité.

Les sondes spatiales Voyager, la mission Cassini vers Saturne, la mission Galileo vers Jupiter, la mission New Horizons vers Pluton et la mission Curiosity vers Mars étaient toutes alimentées par des GTR.

La mission Voyager 2, lancée en 1977, est la mission spatiale la plus longue jamais réalisée.

Transport maritime

L'énergie nucléaire est particulièrement adaptée aux navires qui doivent rester en mer pendant de longues périodes sans ravitaillement.

Actuellement, on compte plus de 140 navires à propulsion nucléaire, pour la grande majorité des sous-marins.

Transport routier

À l'avenir, l'électricité ou la chaleur produites par les centrales nucléaires pourraient être utilisées pour produire de l'hydrogène, notamment destiné à des piles à combustible pour les véhicules routiers.

ROVER CURIOSITY SUR MARS

IMAGE • NASA

SOURCE • World Nuclear Association. « The Many Uses of Nuclear Technology », 2018. http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/overview/the-many-uses-of-nuclear-technology.aspx.

LES BIENS DE CONSOMMATION

Les biens de consommation les plus courants utilisant la technologie nucléaire sont les détecteurs de fumée. Ils utilisent les rayonnements produits par une faible quantité d'américium 241 pour détecter la présence de fumée ou de chaleur.

Les enseignes d'issue de secours fonctionnent quant à elles au tritium, un isotope radioactif de l'hydrogène. Ces enseignes n'ont pas besoin d'électricité ou de piles et assurent ainsi une fonction de sécurité importante en cas de panne d'électricité.

Le tritium est également utilisé dans les horloges, les montres et les viseurs pour créer de la « lumière » en l'absence d'électricité.

Parmi les autres biens de consommation utilisant la technologie nucléaire, on peut citer :

- Les produits cosmétiques comme les solutions pour lentilles de contact et certains produits capillaires, qui sont stérilisés par rayonnement;
- Les poêles à frire, qui sont souvent traitées par rayonnement afin d'obtenir une surface antiadhésive; et
- Les photocopieurs, qui utilisent parfois du polonium radioactif pour empêcher l'accumulation d'électricité statique.

FONCTIONTIONNEMENT DES DÉTECTEURS DE FUMÉE

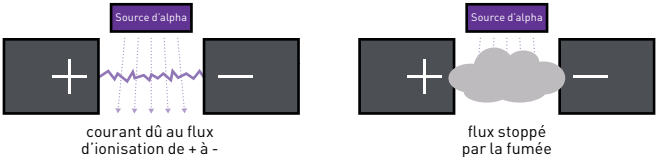


IMAGE • Enseignement de physique avancée

SOURCE • World Nuclear Association. « Radioisotopes in Consumer Products », 2018. http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-consumer-products.aspx.

AUTRES UTILISATIONS DE LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE

Les applications de la technologie nucléaire sont très vastes et incluent, en plus de celles qui ont été décrites précédemment :

La prévention de la propagation de maladies infectieuses telles qu'Ebola, la malaria ou Zika;

L'analyse de métaux, d'alliages et de matériaux électroniques;

La mesure de magnitudes et de sources d'érosion des sols;

L'identification de matériaux médico-légaux extrêmement petits ou dilués;

La détection, la surveillance et le suivi de contaminants alimentaires;

La caractérisation de matériels historiques et archéologiques;

L'amélioration de la santé, la productivité et la nutrition des cheptels;

La datation carbone de l'âge de roches et de matières organiques; et

La lutte contre la malnutrition et l'obésité infantile;

L'étude de la pollution de l'air et des aérosols.

SOURCE • Agence internationale de l'énergie atomique. « Analyse de matériaux », 2018. https://www.iaea.org/fr/themes/analyse-de-materiaux.

LES CENTRES DE RECHERCHE NUCLÉAIRE

Les centres de recherche nucléaire sont des installations clés pour promouvoir la science et la technologie nucléaires.

