

Stratégie nationale de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons

Document de discussion pour la table ronde, « Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons : Vers une Stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons »

Cette table ronde se fera en mode virtuel, les 15 et 16 décembre 2020



Ce document de discussion et la table ronde correspondante de l'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons (ICFN) sont produits en partenariat avec l'Institut canadien de recherches avancées (CIFAR).



Nous remercions aussi les commanditaires suivants :



brightness²



EUROPEAN
SPALLATION
SOURCE



BrightnESS² est financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon de l'Union européenne dans le cadre de l'accord de subvention n° 823867.

Table des matières

1	Sommaire exécutif et aperçu d’une stratégie nationale	5
2	Consultation sur la stratégie	10
3	Le présent : Des assises solides pour le maintien de l’excellence	13
3.1	Communauté canadienne des utilisateurs de faisceaux de neutrons.....	13
3.2	Université McMaster	17
3.3	Autres capacités et intérêts en matière de faisceaux de neutrons	19
4	Tisser des partenariats étrangers	21
4.1	Renouvellement mondial des sources avancées de neutrons.....	21
4.2	Participation du Canada à la Spallation Neutron Source (SNS) (2008–2018).....	21
4.3	Diminution de l’approvisionnement en neutrons	22
4.4	Accès réduit pour les Canadiens	23
4.5	Possibilités de partenariats.....	26
4.6	Activités actuelles visant l’établissement de partenariats	28
4.7	Objectif 1 — Questions à débattre	28
5	Miser sur les capacités nationales	29
5.1	Possibilité pour le Canada de contribuer à l’approvisionnement mondial en neutrons	29
5.2	Pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster	30
5.3	Activités récentes visant à accroître les capacités nationales	31
5.4	Objectif 2 — Questions à débattre	31
6	Explorer de nouvelles sources de neutrons à long terme	33
6.1	Contexte mondial.....	33
6.2	Options du Canada.....	33
6.3	Activités courantes contribuant à la stratégie à long terme	34
6.4	Objectif 3 — Questions à débattre	34
7	Créer un nouveau cadre.....	36
7.1	Cadre historique des faisceaux de neutrons.....	36
7.2	Évolution du cadre des installations de recherche majeures	37
7.3	Leçons pour l’avenir	38
7.4	Neutrons Canada	38
7.5	Objectif 4 : Questions à débattre.....	44
8	Équité, diversité et inclusion.....	45
8.1	EDI — Questions à débattre	46
9	Modèle financier d’un programme national.....	47
9.1	Modèle de coûts	47

9.2	Modèle de financement.....	50
10	Conclusion : Feuille de route pour rétablir l'accès aux faisceaux de neutrons	51
	Annexe A : Impact de la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons	52
A1.	Environnement propre.....	53
A2.	Compétitivité économique et croissance propre	53
A3.	Sûreté et sécurité.....	54
A4.	Santé et sécurité alimentaire	55
A5.	Recherche fondamentale et réputation scientifique.....	55
A6.	Formation de personnel hautement qualifié.....	56
	Annexe B : Historique des Laboratoires de Chalk River (1947–2018)	58
	Annexe C : Analyse des parties prenantes de la Stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons.....	62
	Annexe D : Groupe de travail de l'ICFN	65

1 Sommaire exécutif et aperçu d'une stratégie nationale

Pour relever les défis sociaux, environnementaux et économiques du pays, le Canada doit se doter d'une boîte à outils scientifique avancée et exhaustive qui favorisera la recherche et l'innovation dans le domaine des matériaux. Comme tout se compose de matériaux, l'innovation dans le domaine sous-tend presque toutes les avancées technologiques au service des priorités nationales, notamment :



Environnement propre : Produire de l'énergie propre, que ce soit par l'énergie éolienne, solaire ou nucléaire, et la stocker efficacement dans un réseau électrique efficient.

Croissance économique propre : Fabriquer des pièces pour des voitures, des avions et des navires légers et écoénergétiques, à l'aide de l'impression 3D ou d'autres technologies de fabrication avancées.



Sûreté et sécurité : Contribuer à la non-prolifération nucléaire, assurer la sécurité des pipelines et des chemins de fer et déterminer l'aptitude fonctionnelle des navires militaires.

Santé et sécurité alimentaire : Comprendre les matériaux biologiques du corps à l'échelle nanométrique, concevoir des instruments médicaux et créer des cultures résilientes.



Les faisceaux de neutrons sont des outils polyvalents et irremplaçables pour la recherche sur les matériaux. Depuis plus de 70 ans, les Canadiens sont à l'avant-garde du domaine et exploitent ces outils au profit de retombées socio-économiques majeures. L'une de ces retombées, la réduction du temps d'arrêt du parc de centrales nucléaires du Canada, **a permis d'économiser des centaines de millions de dollars** et a compensé tous les investissements réalisés à ce jour par le Canada dans les installations de faisceaux de neutrons. Parmi d'autres retombées, notons le renforcement de la réputation scientifique du Canada grâce à l'excellence de la recherche, y compris des contributions majeures à des découvertes qui ont été récompensées par le prix Nobel de physique en 2016. À l'annexe A, nous explorons des exemples de retombées dans chacun des domaines prioritaires susmentionnés et la manière dont ces recherches renforcent l'économie de l'innovation du Canada, sa réputation scientifique et la formation de personnes hautement qualifiées.

L'importance des faisceaux de neutrons en tant qu'outils de recherche est reconnue à l'échelle mondiale. Les faisceaux de neutrons nous permettent de recueillir des connaissances sur les matériaux qu'il est impossible d'obtenir par d'autres techniques scientifiques. Voilà pourquoi Bertram Brockhouse,



Les faisceaux de neutrons ont permis de résoudre les problèmes de fissuration du parc de réacteurs nucléaires canadiens et d'éviter les temps d'arrêt.

« La recherche au moyen de faisceaux de neutrons a permis aux exploitants de centrales [nucléaires canadiennes]... de recueillir des données essentielles [ce qui] a entraîné divers bienfaits pour la population : la dose de rayonnement à laquelle s'exposent les inspecteurs a beaucoup diminué en minimisant le temps passé près de la face du réacteur. Le temps d'arrêt des centrales a diminué tout en respectant les marges de sécurité et en procurant des économies financières. Des services publics d'électricité étrangers qui emploient la technologie canadienne ont profité de nouvelles données pour l'exploitation sûre, fiable et économique de leurs centrales, renforçant ainsi la collaboration. »

— Paul Spekkens, ancien vice-président—développement scientifique et technologique, Ontario Power Generation (2004–2016)

Que sont les faisceaux de neutrons?

Tout comme les faisceaux de lumière sont utilisés dans un microscope pour découvrir des matériaux à petite échelle, les faisceaux de neutrons se diffusent à partir des matériaux de façons différentes et révèlent ainsi certains détails de la structure atomique et du mouvement moléculaire à l'échelle nanométrique — des détails qui sont tout simplement impossibles à « voir » avec d'autres outils ou méthodes scientifiques.

pionnier canadien de la diffusion neutronique au service de la recherche sur les matériaux, a reçu le prix Nobel de physique en 1994. La valeur continue des faisceaux de neutrons pour la recherche est reconnue par des nations innovantes qui ont déjà engagé **plus de 8 milliards de dollars en dépenses en capital au cours des 20 dernières années** au profit d'installations de faisceaux de neutrons dans le monde entier.

Les faisceaux de neutrons manquent aujourd'hui à la boîte à outils scientifique du Canada. Le Canada a perdu l'accès à ces outils irremplaçables en 2018, lorsque la seule grande source de neutrons du pays, le réacteur NRU de Chalk River, a été mise hors service de façon permanente sans aucun plan de remplacement. À l'époque, **environ 800 scientifiques, ingénieurs et étudiants** du milieu universitaire, du gouvernement et de l'industrie au Canada et dans le monde entier comptaient sur l'accès à ses faisceaux de neutrons. Cette même année, le seul accord du Canada pour accéder à une source de neutrons étrangère est arrivé à échéance. Si l'accès n'est pas rétabli, de nombreux programmes canadiens qui requièrent des neutrons cesseront, tandis que les autres progresseront à un rythme beaucoup plus lent à l'aide seulement de deux lignes de faisceaux au réacteur nucléaire McMaster à faible luminosité ou en utilisant un accès très limité aux sources américaines tant que les Canadiens y seront les bienvenus¹. Les étudiants ne pourront pas profiter de la grande expérience de formation que représente l'utilisation d'installations à neutrons. Non seulement le leadership du Canada dans ce domaine décline rapidement, mais **sa capacité à innover à long terme pour relever ses défis sociaux, environnementaux et économiques sera entravée** par le fait que ses chercheurs ne pourront plus réaliser de progrès sur des questions dont la résolution requiert ces outils irremplaçables.

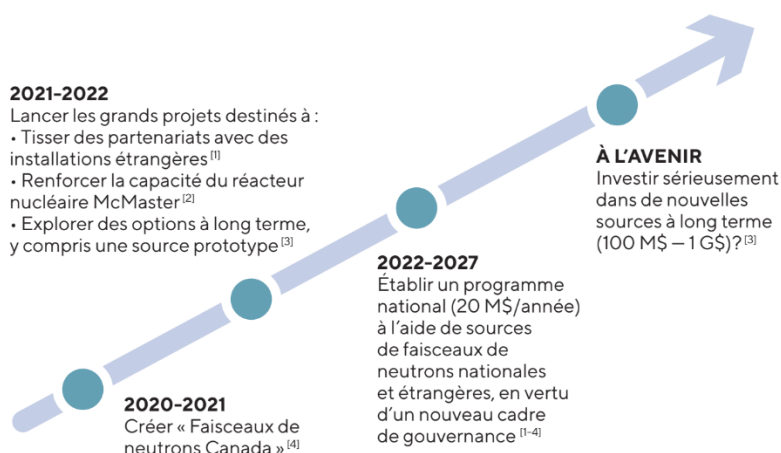
Il est urgent d'élaborer une nouvelle stratégie. Le passé est important et nous en tirons des leçons, mais nous devons aussi regarder vers l'avenir. Le monde a changé depuis l'époque révolutionnaire des années 1940 et 1950, période où Énergie atomique du Canada limitée (EACL) a construit deux sources de neutrons de calibre mondial et a défini leurs applications, presque sans assistance. Depuis, la technologie qui sous-tend les sources de neutrons et les instruments connexes a permis d'élargir considérablement les applications des faisceaux de neutrons, et de nombreuses industries — pas seulement le secteur nucléaire — bénéficient des résultats de ces recherches. La communauté des utilisateurs de faisceaux de neutrons est bien répartie sur le territoire canadien et jouit d'une solide réputation à l'échelle mondiale. En outre, le Canada est invité à établir des partenariats avec des installations de faisceaux de neutrons de premier plan à travers le monde. Parallèlement, il est de plus en plus difficile de construire des sources de neutrons à haute luminosité et, tout comme le Canada, l'Europe et les États-Unis sont particulièrement aux prises avec le défi de fournir à long terme un accès suffisant aux faisceaux de neutrons. Des cadres multinationaux ont vu le jour en Europe pour

¹ En 2020, dans un sondage auprès des membres de l'ICDN, 93 % des répondants ont convenu que les faisceaux de neutrons sont importants pour leurs recherches, mais depuis la fermeture de la source canadienne, seulement 16 % d'entre eux ont obtenu suffisamment de temps de faisceau. Nombre d'entre eux n'ont pas du tout eu accès aux faisceaux de neutrons, et encore moins prévoient des expériences. Les résultats du sondage concernant l'accès réduit sont examinés à la section 4.4.

encourager ou exiger la coopération en matière de construction et d'exploitation de sources de neutrons. Ici, le cadre canadien s'est effondré : EACL et le Conseil national de recherches, auparavant chargés de fournir des faisceaux de neutrons pour la recherche, ont été restructurés, laissant ce rôle à d'autres.

Les universités canadiennes ouvrent la marche pour relever ce défi grâce à l'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons (ICFN). Le groupe de travail de l'ICFN a été créé en 2016 afin d'obtenir du gouvernement qu'il soutienne un programme national destiné à fournir des faisceaux de neutrons après 2018. À la tête de l'ICFN se trouvent des dirigeants de l'Université de la Saskatchewan, de l'Université McMaster, de l'Université de Windsor et de l'Institut canadien de la diffusion des neutrons (ICDN). L'ICFN, un forum composé de dirigeants, a pour objectif de formuler une stratégie et de coordonner les actions. En 2017 et 2018, le comité des Finances de la Chambre des communes a approuvé sa demande de financement pour l'établissement d'un cadre national². L'Initiative a obtenu le soutien de vingt-trois établissements à travers le pays, car les faisceaux de neutrons contribuent à un grand nombre de domaines de recherche et d'innovation, comme nous l'avons décrit précédemment. Après avoir consulté les parties prenantes au cours des dernières années, **l'ICFN a cerné quatre objectifs clés pour que la Stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons** puisse rebâtir la capacité canadienne de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons.

Figure 1. Échéancier simplifié pour la reconstitution de la capacité canadienne de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons. Les activités mentionnées correspondent aux objectifs numérotés.



Voici les quatre objectifs avec leurs activités et échéanciers correspondants (illustrés dans les figures 1 et 2) :

1. Tisser des partenariats avec des sources de neutrons à haute luminosité à l'étranger;
2. Miser sur les capacités nationales actuelles, y compris la pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster (RNM), une source de neutrons à luminosité moyenne;
3. Explorer des options de création de nouvelles sources de neutrons et y investir à long terme;
4. Créer un nouveau cadre national de gouvernance et de gestion pour ces activités.

² Voir les rapports du comité des Finances de la Chambre des communes au sujet de ses consultations pour les budgets de 2018 et de 2019, à l'adresse : http://cins.ca/docs/HC_FINA_report_2017_12.pdf et http://cins.ca/docs/FINA_2018.pdf.

« La recherche et l'innovation de calibre mondial exigent de grandes installations scientifiques à l'échelle du pays, accessibles et à la fine pointe de la technologie. Les installations de faisceaux de neutrons constituent des outils indispensables en matière de recherche et de développement technologique liés aux matériaux dans des domaines tels que l'énergie propre, les transports propres, la santé et la sécurité alimentaire. L'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons propose un programme global qui assurera une gestion ordonnée de l'accès à des installations de faisceaux de neutrons au Canada. »

– Professeur Art McDonald, lauréat du prix Nobel de physique (2015), Université Queen's



La priorité urgente est de rétablir le plus tôt possible un certain accès aux faisceaux de neutrons pour les chercheurs canadiens grâce à des partenariats étrangers (objectif 1). Plusieurs établissements de ce type ont déjà approché le Canada pour discuter de partenariats, et le pays a besoin d'un cadre de gouvernance qui permettra une réponse nationale. L'Université McMaster a dirigé une proposition « nationale » dans le cadre de la FCI (« Bâtir un avenir pour la diffusion neutronique au Canada ») qui constituerait un bon point de départ pour investir dans des partenariats étrangers par l'entremise d'une contribution unique aux infrastructures de 11 millions de dollars afin d'obtenir un certain accès à des faisceaux de neutrons dans deux installations de neutrons américaines pendant six ans. Il faudra investir environ cinq fois plus dans des partenariats étrangers pour répondre aux besoins nationaux en matière de temps de faisceau au cours des prochaines années.

L'achèvement du laboratoire de faisceaux de neutrons au RNM devrait commencer immédiatement afin de fournir une plus grande capacité nationale à moyen terme (objectif 2). « Bâtir un avenir pour la diffusion neutronique au Canada » permettrait également de compléter l'infrastructure de faisceaux de neutrons au RNM qui sera exploitée en vertu du nouveau cadre de gouvernance. Cet investissement en capital constituerait un grand progrès, ouvrant la voie à la pleine exploitation du RNM grâce à des investissements opérationnels majeurs, soit i) 2 à 3 millions de dollars par an pour exploiter le laboratoire de faisceaux de neutrons en tant qu'installation nationale d'utilisateurs et ii) 7 millions de dollars par an pour doubler le temps de faisceau disponible et optimiser la qualité des faisceaux. Si les faisceaux de neutrons fonctionnaient à plein rendement, le RNM pourrait répondre à la moitié des besoins canadiens, permettant ainsi des applications « lourdes » à forte demande qui se prêtent à des intensités neutroniques continues à large bande. Le RNM se spécialiserait dans la diffraction neutronique, et les expériences nécessitant des neutrons pulsés ou froids ou une forte luminosité neutronique, y compris la spectroscopie neutronique, se feraient ailleurs.

L'exploration de solutions à long terme pour l'accès à de nouvelles sources de neutrons devrait se poursuivre parallèlement au développement du RNM (objectif 3). Comme les installations de faisceaux de neutrons du monde entier vieillissent et ferment, la communauté mondiale réalise et planifie des réinvestissements dans de nouvelles sources de neutrons pour contrer la diminution de l'approvisionnement en neutrons. Le Canada doit déterminer comment contribuer à ces plans et les compléter en procédant à sa propre analyse scientifique et de rentabilité pour investir dans une ou plusieurs options à long terme, notamment : i) contributions majeures à de nouvelles sources multinationales; ii) nouvelle installation nationale, pouvant aller d'un réacteur à faisceaux de neutrons dédié de 500 millions de dollars à un réacteur de recherche polyvalent de 1 à 2 milliards de dollars; et iii) création d'une source de neutrons basée sur un accélérateur compact (Compact Accelerator-based Neutron Source, CANS), dont les capacités seraient impossibles à obtenir avec le RNM. Des recherches menées par l'Université de Windsor visent à déterminer si la technologie CANS serait en mesure de fournir une source de neutrons pouvant répondre au gros des besoins du Canada à un coût de 100 à

200 millions de dollars. Les résultats de ces initiatives éclaireront les décisions relatives aux investissements majeurs à long terme.

Il faudrait créer sans tarder une nouvelle entité, Neutrons Canada, pour gérer toutes les activités stratégiques dans le cadre d'un programme national unifié qui pourrait jouir d'une enveloppe de plus de 20 millions de dollars par an (objectif 4). En janvier 2020, une table ronde réunissant les vice-présidents à la recherche et les vice-présidents associés de seize universités canadiennes a examiné et approuvé la création d'une telle entité qui aurait pour membres institutionnels des universités³. Neutrons Canada serait responsable de la gouvernance, de la gestion et de la représentation du programme canadien de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons. Cette entité sera nécessaire pour négocier des accords de partenariats étrangers au nom du Canada, favoriser l'accès des utilisateurs aux stations externes, exploiter le laboratoire de faisceaux de neutrons du RNM en tant qu'installation nationale d'utilisateurs, créer la technologie nécessaire à une nouvelle source de neutrons, mener des activités de vulgarisation scientifique, mobiliser l'industrie pour optimiser l'impact et gérer le programme en général.

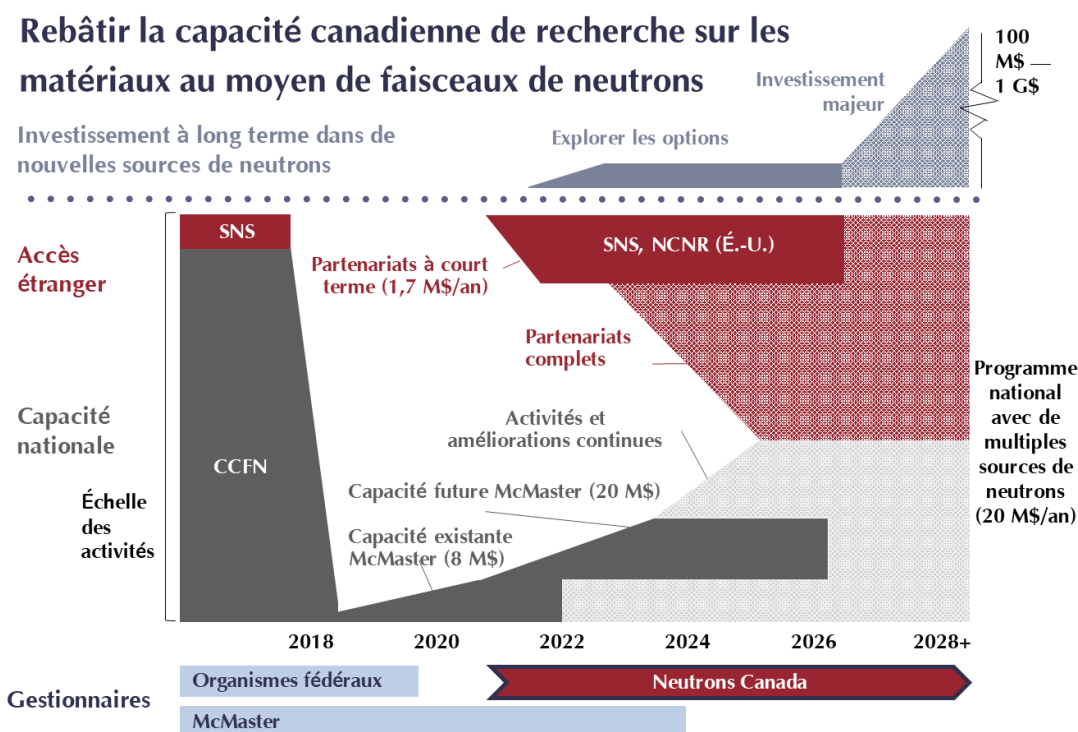


Figure 2. Activités dans le cadre d'une stratégie cohérente visant à soutenir et à revitaliser la capacité du Canada dans ce domaine de recherche. Acronymes : CCFN = Centre canadien de faisceaux de neutrons; SNS = Spallation Neutron Source (É.-U.); NCNR = NIST Center for Neutron Research (É.-U.).

³ Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons. Leadership canadien dans la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons : Rapport sur une table ronde en vue de la création de « Neutrons Canada ». En ligne à : <https://fedorukcentre.ca/resources/canadian-neutron-initiative-cni.php>

2 Consultation sur la stratégie

Bien que des activités en cours se penchent sur chacun des quatre objectifs, le processus consultatif actuel se concentre sur la Stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons en tant qu'ensemble cohérent. La stratégie dont il est question dans le présent document est le produit de consultations auprès d'universités canadiennes, d'organismes gouvernementaux, de l'industrie et de partenaires étrangers éventuels, ainsi qu'auprès de chercheurs, individuellement et collectivement, par l'intermédiaire de l'Institut canadien de la diffusion des neutrons (ICDN). Depuis 2015, les chercheurs ont participé à des forums tels que l'assemblée générale annuelle de l'ICDN et, en mai 2018, à la réunion « Neutrons@Mac »⁴, un rassemblement stratégique de chercheurs de McMaster. En outre, la stratégie s'appuie sur le travail de planification stratégique à long terme de l'ICDN⁵ et sur des sondages pour définir les besoins des utilisateurs en 2017 et en 2020; sur l'expérience de McMaster avec un partenariat étranger à la Spallation Neutron Source (SNS); et sur la vaste expérience de l'ancien CCFN quant à l'exploitation d'une installation nationale de faisceaux de neutrons pour utilisateurs à Chalk River.

Nous invitons les parties prenantes à examiner ce document de discussion et à commenter tout aspect de la stratégie en prévision de la table ronde virtuelle, « Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons : Vers une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons » qui se tiendra en décembre 2020. La table ronde réunira un groupe représentatif de parties prenantes et de scientifiques de premier plan afin de définir une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons pour rebâtir la capacité canadienne de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons. Nous souhaitons obtenir idées et commentaires sur les éléments clés de la stratégie, y compris l'infrastructure nécessaire et les programmes connexes, nationaux et étrangers, selon plusieurs échéanciers.

Le présent document explore chacun des quatre objectifs stratégiques dans des sections distinctes. Pour éclairer cette exploration, la section suivante présente les atouts actuels du Canada. La section 13 présente un modèle financier du nouveau cadre. Les annexes A et B traitent en détail de la valeur de la recherche sur les matériaux et de l'historique des Laboratoires de Chalk River. Les annexes C et D présentent une analyse des parties prenantes et dressent la liste des responsables du groupe de travail de l'ICFN et des établissements d'appui.

Les questions de discussion suivantes visent à susciter des idées et des réactions et sont liées à chacun des quatre objectifs stratégiques.

Tisser des partenariats étrangers (objectif 1)

- 1. Comment le Canada peut-il soutenir au mieux l'ensemble des utilisateurs, y compris les utilisateurs experts et non experts du milieu universitaire, des laboratoires gouvernementaux et de l'industrie, pour qu'ils aient accès aux installations étrangères de faisceaux de neutrons? En quoi leurs besoins sont-ils différents?*
- 2. Dans le cadre d'un programme canadien, quelles activités destinées à favoriser l'accès aux sources étrangères de neutrons faudrait-il mener, par opposition à une externalisation vers un partenaire étranger?*

⁴ Mise à jour sur l'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons et la réunion « Neutrons@Mac ». <http://cins.ca/2018/06/11/cni-update/>

⁵ Par exemple, par l'entremise du plan à long terme de l'ICDN : « Planning to 2050 for Materials Research with Neutron Beams in Canada » (mis à jour en 2015). http://cins.ca/docs/CINS_LRP_2015.pdf

PROJET DE CONSULTATION

3. *Quel processus décisionnel le Canada devrait-il adopter en matière de partenariats étrangers? Quels devraient être les critères utilisés pour la sélection des partenaires? Quel devrait être le processus de cette sélection et des décisions concernant le montant investi dans chaque partenariat?*
4. *Quel devrait être le rôle de Neutrons Canada – à terme, une organisation nationale comprenant des membres institutionnels — dans ces décisions et dans la négociation des modalités avec les partenaires?*

Miser sur les capacités nationales (objectif 2)

5. *Quels seraient les avantages de l'exploitation complète du réacteur nucléaire McMaster pour l'obtention de faisceaux de neutrons qui seraient plus difficiles ou impossibles à obtenir si le Canada dépendait exclusivement de sources de neutrons à l'étranger?*
6. *Comment le Canada peut-il au mieux maintenir en fonction, mettre à profit et prévoir la relève de son expertise scientifique et technique en matière d'instruments et de méthodes liés aux faisceaux de neutrons?*
7. *De quelles autres façons le Canada peut-il tirer parti de ses capacités nationales en matière de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons?*
8. *Quel rôle devrait jouer Neutrons Canada dans la pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster, la promotion de l'expertise nationale et le renforcement des capacités nationales du Canada?*

Explorer de nouvelles sources de neutrons à long terme (objectif 3)

9. *Quels sont les avantages de participer à des consortiums multinationaux pour planifier et construire de nouvelles sources de neutrons, en plus d'assurer un accès à du temps de faisceau à l'avenir?*
10. *Quels sont les avantages de la création d'une nouvelle source nationale de neutrons qui sont impossibles à obtenir par une telle participation à des consortiums multinationaux?*
11. *Comment la communauté canadienne des faisceaux de neutrons peut-elle se préparer à participer aux processus décisionnels nationaux sur les nouvelles sources de neutrons en tant que groupe cohérent aux côtés des communautés de l'énergie nucléaire et de la production d'isotopes?*
12. *Quel rôle devrait jouer Neutrons Canada dans la planification de nouvelles sources de neutrons à long terme? Ou dans les projets de recherche, de développement et de démonstration portant sur de telles sources?*

Créer un nouveau cadre (objectif 4)

13. *Quels sont les avantages associés au fait d'avoir une organisation nationale, Neutrons Canada, pour remplir des fonctions telles que :*
 - a. *Planifier les initiatives majeures en matière de faisceaux de neutrons, et les guider à travers les processus décisionnels et les mettre en œuvre?*
 - b. *Diriger et gérer un programme national d'accès des utilisateurs aux installations de faisceaux de neutrons, tant au pays qu'à l'étranger?*
 - c. *Négocier avec des installations étrangères?*
 - d. *Maintenir la continuité de l'expertise nécessaire pour soutenir à la fois i) le fonctionnement des installations de faisceaux de neutrons et ii) la mise en œuvre de projets d'investissement?*

PROJET DE CONSULTATION

14. *Quelle est la valeur éventuelle d'initiatives centralisées visant à inciter l'industrie à i) mettre en application les faisceaux de neutrons, ii) fournir des services pour créer des installations de faisceaux de neutrons, et iii) mettre au point des technologies dérivées?*
15. *Quels pourraient être les avantages d'un programme de faisceaux de neutrons en matière de vulgarisation scientifique auprès des jeunes et du grand public?*

Équité, diversité et inclusion

16. *Quel rôle une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons peut-elle jouer dans la promotion de l'équité, de la diversité et de l'inclusion, sachant que des groupes tels que les femmes, les minorités raciales et ethniques, les communautés autochtones et les personnes handicapées sont actuellement sous-représentés dans la communauté des faisceaux de neutrons?*
17. *Quel rôle une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons peut-elle jouer pour favoriser l'expertise parmi les utilisateurs atypiques, tels que les chercheurs d'établissements moins actifs en recherche, notamment les universités, collèges et écoles polytechniques de petite taille ou situées dans des régions rurales ou nordiques? Comment pouvons-nous garantir que les besoins de ces utilisateurs sont pris en compte?*
18. *Comment le Canada peut-il garantir l'équité, la diversité et l'inclusion au sein de la communauté des utilisateurs de faisceaux de neutrons s'il doit se fier à un accès à des installations étrangères?*
19. *Au moment où la construction d'une nouvelle infrastructure de faisceaux de neutrons ira de l'avant au Canada, comment mobiliser les communautés locales et autochtones pour garantir un partenariat efficace?*

3 Le présent : Des assises solides pour le maintien de l'excellence

La stratégie nationale misera sur les capacités du Canada, établies au fil des 70 dernières années de leadership mondial en recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons. Plus précisément, le Canada dispose 1) d'un bassin d'environ 100 chercheurs principaux canadiens en milieu universitaire, en plus d'experts dans des laboratoires industriels et gouvernementaux; 2) d'une expertise en matière de sources de neutrons et d'instruments connexes; 3) d'une source de neutrons de luminosité moyenne, le réacteur nucléaire McMaster (RNM), dont l'exploitation peut se poursuivre pendant des décennies; et 4) d'une solide réputation nécessaire pour attirer partenariats, collaborations et expertise. En effet, après l'annonce de la fermeture du réacteur NRU, plusieurs installations de faisceaux de neutrons de calibre mondial ont proposé au Canada des partenariats. Les pages qui suivent font l'examen des éléments clés de ces solides assises pour notre excellence future. En outre, nous tirons d'importantes leçons du passé, car nous reconnaissons qu'une grande partie des assises actuelles repose sur les résultats du programme canadien précédent en matière de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons qui s'articulait autour des capacités des Laboratoires de Chalk River. Cet historique est présenté à l'annexe B.

3.1 Communauté canadienne des utilisateurs de faisceaux de neutrons

Environ 800 scientifiques, ingénieurs et étudiants du milieu universitaire, des laboratoires gouvernementaux et de l'industrie ont participé à des recherches au Centre canadien de faisceaux de neutrons (CCFN), situé au réacteur NRU de Chalk River, au cours de ses cinq dernières années d'exploitation. Environ 360 de ces chercheurs représentaient 64 départements de 30 universités canadiennes, et 430 d'entre eux représentaient plus de 100 institutions de 22 pays étrangers (figure 3). Des scientifiques canadiens dont certains ne sont pas pris en compte dans les statistiques sur les utilisateurs du CCFN ont aussi mené des recherches dans des installations étrangères de faisceaux de neutrons. Le nombre de Canadiens ayant accès à des installations aux États-Unis et le nombre de chercheurs américains ayant accès au CCFN étaient à peu près équivalents.



Figure 3. À gauche : Répartition géographique des 30 universités participantes, ainsi que les 22 pays des établissements étrangers (représentés par des drapeaux). À droite : Répartition du temps de faisceau par type d'utilisateurs au cours des cinq dernières années d'activité du CCFN (2013-2018).



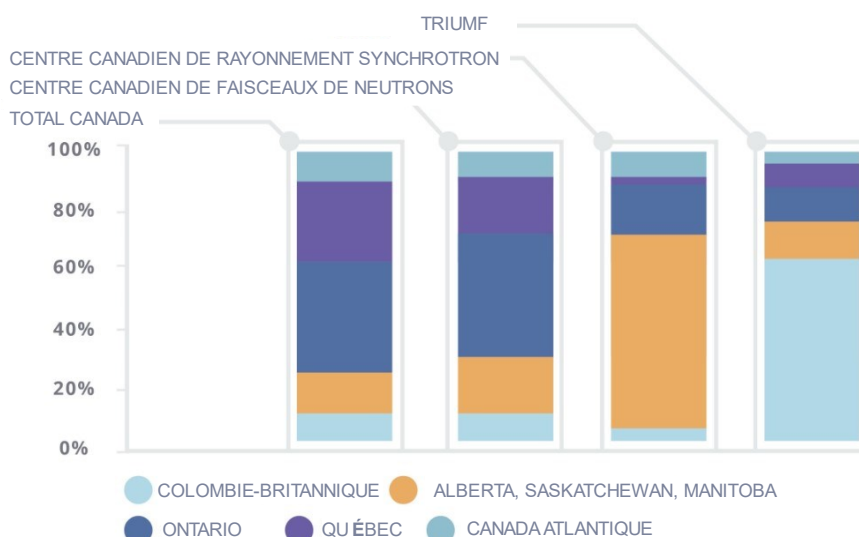
« Pendant plus de 50 ans, le Canada a fait œuvre de pionnier au réacteur de Chalk River en matière de techniques et d'applications de la diffusion neutronique – du développement précoce de la spectroscopie à trois axes jusqu'à des applications industrielles pour la résolution de problèmes en ingénierie. Bien que le réacteur ait été mis hors service en 2018, il ne faut pas sous-estimer la valeur constante des compétences acquises au cours de cette période dans les instituts et les universités, tant pour la recherche fondamentale que pour les applications industrielles. » – **Robert McGreevy, directeur, ISIS Neutron and Muon Source (Royaume-Uni)**

3.1.1 Universités

Les universités créent de nouvelles connaissances et forment des étudiants grâce aux installations de faisceaux de neutrons. Au moment de la fermeture du CCFN, parmi les utilisateurs canadiens de faisceaux de neutrons, que ce soit au Canada ou à l'étranger, il y avait cent chercheurs principaux de presque toutes les grandes universités du Canada, ainsi que de certaines plus petites. Les universités continuent de renforcer leurs capacités dans le domaine malgré les revers causés par la fermeture du CCFN et l'expiration du seul accord conclu par le Canada avec une source de neutrons étrangère (la SNS aux États-Unis). Notamment, depuis trois ans, les universités canadiennes ont embauché huit professeurs qui utilisent des faisceaux de neutrons : Meigan Aronson, Alannah Hallas, Dimitry Sediako et Emily Cranston (Université de la Colombie-Britannique); Benjamin Tutolo (Université de Calgary); Drew Marquardt (Université de Windsor); Sarah Dunsiger (Université Simon Fraser); et Levente Balogh (Université Queen's).

La répartition géographique des professeurs qui ont utilisé le CCFN correspond étroitement à celle de l'ensemble des professeurs au Canada (Figure 4). Cette communauté a aussi beaucoup d'envergure sur le plan scientifique et collabore grandement avec l'industrie. Les principaux indicateurs de ces atouts sont présentés à la Figure 5⁶. En outre, une étude de 2014 a révélé que plus de 6 % de toutes les collaborations entre l'industrie et le milieu universitaire financées par le CRSNG concernaient des utilisateurs des faisceaux de neutrons ou d'autres installations à Chalk River, même si ces utilisateurs ne représentaient qu'environ 1 % de l'ensemble des professeurs financés par le CRSNG⁷. La recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons est l'un des rares domaines où les collaborations abondent entre les universités et l'industrie au Canada, alors que dans d'autres domaines le Canada est moins fort que d'autres pays.

Figure 4. La répartition des professeurs qui ont utilisé le CCFN à Chalk River (Ontario) correspond à la répartition des professeurs d'université au Canada, en comparaison avec les utilisateurs de TRIUMF, situé en Colombie-Britannique, et du Centre canadien de rayonnement synchrotron (CCRS), situé en Saskatchewan. Ces deux installations répondent davantage aux besoins régionaux. Analyse de Strapolec (voir note de bas de page 6).



⁶ Strapolec. « Study of CNBC Performance and Impacts » (février 2019). En ligne à : <http://cins.ca/resources/cnbc/>

⁷ KPMG. « A Report on the Contribution of Nuclear Science and Technology (S&T) to Innovation. » Rapport final préparé pour Ressources naturelles Canada. Automne 2014.

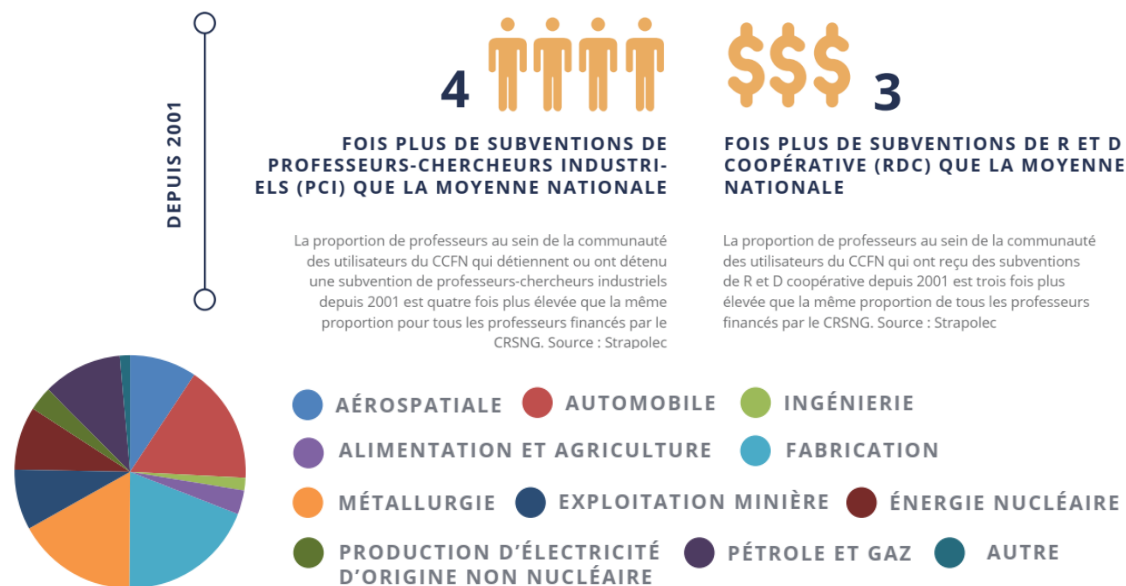


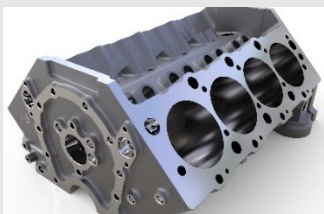
Figure 5. Taux des chaires de recherche du Canada, des subventions de professeurs-chercheurs industriels et des subventions de R. et D. coopérative, et répartition de 40 millions de dollars en financement industriel entre les secteurs pour la communauté des utilisateurs du CCFN pendant la période 2001-2018. Analyse de Strapolec (voir note de bas de page 6).

3.1.2 Industrie et gouvernement

En général, les utilisateurs de l'industrie proviennent d'industries lourdes, sensibles aux risques, où il est essentiel d'avoir une connaissance précise des propriétés des matériaux clés pour garantir la fiabilité et répondre aux exigences réglementaires : énergie nucléaire, aérospatiale, automobile, pétrole et gaz, production de métaux de première transformation et autres secteurs manufacturiers (voir les exemples spécifiques à l'annexe A). Ces industries paient le plein coût de l'accès aux faisceaux de neutrons pour analyser les défaillances, faire du prototypage et d'autres activités de R. et D. visant à améliorer leurs méthodes de fabrication ou à satisfaire les instances de réglementation. Les projets payés sont souvent urgents, à fort impact et ponctuels. Une collaboration à plus long terme avec l'industrie se produit généralement lorsque les industries mettent leurs ressources en commun (p. ex., par l'entremise du groupe des propriétaires de CANDU) et parrainent des laboratoires universitaires ou gouvernementaux pour résoudre des problèmes liés aux matériaux qui peuvent profiter à des secteurs entiers (voir ci-dessus pour une discussion sur le parrainage universitaire).

Les Laboratoires nucléaires canadiens⁸ (LNC), l'exploitant du secteur privé des Laboratoires gouvernementaux de Chalk River, ont été le principal client du CCFN, hormis le milieu universitaire, utilisant près de 20 % du temps de faisceau du CCFN au cours de ses cinq dernières années d'exploitation. Parmi les utilisateurs finaux des nouvelles connaissances issues de nombreux projets des LNC, notons l'industrie canadienne de l'énergie nucléaire, les ministères qui paient les LNC pour réaliser des projets en science et technologie nucléaires, et les instances de réglementation (p. ex., la Commission canadienne de sûreté nucléaire, Santé Canada). D'autres projets se sont penchés sur les besoins opérationnels des LNC en tant que site nucléaire. Parmi les projets réalisés au CCFN dans ses dernières années d'activité, notons la criminalistique nucléaire, la gestion des déchets nucléaires, l'assurance qualité et l'analyse du combustible produit par les LNC, ainsi que des études sur l'hydrogène

⁸ Les références aux LNC dans la présente section incluent Énergie atomique du Canada limitée (EACL) avant 2015, date à laquelle les activités de la section de recherche d'EACL aux Laboratoires de Chalk River ont été transférées aux Laboratoires nucléaires canadiens.



« Les faisceaux de neutrons constituent des outils essentiels et exceptionnels pour évaluer la fiabilité de composants critiques pour l'industrie automobile. » – Glenn Byczynski, gestionnaire, R. et D. et ingénierie pour les États-Unis et le Canada, Nemak

dans les tubes de force CANDU, la défaillance des combustibles, la fiabilité des méthodes de soudage, les réacteurs à eau supercritique et les effets biologiques du rayonnement. Au cours des 15 dernières années d'activité du CCFN, les LNC ont fréquemment demandé un accès pour l'analyse du combustible nucléaire ou la mesure des contraintes dans les tubes d'alimentation et les soudures des conduites d'alimentation.

Outre les clients gouvernementaux qui ont eu indirectement accès au CCFN par l'intermédiaire des LNC, les clients gouvernementaux directs comprenaient CanmetMATERIALS, le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC). CanmetMATERIALS et le CNRC avaient habituellement recours au CCFN pour faire avancer leurs travaux de R. et D. avec des partenaires de l'industrie. RDDC utilisait généralement le CCFN pour ses propres activités (p. ex., pour étudier la résistance des soudures sur la coque de navires militaires afin de gérer le vieillissement de la flotte).

3.1.3 Utilisateurs experts et non experts

On peut classer la communauté des utilisateurs de faisceaux de neutrons en deux catégories — « utilisateurs experts » et « utilisateurs non experts » — en fonction de l'importance que représentent les méthodes neutroniques dans le programme de recherche d'un utilisateur, comme en témoigne la fréquence des expériences neutroniques ou des publications sur les neutrons. Comme l'illustre la Figure 6, une séparation naturelle a été mise en lumière dans un sondage auprès des utilisateurs de faisceaux de neutrons entre ceux qui ont publié deux articles ou moins au cours des deux années suivant la fermeture du CCFN (« utilisateurs non experts ») et ceux qui ont publié trois articles ou plus, témoignant d'une plus grande spécialisation dans les expériences au moyen de faisceaux de neutrons (« utilisateurs experts »)⁹. En extrapolant les résultats du sondage (auquel les utilisateurs non experts étaient moins susceptibles de répondre) et en comparant les données du CCFN sur le nombre d'expériences par utilisateur de 2008 à 2017, on estime que la répartition des utilisateurs experts et non experts au Canada est d'environ 20 % d'utilisateurs experts et 80 % d'utilisateurs non experts.

Dans la plupart des cas, le programme de recherche des utilisateurs experts porte sur les matériaux biologiques ou les matériaux quantiques. Les utilisateurs non experts sont présents dans tous les domaines, mais les utilisateurs dans les laboratoires de l'industrie et du gouvernement canadien, ainsi que les utilisateurs universitaires en science et en génie des matériaux, sont généralement des utilisateurs non experts. Les utilisateurs non experts ont recours aux faisceaux de neutrons pour

⁹ Conformément à la méthode de la communauté des utilisateurs danois, l'ICDN a précédemment classé comme utilisateurs experts ceux qui publient au moins quatre articles en deux ans [Banks D et Harroun TA. 2019. « Seventy years of scientific impact using neutron beams at the Chalk River Laboratories. » FACETS 4 : 507-530. [doi:10.1139/facettes-2019-0003](https://doi.org/10.1139/facettes-2019-0003)]. Même si un grand nombre des nouveaux articles publiés s'appuieraient toujours sur des données recueillies au CCFN, il est maintenant beaucoup plus difficile de mener à bien des expériences au moyen de faisceaux de neutrons (même pour les utilisateurs experts au Canada, comme l'a indiqué le sondage ICDN-ICFN 2020). Par conséquent, nous avons ajusté le seuil de nos objectifs en fonction des utilisateurs qui publient au moins trois articles en deux ans.

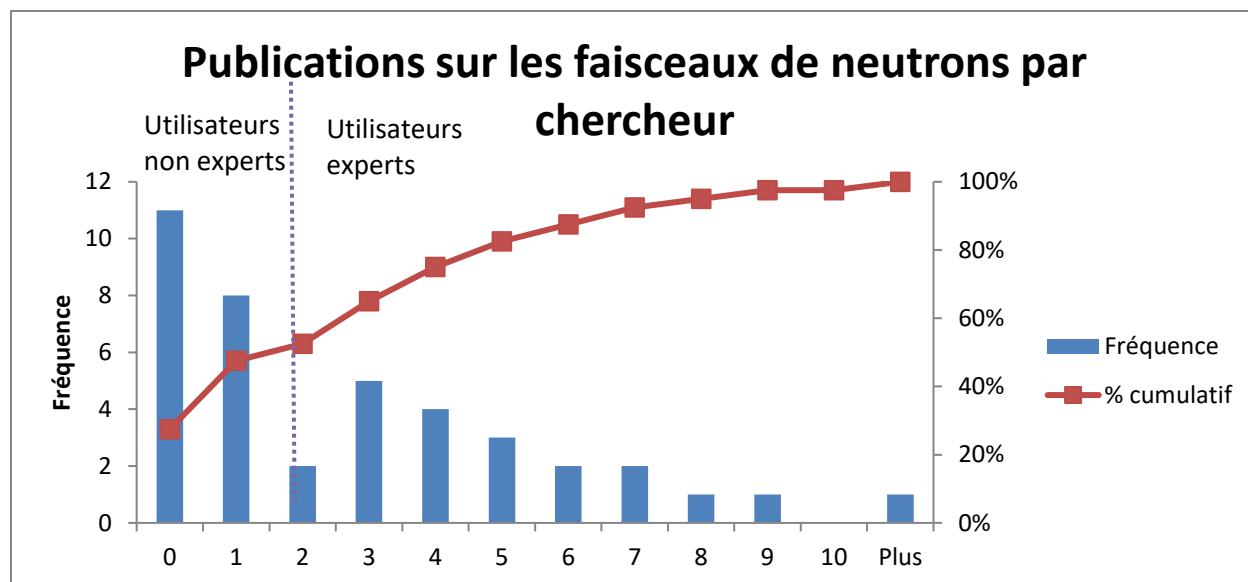


Figure 6. Histogramme de la fréquence des publications sur les faisceaux de neutrons dans les deux années suivant la fermeture du CCFN parmi 40 utilisateurs de faisceaux de neutrons, principalement des chercheurs universitaires canadiens. Source : Sondage ICDN-ICFN 2020.

résoudre des problèmes particulièrement difficiles ou pour compléter d'autres techniques qu'ils utilisent plus fréquemment. Par exemple, les chercheurs qui étudient les matériaux industriels bénéficient grandement de la profondeur de pénétration des neutrons dans les métaux et alliages lorsque la sécurité et la fiabilité constituent des facteurs essentiels.

Pour former leurs étudiants, les utilisateurs non experts avaient tendance à recourir largement aux installations nationales. Pour ce faire, le personnel de l'installation a fourni l'expertise scientifique essentielle à la planification, à l'exécution et à l'analyse efficaces des expériences au moyen de faisceaux de neutrons réalisées par des utilisateurs non experts et des utilisateurs débutants.

Les répercussions de la plus grande difficulté d'accès aux faisceaux de neutrons au Canada sont différentes pour les utilisateurs experts et les utilisateurs non experts, comme l'a révélé le sondage de 2020 auprès des utilisateurs de faisceaux de neutrons (Figure 7) :

- Les utilisateurs experts qui trouvent qu'il est plus difficile de gagner des concours pour obtenir du temps de faisceau dans les installations étrangères obtiennent beaucoup moins de temps de faisceau qu'avant la fermeture du CCFN; environ 80 % de ces répondants ne bénéficient plus d'un temps de faisceau suffisant pour atteindre leurs objectifs de recherche;
- Les utilisateurs non experts (hormis quelques-uns qui n'utilisaient déjà pas le CCFN) trouvent qu'il est beaucoup plus difficile d'obtenir du temps de faisceau et sont dissuadés d'essayer; seulement 25 % des répondants non experts ont fait une demande au cours des deux dernières années, et 60 % d'entre eux n'ont pas obtenu assez de temps de faisceau pour atteindre leurs objectifs de recherche.

3.2 Université McMaster

En 1962, Bertram Brockhouse s'est joint à l'Université McMaster où il a mis sur pied l'institut désormais connu sous le nom d'Institut Brockhouse de recherche sur les matériaux. Sous sa gouverne, le réacteur nucléaire McMaster (RNM) a connu une expansion de ses capacités de faisceaux, et ses deux lignes de faisceaux de diffraction neutronique ont été mises à profit pour la recherche sur les matériaux jusque

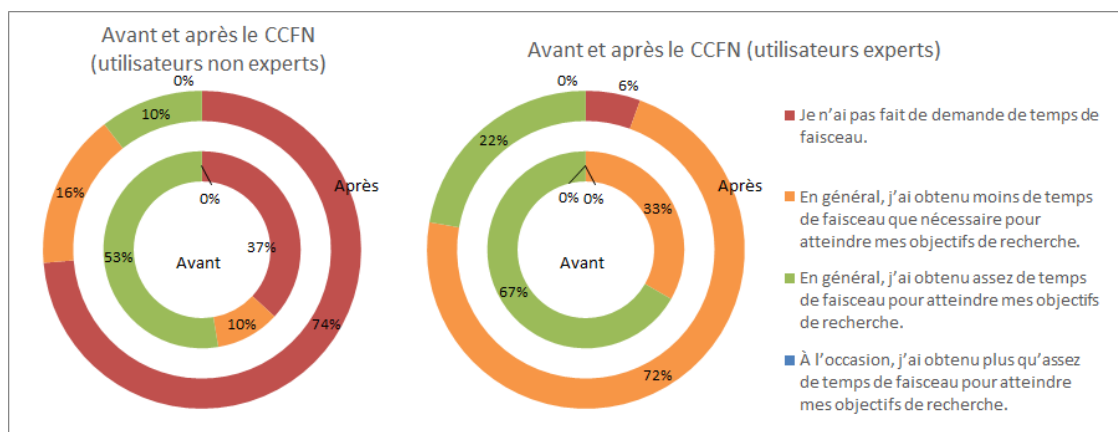


Figure 7. Suffisance du temps de faisceau dans les deux années précédant et suivant la fermeture du CCFN pour les utilisateurs non experts (à gauche) et les utilisateurs experts (à droite). Les utilisateurs experts ont été définis comme ceux qui ont déclaré trois publications ou plus au cours des deux dernières années. Pour de plus amples renseignements sur le déclin continu de l'accès au temps de faisceau, voir la section 4.4. Source : sondage ICDN-ICFN 2020.

dans les années 1990. À ce moment-là, comme la fermeture du réacteur était prévue, les lignes de faisceaux de diffraction neutronique ont été mises hors service. Cependant, le réacteur fonctionne toujours aujourd'hui, car un réacteur à flux moyen dans une université canadienne représente un atout irremplaçable, et la modernisation des capacités du RNM a été un élément clé de la stratégie institutionnelle de l'Université McMaster. Entre 2000 et 2012, environ 25 millions de dollars en capital ont été investis dans le RNM et les laboratoires connexes dans le cadre de projets de la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) et du Programme d'infrastructure du savoir, ce qui permettra au RNM de continuer à fonctionner pendant les prochaines décennies.