Le Canada compte plusieurs grands centres de recherche, dont cinq utilisant des réacteurs de recherche. D'autres centres utilisent des accélérateurs de particules, y compris les accélérateurs linéaires, les cyclotrons et les synchrotrons.

Les Laboratoires de Chalk River (LCR), détenus par Énergie atomique du Canada Limitée (EACL) et exploités par Laboratoires Nucléaires Canadiens (LNC), sont le principal centre de recherche nucléaire du Canada.

Les LCR comptent plusieurs installations nucléaires, dont le réacteur ZED 2 et l'Installation d'irradiation gamma au 60Co, en plus d'autres installations et laboratoires qui soutiennent l'innovation en matière de sûreté, de sécurité, de santé, d'environnement et d'énergie propre.

Jusqu'à sa fermeture en 2018, le réacteur national de recherche universel (NRU – National Research Universal) aux LCR était le plus puissant du Canada et le troisième plus puissant du monde.

TRIUMF exploite le plus puissant cyclotron du monde, ce qui donne au Canada une position de chef de file dans la recherche en physique atomique et en matière de nouveaux procédés de fabrication de radioisotopes.

Le Centre canadien de rayonnement synchrotron (CCRS) exploite le seul synchrotron du Canada.

LES LABORATOIRES DE CHALK RIVER

IMAGE • Laboratoires Nucléaires Canadiens

RÉACTEUR NRU

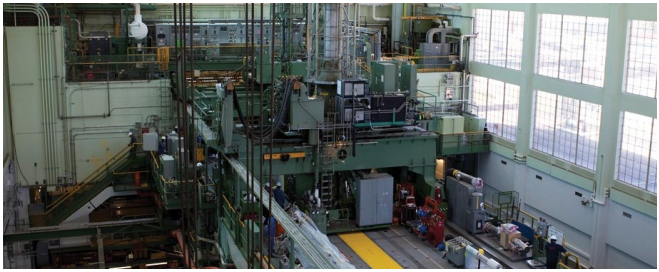


IMAGE • Laboratoires Nucléaires Canadiens

À L'INTÉRIEUR DU CYCLOTRON TRIUMF

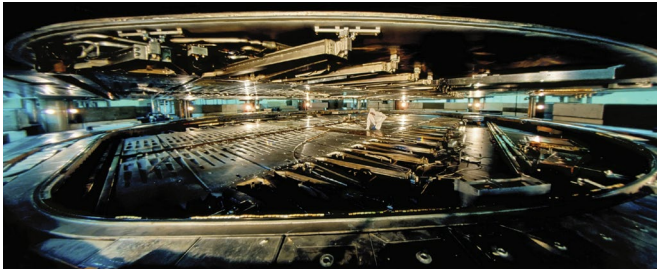


IMAGE • TRIUMF

À L'INTÉRIEUR DU SYNCHROTON DU CCRS

IMAGE • Centre canadien de rayonnement synchrotron

LA RECHERCHE SUR LA FUSION THERMONUCLÉAIRE

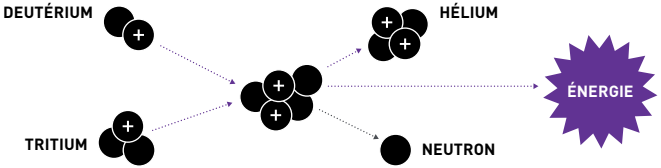
La fusion nucléaire est un procédé qui permet de libérer d'énormes quantités de chaleur en provoquant la compaction de noyaux atomiques. Il s'agit essentiellement du contraire de la fission, processus dans lequel les atomes se divisent.

Dans le Soleil, la gravité crée les conditions propices à la fusion. Ici, sur la Terre, la difficulté consiste à créer les mêmes conditions en utilisant des champs magnétiques et l'inertie.

L'un des combustibles les plus efficaces pour produire une énergie de fusion est un mélange d'isotopes lourds de l'hydrogène (deutérium et tritium), ce qui signifie que l'eau pourrait devenir une importante source de combustible.