Aujourd'hui, le RNM est la seule source de neutrons du Canada qui soit suffisamment brillante pour permettre un programme national de diffraction neutronique. Il possède des lignes de faisceaux de neutrons pour l'imagerie et l'analyse par activation neutronique qui sont exploitées principalement à des fins commerciales. La reconstitution de ses capacités de diffraction neutronique a commencé par la mise en place d'un diffractomètre à monocristal, connu sous le nom de diffractomètre à alignement McMaster (MAD), réalisé en partenariat avec le CCFN. Les utilisateurs ont commencé à avoir accès à cet instrument au milieu de 2017 et, la première année, il a fonctionné à 50 % de sa capacité, permettant à vingt utilisateurs de cinq universités et d'une entreprise du secteur privé d'y mener treize expériences — un début prometteur pour un programme d'utilisateurs de neutrons. Le MAD est utilisé pour 1) préparer les mesures neutroniques qui seront réalisées à la Spallation Neutron Source (SNS) aux États-Unis, car les taux de réussite aux concours trop sollicités de la SNS sont bien plus élevés si la caractérisation de base des neutrons est déjà terminée; et 2) pour les programmes scientifiques et éducatifs.

McMaster construit actuellement une deuxième ligne de faisceaux de diffraction : un diffractomètre à petit angle de 24 mètres — un projet de 9 millions de dollars financé par la FCI qui devrait se conclure d'ici la fin 2020. L'université a contribué à ce projet à hauteur de 2 millions de dollars pour agrandir le hall de faisceaux externe afin de pouvoir accueillir plus de lignes de faisceaux. Pour réaliser ce projet, un partenariat a été établi entre McMaster et les Laboratoires nucléaires canadiens pour que le CCFN fournisse des services de consultation scientifique, de gestion de projet et de conception.

L'Université McMaster a aussi fait figure de chef de file dans la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons au Canada. Elle compte la plus grande concentration d'utilisateurs experts de faisceaux de neutrons au pays, et a su maintenir une succession de chercheurs de renommée mondiale, de Brockhouse à Malcom Collins en passant par Bruce Gaulin, titulaire actuel de la chaire Brockhouse de

physique des matériaux. Gaulin est encore aujourd'hui le seul président élu de la Neutron Scattering Society of America à venir de l'extérieur des États-Unis. Par rapport à d'autres établissements canadiens, McMaster a été le plus grand utilisateur de la CCFN et de la SNS : 18 % de tous les articles issus de la CCFN depuis 1980 ont été rédigés ou corédigés par des utilisateurs de McMaster. Parmi tous les articles issus de la SNS jusqu'en 2018 comptant au moins un auteur canadien, environ la moitié avait un auteur de McMaster. McMaster a aussi joué un rôle déterminant dans l'obtention de fonds pour la communauté canadienne des utilisateurs de faisceaux de neutrons : Collins et Gaulin ont piloté un grand nombre des subventions multi-institutionnelles du CRSNG qui ont permis de construire des lignes de faisceaux à Chalk River et de maintenir l'installation de Chalk River en état de préparation pour en garantir l'accès aux utilisateurs; en outre, ils ont tous deux été à la tête de l'Institut canadien de la diffusion des neutrons pendant de nombreuses années. Gaulin a également dirigé le projet de la FCI « Participation canadienne à la SNS » pour permettre au Canada d'avoir accès à une nouvelle installation étrangère de premier plan (section 4.2).

3.3 Autres capacités et intérêts en matière de faisceaux de neutrons

Outre les ressources de McMaster, ainsi que la communauté des utilisateurs (qui est bien répartie au Canada, comme le décrit la section 3.1), il y a d'autres capacités et intérêts clés au Canada qui font partie des assises d'une stratégie nationale réussie :

- Les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC) ont conservé une grande partie de l'expertise scientifique et technique du CCFN après sa fermeture afin de renforcer leurs propres capacités de recherche, notamment sur les matériaux pour le secteur nucléaire — une expertise qui pourrait servir à des projets de développement de faisceaux de neutrons sur une base commerciale. Les LNC sont aussi responsables de la disposition de la majeure partie de l'équipement de l'ancien CCFN, dont quelques éléments pourraient servir dans d'autres sources de neutrons;
- À l'Université de la Saskatchewan, l'augmentation de la capacité en matière de faisceaux de neutrons suscite un vif intérêt. En 2009, l'université et le gouvernement provincial ont offert 200 millions de dollars dans le cadre d'un partenariat avec le gouvernement fédéral pour construire un réacteur à faisceaux de neutrons sur le campus qui s'ajouterait au Centre canadien de rayonnement synchrotron, une importante installation accueillant des utilisateurs pour la recherche sur les matériaux au moyen de rayons X. En 2011, le Centre canadien d'innovation nucléaire Sylvia Fedoruk (« Centre Fedoruk »), une société à but non lucratif située à l'Université de la Saskatchewan, a été créé pour aider à positionner la province au rang des chefs de file mondiaux de la recherche, du développement et de la formation dans le secteur nucléaire en investissant dans des partenariats avec le milieu universitaire et l'industrie. Le Centre Fedoruk a conservé une partie de l'expertise du CCFN en matière de planification stratégique et de réalisation d'infrastructures de faisceaux de neutrons. Cette première expertise permet au Centre Fedoruk de soutenir le groupe de travail de l'ICFN dans un rôle de secrétariat éclairé, en veillant à la dotation en ressources et en partenaires du groupe de travail, tandis que la deuxième expertise permet au Centre Fedoruk d'offrir un soutien à la conception et à la gestion de projets d'instruments neutroniques, comme l'achèvement du diffractomètre à petit angle au RNM;
- L'Université de Windsor s'est associée à TRIUMF, le centre canadien d'accélération des particules, pour étudier la faisabilité de sources de neutrons basées sur un accélérateur comme solution à long terme pour le Canada (section 6).

PROJET DE CONSULTATION

Parmi les autres parties prenantes éventuelles à l'élaboration de cette stratégie nationale, notons : les organismes de financement gouvernementaux, les communautés qui utilisent les neutrons à d'autres fins que la recherche sur les matériaux (p. ex., la production d'isotopes et l'énergie nucléaire pour les essais sur les combustibles et les composants dans un réacteur) et d'autres installations de recherche majeures, y compris celles dotées d'une expertise dans le domaine des accélérateurs et de la production de neutrons. Une brève analyse des parties prenantes figure à l'annexe D.

4 Tisser des partenariats étrangers

Dans la présente section, nous passons brièvement en revue le contexte mondial et la participation antérieure du Canada à des sources de neutrons étrangères, puis nous explorons la nécessité pour le Canada de tisser de nouveaux partenariats dans le cadre d'une stratégie nationale cohérente.

Objectif stratégique 1 : Tisser des partenariats avec des sources de neutrons à haute luminosité à l'étranger.

4.1 Renouvellement mondial des sources avancées de neutrons

Afin de tirer profit des progrès réalisés dans le domaine des sources de neutrons basées sur un accélérateur (et de remplacer les plus vieux réacteurs), les réinvestissements étrangers dans les installations de faisceaux de neutrons ont pris de l'ampleur dans les années 1990 et 2000 avec la construction du réacteur FRM II en Allemagne, de la deuxième station cible de la ISIS Neutron and Muon Source au Royaume-Uni et de la Spallation Neutron Source (SNS) aux États-Unis. Parmi les autres nouvelles installations importantes dans le monde figurent la Source japonaise de neutrons de spallation, le réacteur OPAL en Australie, la Source chinoise de neutrons de spallation et le réacteur de recherche avancée chinois, ainsi que la Source européenne de spallation (ESS) dont les premiers instruments seront accessibles aux utilisateurs en 2023. Depuis l'an 2000, ces réinvestissements à l'échelle mondiale représentent environ 8 milliards de dollars en dépenses en capital au profit de sources nouvelles et améliorées. Les nouvelles sources ont une durée de vie prévue d'environ 50 ans et donnent lieu à des expériences en neutronique qui sont jusqu'à cent fois meilleures. Dans ces installations, il est possible d'appliquer les faisceaux de neutrons à un ensemble encore plus diversifié de problèmes liés aux matériaux, y compris des problèmes qui étaient impossibles à résoudre il y a à peine dix ans, comme la spectroscopie dans des monocristaux de petite taille (par exemple 20 mg), essentielle pour résoudre de nombreuses questions dans le domaine de la recherche sur les matériaux quantiques.

4.2 Participation du Canada à la Spallation Neutron Source (SNS) (2008–2018)

Le Canada a joué un rôle modeste mais décisif dans l'établissement des capacités neutroniques de pointe d'une nouvelle installation de premier plan à l'échelle mondiale, la SNS de l'Oak Ridge National Laboratory, en contribuant 15 millions de dollars au titre du Fonds d'accès international de la FCI pour la « participation canadienne à la SNS » en 2002. Cette subvention octroyée à l'Université McMaster a permis aux chercheurs canadiens de participer à la supervision de la conception et de la construction de deux instruments de pointe à la SNS : un diffractomètre neutronique (VULCAN) et un spectromètre neutronique à disques (*chopper*) (SEQUOIA). Ces instruments neutroniques sont les meilleurs au monde dans leur catégorie et permettent des avancées scientifiques notables à l'échelle internationale. En retour, les scientifiques canadiens ont eu accès à l'équivalent de 30 % du temps de faisceau d'un instrument, réparti entre les instruments susmentionnés et d'autres instruments de la SNS, pendant 10 ans, jusqu'en 2018. Cet accès a permis aux chercheurs canadiens de rester à la fine pointe de la recherche sur les matériaux et à 88 étudiants et stagiaires postdoctoraux canadiens de publier au moins 106 articles. Ces publications représentent un taux de publication 2,3 fois supérieur à celui de l'ensemble de la SNS, pour un coût 3,5 fois moindre¹⁰. Ces recherches ont continué à asseoir la

¹⁰ L'intégralité de l'investissement de 15 millions de dollars de la FCI a permis d'obtenir l'équivalent de 30 % d'une ligne de faisceaux pendant 10 ans, à partir de 2008. Le taux de publication canadien équivaut donc à 35 publications par ligne de faisceaux par an, soit plus du double du taux de l'ensemble de la SNS, qui est de 15 publications par ligne de faisceaux par an pendant la même période. Le coût de la FCI par publication canadienne, soit 141 500 dollars, était 3,5 fois inférieur au coût des publications de la SNS dans son ensemble, soit 500 000 dollars par publication.

réputation internationale très respectée du Canada, comme en témoignent (1) les prix décernés à deux doctorants de McMaster, qui ont reçu le prix de recherche exceptionnelle par un étudiant de 2014 et 2018 décerné par la Neutron Scattering Society of America; et (2) la nomination de Gaulin à la présidence de la Gordon Research Conference on Neutron Scattering de 2017 à Hong Kong. Grâce à la réputation dont jouit le Canada en raison des investissements réalisés à Chalk River et à la SNS, plusieurs sources internationales de neutrons de calibre mondial ont proposé des partenariats à la communauté canadienne des faisceaux de neutrons.

4.3 Diminution de l'approvisionnement en neutrons

Malgré les 8 milliards de dollars investis à l'échelle mondiale dans des installations nouvelles ou modernisées depuis 2000, l'approvisionnement mondial en faisceaux de neutrons est à la baisse. De nombreuses sources de neutrons plus anciennes ferment en raison de leur âge — la plupart de ces sources sont des réacteurs vieillissants construits dans les vingt ans de la construction du réacteur canadien NRU fermé récemment — ainsi que de la perception du public quant à la sécurité des réacteurs nucléaires. Les sources restantes basées sur un réacteur font l'objet de pressions pour l'élimination de l'uranium hautement enrichi utilisé comme combustible, ce qui pourrait entraîner d'autres fermetures ou des réductions de la luminosité des neutrons. En Europe, trois réacteurs ont été fermés en 2019 : le BER II du Helmholtz-Zentrum Berlin (Allemagne), le réacteur Orphée du Laboratoire Léon Brillouin (France) et le réacteur JEEP II (Norvège). Sur les neuf autres installations européennes majeures, il pourrait n'en rester que cinq d'ici 2028, ce qui représente une diminution nette du temps de faisceau disponible depuis 2018 qui pourrait atteindre 50 %, même après la mise à niveau de la nouvelle Source européenne de spallation (ESS) dotée de 3 milliards de dollars d'ici 2028 (Figure 8)¹¹. De même, les États-Unis ont mis à niveau leur nouvelle installation phare, la SNS, en y injectant 2,2 milliards de dollars, et ont augmenté la capacité de leurs deux installations plus anciennes de type NRU. Néanmoins, les États-Unis continuent de se heurter à un accès réduit aux faisceaux de neutrons¹², car deux de leurs installations ont fermé au cours des 20 dernières années, et une troisième n'est plus accessible aux utilisateurs depuis 2014. Les États-Unis poursuivent la mise à niveau de la SNS et prévoient un investissement supplémentaire d'un milliard de dollars pour y ajouter une deuxième station cible. Cependant, cet investissement ne suffira pas à remplacer les deux réacteurs à faisceaux de neutrons quand ils fermeront. Voilà pourquoi les États-Unis examinent les plans conceptuels d'un nouveau réacteur à uranium faiblement enrichi.

¹¹ Groupe de travail de l'ESFRI sur la stratégie en matière de sciences physiques et d'ingénierie : Groupe de travail sur le paysage neutronique. « Neutron scattering facilities in Europe—Present status and future perspectives. » ESFRI Scripta vol. 1. <https://www.esfri.eu/esfri-scripta-vol1-neutron-scattering-facilities-europe-present-status-and-future-perspectives>. Voir aussi : ESFRI Roadmaps : esfri.eu/roadmap-2016 (2016).

¹² American Physical Society Panel on Public Affairs. [Neutrons for the Nation](#). American Physical Society (juillet 2018).

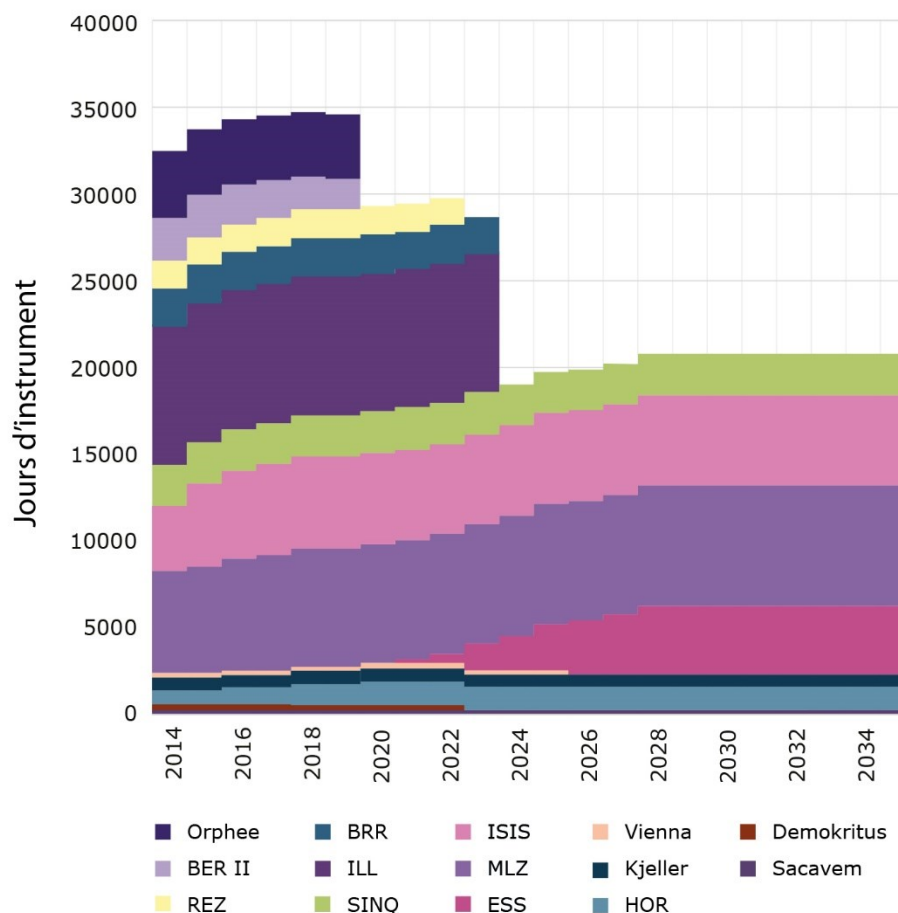


Figure 8. Nombre de jours d'instrument prévus pour les différentes sources de neutrons européennes dans un « scénario de référence », indiquant une baisse de 40 % par rapport aux niveaux de 2018 dans un proche avenir. Source : ESFRI (voir note de bas de page 11).

4.4 Accès réduit pour les Canadiens

À l'échelle de la planète, il y a environ quinze installations de faisceaux de neutrons de calibre mondial, chacune ayant ses propres atouts. Même lorsque le CCFN était en activité, il était nécessaire d'avoir un certain accès aux installations étrangères pour des capacités non existantes au Canada comme les neutrons froids ou pulsés. Un des obstacles fondamentaux à l'accès aux installations par les utilisateurs canadiens tient au fait que toutes les installations de faisceaux de neutrons sont fortement sollicitées¹³; c'est une raison majeure du partenariat avec la SNS, qui a permis aux Canadiens d'avoir un accès privilégié à une partie du temps de faisceau de la SNS. La forte demande a été aggravée récemment par la fermeture d'installations et de programmes d'utilisateurs en Europe et aux États-Unis, ainsi qu'au Canada. La plupart des installations en dehors des États-Unis limitent l'accès afin de favoriser les pays qui contribuent aux coûts de fonctionnement. L'Institut Laue-Langevin en France (ILL) — le réacteur le plus brillant du monde — n'accepte pas de propositions à ses concours de temps de faisceau à moins

¹³ Par exemple, la demande de temps de faisceau dans chacun des programmes d'utilisateurs de neutrons aux États-Unis dépasse de 2 à 3 fois l'offre [APS Panel on Public Affairs. Neutrons for the Nation. Juillet 2018]. Des rapports entre la demande et l'offre de l'ordre de 3 ou plus constituent de puissants facteurs dissuasifs [APS Committee on International Scientific Affairs. Access to Major International X-Ray and Neutron Scattering Facilities. Avril 2009].

que les deux tiers de l'équipe scientifique ne proviennent de pays qui offrent une contribution financière. À son ouverture, la Source européenne de spallation (ESS) sera soumise à des exigences similaires. Certaines installations, en particulier aux États-Unis, ont accepté des scientifiques canadiens dans le cadre d'un échange informel sur une base de réciprocité d'accès aux installations de neutrons¹⁴. Maintenant que le CCFN n'existe plus, il n'y a plus de base pour un tel échange, bien que les Canadiens soient jusqu'à présent toujours les bienvenus; au cours des deux dernières années, les utilisateurs canadiens ont eu accès aux installations américaines pour 80 % de leur temps de faisceau¹⁵. Les installations situées en dehors des États-Unis continuent d'accueillir les Canadiens conformément à leurs politiques qui prévoient d'accorder la préférence aux pays qui offrent une contribution financière. Dans les dix dernières années, l'ILL a accordé l'accès à ses installations à 79 expériences menées par des équipes comprenant 74 chercheurs canadiens (y compris des étudiants et des stagiaires postdoctoraux). L'ILL demeure l'installation la plus recherchée en dehors de l'Amérique du Nord (section 4.5).

Au cours des deux années suivant la fermeture du CCFN et l'expiration de l'accord avec la SNS, les chercheurs canadiens ont été confrontés à une importante réduction de l'accès aux faisceaux de neutrons, comme l'a clairement démontré un sondage réalisé en 2020 auprès des utilisateurs de faisceaux de neutrons (Figure 9 et Figure 10). Les résultats indiquent que la capacité des chercheurs canadiens à recourir aux faisceaux de neutrons pour leurs recherches continue de diminuer même aujourd'hui. Il faudra donc attendre peut-être encore plusieurs années avant que toute l'ampleur de la réduction de la capacité soit clairement établie et bien comprise. D'après le sondage, le nombre d'expériences *prévues* pour les 12 prochains mois était inférieur de 24 % au nombre d'expériences *effectivement réalisées* au cours des 12 derniers mois. En raison de l'accès réduit aux installations de

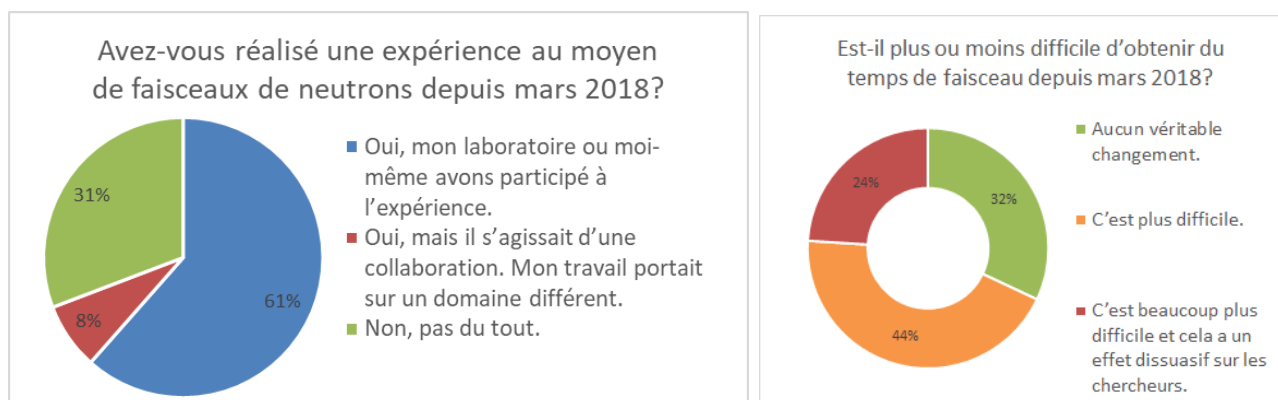


Figure 9. Moins de chercheurs ont utilisé des faisceaux de neutrons dans les deux années suivant la fermeture du CCFN en mars 2018, et ceux qui l'ont fait ont signalé que c'était beaucoup plus ardu. À gauche : Part des répondants qui ont continué à utiliser des neutrons au cours des deux dernières années. À droite : Part des répondants pour qui il a été plus difficile d'obtenir du temps de faisceau; ceux qui ont déclaré n'avoir connu aucun changement notable dans l'obtention de temps de faisceau sont uniquement ceux qui, au cours des deux dernières années, ont utilisé uniquement des capacités que le CCFN n'offrait pas (p. ex., diffusion neutronique à petit angle, neutrons froids, méthodes par temps de vol ou diffusion à écho de spin neutronique). Source : Sondage ICDN-ICFN 2020 (note de bas de page 15).

¹⁴ La répartition était à peu près égale, avec plus de 100 chercheurs participants étrangers au CCFN chaque année, tandis qu'un sondage auprès des installations américaines en 2012 a fait état de plus de 90 chercheurs participants en provenance du Canada. Un chercheur participant au cours d'une année donnée est une personne qui a été un utilisateur pendant ladite année ou un coauteur d'un article rédigé à la suite de travaux effectués au CCFN et publié pendant l'année. Il s'agit d'une mesure normalisée pour les installations de neutrons nord-américaines.

¹⁵ Résumé des résultats du sondage ICDN-ICFN 2020. 5 octobre 2020. En ligne à : <https://fedorukcentre.ca/documents/resources/cni/cins-cni-survey-2020-report.pdf>

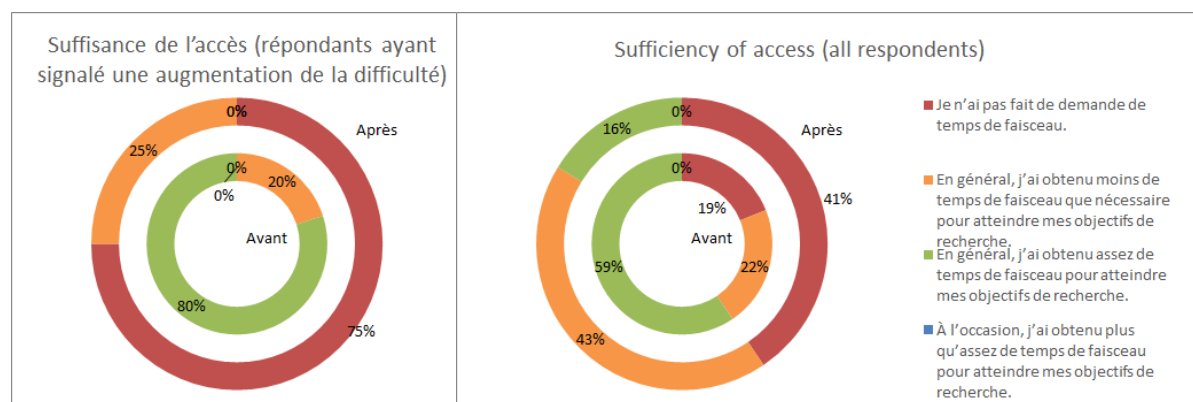


Figure 10. Le changement du niveau d'accès est considérable pour ceux qui ont été touchés. La figure illustre la suffisance du temps de faisceau dans les deux années précédant et suivant la fermeture du CCFN en mars 2018, pour ceux qui ont signalé une augmentation de la difficulté (à gauche), et pour tous les répondants (à droite). Parmi ceux qui ont été touchés, seuls 10 % obtiennent suffisamment de temps de faisceau depuis la fermeture, alors que 73 % d'entre eux en obtenaient suffisamment auparavant. Près de la moitié (45 %) des répondants ont demandé du temps de faisceau mais n'en ont pas reçu assez (pas du tout ou trop peu), tandis qu'un nombre égal (45 %) ont été dissuadés de faire une demande. En outre, la proportion de tous les répondants qui n'ont pas fait de demande dans une fenêtre de deux ans a doublé, passant de 19 % à 41 % après la fermeture du CCFN. Source : Sondage ICDN-ICFN 2020 (note de bas de page 15).

neutrons et de la beaucoup trop forte demande par rapport au temps de faisceau disponible, de nombreuses expériences prévues ne seront pas retenues dans les concours de temps de faisceau. En outre, le grand déséquilibre entre l'offre et la demande, de même que les obstacles politiques à la participation canadienne ne feront que s'aggraver avec la pénurie croissante de neutrons, et le Canada ne peut pas s'attendre à avoir accès à des installations étrangères pendant longtemps en l'absence de contribution financière.

Au cours des dix dernières années, les chercheurs canadiens ont profité d'avantages apportés directement et indirectement par le CCFN et la SNS, et ces avantages ont aidé les Canadiens à être compétitifs dans les concours de temps de faisceau : les scientifiques canadiens et leurs étudiants et stagiaires postdoctoraux ont pu profiter d'une formation et d'une expérience précieuses; ils ont recueilli des données et publié des articles qui peuvent être cités comme recherches antérieures pertinentes. Certains de ces utilisateurs sont devenus des chefs de file dans leur domaine scientifique et ont fait figure de pôle d'attraction pour des collaborateurs internationaux qui les aident à leur tour à avoir accès à du temps de faisceau dans des installations situées dans leur pays d'origine. Les Canadiens ont été invités à présenter une demande d'accès aux installations américaines, en partie grâce à cet échange scientifique basé sur une réciprocité d'accès et aussi parce que le Canada a contribué largement à la construction d'instruments à la SNS. Ces avantages résiduels diminueront au cours des prochaines années, car 1) le retard dans les projets qui s'appuient sur les résultats du CCFN et de la SNS sera éliminé; 2) les étudiants actuels obtiendront leur diplôme, et la formation de nouveaux étudiants sur les techniques de faisceaux de neutrons deviendra plus difficile; 3) la réputation des Canadiens dans le domaine et leur attrait en tant que collaborateurs diminuera; 4) les chercheurs canadiens se tourneront vers d'autres pays en raison du manque de temps de faisceau; et 5) l'accueil favorable résiduel des scientifiques canadiens au sein des installations américaines ne durera pas.

À moins que le Canada ne rétablisse l'accès bientôt, bon nombre de ses programmes qui requièrent des faisceaux de neutrons prendront fin, tandis que les autres progresseront à un rythme beaucoup plus lent puisqu'il n'y aura plus que les deux lignes de faisceaux du RNM ou un accès limité aux sources américaines tant que les Canadiens y seront les bienvenus. Dans le cas des étudiants, le grand risque d'échec d'une demande à l'une de ces sources, où les demandes de temps de faisceau sont acceptées

une ou deux fois par an seulement, peut condamner un chapitre entier de mémoire de maîtrise ou de thèse de doctorat, et les étudiants passeront à côté de la solide expérience de formation qu’auraient offertes ces installations.

Tableau 1. Les six principales installations neutroniques utilisées par les répondants canadiens, avec les expériences prévues dans chaque installation en tant que pourcentage de jours de faisceau pour toutes les expériences prévues par les répondants. Source : Enquête ICDN-ICFN 2020 (note de bas de page 15).

Installation de neutrons	Pays	%
NIST Center for Neutron Research (NCNR)	É.-U.	43
Spallation Neutron Source (SNS)	É.-U.	24
High-Flux Isotope Reactor (HFIR)	É.-U.	9,4
Institut Laue-Langevin (ILL)	France	8,7
ISIS Neutron and Muon Source (ISIS)	Royaume-Uni	5,1
Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM-II)	Allemagne	2,9

4.5 Possibilités de partenariats

Les partenariats représentent le seul moyen d’obtenir un accès immédiat à toute la gamme des techniques neutroniques dont les Canadiens ont besoin. Le partenariat avec des installations neutroniques étrangères doit constituer un élément permanent de la stratégie du Canada. Les partenariats sont indispensables dans l’immédiat pour maintenir la continuité des programmes de recherche canadiens; leur nécessité sera toute aussi grande même lorsque le RNM à luminosité moyenne sera en pleine activité. La plupart des programmes de recherche canadiens auront tout de même besoin d’une source de neutrons à haute luminosité pour au moins certaines de leurs expériences neutroniques. Une haute luminosité permet une haute résolution en matière de temps, d’énergie, de transfert de quantité de mouvement et d’espace dans l’échantillon — chacun de ces éléments étant souvent nécessaire pour résoudre des problèmes dans le domaine de la recherche sur les matériaux. En outre, même dans le scénario à long terme le plus optimiste quant à une nouvelle source nationale basée sur un réacteur ou un accélérateur compact (section 8), certaines capacités scientifiques nécessaires ne seront disponibles que dans des sources de neutrons de spallation de renommée mondiale dans d’autres pays.

Depuis 2015, quand la date de fermeture de l’installation canadienne a été annoncée, au moins six installations étrangères ont proposé des occasions de partenariat où le Canada pourrait investir. Comme les principales installations aux États-Unis et en Europe en particulier offrent des avantages distinctifs qui interpellent les chercheurs canadiens, le programme canadien pourrait s’associer à plusieurs installations, en fonction de la demande canadienne pour des capacités particulières.

La plupart des techniques neutroniques dont les Canadiens ont besoin immédiatement sont offertes dans des sources américaines. Les possibilités de partenariat aux États-Unis sont les suivantes : 1) l’Oak Ridge National Laboratory du département de l’Énergie (c’est-à-dire la SNS et le High-Flux Isotope Reactor [HFIR]) à Oak Ridge (Tennessee); et 2) le NIST Center for Neutron Research (NCNR) du département du Commerce à Gaithersburg (Maryland). Ces installations sont bien connues des

« Nous serions ravis d'établir un partenariat avec le Canada, car à titre de pôle principal de la science neutronique dans le monde, le fait d'attirer de solides communautés facilite notre mission. La communauté de recherche canadienne affiche un excellent bilan en matière d'exploitation de faisceaux de neutrons au profit de la recherche et de l'innovation dans le domaine des matériaux, et de nombreuses entreprises canadiennes jouissent d'une grande expérience dans l'approvisionnement d'installations nucléaires. » — **Helmut Schober, directeur de la première source de neutrons au monde, l'Institut Laue-Langevin en France**



utilisateurs experts canadiens et raisonnablement faciles d'accès sur le plan géographique. En se basant sur des précédents, il serait possible d'exécuter un programme canadien dans ces installations grâce à une combinaison de contributions en espèces et en nature d'experts et d'équipement. Par exemple, le Centre Jülich de science neutronique en Allemagne dispose d'une antenne à la SNS où du personnel du Centre Jülich offre un soutien aux utilisateurs allemands, tandis que le projet de la FCI « Participation canadienne à la SNS » était une contribution en espèces pour l'obtention d'un simple accès, sans programme de soutien particulier pour les Canadiens.

En Europe, l'Institut Laue-Langevin (ILL) en France, la ISIS Neutron and Muon Source au Royaume-Uni et la Source européenne de spallation (ESS) en construction en Suède, ont tous contacté le Canada pour discuter de partenariats. Ces installations offrent des capacités et des possibilités que des partenariats avec les installations américaines ne pourraient offrir. L'ILL, aujourd'hui première source de neutrons au monde, offre un vaste éventail de lignes de faisceaux et a la capacité de fournir sur place des matériaux deutérés et biologiquement pertinents. Il est possible d'obtenir un accès immédiat à l'ILL en payant une cotisation à son consortium international. L'installation ISIS offre une gamme de capacités puissantes pour l'étude des matériaux industriels et a déjà établi des partenariats internationaux pour accorder l'accès à ses ressources. On prévoit que l'ESS sera la source de neutrons la plus brillante du monde. Même si les premières lignes de faisceaux de l'ESS ne seront probablement pas accessibles avant 2023, l'établissement d'un partenariat dès à présent permettrait aux Canadiens de participer à la conception et à la construction de composants de lignes de faisceaux, d'équipements auxiliaires et d'outils de calcul afin de réaliser des travaux scientifiques de pointe au cours des prochaines décennies, des activités qui sont particulièrement pertinentes pour l'objectif 3 : « Explorer des options de création de nouvelles sources de neutrons et y investir à long terme ».

Travailler en partenariat avec des sources de neutrons en dehors des États-Unis est une occasion de diversifier les collaborations du Canada. Dans l'ensemble, le milieu scientifique canadien collabore étroitement avec les États-Unis. L'importance de ces collaborations se maintient, mais selon la stratégie scientifique fédérale, il est nécessaire de diversifier nos collaborations, car « pour que le Canada fasse figure de chef de file en matière de science, de technologie et d'innovation¹⁶, il doit absolument tisser des liens avec les nombreux pays à fort coefficient de recherche dans le monde ». Un partenariat avec les sources de neutrons présentes dans ces pays permettra aux scientifiques canadiens de participer à la vie scientifique de ces installations, ce qui conduira à de nouvelles relations et collaborations.

¹⁶ Innovation, Science et Développement économique Canada. « Un moment à saisir pour le Canada : Aller de l'avant dans le domaine des sciences, de la technologie et de l'innovation 2014. » https://www.ic.gc.ca/eic/site/113.nsf/fra/h_07657.html. Consulté le 20 octobre 2020.

4.6 Activités actuelles visant l'établissement de partenariats

Afin de rétablir un certain accès aux faisceaux de neutrons pour la recherche canadienne, l'Université McMaster a présenté une proposition « nationale » au concours du Fonds d'innovation 2020 de la FCI à propos d'un projet d'infrastructure de 47 millions de dollars intitulé « Bâtir un avenir pour la diffusion neutronique au Canada ». La gouvernance et la gestion de ce projet et de l'infrastructure correspondante s'inscriraient dans le cadre découlant de l'objectif 4. L'ICFN a obtenu le soutien de dirigeants pour ce projet, et dix-sept universités canadiennes ont fini par contribuer à cette proposition en versant une partie de leurs quotas de demandes de subventions à la FCI. La proposition comportait des éléments nationaux et étrangers. (La figure 2 illustre comment ces projets d'investissement s'inscrivent dans une stratégie nationale cohérente.)

Comme les partenariats étrangers constituent la seule façon d'obtenir un certain accès aux faisceaux de neutrons à court terme, la proposition « Bâtir un avenir pour la diffusion neutronique au Canada » comprenait une contribution de 11 millions de dollars destinée à l'infrastructure des faisceaux de neutrons dans deux installations américaines : la SNS et le NCNR. En échange, les Canadiens auraient un accès immédiat à la gamme de faisceaux de neutrons dont ils ont besoin pendant six ans. Le temps total de temps de faisceau dans ces installations étrangères ne remplacerait pas ce qui a été perdu à la fermeture du CCFN, mais représenterait au moins le double de ce que les Canadiens avaient en vertu de l'accord précédent avec la SNS, et serait un bon début pour rétablir l'accès aux faisceaux de neutrons. Néanmoins, pour répondre au besoin national en temps de faisceau, il faudrait investir environ cinq fois plus dans les installations étrangères au cours des prochaines années.

4.7 Objectif 1 — Questions à débattre

1. *Comment le Canada peut-il soutenir au mieux l'ensemble des utilisateurs, y compris les utilisateurs experts et non experts du milieu universitaire, des laboratoires gouvernementaux et de l'industrie, pour qu'ils aient accès aux installations étrangères de faisceaux de neutrons? En quoi leurs besoins sont-ils différents?*
2. *Dans le cadre d'un programme canadien, quelles activités destinées à favoriser l'accès aux sources étrangères de neutrons faudrait-il mener, par opposition à une externalisation vers un partenaire étranger?*
3. *Quel processus décisionnel le Canada devrait-il adopter en matière de partenariats étrangers? Quels devraient être les critères utilisés pour la sélection des partenaires? Quel devrait être le processus de cette sélection et des décisions concernant le montant investi dans chaque partenariat?*
4. *Quel devrait être le rôle de Neutrons Canada – à terme, une organisation nationale comprenant des membres institutionnels — dans ces décisions et dans la négociation des modalités avec les partenaires?*

5 Miser sur les capacités nationales

Dans la présente section, nous passons brièvement en revue les capacités nationales sur lesquelles nous pouvons miser, puis nous examinons leurs contributions éventuelles à une stratégie nationale cohérente.

Objectif stratégique 2 : Miser sur les capacités nationales actuelles, y compris la pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster (RNM), une source de neutrons à luminosité moyenne

5.1 Possibilité pour le Canada de contribuer à l’approvisionnement mondial en neutrons

Même si le Canada peut s’associer à d’autres pays pour répondre à ses besoins en matière de faisceaux de neutrons (section 4), il n’a pas besoin de concentrer toutes ses ressources sur les partenariats étrangers. L’expérience d’autres pays qui ont perdu leurs propres sources principales de neutrons montre qu’il est extrêmement difficile de maintenir la capacité dans ce domaine sans avoir au moins une source nationale plus petite capable de répondre aux besoins des chercheurs du pays et de leur permettre d’acquérir l’expérience nécessaire pour participer aux concours de temps de faisceau dans les installations internationales majeures. L’expertise diminue à mesure que les utilisateurs vont s’installer dans d’autres pays dotés d’une source de neutrons, ou que les utilisateurs changent complètement de domaine de recherche. En conséquence, de nombreux étudiants ne pourront plus acquérir une expérience de recherche dans des installations de faisceaux de neutrons, tant au pays qu’à l’étranger; on a déjà démontré que ce facteur a un impact considérable sur le niveau de scolarisation des étudiants et sur la poursuite de leur carrière dans des secteurs innovants (section A6).

Bien que le Canada doive examiner diverses possibilités ouvrant la voie à de nouvelles sources de neutrons (section 8), il faudrait attendre au moins dix ans avant qu’une source nouvellement construite soit opérationnelle et suffise à répondre à la plupart des besoins du Canada. Cependant, le potentiel inutilisé du réacteur nucléaire McMaster (RNM) à luminosité moyenne représente une occasion immédiate de reconstituer en partie la capacité nationale en matière d’expériences à haut débit et à forte demande. En outre, il offre la possibilité d’accroître l’approvisionnement mondial en neutrons qui est à la baisse (section 4.3) et de participer aux initiatives internationales visant à pallier la rareté des neutrons. Cette approche est également conforme à la position internationale. Par exemple, un des éléments clés de la stratégie européenne sur les faisceaux de neutrons a été d’exploiter plus efficacement les sources de neutrons à luminosité moyenne pour les méthodes à haut débit et à forte demande (généralement la diffraction) et de permettre ainsi aux installations à haute luminosité de se concentrer sur les méthodes qui requièrent le plus de luminosité et qui repoussent les frontières de la science des neutrons (généralement la spectroscopie).

La modernisation du RNM a permis la reconstruction initiale de son laboratoire de faisceaux de neutrons (section 3.2). Grâce à sa gamme de capacités complémentaires, l’Université McMaster est aussi un endroit propice à la mise en place d’une installation pour utilisateurs de faisceaux de neutrons : elle compte le plus grand groupe de spécialistes des matériaux de toutes les universités du Canada, ainsi que l’un des ensembles d’infrastructures de recherche sur les matériaux les plus complets de toutes les universités du monde. De plus, l’Université McMaster est bien située pour soutenir la formation et le rayonnement, car elle se trouve à moins d’une heure des aéroports internationaux de Toronto et de Hamilton et que la région compte de nombreuses universités.

5.2 Pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster

Le RNM polyvalent est le seul réacteur de recherche financièrement autonome au monde. Il tire profit des revenus de la production d'isotopes médicaux, des services d'analyse et de l'irradiation des matériaux — des revenus qui peuvent ensuite être injectés dans certains services de recherche et d'éducation. Par exemple, le RNM appuie l'industrie aéronautique en fournissant deux lignes de faisceaux de neutrons à NRay Services Inc, une entreprise qui offre un service d'imagerie non destructive des aubes de turbines d'avion utilisées dans les moteurs à réaction. Les droits payés par NRay Services contribuent à l'exploitation du réacteur et permettent à des chercheurs d'avoir accès aux autres services du réacteur. Actuellement, les frais d'utilisation du réacteur limitent ses heures de fonctionnement (16/5) et sa puissance. Par conséquent, la capacité du RNM n'est pas pleinement exploitée. Pendant que le réacteur est en fonctionnement, il accepte autant d'activités de recherche que possible; cependant, il ne peut pas soutenir de nouvelles activités de recherche en vertu de son modèle financier actuel.

Il est possible de repousser les limites du RNM à la fois par des dépenses en capital et des dépenses d'exploitation au profit du réacteur lui-même ainsi que du laboratoire de faisceaux de neutrons. Les dépenses en capital les plus nécessaires et les plus rentables consistent à ajouter trois lignes de faisceaux de diffraction, avec les environnements d'échantillons connexes et l'équipement auxiliaire, pour compléter la gamme de diffraction du RNM (Tableau 2). Cette mise à niveau permettra au RNM de fournir environ 700 jours d'instrument par an à partir d'un ensemble de cinq instruments (Tableau 3) — une contribution majeure pour répondre aux besoins du Canada. En comparaison, l'ancien CCFN fournissait 1 300 jours d'instrument par an à l'aide de six instruments. Les dépenses totales en capital sont estimées à 25 millions de dollars, tandis que la mise en service des lignes de faisceaux s'étendrait sur sept ans. L'acquisition et l'adaptation de l'équipement usagé de l'ancien CCFN pourraient réduire le coût et la durée de ces projets d'immobilisations. Au fur et à mesure de la mise en service de ces instruments au RNM, des fonds d'exploitation (2 à 3 millions de dollars par an) seront essentiels pour maintenir en état de préparation le laboratoire de faisceaux de neutrons et permettre ainsi aux chercheurs invités d'y accéder, avec le soutien de dix-huit professionnels et techniciens à plein temps.

Tableau 2. La gamme d'instruments du RNM nécessaires à la recherche sur diverses catégories de matériaux.

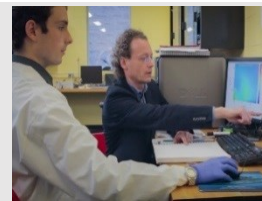
Instruments	Statut	Énergie	Structure	Bio	Quantique
Diffractomètre à poudre	Proposé	✓	✓		✓
Réfectomètre	Proposé		✓	✓	✓
Scanneur de contrainte	Proposé		✓		
Diffractomètre à petit angle	En construction	✓	✓	✓	✓
Diffractomètre à monocristal	Opérationnel	✓			✓

Tableau 3. Comparaison des principaux indicateurs de capacité pour les expériences au moyen de faisceaux de neutrons au RNM par rapport au réacteur NRU aujourd'hui fermé.

	Réacteur NRU	RNM (2021)***	RNM (éventuel)
Flux neutronique ($n/cm^2/s$)*	30×10^{13}	1×10^{13}	2×10^{13}
Flux neutronique ($n/cm^2/s$)**	48×10^8	5×10^8	10×10^8
Cycle d'exploitation hebdomadaire	24/7	16/5	24/7
Facteur de capacité d'exploitation	60 %	40 %	80 %
Instruments	6	2	5
Jours de faisceau	1 300	280	1 500

*Estimation du flux neutronique thermique dans le modérateur en amont des tubes de faisceaux. **Flux de neutrons thermiques à la position du monochromateur sur les lignes de faisceaux. ***Dans l'hypothèse de l'ouverture de la ligne de faisceaux du diffractomètre à petit angle et de la mise en place de filtres de faisceaux améliorés.

Le professeur **Maikel Rheinstadter** (Université McMaster) enseigne à un étudiant diplômé à analyser comment des molécules médicamenteuses interagissent avec des tissus analogues à ceux de l'être humain — des recherches qui pourraient progresser grâce au diffractomètre à petit angle d'un RNM mis à niveau.



Une des principales différences entre le RNM et le réacteur NRU, aujourd'hui à l'arrêt, est le flux neutronique plus faible du RNM et sa moindre capacité de fonctionnement. Cette différence pourrait être atténuée grâce à des fonds d'exploitation supplémentaires (7 millions de dollars par an) afin de doubler le temps de faisceau disponible — en prolongeant le cycle de fonctionnement du réacteur de 16/5 à 24/7 — et d'optimiser la qualité des faisceaux — en doublant la luminosité des neutrons par l'augmentation de la puissance du réacteur de 2 MW à 5 MW. Un fonctionnement continu et à haute puissance du réacteur serait possible d'ici quelques années, les facteurs limitatifs étant le temps nécessaire pour attirer et former un personnel d'exploitation suffisant et le temps nécessaire pour l'approvisionnement en combustible nucléaire supplémentaire.

Une fois complètement mis à niveau et exploité comme décrit ci-dessus, le RNM pourrait soutenir un programme d'utilisation à une échelle similaire à celle du CCFN, et pourrait répondre à environ la moitié de la demande canadienne de faisceaux de neutrons et permettre la recherche dans des domaines particuliers. Bien que le RNM mettrait l'accent sur des applications « lourdes » à forte demande qui se prêtent à des intensités neutroniques continues à large bande, des catégories entières d'expériences, en particulier la diffusion neutronique inélastique pour l'étude des matériaux quantiques, nécessiteraient encore le recours à une source de neutrons beaucoup plus brillante ailleurs.

5.3 Activités récentes visant à accroître les capacités nationales

Forte du soutien du groupe de travail de l'ICFN et de dix-sept universités (section 4.6), l'Université McMaster a présenté une proposition « nationale » dans le cadre du concours du Fonds d'innovation 2020 de la FCI sur un projet d'infrastructure de 47 millions de dollars; la proposition s'intitule « Bâtir un avenir pour la diffusion neutronique au Canada ». La proposition a demandé une contribution de 25 millions de dollars pour achever le laboratoire de faisceaux de neutrons au RNM en acquérant les lignes de faisceaux de neutrons et l'équipement auxiliaire proposé ci-dessus (tableau 2). Bien que ces dépenses en capital constituent une avancée majeure, il faudra encore procéder à des mises à niveau opérationnelles pour pleinement exploiter le RNM; ces dernières pourraient être réalisées en parallèle ou ultérieurement.

En outre, plusieurs universités canadiennes continuent à embaucher des spécialistes des matériaux qui utilisent des faisceaux de neutrons (section 3.1.1). Aujourd'hui, le Centre Fedoruk invite les universités de la Saskatchewan à envisager la création d'une grappe de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons, et finance des projets de recherche sur les matériaux qui utilisent des outils nucléaires, notamment des faisceaux de neutrons.

5.4 Objectif 2 — Questions à débattre

5. *Quels seraient les avantages de la pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster pour l'obtention de faisceaux de neutrons qui seraient plus difficiles ou impossibles à obtenir si le Canada dépendait exclusivement de sources de neutrons à l'étranger?*
6. *Comment le Canada peut-il au mieux maintenir en fonction, mettre à profit et prévoir la relève de son expertise scientifique et technique en matière d'instruments et de méthodes liés aux faisceaux de neutrons?*

PROJET DE CONSULTATION

7. *De quelles autres façons le Canada peut-il tirer parti de ses capacités nationales en matière de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons?*
8. *Quel rôle devrait jouer Neutrons Canada dans la pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster, la promotion de l'expertise nationale et le renforcement des capacités nationales du Canada?*

6 Explorer de nouvelles sources de neutrons à long terme

Dans la présente section, nous passons brièvement en revue les possibilités d'investissement à long terme dans de nouvelles sources de neutrons, puis nous envisageons diverses activités pour explorer de telles possibilités dans le cadre d'une stratégie nationale cohérente.

Objectif stratégique 3 : Explorer des options de création de nouvelles sources de neutrons et y investir à long terme.

6.1 Contexte mondial

Comme le décrit la section 4, les pays du monde entier réinvestissent massivement dans les sources de neutrons, mais l'approvisionnement en neutrons est à la baisse, car les plus vieilles sources sont mises à l'arrêt plus rapidement que la mise en service de nouvelles sources. Dans un environnement où l'accès aux neutrons est de plus en plus difficile, le Canada ne peut pas s'attendre à profiter des investissements des autres pays. Pour continuer à participer à ce domaine au cours des prochaines décennies, le Canada doit se préparer à investir à long terme dans de nouvelles installations, qu'elles soient nationales, étrangères ou les deux.

La stratégie à long terme du Canada peut s'inspirer des efforts déployés aux États-Unis et en Europe pour planifier l'avenir, et les compléter : les États-Unis planifient la deuxième station cible de la Spallation Neutron Source (SNS), tout en examinant les plans conceptuels de rénovations majeures ou de nouvelles constructions de sources basées sur un réacteur. L'Europe se concentre sur l'achèvement de la Source européenne de spallation (ESS) et a réuni ses installations existantes au sein de la Ligue des sources européennes de neutrons avancées (LENS) afin d'utiliser au mieux les installations existantes et de se pencher sur la planification stratégique des futures sources de neutrons. Un des éléments clés de la stratégie européenne est d'exploiter plus efficacement les sources de neutrons à luminosité moyenne pour les méthodes à haut débit et à forte demande (généralement la diffraction) et de permettre ainsi aux installations à haute luminosité de se concentrer sur les méthodes qui requièrent la plus haute luminosité et qui repoussent les frontières de la science des neutrons (généralement la spectroscopie). En outre, comme la construction de nouveaux réacteurs pose un défi sur le plan politique en Europe et que les réacteurs à haute luminosité et les sources de spallation coûtent très cher, la stratégie européenne prévoit d'explorer la faisabilité de technologies novatrices basées sur des accélérateurs pour la production à moindre coût de sources à faible et à moyenne luminosité¹⁷. Par conséquent, des sources de neutrons basées sur un accélérateur compact (CANS) sont en cours de réalisation afin de déterminer leur faisabilité comme solution de rechange à la construction de nouveaux réacteurs, et la LENS formule un exposé de position sur la façon dont cette technologie pourrait s'inscrire dans une feuille de route européenne pour l'avenir des sources de neutrons.