En plus de constituer une source de combustible abondante, la fusion pourrait devenir un mode de production d'énergie relativement propre et générer des déchets ayant une période radioactive plus courte par rapport à la fission.

FUSION NUCLÉAIRE



PROTOTYPE DE RÉACTEUR DE FUSION

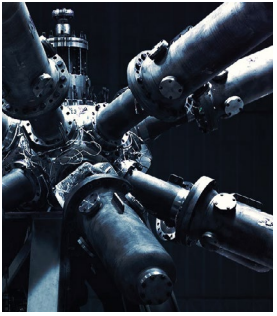


IMAGE • General Fusion

LE SAVIEZ-VOUS?

UN KILOMÈTRE CUBE D'EAU PEUT PRODUIRE PLUS D'ÉNERGIE DE FUSION QUE TOUT LE CHARBON, LE PÉTROLE ET LE GAZ JAMAIS DÉCOUVERTS DANS TOUTE L'HISTOIRE DE L'HUMANITÉ!

RAYONNEMENT,

SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET RÉGLEMENTATION

LE RAYONNEMENT

Le rayonnement est une énergie qui se propage sous forme d'ondes ou de particules. Il est présent partout dans l'univers, notamment dans les roches terrestres et dans l'espace profond.

Le son, la lumière et la chaleur sont des types de rayonnement que les humains peuvent sentir directement. D'autres types, tel que les micro-ondes, les ondes radio et le rayonnement ionisant, ne peuvent être observés qu'indirectement.

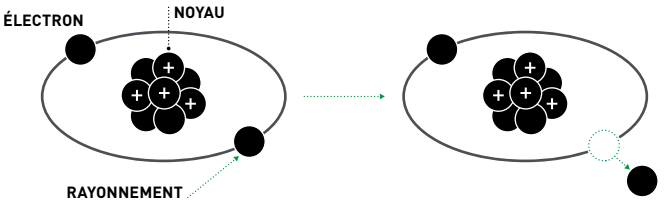
Dans le contexte de l'énergie nucléaire, le terme « rayonnement » renvoie habituellement au rayonnement ionisant.

Un rayonnement ionisant est émis lors de la décroissance d'atomes. C'est un type de rayonnement très énergétique qui peut arracher des électrons aux atomes dans la matière irradiée.

Le rayonnement ionisant se produit naturellement et se retrouve tout autour de nous. Le niveau normal de rayonnement dans un endroit donné est appelé « rayonnement de fond ».

Dans le contexte de la sûreté nucléaire et de la santé humaine, les principaux types de rayonnement sont les particules alpha et bêta ainsi que les rayons gamma.

RAYONNEMENT IONISANT



LE RAYONNEMENT DE FOND

Le rayonnement de fond provient de sources naturelles et artificielles (créées par l'homme).

À l'échelle mondiale, le rayonnement de fond naturel est en moyenne de 2,4 mSv/an, avec d'importantes variations locales. À certains endroits, comme à Ramsar en Iran, les niveaux de rayonnement naturel peuvent atteindre 260 mSv/an – soit cinq fois la limite de dose fixée pour les travailleurs du secteur nucléaire canadien.

En moyenne, les Canadiens sont naturellement exposés à environ 1,8 mSv/an. Les niveaux locaux varient de 1,3 mSv à Vancouver à 4,1 mSv environ à Winnipeg. La majeure partie de ce rayonnement provient des roches du sol et du gaz radon d'origine naturelle.

Le rayonnement de l'énergie nucléaire produit moins de 0,1 % de notre rayonnement de fond naturel.

SOURCES DE RAYONNEMENT DANS LE MONDE

NATURELLE

- Inhalation (principalement du radon) – 1,26 mSv **42 %**
- Terrestre – 0,48 mSv **16 %**
- Cosmique – 0,39 mSv **13 %**
- Ingestion – 0,29 mSv **10 %**

ARTIFICIELLE

- Médical – 0,60 mSv **20 %**
- Autres* – 0,002 mSv **0,4 %**

*Exposition professionnelle, analyse de l'air et déversements de déchets nucléaires, entre autres sources.

SOURCES • Commission canadienne de sûreté nucléaire. « Doses de rayonnement », 2018. http://www.nuclearsafety.gc.ca/fra/resources/radiation/introduction-to-radiation/radiation-doses.cfm.

Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants. « Sources and Effects of Atomic Radiation: UNSCEAR 2008 Report », 2010, p. 4. http://www.unscear.org/docs/publications/2008/UNSCEAR_2008_Report_Vol.I.pdf.

MESURE ET EFFETS DU RAYONNEMENT

Il existe différentes façons de mesurer le rayonnement. Un compteur Geiger peut mesurer le rayonnement alpha, bêta ou gamma. On peut aussi mesurer des doses de rayonnement cumulatives à l'aide d'un dosimètre personnel.

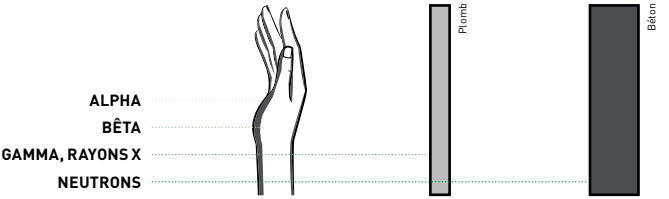
Les effets biologiques varient selon le type de rayonnement ionisant. Pour tenir compte des différences, on mesure généralement ces effets en millisieverts (mSv).

Un rayonnement ionisant ne peut rendre radioactifs des atomes qui ne le sont pas au départ. C'est pourquoi on peut y avoir recours pour stériliser les aliments ou les fournitures médicales.

Toutefois, à forte dose, le rayonnement ionisant peut endommager des tissus sains et causer de graves maladies.

On n'a pu établir avec certitude un niveau de rayonnement sûr, mais l'état actuel de la recherche montre qu'une dose allant jusqu'à 100 mSv/an n'a aucun effet mesurable sur la santé humaine.

CAPACITÉ DE PÉNÉTRATION DES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENT



LES EFFETS DU RAYONNEMENT SUR LE CORPS

Les faibles doses que nous recevons en raison du rayonnement naturel et des procédures médicales présentent peu de risque pour notre santé, mais de fortes doses reçues en peu de temps (appelées doses aiguës) peuvent être très dangereuses.

De doses d'une telle ampleur ne se produisent que dans des circonstances extrêmes, comme dans le cas des travailleurs d'urgence après l'accident de Tchernobyl. Aucun incident entraînant des doses de cette ampleur n'est jamais survenu au Canada.

DOSES DE RAYONNEMENT ET EXEMPLES

MSV	EXEMPLE
10 000	Dose aigüe provoquant la mort en quelques semaines
6 000	Dose aigüe reçue par certains des secouristes de Tchernobyl
5 000	Dose aigüe qui causerait dans un délai d'un mois la mort de la moitié des personnes exposées
1 000	Dose aigüe entraînant une maladie attribuable aux radiations, mais pas la mort
600	Dose maximale de radiation à l'heure enregistré à Fukushima le 14 mars 2011
350	Dose reçue par les résidents de Tchernobyl qui ont été relocalisés
150	Dose annuelle reçue par les astronautes à bord de la station spaciale internationale
50	Limite de dose annuelle pour les travailleurs du secteur nucléaire
10	Tomodensitogramme (CT-scan) corporel complet
1,8	Dose annuelle reçue par les Canadiens en raison du rayonnement de fond naturel
1,0	Dose annuelle reçue par les travailleurs du secteur nucléaire
0,1	Radiographie pulmonaire
0,01	Radiographie dentaire
0,001	Dose annuelle attribuable aux réacteurs nucléaires du Canada pour les personnes vivant à proximité

LE SAVIEZ-VOUS?

LA VIE SUR TERRE A ÉVOLUÉ DANS UN CHAMP DE RAYONNEMENT, ET CERTAINES RECHERCHES PROUVENT QUE NOS CELLULES PEUVENT RÉPARER LES DOMMAGES CAUSÉS PAR LE RAYONNEMENT!