6.2 Options du Canada

Parmi les options à long terme qui permettront de renforcer les capacités du Canada et de compléter les initiatives mondiales en matière de réinvestissement dans les installations neutroniques, notons :

- Construction d'une nouvelle source de neutrons basée sur un réacteur qui pourrait aller d'un réacteur à faisceaux de neutrons dédié de 500 millions de dollars à un réacteur de recherche polyvalent de 1 à 2 milliards de dollars. Par le passé, le processus décisionnel lié à la

¹⁷ « Neutron scattering facilities in Europe—Present status and future perspectives. » 2016. ESFRI Scripta volume I. esfri.eu/esfri-scripta-series. Voir aussi : France : Frédéric Ott. « Compact Neutron Sources for Neutron Scattering. » [Rapport technique] CEA. Paris Saclay. 2018. <cea-01873010>; Allemagne : Rücker et coll. « The Jülich high brilliance neutron source project. » doi.org/10.1140/epjp/i2016-16019-5

construction d'un réacteur polyvalent au Canada se fondait sur les besoins des secteurs de l'énergie nucléaire et des isotopes médicaux. La communauté canadienne des utilisateurs de faisceaux de neutrons pourrait se préparer à participer à un tel processus en tant que groupe cohérent aux côtés des représentants de ces secteurs;

- Conception d'une source de neutrons compacte basée sur un accélérateur afin de fournir une nouvelle source à luminosité moyenne pour répondre à la plupart des besoins du Canada, ce qui peut être réalisé pour 100 à 200 millions de dollars;
- Contribution importante aux nouvelles sources multinationales et participation à leur élaboration. L'ESS et la deuxième station cible de la SNS sont les options connues pour participer à des projets d'investissement de calibre mondial qui permettront aux Canadiens d'avoir accès à des neutrons à haute luminosité pendant des décennies. Vu la taille réduite de la communauté scientifique canadienne, la construction de sa propre source de spallation au coût de 2 à 3 milliards de dollars pour rivaliser avec ces installations n'est pas une option attrayante, d'autant plus qu'elle ne produirait que des faisceaux de neutrons, plutôt que de constituer une installation polyvalente.

Dans les prochaines années, il importerait de réaliser une analyse scientifique et une analyse de rentabilité relativement à ces options. Bien que les technologies des réacteurs soient déjà établies, il faut encore réaliser d'importants travaux de recherche, de développement et de démonstration en ce qui concerne les technologies nécessaires aux nouvelles sources basées sur les accélérateurs. Le Canada pourrait tirer de nombreuses leçons des collaborations internationales visant la mise au point de technologies pour la Source européenne de spallation ou pour une source CANS. Peu importe la source de neutrons choisie, la conception de technologies pour les instruments à faisceaux de neutrons sera essentielle. Par conséquent, la stratégie du Canada doit comporter un programme qui encourage le renouvellement continu de l'expertise canadienne dans ces domaines pour que les scientifiques canadiens puissent encore contribuer au renforcement des capacités de calibre mondial et concevoir l'équipement dont les chercheurs canadiens ont besoin. Cette stratégie permettra au Canada de participer à des projets scientifiques internationaux de premier plan tout en créant ses propres sources CANS ou ses propres sources basées sur des réacteurs. L'analyse scientifique et l'analyse de rentabilité nous aideront à déterminer si nous avons besoin d'un nouveau réacteur à faisceaux de neutrons et à évaluer l'ampleur de l'accès dont nous aurons besoin à long terme aux installations étrangères.

6.3 Activités courantes contribuant à la stratégie à long terme

L'Université de Windsor pilote une étude de faisabilité pour la construction d'une source CANS financée par le volet Exploration du Fonds Nouvelles frontières en recherche. Les chercheurs collaborent avec des experts mondiaux de la technologie CANS afin de déterminer comment concevoir un prototype CANS pour le Canada. La conception du prototype et les activités de démonstration connexes pourraient représenter un projet de 20 millions de dollars sur plusieurs années. Ces activités aideraient le Canada à déterminer comment la technologie CANS peut contribuer au mieux à la stratégie à long terme de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons au Canada.

6.4 Objectif 3 — Questions à débattre

9. *Quels sont les avantages de participer à des consortiums multinationaux pour planifier et construire de nouvelles sources de neutrons, en plus d'assurer un accès à du temps de faisceau à l'avenir?*
10. *Quels sont les avantages de la création d'une nouvelle source nationale de neutrons qui sont impossibles à obtenir par une telle participation à des consortiums multinationaux?*

PROJET DE CONSULTATION

- 11. Comment la communauté canadienne des faisceaux de neutrons peut-elle se préparer à participer aux processus décisionnels nationaux sur les nouvelles sources de neutrons en tant que groupe cohérent aux côtés des communautés de l'énergie nucléaire et de la production d'isotopes?*
- 12. Quel rôle devrait jouer Neutrons Canada dans la planification de nouvelles sources de neutrons à long terme? Ou dans les projets de recherche, de développement et de démonstration portant sur de telles sources?*

7 Créer un nouveau cadre

La présente section décrit brièvement le cadre historique de la gestion des faisceaux de neutrons au Canada, les leçons à tirer du passé et du contexte actuel, et le potentiel d'un nouveau cadre dirigé par les universités et s'articulant autour d'une nouvelle entité, Neutrons Canada.

Objectif stratégique 4 : Créer un nouveau cadre national de gouvernance et de gestion des activités énoncées aux objectifs 1 à 3

7.1 Cadre historique des faisceaux de neutrons

Au début des années 1990, les installations de faisceaux de neutrons (connues plus tard sous le nom de CCFN) du réacteur NRU ont officiellement ouvert leurs portes aux utilisateurs par voie de concours avec évaluation par les pairs. Un financement conjoint de 4 millions de dollars du CRSNG (par l'intermédiaire de l'Université McMaster) et d'EACL a permis de construire ces deux nouvelles lignes de faisceaux. En 2007, une autre ligne de faisceaux a été finalisée, au coût de 2,4 millions de dollars, grâce à un financement de la FCI par l'intermédiaire de l'Université Western. Les utilisateurs universitaires de ces installations se sont regroupés au sein d'une société à but non lucratif, l'Institut canadien de la diffusion des neutrons (ICDN). De 1992 à 2013, l'ICDN a notamment supervisé le système d'évaluation par les pairs pour l'accès aux installations et la gestion des subventions de fonctionnement du CRSNG (valeur cumulative de 14 millions de dollars) par l'entremise du Programme de subventions d'accès aux installations majeures (AIM) et, plus tard, du Programme d'appui aux ressources majeures (ARM). Ces subventions étaient accordées aux présidents de l'ICDN de l'époque qui représentaient des équipes de candidats de dix universités ou plus. Les subventions compensaient partiellement le coût du maintien du CCFN dans un état de préparation compétitif pour les utilisateurs.

Les fonds du CRSNG ont couvert moins de 10 % du coût total d'exploitation de l'ancien CCFN (y compris les coûts attribués au réacteur NRU), tandis que les utilisateurs universitaires en sont devenus les principaux bénéficiaires à partir des années 1990. Le reste des coûts a été couvert par des organismes fédéraux. EACL, une société d'État relevant de Ressources naturelles Canada (RNCAN), a produit les neutrons à son réacteur NRU en tant que contribution en nature évaluée à environ 65 % du coût total d'exploitation; le Conseil national de recherches (CNR) a repris l'exploitation directe des installations de faisceaux de neutrons en 1997 et a couvert la majeure partie des 25 % du coût d'exploitation restants, qui jusqu'alors étaient également couverts par EACL.

De 1998 à 2012, ce cadre s'est révélé très efficace pour permettre à la communauté de chercheurs d'utiliser les faisceaux de neutrons. Les examens par les pairs du CRSNG et du CNR¹⁸, ainsi que les évaluations du Conseil des académies canadiennes et du Conseil du Trésor en font le constat. Ce cadre n'a toutefois pas permis aux parties prenantes du milieu universitaire de s'exprimer efficacement, ni aux universités de savoir dans quelle mesure leurs programmes de recherche pouvaient avoir accès aux faisceaux de neutrons. En 2012, lorsque les administrations universitaires n'ont pas semblé s'investir dans la consultation fédérale sur la restructuration d'EACL, le gouvernement n'a pas perçu d'intérêt marqué pour la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons au Canada.

Le cadre s'est effondré lorsque les bailleurs de fonds fédéraux ont connu une restructuration ou une réorientation des mandats. En 2012, le CRSNG s'est retiré du soutien au fonctionnement des

¹⁸ Par exemple, le pourcentage de temps de faisceau accordé aux utilisateurs par le CCFN était « extraordinairement élevé » et, dans le cas des clients industriels, « aucun autre centre de diffusion de neutrons [dans le monde] n'a pu l'égaliser ». Examen par les pairs de l'Institut Steacie des sciences moléculaires. Rapport final du comité d'examen de l'Institut (octobre 2004).

infrastructures scientifiques majeures en général, instaurant un moratoire sur son programme d'ARM. Le CNRC, qui s'est tourné vers la recherche industrielle, s'est départi de la responsabilité du CCFN. RNCAN, tout en envisageant un éventuel programme d'innovation nucléaire, a autorisé EACL à assumer la responsabilité de l'exploitation du CCFN, à partir de 2013, pour veiller à ce que le Canada conserve l'expertise nécessaire au soutien d'un éventuel programme d'innovation nucléaire. Les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC), issus de la restructuration d'EACL en 2015, ont été chargés de poursuivre l'exploitation du CCFN jusqu'à l'arrêt définitif du réacteur NRU en 2018.

Après la décision de fermer définitivement le réacteur NRU en 2015, aucun de ces organismes — RNCAN, EACL, LNC, CNRC ou CRSNG — n'a conservé le mandat de fournir une infrastructure de faisceaux de neutrons à la communauté nationale des utilisateurs après la fermeture du réacteur. À ce moment, les utilisateurs de faisceaux de neutrons du Canada, regroupés au sein de l'ICDN, ont fait appel à l'aide des cadres universitaires, ce qui a mené à la création de l'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons en 2016.

7.2 Évolution du cadre des installations de recherche majeures

L'ampleur et la complexité des infrastructures nécessaires aux objectifs stratégiques 1 à 3 feraient de cet ensemble d'infrastructures une installation de recherche majeure (IRM), comme le définit l'Examen du soutien fédéral à la science fondamentale¹⁹; elle serait comparable notamment à TRIUMF, à Calcul Canada, à Ocean Networks Canada et au Centre canadien de rayonnement synchrotron. Le modèle canadien de gestion des IRM a évolué et il s'agit souvent d'un processus ponctuel. Au Canada, les IRM sont de plus en plus exploitées par des entités extérieures au gouvernement, et la tendance est à l'exploitation par des sociétés à but non lucratif appartenant à plusieurs institutions membres.

À titre d'exemple de cette approche ponctuelle, notons la « Participation canadienne à la Spallation Neutron Source (SNS) », un accord entre l'Université McMaster et la SNS aux États-Unis, qui découle d'une subvention accordée dans le cadre du seul concours du Fonds d'accès international de la FCI en 2003. Les fonds ont été attribués en tant qu'apport en capital que la SNS a utilisé pour la mise au point d'instruments de faisceaux de neutrons. En retour, la SNS a accordé aux Canadiens du temps de faisceau pour une période limitée. Bien que ce projet ait atteint ses objectifs, cette méthode de gouvernance n'est pas idéale, car elle soulève des questions sur la durabilité (les concours de fonds d'immobilisations sont-ils le bon véhicule pour répondre aux besoins opérationnels à long terme?), la crédibilité de la représentation nationale (sur quelle base une université peut-elle représenter le Canada?) et la répartition appropriée de la charge administrative (une université doit-elle être la seule responsable de l'administration d'un programme, alors que les bénéfices escomptés sont destinés à une communauté nationale?).

Plus récemment, la FCI a encouragé des améliorations à la gouvernance des projets majeurs qui servent les communautés nationales. Souvent, une entité nationale, telle qu'une IRM, soutiendra une demande de subvention majeure d'une équipe réunissant divers établissements et mettra ensuite en œuvre le projet au nom de sa communauté d'utilisateurs scientifiques. En outre, le Fonds d'innovation de la FCI a évolué ces dernières années, ce qui a permis à la communauté des utilisateurs de faisceaux de neutrons de concourir pour une subvention similaire à celle de la « Participation canadienne à la SNS » — mais

¹⁹ Examen du soutien fédéral à la science fondamentale. « Investir dans l'avenir du Canada : Consolider les bases de la recherche au pays. » 10 avril 2017. <http://www.sciencereview.ca/eic/site/059.nsf/eng/home>

même la FCI reconnaît que le Fonds d'innovation n'est pas conçu pour soutenir les installations scientifiques nationales, et encore moins l'accès à de telles installations à l'étranger, et elle examine de meilleures façons de soutenir ces installations²⁰.

Aujourd'hui, il reste des défis de taille à relever dans la gestion des IRM au Canada, notamment la nécessité d'établir une feuille de route des besoins du Canada en matière d'IRM afin d'éclairer une prise de décision ordonnée concernant les cycles de vie ainsi que les choix entre les diverses options de nouvelles IRM. L'Examen du soutien fédéral à la science fondamentale a formulé des recommandations pour relever ces défis. Mona Nemer, conseillère scientifique en chef du Canada, a examiné ces recommandations et conseillé au gouvernement fédéral d'adopter une approche par portefeuille en désignant un responsable central chargé de la surveillance et de la planification à long terme des IRM²¹.

7.3 Leçons pour l'avenir

Voici les principales leçons tirées de ces expériences passées :

- Le nouveau cadre de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons devrait adopter les meilleures pratiques actuelles en matière d'IRM et s'harmoniser avec l'évolution du paysage politique en matière de gouvernance, de fonctionnement et de financement des IRM au Canada;
- Le financement de ce cadre doit provenir d'un organisme dont le mandat comprend l'approvisionnement en infrastructures de recherche;
- Le nouveau cadre doit être dirigé par le milieu universitaire, car celui-ci compte la plupart des utilisateurs de faisceaux de neutrons;
- La participation des administrations universitaires est nécessaire, tout comme celle des chercheurs;
- Les demandes de financement majeur d'infrastructures devraient être coordonnées au sein du cadre national;
- L'infrastructure doit être exploitée par une entité nationale dont la mission consiste notamment à permettre aux utilisateurs de la communauté d'y avoir accès;
- Il faut avoir une entité nationale pour représenter le Canada dans la négociation des accords avec les installations étrangères de faisceaux de neutrons;
- Une communauté d'utilisateurs structurée peut apporter une contribution précieuse en supervisant une telle entité nationale et en collaborant avec elle.

7.4 Neutrons Canada

En s'appuyant sur ces leçons, l'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons a envisagé une nouvelle entité nationale, « Neutrons Canada » — un élément clé de l'objectif 4 —, qui peut gérer les activités stratégiques du cadre (objectifs 1, 2 et 3) comme un programme cohérent, jouer un rôle unificateur pour la communauté des faisceaux de neutrons au Canada, et être une voix institutionnelle crédible et fiable. Les vice-présidents à la recherche, ou leurs représentants désignés, de seize

²⁰ La Fondation canadienne pour l'innovation, 2018. Le Fonds des initiatives scientifiques majeures de la Fondation canadienne pour l'innovation : « Rapport sur les progrès réalisés par les installations de recherche financées de 2012 à 2017 ». Ottawa (Ontario). <https://www.innovation.ca/fr/propos/nouvelles/un-rapport-souligne-limpact-programme-installations-recherche-dimportance-nationale>

²¹ Bureau de la conseillère scientifique en chef du Canada. Rapport annuel de la conseillère scientifique en chef 2019-2020. http://science.gc.ca/eic/site/063.nsf/fra/h_98146.html

universités ont participé à la table ronde en prévision de la création de « Neutrons Canada ». Les participants sont arrivés à un consensus autour de trois propositions²² :

1. Le Canada doit maintenir son rôle de chef de file dans le domaine de la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons;
2. Les universités canadiennes doivent établir un cadre pancanadien, dirigé par les universités, pour régir, gérer et représenter le programme canadien de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons;
3. Les vice-présidents à la recherche des universités canadiennes devraient consacrer du temps et de l'énergie à l'élaboration de ce nouveau cadre et veiller à la participation continue de leurs universités en tant que membres institutionnels.

Le groupe de travail de l'ICFN agira à titre de comité directeur pour l'établissement de Neutrons Canada.

7.4.1 Rôles

Voici les rôles et responsabilités éventuels de Neutrons Canada définis lors de la table ronde :

- Agir à titre d'organisme de coordination de la communauté des faisceaux de neutrons pour la planification, la communication et la gestion des principales initiatives en matière de faisceaux de neutrons tout au long du processus décisionnel;
- Agir à titre d'organisme de mise en œuvre des principales initiatives en matière de faisceaux de neutrons des établissements membres;
- Assurer l'intendance, y compris la gouvernance et la gestion des ressources, d'un programme national d'accès des utilisateurs aux installations de faisceaux de neutrons, tant nationales qu'étrangères;
- Agir en tant qu'organisme-cadre pour le personnel hautement qualifié requis par un programme national de faisceaux de neutrons, en orientant les talents et les chefs de file canadiens vers des activités nationales et internationales;
- Exploiter les installations de faisceaux de neutrons, particulièrement à l'échelle nationale;
- Négocier et superviser les partenariats internationaux;
- Servir d'interlocuteur institutionnel crédible en ce qui concerne l'infrastructure des faisceaux de neutrons (c'est-à-dire un rôle distinct de celui d'un groupe de défense d'intérêts);
- Travailler en réseau avec d'autres IRM afin d'établir un cadre national cohérent pour toutes les IRM au Canada.

7.4.2 Exploitation

L'organisation la plus comparable à Neutrons Canada dans le domaine de la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons est le Centre Jülich de science neutronique (JCNS) en Allemagne. Le JCNS est le *seul exemple au monde* d'un programme d'utilisateurs de faisceaux de neutrons qui a fonctionné avec succès après la fermeture de sa source de neutrons. Son fonctionnement en tant que « laboratoire virtuel », basé sur un accès à des faisceaux de neutrons dans d'autres installations (c'est-à-dire dans des « stations externes »), est particulièrement intéressant pour le Canada²³. Le JCNS offre un accès à dix-huit lignes de faisceaux dans trois stations externes en Allemagne, en France et aux États-

²² Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons. Leadership canadien dans la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons : Rapport sur une table ronde en vue de la création de « Neutrons Canada ». En ligne à : <https://fedorukcentre.ca/resources/canadian-neutron-initiative-cni.php>

²³ « Discussion on a Virtual Institute for Neutron Scattering – A concept paper » (novembre 2015). <http://cins.ca/docs/vins.pdf>

Unis, et est en train de construire des lignes de faisceaux pour une quatrième station externe en Suède, à la Source européenne de spallation qui ouvrira bientôt. Dans ses stations externes, le JCNS offre un soutien aux utilisateurs, met en place des lignes de faisceaux de neutrons et des méthodes (y compris la conception et la construction d'instruments) et fournit des services informatiques scientifiques, en plus d'exécuter ses propres programmes de recherche internes. En outre, le modèle du JCNS est maintenant reproduit en France par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) afin de conserver son noyau d'expertise au Laboratoire Léon Brillouin qui utilisait le réacteur Orphée récemment fermé.

Au Canada, un certain nombre d'organisations de recherche dans d'autres domaines scientifiques exploitent des IRM ou y participent, et sont pareillement éloignées de leurs utilisateurs, et souvent aussi de leur administration centrale. Ces organisations (échantillons au Tableau 4) soutiennent leurs communautés scientifiques respectives en fournissant bien plus qu'un simple accès à l'équipement.

Tableau 4. Exemples d'organisations de recherche canadiennes qui exploitent des IRM éloignées de leurs utilisateurs ou qui y participent (et, à l'exception de POLAIRE et de l'ancien CCFN, qui sont aussi éloignées de leur administration centrale).

Organisation	Rôle en matière d'accès aux stations externes et d'accroissement des capacités scientifiques
Conseil national de recherches (CNR) — Institut Herzberg	Facilite la participation canadienne aux installations astronomiques internationales en tant que « fenêtre sur les étoiles du Canada ».
Savoir polaire Canada (POLAIRE)	Responsable du renforcement du leadership canadien en matière de sciences et technologies polaires, en plus de permettre l'accès à la Station canadienne de recherche dans l'Extrême-Arctique.
TRIUMF	Sert de passerelle à la participation du Canada au CERN, le plus grand projet de physique des particules au monde, situé en Suisse, en plus de fournir l'accès à ses propres installations.
Centre canadien de rayonnement synchrotron	Détache une partie du personnel canadien auprès de sources de rayonnement synchrotron étrangères pour favoriser la recherche canadienne.
Centre canadien de faisceaux de neutrons (maintenant fermé)	Renforçait les capacités du Canada en matière de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons en donnant accès à ses installations à des utilisateurs experts et non experts, en formant de nouveaux utilisateurs et en mettant au point de l'équipement et des méthodes liés aux faisceaux de neutrons.
ArcticNet	Le réseau ArcticNet, associé au brise-glace de recherche <i>NGCC Amundsen</i> , renforce la capacité scientifique nécessaire à l'étude, à la modélisation et à la gestion de l'Arctique canadien en évolution.
Calcul Canada	Exploite une fédération de systèmes de calcul haute performance répartis dans les universités.
CMC Microsystems	Favorise la capacité des universités canadiennes à concevoir et à fabriquer des microdispositifs et des nanodispositifs à des fins de R. et D. en facilitant l'accès à de l'équipement et à des moyens de fabrication spécialisés et coûteux qui sont disponibles dans des salles blanches ailleurs au pays, en plus d'offrir ses propres services du même type.

Certaines conclusions clés du sondage 2020 auprès des utilisateurs de neutrons permettent de bien comprendre comment un programme national coordonné de gestion des capacités du Canada en matière de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons pourrait favoriser la communauté canadienne des utilisateurs de faisceaux de neutrons à l'avenir (Figure 11 et Figure 12) :

1. Le service le plus important serait l'établissement de partenariats afin d'obtenir du temps de faisceau pour les Canadiens (Figure 11) et de réduire ainsi le plus grand obstacle à l'accès. En particulier, les difficultés d'accès au temps de faisceau ne découragent pas seulement les nouvelles expériences (section 4.4), mais empêchent aussi les utilisateurs de mener leurs expériences au moyen de faisceaux de neutrons jusqu'à l'étape de la publication, car des mesures de suivi sont souvent nécessaires pour achever le projet et satisfaire les examinateurs

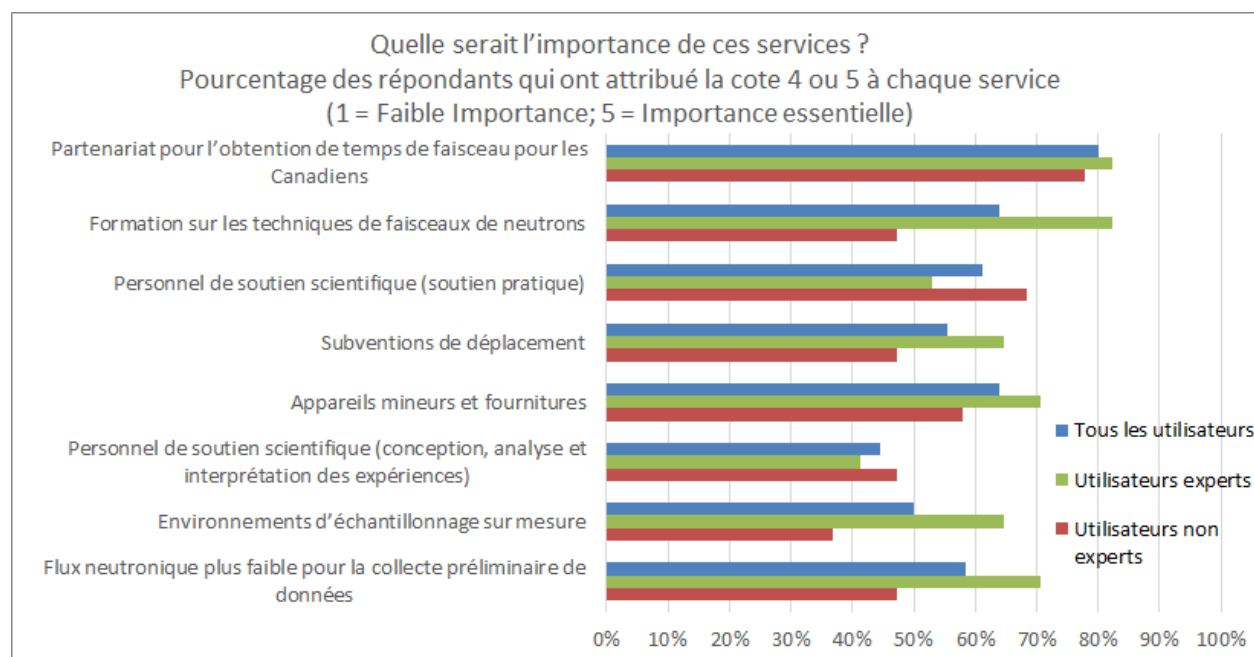


Figure 11. Pourcentage (%) des répondants qui ont qualifié chaque service comme étant très nécessaire ou absolument nécessaire (c'est-à-dire 4 ou 5 sur une échelle de 1 à 5). Source : Enquête ICDN-ICFN 2020.