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Le Programme électronucléaire du Canada a un bilan exemplaire dans lequel s'inscrivent plus de 60 ans de santé et de sûreté de ses travailleurs et du public, ce qui en fait un chef de file de l'industrie au niveau mondial.

Il existe de nombreuses couches de protection entre les installations nucléaires et les collectivités dans lesquelles elles sont exploitées. Ces couches de protection permettent d'assurer la sûreté des travailleurs, des collectivités et de l'environnement, afin de les protéger contre les incidents dus à une erreur humaine, une défaillance matérielle ou une force externe (p. ex. un tremblement de terre).

La production d'énergie nucléaire est la seule technologie faisant l'objet d'une surveillance par un organisme international onusien, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).

En raison de cette étroite surveillance et d'une réglementation des plus rigoureuses, tant sur le plan national qu'international, la production d'énergie nucléaire est l'une des technologies les plus sûres au monde.

LE DIRECTEUR GÉNÉRAL DE L'AIEA YUKIYA AMANO

LE SAVIEZ-VOUS?

LA TECHNOLOGIE NUCLÉAIRE PRÉSENTE L'UN DES PLUS BAS TAUX DE BLESSURES OU D'ACCIDENTS MORTELS PAR UNITÉ D'ÉLECTRICITÉ PRODUITE!

LA RÉGLEMENTATION NUCLÉAIRE

La Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN) est l'organisme de réglementation nucléaire du Canada.

La CCSN est un organisme indépendant qui relève du Parlement par l'entremise du ministre des Ressources naturelles. Elle possède des pouvoirs quasi judiciaires, comparables à ceux d'une cour de justice, et peut imposer à des particuliers et à des organisations les sanctions prévues par la loi telles que des amendes.

La CCSN réglemente l'utilisation de l'énergie et des matières nucléaires afin de préserver la santé, la sûreté et la sécurité des Canadiens et de protéger l'environnement

Elle surveille et réglemente le cycle complet du combustible nucléaire et les autres utilisations des matières nucléaires, notamment les mines d'uranium, les usines de concentration et les installations de traitement de l'uranium, les usines de fabrication de combustible, les centrales nucléaires, les installations de stockage de déchets radioactifs, les installations de recherche nucléaire et les installations de traitement des substances nucléaires.

Toute personne ou organisation qui souhaite posséder, utiliser, transporter ou stocker des matières nucléaires ou construire, exploiter, déclasser ou abandonner une installation nucléaire, y compris une centrale nucléaire, doit obtenir au préalable un permis auprès de la CCSN.

La CCSN honore les engagements internationaux du Canada à l'égard de l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire.

Sur la scène internationale, la CCSN collabore depuis longtemps avec d'autres organismes dans le cadre de partenariats bilatéraux ou multilatéraux. La mise en commun des pratiques exemplaires et les examens par les pairs sont fréquents au sein de l'AIEA et de l'Association mondiale des exploitants de centrales nucléaires (WANO – World Association of Nuclear Operators).

LE RÔLE DE LA CCSN

La CCSN évalue actuellement de nouveaux projets nucléaires proposés, notamment un projet de dépôt géologique en profondeur permettant le stockage de déchets nucléaires sur le site de Bruce, un projet d'installation de stockage de déchets près de la surface aux Laboratoires de Chalk River, un projet de déclassement sur place du réacteur nucléaire de démonstration (NPD – Nuclear Power Demonstration), à Rolphton (Ontario), et un projet de déclassement du réacteur WR 1 aux Laboratoires de Whiteshell à Pinawa (Manitoba).

La CCSN travaille en collaboration avec le Bureau de gestion des grands projets du gouvernement fédéral, dépendant de Ressources naturelles Canada qui pilote ces grands projets portant sur les ressources naturelles.

INSPECTION D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE EFFECTUÉE PAR LA CCSN

IMAGE • Commission canadienne de sûreté nucléaire

LE SAVIEZ-VOUS?

DES EMPLOYÉS DE LA CCSN SE TROUVENT SUR LE SITE DE CHAQUE CENTRALE NUCLÉAIRE CANADIENNE AINSI QUE DANS LES LABORATOIRES DE CHALK RIVER ET DANS CINQ BUREAUX RÉGIONAUX À TRAVERS LE CANADA.

LA SÉCURITÉ SUR LES CHANTIERS

Au Canada, la sécurité nucléaire est réglementée par la CCSN, qui fixe des exigences de sécurité détaillées pour les installations nucléaires autorisées.

Les exigences de sécurité sont établies de façon à protéger les installations nucléaires contre toute possibilité d'infiltration ou d'attaque, et à veiller à ce que le matériel nucléaire reste entre de bonnes mains.

Les principales exigences de sécurité incluent :

- Les évaluations annuelles des menaces et des risques;
- La disponibilité de forces d'intervention armées sur site 24 h/24, 7 j/7;
- Les contrôles de sécurité renforcés pour les employés et les sous-traitants, avec notamment des contrôles d'antécédents, de casier judiciaire et de sécurité;
- La mise en place de contrôles d'accès renforcés pour les installations nucléaires;
- L'élaboration d'analyses des menaces de base pour les installations nucléaires;
- La mise en place d'une alimentation sans interruption pour la surveillance par alarme et les autres systèmes de sécurité; et
- La planification des urgences, les manœuvres et les exercices.

FORCE D'INTERVENTION DE LA CENTRALE DE BRUCE POWER

IMAGE • Bruce Power

SOURCE • Commission canadienne de sûreté nucléaire. « Gestion des urgences et sécurité nucléaire », 2018. http://suretenucleaire.gc.ca/fra/resources/emergency-management-and-safety/index.cfm.

LA CYBERSÉCURITÉ

La cybersécurité est la pratique qui consiste à protéger les systèmes, les réseaux et les programmes contre les attaques numériques.

Toutes les infrastructures essentielles, y compris celles des centrales nucléaires, s'appuient sur des mesures de cybersécurité efficaces pour se protéger contre les attaques.

La CCSN impose des réglementations strictes en matière de cybersécurité, qui sont régulièrement révisées pour intégrer les menaces nouvelles et émergentes.

Les systèmes de sécurité et de contrôle des réacteurs nucléaires canadiens et d'autres composants essentiels des centrales ne sont pas reliés à des réseaux d'entreprise ou à Internet. Grâce à cela, il est pratiquement impossible qu'une cyberattaque affectant la sécurité ou les opérations se produise.

Aucune cyberattaque contre une centrale nucléaire canadienne ayant mis en péril la sécurité du public n'a jamais été commise.

CHEFS D'ÉTAT LORS DU SOMMET SUR LA SÉCURITÉ NUCLÉAIRE DE 2016

LES RESSOURCES

TESTEZ VOS CONNAISSANCES

1 Combien de réacteurs nucléaires de puissance y a-t-il au Canada?

a. 13
b. 19
c. 25
d. 31

2 Une centrale nucléaire émet du dioxyde de carbone (CO_2) pendant son exploitation.

a. Vrai
b. Faux

3 Quelle réalisation parmi les suivantes doit-on à la technologie nucléaire?

a. La production d'isotopes médicaux servant à diagnostiquer et à traiter le cancer et d'autres maladies.
b. La destruction des agents pathogènes alimentaires qui causent l'intoxication alimentaire et la détérioration prématurée
c. La possibilité d'étudier l'intégrité des composants de l'aéronef comme les rotors et les ailes
d. Tout ce qui précède

4 Le nucléaire est plus cher comparativement à d'autres sources d'énergie.

a. Vrai
b. Faux

5 Les centrales nucléaires émettent des quantités dangereuses de radiation.

a. Vrai
b. Faux

6 Quelles provinces canadiennes utilisent l'énergie nucléaire?

a. Colombie-Britannique et l'Alberta
b. Saskatchewan et Ontario
c. Ontario et Nouveau-Brunswick
d. Nouveau-Brunswick et la Nouvelle-Écosse