(Figure 12). L'offre de « temps de faisceau canadien » dans une installation étrangère permettrait de réaliser de nouvelles expériences ainsi que des activités de suivi;

- La formation sur les techniques de faisceaux de neutrons serait le deuxième service le plus important (Figure 11). La formation peut aider les utilisateurs à concourir plus efficacement pour du temps de faisceau et à relever certains défis en matière d'analyse de données et d'autres obstacles comme le « temps nécessaire pour s'investir dans une expérience » (Figure 12). En fait, plus de 80 % des utilisateurs experts (voir section 3.1.3 pour la distinction entre utilisateurs experts et non experts) accorderaient une grande importance à la formation

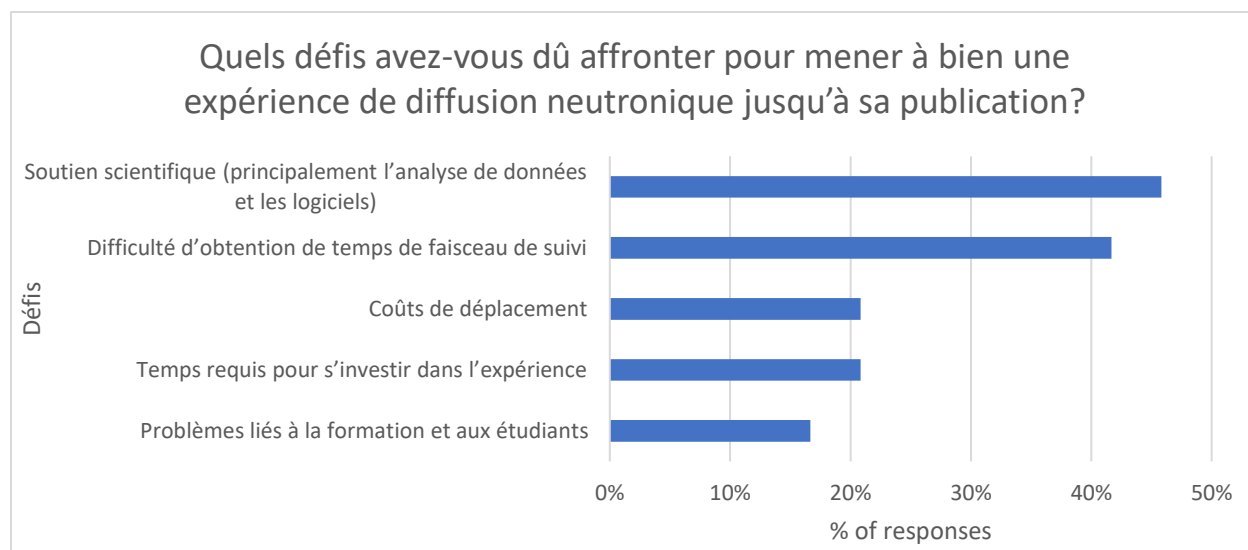


Figure 12. Dans la question ouverte ci-dessus, les répondants ont décrit les obstacles à surmonter pour achever leurs publications après avoir mené une expérience au moyen de faisceaux de neutrons. Les obstacles relevés ont été regroupés dans les catégories indiquées. Source : Enquête ICDN-ICFN 2020.

sur les techniques de faisceaux de neutrons — ce qui démontre que la formation serait tout aussi importante pour les utilisateurs experts que les partenariats visant à obtenir du temps de faisceau pour les Canadiens (figure 11);

3. La présence de personnel de soutien scientifique pour faciliter les différentes étapes d'un projet de recherche (p. ex., préparation d'une expérience ou analyse ultérieure des résultats) est aussi considérée comme étant très importante (Figure 11). Près de 70 % des utilisateurs non experts accordent beaucoup d'importance à un soutien scientifique pratique. De plus, ils ont plus fréquemment accordé beaucoup d'importance au soutien scientifique hors site. Le manque de soutien scientifique pour l'analyse de données est le défi le plus souvent mentionné par tous les répondants dans la réalisation d'une expérience au moyen de faisceaux de neutrons (Figure 12). En outre, la présence de personnel scientifique est essentielle à la formation que tous les répondants jugent importante;
4. Les chercheurs canadiens accorderaient de l'importance à tous les services recensés dans le sondage (Figure 11) (la cote moyenne la plus basse était de 3,4 sur 5);
5. Les utilisateurs experts et non experts ont des besoins différents et accorderaient une importance différente aux services offerts par un tel programme (Figure 11). Outre les différences mentionnées ci-dessus, le sondage a révélé qu'un plus grand nombre d'utilisateurs experts que d'utilisateurs non experts accorderaient beaucoup d'importance à 1) des subventions de déplacement, 2) des appareils mineurs et des fournitures, 3) des environnements d'échantillonnage sur mesure, et 4) des possibilités de collecte de données préliminaires au moyen d'instruments à faible flux.

Au vu de l'expérience du JCNS, du Centre canadien de faisceaux de neutrons et d'autres IRM canadiennes, et compte tenu des conclusions tirées par ces parties prenantes, une entité nationale pourrait envisager les moyens suivants pour apporter un soutien direct au maintien et au dynamisme de la communauté de la recherche :

- Négocier des accords de partenariat pour l'accès à des sources de neutrons au nom du Canada, et garantir le financement de ces partenariats;
- Appuyer les expériences individuelles, notamment en fournissant : de l'aide à la conception des expériences et à la participation au concours de temps de faisceau; un soutien pratique pendant les expériences elles-mêmes; un soutien pour l'analyse de données et la publication des résultats; des appareils mineurs et des fournitures pour les expériences; et un remboursement des frais de déplacement vers les stations externes pour réaliser les expériences;
- Développer, concevoir et fabriquer de l'équipement de lignes de faisceaux pour répondre aux nouvelles exigences scientifiques des chercheurs canadiens, et mettre ces outils en service dans les stations externes;
- Fournir des systèmes informatiques spécialisés pour la gestion et l'analyse de données;
- Attirer de nouveaux utilisateurs et former des utilisateurs non experts, parrainer des étudiants et des stagiaires postdoctoraux et organiser des ateliers sur la diffusion neutronique;
- Nouer des partenariats avec des universités à travers le Canada pour mettre en place des programmes de recherche et d'éducation, y compris la création éventuelle de postes de professeurs dans le domaine de la diffusion neutronique;
- Mettre en place des activités commerciales, y compris la commercialisation auprès de l'industrie, la passation de contrats pour des services de faisceaux de neutrons, la facilitation de la prestation de services aux installations de faisceaux de neutrons et la création de technologies dérivées pour les entreprises canadiennes;

- Assurer la communication scientifique et les initiatives de sensibilisation auprès des parties prenantes, des étudiants et du public;
- Promouvoir l'équité, la diversité et l'inclusion dans la communauté des faisceaux de neutrons (section 8).

Un personnel scientifique et technique spécialisé est indispensable à tous ces services opérationnels. Les principales installations d'utilisateurs de faisceaux de neutrons dans le monde comptent de six à dix employés par ligne de faisceaux²⁴, tandis que le CCFN, avec seulement trois ou quatre employés par ligne de faisceaux, a été décrit lors d'un examen international par les pairs comme « un programme de calibre mondial exécuté avec un minimum de moyens »²⁵. Toutes les IRM qui réussissent doivent avoir un personnel adéquat. Les graves limites associées au fait de miser sur le « volontariat » des étudiants diplômés et des professeurs, plutôt que sur un personnel dédié pour faire fonctionner les ressources universitaires communes constituent l'une des raisons majeures pour lesquelles les installations de calcul haute performance se sont fédérées pour devenir Calcul Canada, aujourd'hui une IRM unifiée²⁶.

Une entité nationale pourrait également veiller à la cohérence du programme afin que toutes les activités des différentes stations externes soient hiérarchisées, soutenues et gérées en fonction des orientations stratégiques du Canada. La centralisation de diverses fonctions administratives peut éviter le double emploi et améliorer la qualité de la prestation grâce à un personnel spécialisé qui assume diverses fonctions, telles que :

- Administrer les fonds de recherche, faciliter l'approvisionnement, analyser le rendement des programmes et s'acquitter de la reddition de compte;
- Allouer des ressources, comme le temps de faisceau, à l'aide d'un système d'examen de propositions d'utilisateurs, ou des dépenses en capital par voie de propositions concurrentielles pour la mise à niveau des instruments;
- Assurer le secrétariat des instances dirigeantes, y compris du conseil d'administration et des comités consultatifs scientifiques;
- Remplir d'autres fonctions générales, notamment les ressources humaines, les services juridiques, les TI, la sécurité et la conformité réglementaire.

7.4.3 Gouvernance

Il faudrait positionner Neutrons Canada comme le gestionnaire d'un programme de l'envergure d'une IRM dans le cadre de la compétence de financement d'Innovation, Science et Développement économique Canada (ISDE) et de son portefeuille d'organismes (par exemple la FCI). À ce titre, il devrait adopter les pratiques exemplaires émergentes de gouvernance et de gestion des IRM. Le groupe de travail de l'ICFN voit Neutrons Canada comme une entité dirigée par les universités, dont les membres sont des organisations (principalement universitaires) qui s'intéressent aux faisceaux de neutrons. Les membres éliraient un conseil d'administration indépendant sur la base de compétences en matière de gouvernance, de connaissances techniques et des principes d'équité, de diversité et d'inclusion (Figure 13). Les membres du conseil d'administration ne représenteraient pas les intérêts des sources de

²⁴ Analyse de Ken Andersen, chef de la division des instruments neutroniques, Source européenne de spallation. Octobre 2016.

²⁵ Selon l'examen, le pourcentage de temps de faisceau accordé aux utilisateurs par le CCFN était « extraordinairement élevé » et, dans le cas des clients industriels, « aucun autre centre de diffusion de neutrons [dans le monde] n'a pu l'égaliser » (voir note de bas de page 13).

²⁶ « The current 'volunteerism' model is an enormous burden at all levels. » Calcul Canada : Proposition complète au FISM (2011).

neutrons ou des établissements d'accueil. Le conseil d'administration nommerait un directeur général (« directeur ») pour diriger l'organisation.

Le personnel hautement qualifié du directeur assurerait le fonctionnement du programme national, y compris la mise en œuvre de projets de développement et la facilitation de l'accès des utilisateurs aux sources de neutrons au Canada et à l'étranger. Ce programme pourrait inclure l'exploitation directe d'installations nationales (p. ex., un laboratoire de faisceaux de neutrons au réacteur nucléaire McMaster). Neutrons Canada agirait en tant que client payant des sources de neutrons et négocierait les modalités de participation avec chaque source, ce qui pourrait inclure le détachement d'employés dans ces installations pour faciliter l'accès des utilisateurs. L'ICDN représenterait la communauté des utilisateurs, conseillerait le directeur et pourrait jouer un rôle de coordination avec Neutrons Canada quant à la planification stratégique et aux demandes de financement. D'autres comités consultatifs pourraient élargir l'expertise de Neutrons Canada selon les besoins, et pourraient compter des experts de l'industrie, d'autres IRM et de la communauté internationale des neutrons.

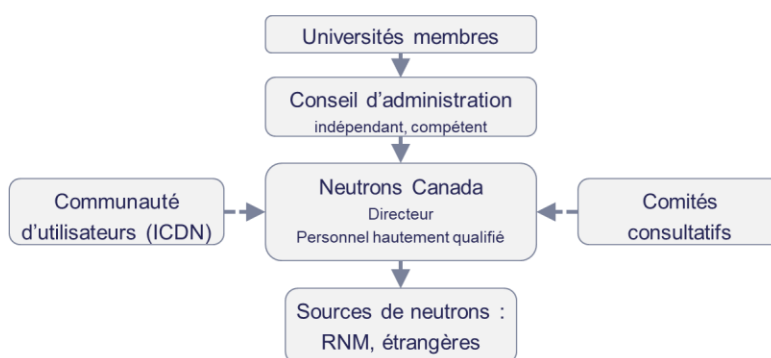


Figure 13. Proposition de structure de gouvernance pour Neutrons Canada.

7.5 Objectif 4 : Questions à débattre

13. *Quels sont les avantages associés au fait d'avoir une organisation nationale, Neutrons Canada, pour remplir des fonctions telles que :*

- a. *Planifier les initiatives majeures en matière de faisceaux de neutrons, et les guider à travers les processus décisionnels et les mettre en œuvre?*
- b. *Diriger et gérer un programme national d'accès des utilisateurs aux installations de faisceaux de neutrons, tant au pays qu'à l'étranger?*
- c. *Négocier avec des installations étrangères?*
- d. *Maintenir la continuité de l'expertise nécessaire pour soutenir à la fois le fonctionnement des installations de faisceaux de neutrons et la mise en œuvre de projets d'investissement?*

14. *Quelle est la valeur éventuelle d'initiatives centralisées visant à mobiliser l'industrie pour i) mettre en application les faisceaux de neutrons, ii) fournir des services pour créer des installations de faisceaux de neutrons, et iii) mettre au point des technologies dérivées*

15. *Quels pourraient être les avantages d'un programme de faisceaux de neutrons pour la vulgarisation scientifique auprès des jeunes et du grand public?*

8 Équité, diversité et inclusion

La politique scientifique fédérale vise à accroître l'équité, la diversité et l'inclusion (EDI) dans la recherche au Canada, afin de faire progresser les connaissances et l'innovation pour répondre aux défis locaux, nationaux et même mondiaux. De nombreux domaines scientifiques au Canada ne reflètent pas la composition de la population générale, et la communauté de recherche sur les matériaux ne fait pas exception. En 2017, le CCFN a mené une analyse auprès de 105 professeurs canadiens connus pour avoir utilisé des faisceaux de neutrons au cours des dernières années, que ce soit au Canada ou à l'étranger; les résultats ont révélé que ce groupe était composé à 11 % de femmes et à 14 % de membres de minorités visibles. Parmi les professeurs canadiens ayant répondu à un sondage réalisé en 2020 auprès d'utilisateurs de faisceaux de neutrons, 20 % des répondants ont indiqué être une femme et 19 %, un membre d'une minorité visible; aucun répondant n'a déclaré être autochtone ou handicapé²⁷. La population d'étudiants et de stagiaires postdoctoraux qui utilisent les faisceaux de neutrons est beaucoup plus diversifiée. Au cours des cinq dernières années d'activité du CCFN, les étudiants et les stagiaires postdoctoraux qui ont réalisé des expériences étaient composés à 32 % de femmes et à 42 % de membres de minorités visibles.

Le manque d'accès aux faisceaux de neutrons pourrait encore entraver davantage les efforts visant à promouvoir l'EDI au sein de la communauté de recherche sur les matériaux. Les écrits sur l'EDI ont souvent évoqué les difficultés liées à un déménagement pour poursuivre une carrière scientifique comme un obstacle à l'égalité des genres²⁸. Les femmes sont plus susceptibles que les hommes d'être confrontées aux dilemmes de sacrifier leurs obligations ou intérêts familiaux en déménageant, ou de sacrifier leur avancement professionnel en ne déménageant pas. Les hommes sont plus susceptibles que les femmes de déménager dans un autre pays pour avoir accès à une source de neutrons ou à une autre installation de recherche majeure, si c'est essentiel à l'avancement de leur carrière. Les femmes seront plus susceptibles que les hommes de réorienter leurs intérêts de recherche pour éviter un tel déménagement, même si les nouvelles pistes de recherche peuvent être moins prometteuses. Les femmes ont souvent de plus grandes responsabilités familiales, ce qui rend également difficile le fait de voyager pour aller à une source de neutrons, même pour de courtes périodes, afin de mener des expériences. La pandémie de COVID-19 a amplifié cette disparité, les femmes étant plus nombreuses à s'occuper de la scolarisation des enfants à la maison.

Un programme national qui facilite l'accès des utilisateurs aux installations de faisceaux de neutrons peut offrir divers moyens de corriger ces disparités. Le programme pourrait veiller à ce que les Canadiens travaillant dans le domaine de la recherche sur les matériaux ne soient pas confrontés à l'obligation de déménager à l'étranger avec leur famille pour être concurrentiels. En outre, le programme pourrait créer des possibilités d'expériences à distance ou offrir une aide à la garde d'enfants, selon les besoins, afin de permettre aux chercheurs de voyager pour mener à bien leurs expériences.

De manière plus générale, un tel programme constituerait également le meilleur moyen de promouvoir l'EDI et de réduire les obstacles systémiques au sein de la communauté. Il pourrait promouvoir un environnement positif dans lequel les valeurs fondamentales de l'EDI sont respectées dans les activités qu'il supervise. Par exemple, un programme national pourrait :

²⁷ Résumé des résultats du sondage ICDN-ICFN 2020. 5 octobre 2020. En ligne à : <https://fedorukcentre.ca/documents/resources/cni/cins-cni-survey-2020-report.pdf>

²⁸ Par exemple : Louise Ackers. (2004) « Managing relationships in peripatetic careers: Scientific mobility in the European Union. Women's Studies International Forum. » 27(3) : 189-201

- 1) Veiller à ce que tout processus concurrentiel d'examen par les pairs visant l'attribution de temps de faisceau dans les installations nationales ou de temps de faisceau « canadien » dans des installations étrangères soit exécuté conformément aux meilleures pratiques en matière d'EDI;
- 2) Organiser des programmes de formation nationaux (p. ex., cours d'été sur les sources de neutrons) et offrir d'autres possibilités (p. ex., bourses d'études, bourses de recherche, embauche) pour garantir un accès équitable à toute la communauté canadienne;
- 3) Faire en sorte que les chercheurs en début de carrière fassent partie des équipes de développement des infrastructures neutroniques majeures et qu'ils soient intégrés de manière efficace pour renforcer leurs compétences en matière de leadership tout au long du projet;
- 4) Veiller à ce que ces projets se fassent dans le cadre d'une culture d'appartenance pour tous, créée par un environnement de collaboration, de soutien et de respect.

Cependant, on ne peut pas s'attendre à ce que les installations neutroniques étrangères favorisent (à elles seules) les objectifs canadiens en matière d'EDI. Par exemple, les défis particuliers que représente l'inclusion des Canadiens autochtones pourraient ne pas se traduire par des actions sans un leadership canadien. Bien que d'autres pays partagent certains de nos objectifs en matière d'EDI, comme l'élimination des obstacles liés au genre dans le domaine scientifique, leurs méthodes ne reflètent pas nécessairement les pratiques canadiennes.

Grâce à la promotion de l'EDI dans le domaine scientifique, la communauté canadienne des utilisateurs de faisceaux de neutrons sera plus diversifiée et plus inclusive en matière de genre, de stade de carrière, de culture, de discipline et de nombreux autres attributs, ce qui conduira à des idées et à des résultats plus novateurs qui enrichiront le monde entier.

8.1 EDI — Questions à débattre

16. *Quel rôle une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons peut-elle jouer dans la promotion de l'équité, de la diversité et de l'inclusion, sachant que des groupes tels que les femmes, les minorités raciales et ethniques, les communautés autochtones et les personnes handicapées sont actuellement sous-représentés dans la communauté des faisceaux de neutrons?*
17. *Quel rôle une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons peut-elle jouer pour favoriser l'expertise parmi les utilisateurs atypiques, tels que les chercheurs d'établissements moins actifs en recherche, notamment les universités, collèges et écoles polytechniques de petite taille ou situées dans des régions rurales ou nordiques? Comment veiller à la prise en compte des besoins de ces utilisateurs?*
18. *Comment le Canada peut-il garantir l'équité, la diversité et l'inclusion au sein de la communauté des utilisateurs de faisceaux de neutrons s'il doit se fier à un accès à des installations étrangères?*
19. *Au moment où la construction d'une nouvelle infrastructure de faisceaux de neutrons ira de l'avant au Canada, comment mobiliser les communautés locales et autochtones pour garantir un partenariat constructif?*

9 Modèle financier d'un programme national

La présente section traite d'un modèle financier adapté à un programme national complet qui comprend toutes les activités stratégiques abordées dans les sections précédentes. Le modèle financier se concentre sur les sept premières années de fonctionnement du programme.

Le coût de fonctionnement d'un tel programme est évalué à environ 20 à 25 millions de dollars par an. À titre comparatif, les dépenses annuelles d'environ 500 millions d'euros engagées par l'Europe pour ses neuf installations de neutrons utilisées par quelque 5 000 chercheurs correspondent à environ 50 millions de dollars par an pour le Canada. Si le coût annualisé d'un investissement majeur dans une nouvelle source nationale de neutrons était ajouté au programme canadien, le coût pourrait s'approcher de cette « échelle européenne » d'investissement. Les 20 à 25 millions de dollars par an prévus pour le programme sont bien inférieurs aux 100 millions de dollars par an ou plus que le Canada avait investis dans le réacteur NRU, exploité non seulement pour les faisceaux de neutrons, mais aussi pour la production d'isotopes et l'irradiation de combustibles et de matériaux pour l'énergie nucléaire.

Par ailleurs, les laboratoires de recherche des universités canadiennes qui ont accès à des faisceaux de neutrons — que ce soit fréquemment ou à l'occasion — représentent des investissements d'environ 90 millions de dollars par an, toutes sources confondues. Il est important de continuer à fournir aux chercheurs un accès aux faisceaux de neutrons afin d'assurer le rendement maximal de ces autres investissements.

9.1 Modèle de coûts

L'ampleur du programme proposé repose sur le nombre d'utilisateurs et la demande de temps de faisceau de neutrons au cours des 15 années précédant la fermeture du CCFN et de la décennie où le Canada disposait d'un accord avec la SNS. Le temps de faisceau total utilisé par les chercheurs canadiens a été par le passé d'environ 1 300 à 1 400 jours de faisceaux CCFN-équivalent par an. L'unité de mesure « jours de faisceaux CCFN-équivalent » reflète les ajustements pour une luminosité plus ou moins élevée ailleurs (p. ex., on pourrait considérer qu'un jour de faisceaux à la SNS équivaut à trois jours de faisceaux au CCFN).

Le modèle de coûts suivant présume que les activités stratégiques présentées dans ce document de discussion seront mises en œuvre dans les prochaines années. Ce scénario présume aussi des éléments suivants :

1. Contribution suffisante aux partenariats étrangers pour répondre à la totalité de la demande canadienne d'accès aux neutrons à court terme (objectif 1);
2. Atteinte de la pleine exploitation du réacteur nucléaire McMaster d'ici la fin de la septième année de fonctionnement (objectif 2);
3. Recherche, développement et démonstration de technologies pour une nouvelle source de neutrons (objectif 3);
4. Gestion par une nouvelle entité, Neutrons Canada, du programme national et prise en charge par cette entité de toutes les fonctions potentielles décrites à la section 7.4 (objectif 4).

Les coûts du programme sont basés sur les coûts connus des activités suivantes : 1) exploitation d'un laboratoire national de faisceaux de neutrons (c'est-à-dire le CCFN); 2) exploitation du réacteur nucléaire McMaster; 3) temps de faisceau dans des installations étrangères; et 4) projets récents de développement d'une infrastructure de faisceaux de neutrons. La ventilation des coûts entre les activités et au fil du temps est présentée ici (Figure 14) comme un scénario probable à titre d'illustration, car ces détails sont tributaires des nouveaux besoins des utilisateurs canadiens de

PROJET DE CONSULTATION

faisceaux de neutrons et des négociations avec les sources de neutrons. Les coûts représentent l'ensemble des coûts des activités, à l'exception de certains coûts qui doivent être couverts par les hôtes du programme (p. ex., la construction de bâtiments).

Le coût total des sept premières années de fonctionnement de ce scénario s'élève en moyenne à 20 millions de dollars par an, en plus d'un projet d'investissement de 25 millions de dollars pour achever le laboratoire de faisceaux de neutrons du réacteur nucléaire McMaster.

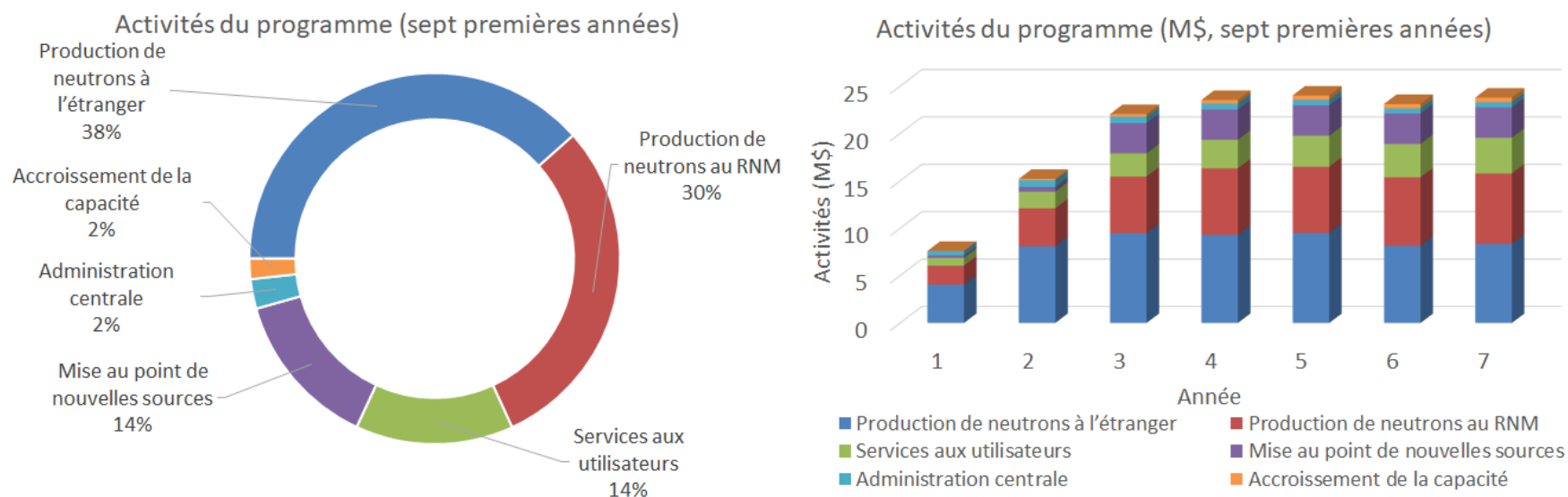


Figure 14. Ventilation à titre d'illustration des sept premières années de fonctionnement d'un programme national canadien à grande échelle de recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons, avec une répartition des coûts selon diverses fonctions. Les « activités » excluent un projet d'investissement de 25 millions de dollars pour achever le laboratoire de faisceaux de neutrons du réacteur nucléaire McMaster. Légende : Production de neutrons à l'étranger = versement de fonds à des partenaires étrangers; production de neutrons au RNM = versement de fonds au RNM en tant que source de neutrons; services aux utilisateurs = fonctionnement des instruments de faisceaux de neutrons aux installations de sources de neutrons (y compris le personnel), ainsi que les déplacements et un système d'attribution du temps de faisceau; mise au point de nouvelles sources = recherche, développement et démonstration de la technologie pour une nouvelle source de neutrons; renforcement des capacités = sensibilisation et formation pour favoriser la capacité à utiliser les faisceaux de neutrons; et administration centrale = gouvernance, gestion et services partagés.