7 Combien de personnes l'industrie nucléaire canadienne emploie-t-elle directement et indirectement?

a. 10 000
b. 20 000
c. 40 000
d. 60 000

8 Le Canada a une solution pour l'élimination des déchets nucléaires.

a. Vrai
b. Faux

9 L'énergie nucléaire produit une grande quantité de déchets par rapport à d'autres sources d'énergie.

a. Vrai
b. Faux

10 Quel pourcentage de l'offre mondiale de cobalt 60 est produit au Canada?

a. 10 %
b. 30 %
c. 50 %
d. 70 %

Corrigé : 1) b, 2) b, 3) d, 4) b, 5) b, 6) c, 7) d, 8) a, 9) b, 10) d

ÉTABLISSEMENTS POSTSECONDAIRES CANADIENS DOTÉS D'UN PROGRAMME DE RECHERCHE NUCLÉAIRE

Collège Algonquin ..... **algonquincollege.com**
Collège militaire royal du Canada ..... **rmc.ca**
Institut universitaire de technologie de l'Ontario ..... **uoit.ca**
Polytechnique Montréal ..... **polymtl.ca**
Université Brock ..... **brocku.ca**
Université Carleton ..... **carleton.ca**
Université de Calgary ..... **ucalgary.ca**
Université de Guelph ..... **uoguelph.ca**
Université de Saskatchewan ..... **usask.ca**
Université de Toronto ..... **utoronto.ca**
Université de Waterloo ..... **uwaterloo.ca**
Université de Western Ontario ..... **uwo.ca**
Université de Windsor ..... **uwindsor.ca**
Université du Nouveau-Brunswick ..... **unb.ca**
Université McMaster ..... **mcmaster.ca**
Université Queen's ..... **queensu.ca**

Votre établissement devrait-il figurer sur cette liste?

Si un programme d'études supérieures comportant un volet nucléaire nous a échappé, veuillez nous en faire part à info@cna.ca.

LE CŒUR DU RÉACTEUR DE L'UNIVERSITÉ MCMASTER

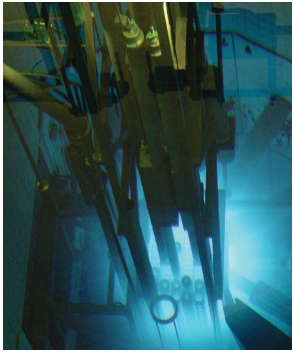


IMAGE • Université McMaster

LE SAVIEZ-VOUS?

LE CŒUR DU RÉACTEUR DE L'UNIVERSITÉ MCMASTER EST L'UN DES RARES AU MONDE À ÊTRE VISIBLE ET ACCESSIBLE PENDANT L'EXPLOITATION!