9.2 Modèle de financement

Il serait préférable que le programme national complet soit financé et géré comme une unité, à l'instar d'autres programmes basés sur les IRM. Cependant, le coût de 20 à 25 millions de dollars par an dépasse ce que peuvent fournir les concours de financement scientifique existants, bien que des efforts soient en cours pour que certains éléments du programme puissent être obtenus par l'entremise de tels concours. En l'absence de cadre global de financement des IRM, le financement du programme doit se faire de manière ponctuelle pour l'instant et être envisagé de façon particulière par le gouvernement du Canada. L'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons (ICFN) a recommandé que le gouvernement du Canada engage 124 millions de dollars pour les sept premières années de fonctionnement du programme, avec des périodes de financement renouvelables de cinq ans. Un engagement pour les sept premières années permettra de planifier et de mettre en œuvre de manière ordonnée des activités qui nécessitent un délai d'exécution important, comme la mise à niveau de la capacité du réacteur nucléaire McMaster²⁹.

La FCI est en voie de devenir le principal bailleur de fonds des installations de recherche universitaires partagées. Par conséquent, l'ICFN a avancé que la FCI est l'entité la mieux placée pour agir en tant que bailleur de fonds et superviseur du programme, du moins jusqu'à ce qu'un nouveau cadre pour les IRM — tel que celui proposé par l'Examen du soutien fédéral à la science fondamentale — soit créé. La proposition d'un mandat quinquennal renouvelable est conforme au Fonds des initiatives scientifiques majeures de la FCI.

Dès sa mise en œuvre, le nouveau cadre devrait prévoir un mécanisme de partage des coûts avec les provinces; toutefois, le soutien à la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons relève de la compétence fédérale. Il est essentiel que le gouvernement fédéral continue à jouer un rôle de premier plan en matière de financement, en particulier pour les activités du programme à vocation internationale. Pour les composantes du programme au Canada, une contribution de 60 % de la FCI est conforme à la recommandation de l'Examen du soutien fédéral à la science fondamentale en matière d'IRM³⁰. Pour les partenariats avec des installations étrangères, le gouvernement fédéral pourrait devoir fournir la quasi-totalité (sinon la totalité) de la contribution canadienne. Les recettes de l'industrie provenant des travaux rémunérés à l'acte pourraient atteindre 2 à 3 % quand le programme arrivera à maturité et devraient être réinvesties dans l'amélioration des capacités et des services offerts à l'industrie et aux autres utilisateurs.

²⁹ Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons. Soumission pour les consultations prébudgétaires en prévision du budget de 2019. Août 2018. http://cins.ca/docs/FINA_2018.pdf

³⁰ Examen du soutien fédéral à la science fondamentale. « Investir dans l'avenir du Canada : Consolider les bases de la recherche au pays. » 10 avril 2017. <http://www.sciencereview.ca/eic/site/059.nsf/eng/home>

10 Conclusion : Feuille de route pour rétablir l'accès aux faisceaux de neutrons

Les défis que doit relever le Canada pour protéger la santé et la sécurité de nos communautés, garantir un environnement propre et durable et offrir des emplois valorisants et de qualité requièrent une boîte à outils scientifique avancée et exhaustive — y compris les faisceaux de neutrons — afin de mettre au point les matériaux qui sous-tendent les solutions technologiques.

Une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons constituera une feuille de route pour que le Canada mette en place l'infrastructure et le cadre nécessaires qui permettront aux Canadiens d'utiliser les faisceaux de neutrons pour relever ces défis. **Plus précisément, le Canada doit 1) rétablir immédiatement l'accès aux faisceaux de neutrons pour ses chercheurs grâce à des partenariats étrangers avec des sources de neutrons à haute luminosité dans d'autres pays. Le Canada doit 2) achever le laboratoire de faisceaux de neutrons du réacteur nucléaire McMaster afin de fournir une certaine capacité nationale à moyen terme. Le Canada doit 3) explorer des options à long terme pour de nouvelles sources de neutrons. Enfin, le Canada doit 4) créer un cadre d'excellence pour la gouvernance et la gestion des activités susmentionnées afin de garantir une gestion responsable et un rendement optimal des investissements publics majeurs requis.**

Grâce à l'atteinte de ces objectifs, lorsque les milliers de scientifiques et d'ingénieurs canadiens qui mènent des recherches sur les matériaux se pencheront sur des questions dont la résolution exige des faisceaux de neutrons, ils pourront se tourner vers ces outils polyvalents et irremplaçables pour obtenir des réponses.

Grâce à une boîte à outils scientifique complète, les Canadiens pourront accélérer le rythme de l'innovation et relever les défis sociaux, environnementaux et économiques du pays. De nouvelles connaissances sur les liens entre la structure et les propriétés d'un matériau et ses méthodes de fabrication favoriseront le progrès technologique qui donnera lieu à des innovations dans divers domaines, comme la fabrication avancée de véhicules propres et écoénergétiques, la production sûre et fiable d'énergie propre grâce à des matériaux haute performance dans les centrales électriques, et la lutte contre les maladies telles que la maladie d'Alzheimer et la COVID-19 grâce à une meilleure compréhension de leurs mécanismes moléculaires. En outre, les Canadiens ouvriront la voie à la découverte de nouveaux matériaux d'une performance nettement supérieure qui auront une influence transformatrice sur de nombreuses technologies. **Toutes ces innovations recèlent la promesse d'une meilleure qualité de vie pour l'ensemble des Canadiens.**

Annexe A : Impact de la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons

Le Canada doit relever le défi de bâtir une économie propre et durable qui offre des emplois valorisants et de qualité et qui assure la sécurité des collectivités. Une telle économie est portée par la recherche et l'innovation.

Nous pouvons innover pour protéger l'environnement et stimuler la croissance. Nous pouvons mettre au point des technologies énergétiques propres pour le réseau électrique. Nous pouvons repousser les limites des matériaux de nos voitures, nos avions et nos navires afin de consommer moins d'énergie. Nous pouvons exploiter des sources d'énergie alternatives pour réduire les coûts de production et diminuer ou éliminer les émissions de gaz à effet de serre. Nous pouvons créer de nouveaux matériaux et de nouvelles nanotechnologies afin de mettre au point la prochaine génération d'appareils électroniques et d'instruments médicaux. Nous pouvons concevoir de nouvelles méthodes de fabrication des matériaux, comme l'impression 3D, pour améliorer la productivité.

Nous pouvons innover pour améliorer la vie au Canada et dans le monde entier, y compris pour les personnes vulnérables. Nous pouvons accroître l'agilité de nos forces armées et réduire leur dépendance au pétrole grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux de blindage légers. Nous pouvons réduire les menaces grâce à des technologies qui contribuent à prévenir la propagation des matières nucléaires.

Notre travail contribuera à cet avenir meilleur, et nous en tirerons satisfaction.

Pour relever ce défi, il est essentiel de disposer d'une base scientifique et technologique solide, notamment d'un ensemble complet d'outils avancés pour la recherche sur les matériaux dont dépendent de nombreux progrès. Après tout, les matériaux forment le monde entier.

Les faisceaux de neutrons sont maintenant des outils scientifiques irremplaçables qui procurent des connaissances sur les matériaux que d'autres techniques de recherche ne permettent pas d'obtenir. Voilà pourquoi Bertram Brockhouse, pionnier canadien de la diffusion des neutrons au service de la recherche sur les matériaux, a reçu le prix Nobel de physique. La valeur continue des faisceaux de neutrons pour la recherche est reconnue par des nations innovantes qui ont déjà engagé **plus de 8 milliards de dollars en dépenses en capital au cours des 20 dernières années** au profit d'installations de faisceaux de neutrons dans le monde entier. Les méthodes de faisceaux de neutrons sont des compléments aux autres outils permettant de sonder les matériaux, comme les faisceaux de lumière, d'électrons et de muons. Ces derniers sont tous disponibles dans les installations scientifiques majeures canadiennes, mais ne peuvent pas remplacer les faisceaux de neutrons³¹.

Les spécialistes des matériaux du Canada et du monde entier exploitent les faisceaux de neutrons au profit de retombées dans des domaines prioritaires qui favorisent l'innovation. Les sections suivantes décrivent quelques exemples canadiens; d'autres exemples sont donnés à l'adresse : cins.ca/discover.

³¹ Par exemple, le Centre canadien de rayonnement synchrotron, TRIUMF, Institut Brockhouse de recherche sur les matériaux et CanmetMATERIALS.

A1. Environnement propre

Au Canada, environ 85 % des émissions de gaz à effet de serre proviennent de la production d'énergie et d'activités connexes³². La recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons permet une production d'électricité de base plus fiable et sans émissions. En voici quelques exemples :

- Comme l'énergie nucléaire produit 15 % de l'électricité au Canada, il est essentiel d'innover pour maintenir la sécurité et la fiabilité de cette source de base sans émissions. L'analyse par contrainte neutronique a été utilisée pour examiner des problèmes de fissuration dans des composants clés de la centrale nucléaire de Point Lepreau, à l'origine des arrêts de 1997 et 2001, qui ont entraîné des pertes de plus de 50 millions de dollars. Les résultats ont permis d'assurer à l'organisme de réglementation que la centrale pouvait être remise en service, évitant ainsi de nouvelles pertes. Des recherches ultérieures au moyen de faisceaux de neutrons ont permis au parc de réacteurs du Canada de réduire les temps d'arrêt associés à des problèmes de fissuration pendant les vingt années qui ont suivi. Ces recherches ont permis d'éviter des pertes de production d'électricité de plusieurs centaines de millions de dollars, un chiffre qui dépasse tous les investissements directs du Canada dans les capacités de faisceaux de neutrons depuis les années 1940 (<http://bit.ly/34su3Gx>). La recherche au moyen de faisceaux de neutrons continue d'apporter de précieuses contributions à l'exploitation sûre, fiable et économique des centrales nucléaires canadiennes en déterminant l'aptitude fonctionnelle des composants critiques des réacteurs. La fiabilité de cette source d'énergie propre a aidé l'Ontario à remplacer l'électricité de base produite par les centrales au charbon, éliminant ainsi les « jours de smog » à Toronto depuis 2014;
- Hydro-Québec a utilisé des données d'analyse par contrainte neutronique, issues de la recherche, pour améliorer la fiabilité des roues de turbine, des composants importants des barrages hydroélectriques. Les roues de turbine peuvent coûter jusqu'à 10 millions de dollars chacune et, si l'une d'entre elles fait défaut, les pertes en matière de production d'électricité peuvent être très coûteuses. Hydro-Québec a utilisé les résultats d'analyse par contrainte neutronique pour montrer que l'optimisation des procédés de fabrication comme le soudage et le traitement thermique peut améliorer la durée de vie des turbines, souvent sans augmentation du coût de fabrication (<http://cins.ca/2015/07/01/hydro/>).



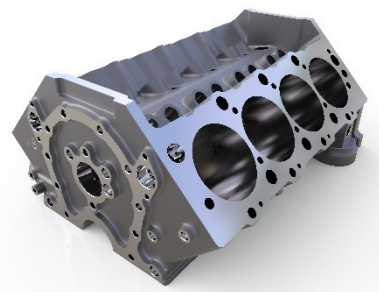
Les faisceaux de neutrons ont permis d'expliquer et de prévenir les temps d'arrêt causés par des fuites dans le parc de réacteurs nucléaires du Canada.

A2. Compétitivité économique et croissance propre

La recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons favorise l'innovation dans la fabrication avancée de voitures, d'avions et de navires légers et écoénergétiques, car elle permet de comprendre les effets des processus de fabrication sur les matériaux et ainsi de fabriquer des moteurs plus efficaces, de réduire les déchets et les coûts de production, et d'accroître la durée de vie des pièces indispensables. Les faisceaux de neutrons apportent de nouvelles connaissances sur les alliages métalliques aux chercheurs qui tentent de trouver comment fabriquer des pièces automobiles fiables et

³² CAIT Climate Data Explorer. 2015. Washington, DC: World Resources Institute. Accès par Environnement Canada. Science des changements climatiques. Annexe 2. 23 novembre 2015. http://www.ec.gc.ca/sc-cs/Default.asp?lang=En&n=A5F83C26-1#_s09.

légères afin d'améliorer la consommation d'essence. Ils produisent des données utiles à la création de nouveaux matériaux pour les batteries, les piles à combustible et les technologies de stockage de l'hydrogène. La légèreté et le stockage de l'énergie constituent des facteurs essentiels au fonctionnement des voitures à l'électricité, à l'hydrogène ou à d'autres carburants propres. Les faisceaux de neutrons servent aussi à évaluer l'impression 3D et les nanotechnologies pour la fabrication avancée, en vue de trouver de nouveaux matériaux et méthodes pour produire les ordinateurs, les appareils électroniques et les instruments médicaux de prochaine génération. En voici quelques exemples :



Les faisceaux de neutrons ont permis de garantir la fiabilité de pièces de moteur automobile fabriquées à l'aide de méthodes novatrices.

- Nemak Canada a évalué l'efficacité de procédés de traitement thermique à moindre coefficient de ressources sur des blocs moteurs en alliage d'aluminium afin de s'assurer que ces procédés ne compromettent pas la fiabilité. Grâce à ces résultats, l'usine Nemak de Windsor (Ontario) réalise des économies de 2 à 3 millions de dollars par an;
- Les chefs de file canadiens de l'aérospatiale, Bombardier et StandardAero, ont acquis les connaissances nécessaires pour réduire les déchets et perfectionner les méthodes de fabrication et de réparation des moteurs (<http://cins.ca/tag/aero+impact/>), tandis que Rolls-Royce a récemment breveté un nouvel alliage destiné aux moteurs à réaction à haut rendement (<http://cins.ca/2017/01/10/aero-3/>);
- En 2014, Ivaco Rolling Mills a investi 80 millions de dollars pour agrandir son usine de l'Est ontarien. L'entreprise a attribué une partie de son récent succès à l'analyse par contrainte neutronique qui lui a permis d'améliorer ses produits d'acier en tiges (<http://cins.ca/2013/09/01/metal/>).

A3. Sûreté et sécurité

La recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons améliore la sécurité des pipelines et des rails, et aide à déterminer l'aptitude fonctionnelle des navires militaires, en examinant les contraintes à l'intérieur des voies ferrées, des conduites ou des coques de navire qui peuvent entraîner des défaillances catastrophiques. Les méthodes neutroniques ont permis des avancées dans la fabrication de navires militaires légers pour nos alliés, et ont contribué à prolonger la durée de vie de la flotte actuelle du Canada. En voici quelques exemples :

- Grâce à l'analyse par contrainte neutronique, l'industrie canadienne des pipelines a amélioré ses pratiques pour garantir des niveaux de contrainte acceptables, éviter la fissuration et prédire la durée de vie des pipelines (<http://cins.ca/2017/09/27/pipeline/>);
- L'examen des voies ferrées après le déraillement d'un train en 2005 qui a entraîné le déversement de plus de 800 000 litres de pétrole dans le lac Wabamun en Alberta a permis de recueillir des données qui ont servi à la mise à jour en 2011 du « Règlement concernant la sécurité de la voie » de Transports Canada sur la fréquence minimale des essais ferroviaires aux ultrasons (<http://cins.ca/2014/07/01/rail/>);



Les faisceaux de neutrons ont permis d'expliquer des problèmes de fissuration dans les pipelines vieillissants du Canada et d'établir des normes de fiabilité pour l'industrie.

- Recherche et développement pour la défense Canada (RDDC) a qualifié une nouvelle méthode d'assemblage des métaux pour la réparation des navires militaires canadiens. Les alliés du Canada perfectionnent actuellement cette méthode pour l'assemblage de composants en aluminium dans la construction de navires légers à grande vitesse (<http://cins.ca/2013/03/01/defence-5/>). RDDC a également acquis des connaissances pour prolonger en toute sécurité la durée de vie des navires canadiens, ce qui permet de préserver des ressources pour d'autres besoins de sécurité. Le RDDC a également mis à profit ces résultats pour établir des relations de travail étroites avec les alliés du Canada dans le cadre de projets de gestion de la corrosion et d'autres problèmes de vieillissement communs à de nombreuses marines occidentales (<http://cins.ca/2014/11/01/defence/>; <http://cins.ca/2014/05/01/defence-2/>).

A4. Santé et sécurité alimentaire

Les faisceaux de neutrons se révèlent des outils puissants et irremplaçables pour examiner les matériaux mous des êtres vivants, y compris les biomolécules comme le cholestérol et la vitamine E, ainsi que des molécules qui jouent un rôle, entre autres, dans le traitement du cancer, la maladie d'Alzheimer, le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) et l'antibiorésistance. La recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons contribue à la conception de meilleurs instruments médicaux et traitements de maladies, ainsi qu'à la mise au point de cultures résistantes pour la sécurité alimentaire mondiale. En voici quelques exemples :

- Econous Systems Inc. utilise une nouvelle technologie de revêtement destinée aux instruments médicaux afin de concevoir des tests médicaux pour la détection précoce du cancer des ovaires qui est essentielle pour survivre à cette maladie (<http://cins.ca/2016/10/26/bio-4/>);
- Les spécialistes des sciences de la vie appliquent des connaissances issues de tests au moyen de faisceaux de neutrons à des essais précliniques de traitements anticancéreux basés sur des nanoparticules anticancéreuses (<http://cins.ca/2017/10/26/cancer/>);
- L'Institut mondial pour la sécurité alimentaire de l'Université de la Saskatchewan a récemment conçu une méthode d'imagerie neutronique pour accélérer la mise au point de cultures, notamment en faisant correspondre la variation génétique à des traits observables qui améliorent la résistance à la sécheresse (<http://cins.ca/2017/05/04/agriculture/>).



L'Université de la Saskatchewan exploite les faisceaux de neutrons pour favoriser la sécurité alimentaire mondiale.

A5. Recherche fondamentale et réputation scientifique

Les faisceaux de neutrons constituent un élément irremplaçable de notre boîte à outils scientifique avancée et exhaustive, non seulement pour les domaines prioritaires susmentionnés, mais aussi pour jeter les bases de futures percées en étudiant de nouveaux matériaux et des nanotechnologies. L'accès aux faisceaux de neutrons a permis aux Canadiens de contribuer à la recherche sur les matériaux quantiques — ce qui a mené à un prix Nobel en 2016 — et de produire des résultats de recherche compétitifs (comme le décrivent les sections 3.1 et l'annexe B). Les mystères qui subsistent dans le domaine des matériaux quantiques constituent un terrain fertile pour d'autres découvertes qui pourraient être récompensées par un prix Nobel, car la poursuite des recherches permettra de jeter les bases scientifiques essentielles pour déterminer si les propriétés remarquables des matériaux quantiques constituent le fondement technologique de générations futures de technologies de l'information et d'appareils connexes plus rapides et plus puissants — des innovations éventuellement

basées entre autres sur l'électronique supraconductrice, la spintronique et l'informatique quantique. Ces avantages technologiques surviennent souvent dix ans ou plus après la recherche fondamentale. Par exemple, la recherche sur les matériaux quantiques multiferroïques réalisée au cours des quinze dernières années au CCFN et ailleurs, au moyen de la spectroscopie neutronique, a mené à la création de prototypes qui font l'objet d'études avec Intel pour mettre au point une prochaine génération de processeurs informatiques et de puces de mémoire (doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b05152).

A6. Formation de personnel hautement qualifié

Bien que tous ces projets de science fondamentale ne se traduisent pas en percées, il a été démontré que la réalisation de recherches sur les matériaux dans les grandes installations de faisceaux de neutrons a un impact profond sur le niveau de scolarisation des étudiants et sur la poursuite de leur carrière dans des secteurs qui ont besoin de leurs compétences pour innover. De 1984 à 2018, plus de 1 000 stagiaires hautement qualifiés ont reçu une formation pratique sur les techniques de faisceaux de neutrons au CCFN. Une étude récente³³ a identifié 300 de ces anciens et a révélé que parmi les étudiants de premier cycle, 60 % ont obtenu un diplôme d'études supérieures — un doctorat chez les deux tiers d'entre eux. Parmi les étudiants de maîtrise, plus de la moitié ont ensuite obtenu un doctorat, ce qui est bien supérieur aux normes canadiennes (Figure 15). Lors des entretiens, ces anciens du CCFN ont déclaré que leur expérience en matière de faisceaux de neutrons avait contribué à leur réussite universitaire et professionnelle.

Voici les thèmes communs formulés par les anciens du CCFN lors de l'entrevue sur l'impact du CCFN sur leur carrière :

- Comme ils ont été tenus de réaliser des expériences dans un temps limité, ils ont appris à faire preuve de discipline dans leurs recherches, et ont acquis un souci du détail et de la planification;
- En travaillant avec des chercheurs œuvrant dans l'industrie, ils ont appris à apprécier les sciences appliquées et ont été attirés par des carrières dans l'industrie;
- Comme ils ont été exposés à une culture de la sûreté et de la sécurité, ils sont mieux préparés à la culture que l'on retrouve dans les industries qu'ils ont choisies;
- Ils ont apprécié la possibilité d'apprendre directement de chercheurs hautement qualifiés, respectueux et disposés à aider les étudiants tout au long de leurs stages;
- Ils ont apprécié la possibilité d'utiliser des outils et des techniques de pointe en recherche sur les matériaux, qui n'étaient disponibles qu'au CCFN;
- Ils ont apprécié le fait d'apprendre à travailler dans le contexte d'un laboratoire national sophistiqué, ce qui les a préparés à travailler dans des milieux industriels complexes.



Préparer les étudiants à une carrière en haute technologie

Les étudiantes diplômées en génie Stephanie Stafford et Paula Mosbrucker se préparent à utiliser une ligne de faisceaux de neutrons. Stafford est maintenant ingénieure métallurgiste chez **Evrax (industrie pétrolière et gazière)**. Mosbrucker est maintenant cheffe de groupe technique chez **Kinectrics (industrie de l'énergie nucléaire)**.

³³ Strategic Policy Economics. « Study of the CNBC performance and impacts. » Février 2019.

Diplôme le plus élevé obtenu par les étudiants au baccalauréat et à la maîtrise après un stage au CCFN

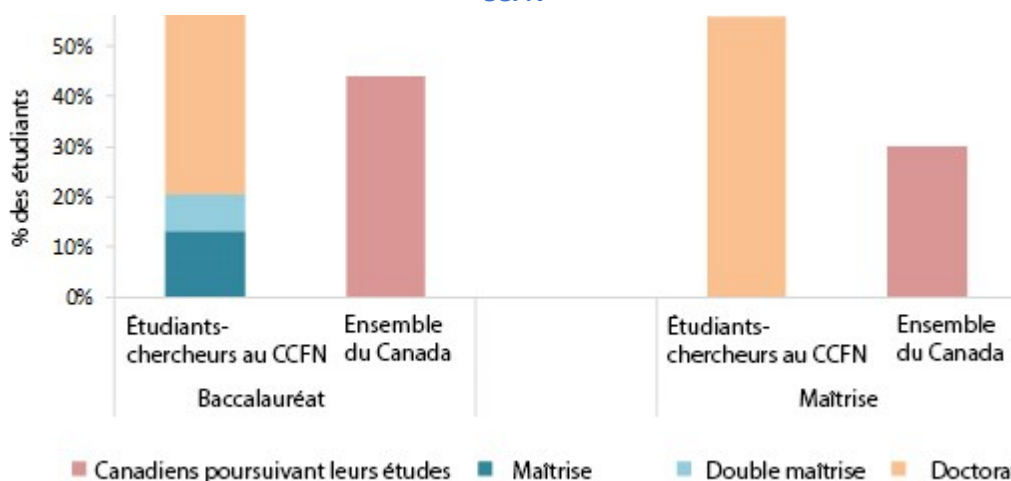


Figure 15. Les diplômes les plus élevés obtenus par les étudiants au baccalauréat ou à la maîtrise au moment de leur stage pratique au CCFN, par rapport à l'ensemble des étudiants canadiens qui ont déclaré leur intention de poursuivre leurs études, peu importe le type, lors d'un sondage à la fin de leurs études.

L'étude a aussi révélé que ces anciens du CCFN travaillent dans des domaines où le Canada a le plus besoin de leurs compétences : près de 80 % d'entre eux travaillent maintenant dans trois secteurs clés de la R. et D. qui contribuent le plus à l'innovation canadienne : fabrication, enseignement supérieur, et services scientifiques et techniques. Environ 13 % d'entre eux travaillent dans l'administration publique ou dans les services financiers et commerciaux.