AUTRES RESSOURCES

Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire ..... **oecd-nea.org**
Agence internationale de l'énergie ..... **iea.org**
Agence internationale de l'énergie atomique ..... **iaea.org**
Association canadienne de l'électricité ..... **electricity.ca**
Bruce Power ..... **brucepower.com**
Cameco ..... **cameco.com**
Canadian Nuclear Isotope Council ..... **canadianisotopes.ca**
CANDU Owners Group ..... **candu.org**
Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants ..... **unscear.org**
Commission canadienne de sûreté nucléaire ..... **nuclearsafety.gc.ca**
Conseil canadien de l'énergie ..... **energy.ca**
Conseil Canadien des Travailleurs du Nucléaire ..... **cnwc-cctn.ca**
Énergie NB ..... **nbpower.com**
General Fusion ..... **generalfusion.com**
Hydro-Québec ..... **hydroquebec.com**
Independent Electricity Systems Operator ..... **ieso.ca**
International Commission on Radiological Protection ..... **icrp.org**
Laboratoires Nucléaires Canadiens ..... **cnl.ca**
Nordion ..... **nordion.com**
North American Young Generation in Nuclear ..... **naygn.org**
Nuclear Energy Institute ..... **nei.org**
Nuclear Industry Association ..... **niauk.org**
Ontario Power Generation ..... **opg.com**
Ontario's Nuclear Advantage ..... **ontariosnuclearadvantage.com**
Organisation mondiale de la Santé—radiation ionisante ..... **who.int/ionizing_radiation**
Organization of Canadian Nuclear Industries ..... **ocni.ca**
Ressources naturelles Canada—Énergie nucléaire ..... **nuclear.nrcan.gc.ca**
Saskatchewan Mining Association ..... **saskmining.ca**
SNC-Lavalin—Énergie nucléaire ..... **snclavalin.com/nuclear**
Société de gestion des déchets nucléaires ..... **nwmo.ca**
Société Nucléaire Canadienne ..... **cns-snc.ca**
Society for the Preservation of Canada's Nuclear Heritage ..... **nuclearheritage.ca**
Statistique Canada ..... **statcan.gc.ca**
Sylvia Fedoruk Canadian Centre for Nuclear Innovation ..... **fedorukcentre.ca**
TRIUMF ..... **triumf.ca**
U.S. Energy Information Administration ..... **eia.gov**
Women in Nuclear Canada ..... **canada.womeninnuclear.org**
World Nuclear Association ..... **world-nuclear.org**
World Nuclear Transport Institute ..... **wnti.co.uk**

À PROPOS DE L'ANC

L'Association nucléaire canadienne (ANC) est une organisation à but non lucratif créée en 1960 pour représenter l'industrie nucléaire au Canada et pour promouvoir le développement et la croissance des technologies nucléaires à des fins pacifiques.

L'ANC vise à :

- Créer et à encourager un cadre réglementaire raisonnable ainsi qu'un environnement politique favorable à l'avancement de l'industrie nucléaire au Canada;
- Favoriser la coopération entre divers secteurs, services d'utilité publique, établissements d'enseignement, organismes et ministères gouvernementaux, et autres entités compétentes, qui ont un intérêt commun à développer l'usage économique de l'énergie nucléaire et des radioisotopes; et
- Offrir une tribune favorable aux échanges et à la résolution de questions touchant les membres, l'industrie, ou le public canadien.

À propos de l'Aide-mémoire du nucléaire au Canada

Depuis 2004, l'Association nucléaire canadienne publie régulièrement son Aide-mémoire du nucléaire au Canada. Elle en distribue chaque année 30 000 exemplaires à des écoles, des universités, des centres d'information dans les installations nucléaires, des associations industrielles, des parlementaires et beaucoup d'autres groupes. Des milliers d'exemplaires sont remis gratuitement sur demande à des particuliers et à des organisations au Canada et ailleurs dans le monde. Pour obtenir sans frais d'autres exemplaires de cet Aide-mémoire, il suffit de nous faire parvenir un courriel à info@cna.ca.

PARTICIPEZ À LA CONVERSATION PARLONS NUCLÉAIRE

CONSULTEZ NOTRE BLOGUE
TalkNuclear.ca

SUIVEZ-NOUS SUR TWITTER
@TalkNuclear

CLIQUEZ SUR « J'AIME » POUR NOTRE PAGE FACEBOOK
facebook.com/TalkNuclear

REGARDEZ-NOUS SUR YOUTUBE
youtube.com/TalkNuclear

PARTICIPEZ À NOTRE CONFÉRENCE ANNUELLE
cna.ca/fr/conference

VOUS SOUHAITEZ PARLER NUCLÉAIRE ET DONNER DES COURS SUR LE NUCLÉAIRE? CONSULTEZ NOS RESSOURCES PÉDAGOGIQUES COMPLÈTES À TEACHNUCLEAR.CA/FR.

130, rue Albert, bureau 1610, Ottawa (Ontario) K1P 5G4
613 237 4262 info@cna.ca cna.ca

© Association nucléaire canadienne 2019

L'AIDE-MÉMOIRE
DU NUCLÉAIRE AU CANADA
2019

anc association nucléaire canadienne