La plupart des professeurs-chercheurs canadiens qui utilisent les faisceaux de neutrons pour étudier les matériaux se fient à l'expertise du personnel de l'installation de faisceaux de neutrons (p. ex., à l'ancien CCFN). Par exemple, la plupart des professeurs-chercheurs qui utilisent des faisceaux de neutrons sont des spécialistes de problèmes particuliers en génie, en physique, en chimie ou en biologie — et de plusieurs méthodes d'étude des matériaux qui sous-tendent ces problèmes —, mais la plupart n'utilisent pas les faisceaux de neutrons assez souvent pour se familiariser pleinement avec leur application à l'étude des matériaux. Dans presque toutes les expériences universitaires visant à étudier les matériaux dans une installation de faisceaux de neutrons, un ou plusieurs étudiants font progresser leurs compétences en recherche en interagissant avec les membres experts du personnel pour préparer le plan conceptuel et les échantillons, réaliser l'expérience, interpréter les données et publier les résultats.

Les étudiants canadiens ont aussi apprécié le temps qu'ils ont passé dans des installations étrangères de faisceaux de neutrons — lorsqu'ils y ont eu accès. Notamment, entre 2008 et 2018, l'ancien partenariat avec la SNS a mené à la publication d'articles de recherche par 88 étudiants et stagiaires postdoctoraux canadiens. Gage de la qualité de la formation, les doctorants canadiens ont reçu deux des quatre prestigieux « prix de recherche exceptionnelle par un étudiant » décernés par la Neutron Scattering Society of America à ce jour.

Annexe B : Historique des Laboratoires de Chalk River (1947–2018)

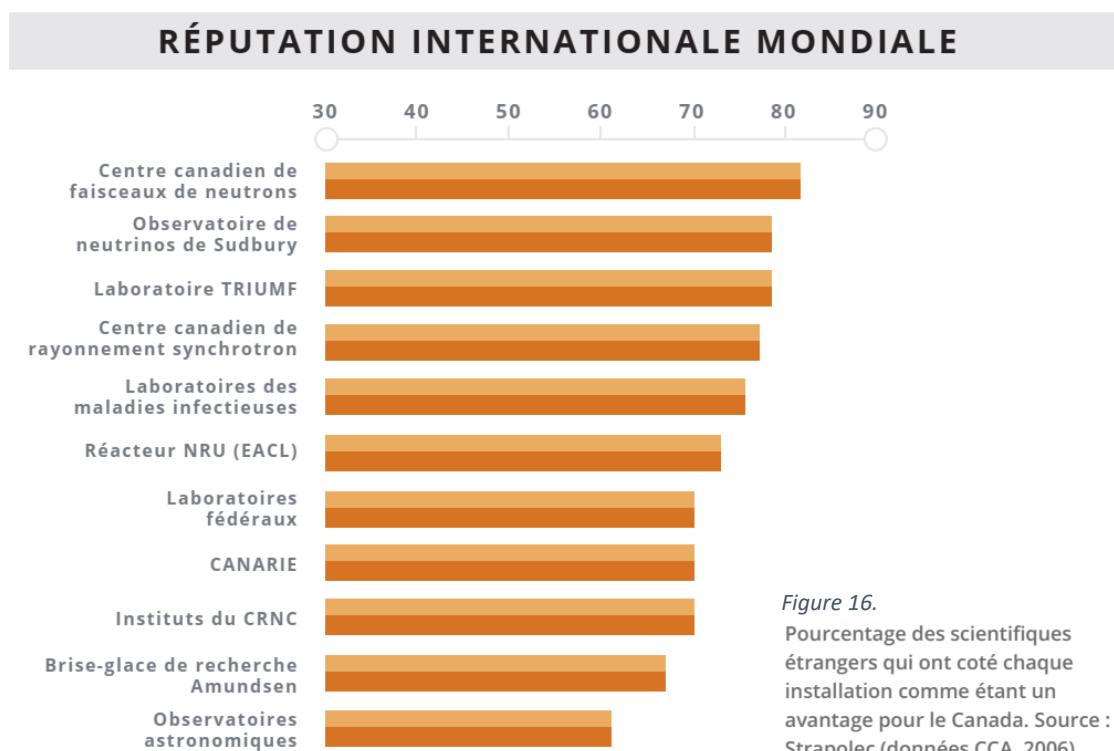
Pendant 70 ans, la solide réputation et la position de chef de file du Canada dans le domaine de la recherche sur les matériaux au moyen de faisceaux de neutrons se sont appuyées sur l'infrastructure et l'expertise des Laboratoires de Chalk River. Ces dernières années, cette réputation a été renforcée par la participation du Canada à la SNS, comme le décrit la section 4.2. Dans la présente section, nous passons brièvement en revue ce contexte historique.

Les premières expériences de diffusion neutronique aux Laboratoires de Chalk River ont commencé à la fin des années 1940 avec le réacteur NRX. Dans les années 1950, le Canada a ensuite construit le réacteur national de recherche universel (NRU) pour soutenir toutes les applications connues, prévisibles et même imprévisibles des neutrons dans les domaines de la science, de la technologie et de l'industrie. Le réacteur polyvalent NRU a fonctionné pendant plus de 60 ans, jusqu'à ce qu'il soit définitivement mis hors service en 2018 en raison de l'augmentation des coûts d'exploitation due à son vieillissement. Il a servi de plateforme scientifique et technologique pour 1) la production d'isotopes médicaux et a ainsi contribué à environ 1 milliard de procédures médicales dans le monde; 2) le développement de l'énergie nucléaire, source de 60 % de l'électricité en Ontario aujourd'hui; et 3) les faisceaux de neutrons. Dans les années 1950 et 1960, Bertram Brockhouse et ses contemporains ont été les premiers à utiliser des faisceaux de neutrons pour la recherche sur les matériaux. En reconnaissance de ce travail, Brockhouse a reçu le prix Nobel de physique en 1994. À cette époque, ses méthodes avaient été reproduites et perfectionnées dans le monde entier.

Le laboratoire de faisceaux de neutrons du réacteur NRU, connu plus tard sous le nom de Centre canadien de faisceaux de neutrons (CCFN), est devenu un centre de recherche international entre les années 1960 et 1980. En particulier, W.J.L. Buyers y a utilisé des faisceaux de neutrons en 1985 pour faire les premières observations du « gap de Haldane », confirmant ainsi les prédictions théoriques de Duncan Haldane sur une nouvelle classe de matériaux quantiques — les matériaux topologiques — pour lesquels Haldane a partagé le prix Nobel de physique en 2016 et Buyers a été nommé Officier de l'Ordre du Canada. Ces travaux d'avant-garde ont ouvert un nouveau domaine de recherche en physique des matériaux qui a été exploré de façon intensive au cours des dix dernières années et a suscité des découvertes qui pourraient un jour révolutionner les ordinateurs et les appareils. Les scientifiques canadiens et leurs collaborateurs ont continué à réaliser des avancées majeures dans ce domaine grâce à leur accès à des installations de faisceaux de neutrons jusqu'en 2018.

Dans les années 1980, des scientifiques canadiens des Laboratoires de Chalk River ont mis au point une méthode neutronique de repérage et de mesure des contraintes à l'intérieur des métaux, dans les régions profondes, afin de déterminer l'aptitude fonctionnelle ou les causes de défaillances. Cette méthode a permis à des Canadiens de participer à l'enquête de la NASA sur les accidents des navettes spatiales Challenger et Columbia et de soutenir l'enquête du Bureau de la sécurité des transports sur le déraillement d'un train qui a entraîné un déversement de pétrole dans le lac Wabamun en Alberta, une catastrophe environnementale (section A3). Les laboratoires de Chalk River offraient aussi des capacités complémentaires en matière de manipulation de matières radioactives, ainsi que des services aux industries nucléaires et non nucléaires qui étaient difficiles à reproduire ailleurs. Jusqu'à sa fermeture en 2018, le CCFN a fait figure de chef de file mondial dans l'utilisation de l'analyse par contrainte neutronique pour améliorer la fiabilité et la rentabilité des composants techniques des centrales nucléaires, des pipelines, des voitures, des navires et des avions — ce qui représente plus de 230 projets financés par l'industrie et un revenu total d'au moins 6 millions de dollars.

Au début des années 1990, le CCFN est officiellement devenu un programme national d'utilisateurs et, en 1997, le Conseil national de recherches en a assumé l'exploitation. À partir de cette période, les



principales installations étrangères de faisceaux de neutrons ont investi davantage que le CCFN (section 4.1), mettant au point de nouvelles capacités pour les sources de neutrons à haute luminosité. Néanmoins, la plupart des lignes de faisceaux du CCFN ont continué à être compétitives pour les applications « lourdes » à forte demande jusqu'à sa fermeture. Parmi ces appareils à haut rendement figuraient un diffractomètre à poudre, un spectromètre à trois axes à faisceau polarisé, un réflectomètre neutronique et un diffractomètre de cartographie des contraintes; ces capacités ont attiré de nombreux collaborateurs et utilisateurs étrangers (section 3.1).

La qualité et la renommée du leadership scientifique canadien dans l'application des faisceaux de neutrons sont démontrées dans une évaluation du Conseil des académies canadiennes (CAC) qui a interrogé d'éminents scientifiques internationaux. Ces scientifiques ont estimé que le CCFN était l'installation qui offrait le plus d'avantages au Canada, par rapport à tous les autres laboratoires nationaux du pays (Figure 16)³⁴. En outre, une étude bibliométrique³⁵ a révélé que les articles issus du CCFN publiés entre 2000 et 2017 affichaient un taux de citation supérieur de 40 % à la moyenne mondiale et représentaient un taux de citation supérieur de 70 % par rapport à la part moyenne mondiale des 10 % d'articles les plus cités du monde. Ce niveau d'impact scientifique s'est révélé très compétitif par rapport à d'autres installations canadiennes de recherche sur les matériaux et aux installations étrangères de faisceaux de neutrons (figure 17). Voici quelques-unes des principales constatations d'une autre étude sur l'impact du CCFN³⁶ :

³⁴ Les résultats du sondage du CAC ont été analysés dans : Strapolec. « Study of CNBC Performance and Impacts » (février 2019). En ligne à : <http://cins.ca/resources/cnbc/>

³⁵ Science-Metrix. « Étude bibliométrique des publications scientifiques du CCFN, 1980–2017 » (septembre 2018). En ligne à : <http://cins.ca/resources/cnbc/>

³⁶ Strapolec. « Study of CNBC Performance and Impacts » (février 2019). En ligne à : <http://cins.ca/resources/cnbc/>

Le CCFN a été un outil de recherche essentiel pour l'assise manufacturière du Canada. Le CCFN a favorisé des domaines de recherche sur les matériaux qui sous-tendent les progrès de la fabrication, notamment : amélioration de l'intégrité des conduites en acier pour l'industrie pétrolière et gazière, amélioration des alliages pour les secteurs automobile et aérospatial, et amélioration des matériaux pour l'administration des médicaments.

Le CCFN a été un pôle d'attraction pour la recherche et la collaboration axées sur l'industrie. Les chercheurs qui ont utilisé le CCFN ont attiré une grande proportion des fonds de recherche en collaboration avec l'industrie provenant d'un vaste éventail de secteurs d'investissement en recherche et développement du Canada. Le CCFN s'est distingué comme établissement de recherche fortement axé sur l'industrie.

Le CCFN a facilité des résultats de recherche très importants. Les résultats de recherche issus du CCFN dans des domaines clés de la recherche sur les matériaux, y compris la recherche qui éclaire les technologies énergétiques et biomédicales, ont eu un impact scientifique plus grand que des recherches similaires menées sans le CCFN. Le CCFN a contribué de manière positive au bilan global du Canada en matière de qualité de la recherche.

Le CCFN a été un élément clé de l'économie de l'innovation au Canada. La contribution du CCFN à l'innovation au Canada repose sur quatre observations fondamentales :

- a. Comme le secteur manufacturier repose sur la recherche, le niveau élevé de recherche et développement dans les entreprises commerciales (RDEC) du secteur manufacturier en fait un élément clé et un indicateur d'une économie fortement innovante;
- b. La recherche sur les matériaux est à la base de l'innovation dans le secteur manufacturier, et le CCFN a favorisé la recherche sur les matériaux au Canada;
- c. Les publications du Canada dans le domaine de la recherche sur les matériaux sont reconnues et contribuent positivement à la qualité générale de la recherche au Canada;
- d. La qualité des recherches menées au CCFN est à la hauteur des normes d'excellence mondiales.

En février 2015, le gouvernement du Canada a annoncé que le 31 mars 2018 il arrêterait définitivement le réacteur NRU, alors le réacteur de recherche majeur le plus vieux au monde, pour des raisons indépendantes de la mission liée aux faisceaux de neutrons du réacteur³⁷. Avant cette décision, le gouvernement fédéral avait consacré des ressources considérables à la réduction de la dépendance mondiale envers le réacteur NRU pour son approvisionnement en molybdène 99, l'un des isotopes médicaux les plus couramment utilisés, atténuant ainsi l'impact de sa fermeture. Ressources naturelles Canada a aussi travaillé avec Énergie atomique du Canada limitée (et avec son successeur, les Laboratoires nucléaires canadiens) pour étudier les arguments économiques en faveur de la poursuite des activités, avec des contributions de l'industrie, au profit de la recherche sur l'énergie nucléaire ou de la production d'autres isotopes médicaux et industriels, mais n'a pas été en mesure de justifier les coûts généraux annuels de 160 millions de dollars du réacteur. En outre, en raison de la restructuration d'EACL et du Conseil national de recherches, aucun organisme gouvernemental n'était dorénavant en mesure d'exécuter un programme national d'accès des utilisateurs aux faisceaux de neutrons.

³⁷ L'annonce portait sur les changements apportés au marché des isotopes médicaux et sur l'augmentation des coûts d'exploitation. <http://news.gc.ca/web/article-en.do?nid=929189>; et http://www.cnl.ca/en/home/news-and-publications/bulletins/2015/NRU_decision.aspx. 6 février 2015.

Impact de la recherche du CCFN par rapport à celui d'installations internationales comparables
(MCR et IDC par installation, 2000–2017)

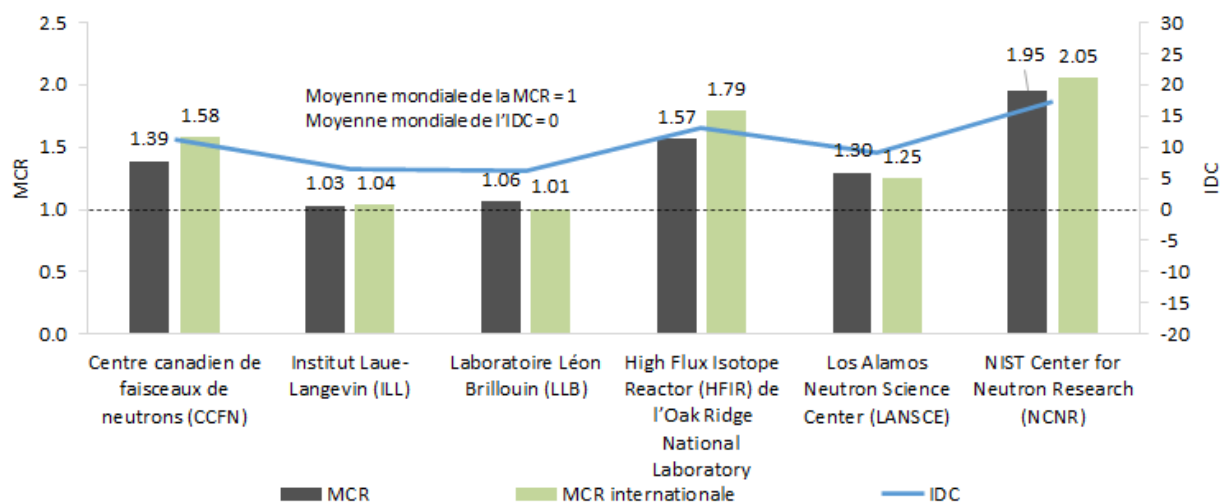


Figure 17. Moyenne de citations relatives (MCR), MCR internationale (pour les articles avec des coauteurs étrangers) et indice de distribution des citations (IDC) pour le CCFN et les établissements américains et européens comparables pour la période 2000-2017. L'IDC est une mesure du degré auquel les articles publiés obtiennent régulièrement des taux de citation élevés et constitue une mesure de rechange au score de la MCR. Source : Science-Metrix 2018, analyse de Strapolec (voir note de bas de page 36).

Annexe C : Analyse des parties prenantes de la Stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons

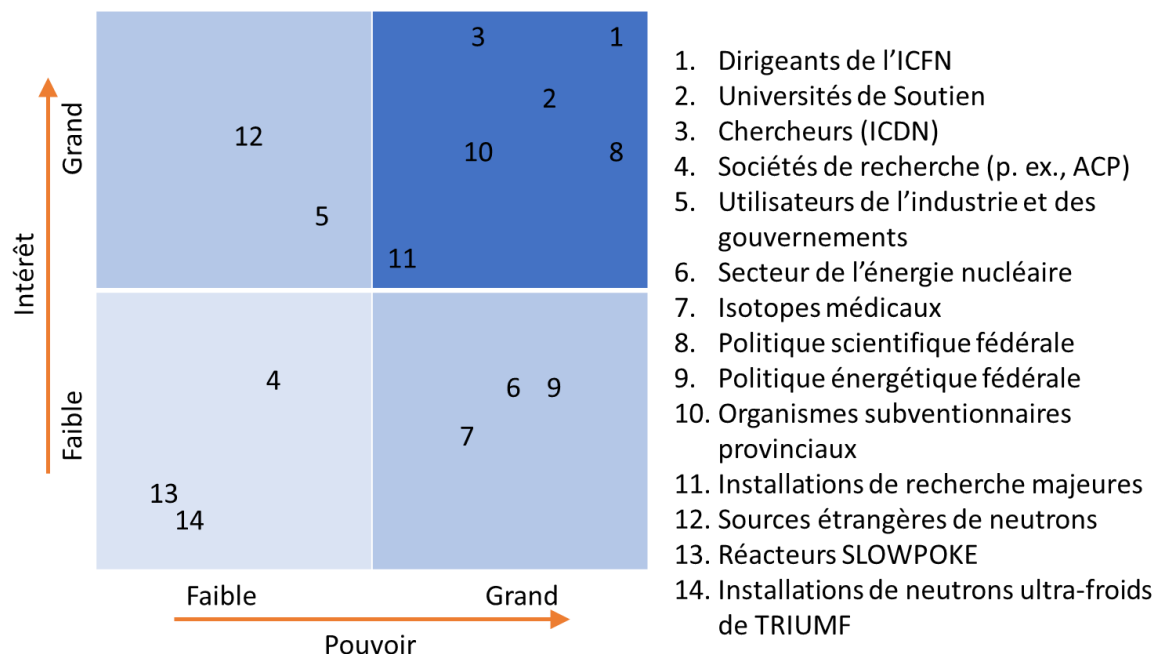


Figure 18. Matrice des parties prenantes illustrant les différents niveaux de pouvoir et d'intérêt relativement à une stratégie nationale sur les faisceaux de neutrons.

Types de parties prenantes	Description
Dirigeants d'activités stratégiques :	
Université de la Saskatchewan	Présidence du groupe de travail de l'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons (ICFN)
Université McMaster	Propriétaire du réacteur nucléaire McMaster; responsable de la proposition « nationale » au FI de la FCI sur les infrastructures de faisceaux de neutrons
Université de Windsor	Responsable d'une étude de faisabilité d'une source de neutrons basée sur un accélérateur compact (CANS)
Utilisateurs principaux de faisceaux de neutrons :	
Universités : 21 « défenseurs » de l'ICFN; Universités Canada et U15 Utilisateurs universitaires : ICDN, ACP, ICC, CIM	Une centaine de chercheurs principaux de trente universités canadiennes utilisent les faisceaux de neutrons pour la recherche sur une période de cinq ans. Les universités des utilisateurs sont représentées par Universités Canada et U15. Les utilisateurs sont représentés par l'Institut canadien de la diffusion des neutrons (ICDN) et par de plus grandes organisations professionnelles comme l'Association canadienne des physiciennes et des physiciens, l'Institut de chimie du Canada et la Société de la métallurgie et des matériaux.
Chercheurs de l'industrie et du gouvernement	Des laboratoires d'entreprises (p. ex., Nemak Canada) et gouvernementaux (p. ex., CNR ou Laboratoires de Chalk River)

	d'EACL, exploité par les Laboratoires nucléaires canadiens) utilisent les faisceaux de neutrons, souvent en fonction d'une rémunération à l'acte, pour la réalisation de recherches exclusives
Organisations et utilisateurs internationaux	Les sources européennes de neutrons sont réunies au sein de la Ligue des sources européennes de neutrons avancées; les utilisateurs sont regroupés dans des organisations bénévoles comme la Neutron Scattering Society of America, l'Association européenne de diffusion des neutrons et l'Association de diffusion des neutrons d'Asie-Océanie
Producteurs de neutrons et autres utilisateurs de neutrons :	
Secteur de l'énergie nucléaire	Représenté par l'Association nucléaire canadienne, le secteur de l'énergie nucléaire utiliserait un nouveau réacteur de recherche polyvalent pour la recherche sur les combustibles nucléaires et les essais sur les matériaux pour réacteurs
Producteurs d'isotopes médicaux	Représentés par le Conseil canadien des isotopes nucléaires, les producteurs d'isotopes médicaux utiliseraient un nouveau réacteur de recherche polyvalent pour la production d'isotopes
Réacteur nucléaire McMaster	Procure des services d'irradiation tels que la production d'isotopes; compte désormais deux lignes de faisceaux de neutrons pour la recherche sur les matériaux
NRay Services Inc.	Fournisseur commercial de services d'imagerie neutronique basé au réacteur nucléaire McMaster
Autres réacteurs de recherche universitaires	Plusieurs réacteurs SLOWPOKE sont exploités par des universités; la luminosité de ces réacteurs est beaucoup trop faible pour la diffraction neutronique
TRIUMF	TRIUMF exploite une installation de neutrons ultra-froids pour l'étude des neutrons (c'est-à-dire la recherche sur les particules, et non sur les matériaux)
Expertise en matière d'accélérateur :	
TRIUMF, Centre canadien de rayonnement synchrotron	Une expertise substantielle dans la technologie des accélérateurs est disponible pour explorer des solutions de rechange aux réacteurs comme sources de neutrons
Organismes gouvernementaux :	
Politiques scientifiques : ISDE, conseiller scientifique en chef, FCI, trois Conseils	La gestion des faisceaux de neutrons pour la recherche et l'innovation dans le domaine des matériaux s'inscrit dans les politiques scientifiques en matière d'installations de recherche majeures (IRM), et devrait donc relever de la compétence de l'ISDE et de son portefeuille d'organismes. La FCI et la conseillère scientifique en chef jouent maintenant un rôle de premier plan en matière de politiques applicables aux IRM, et apportent leur aide à l'ISDE
Développement économique du Canada : FedDev Ontario, Western Diversification	Ces organismes sont des sources potentielles d'investissements supplémentaires dans les infrastructures de recherche, y compris les IRM, dans leur région
Politiques énergétiques et en matière d'isotopes : RNCAN, EACL	La gestion des faisceaux de neutrons relève depuis toujours de la politique énergétique de Ressources naturelles Canada en

	raison de son lien avec les réacteurs nucléaires de recherche. EACL est un organisme de RNCAN chargé de superviser le contrat avec l'exploitant des Laboratoires de Chalk River. Ces organismes devraient participer aux discussions sur un nouveau réacteur de recherche polyvalent
Organismes provinciaux : p. ex., Fonds pour la recherche en Ontario, Innovation Saskatchewan, ministère de l'Énergie de l'Ontario	Ces organismes constituent souvent des sources de fonds provinciaux de contrepartie aux investissements fédéraux dans les infrastructures de recherche, y compris les IRM. Le ministère de l'Énergie de l'Ontario est une partie prenante majeure dans les discussions sur l'innovation nucléaire (p. ex., nouveau réacteur de recherche)
Installations de recherche majeures :	
Canada : TRIUMF, SNOLAB, Institut Herzberg du CNR, Centre canadien de rayonnement synchrotron, Ocean Networks Canada	Il s'agit d'organisations comparables au Canada dont les expériences collectives peuvent éclairer l'établissement de la gouvernance, de la gestion et du financement de Neutrons Canada
International : Centre Jülich de science neutronique; quinze sources de neutrons majeures à l'échelle mondiale	Le Centre Jülich de science neutronique en Allemagne est l'homologue étranger le plus comparable à Neutrons Canada; c'est le seul exemple d'un programme qui s'est poursuivi après la fermeture de sa source de neutrons en prévoyant un accès à des « stations externes ». Environ quinze sources majeures de neutrons constituent des partenaires éventuels et possèdent une grande expérience en matière de gestion des infrastructures de faisceaux de neutrons : neuf en Europe (ILL, ESS, ISIS, etc.); trois aux États-Unis (SNS, NCNR, HFIR); une en Australie (OPAL); et d'autres en Asie
Ressources liées aux politiques scientifiques :	
Institut canadien de recherches avancées (CIFAR), Forum des politiques publiques, Conseil des académies canadiennes, Centre d'études sur la politique scientifique canadienne	Voici des exemples d'organisations canadiennes qui possèdent une expérience dans l'organisation et la tenue de réunions stratégiques et de concertation dans un contexte de politiques scientifiques

Annexe D : Groupe de travail de l'ICFN

Voici les dirigeants qui siégeaient au groupe de travail de l'Initiative canadienne sur les faisceaux de neutrons en novembre 2020 :

- Karen Chad (présidente), Université de la Saskatchewan, vice-présidente à la recherche
- Karen Mossman, Université McMaster, vice-présidente à la recherche
- Michael Siu, Université de Windsor, vice-président à la recherche et à l'innovation
- Alice Aiken, Université Dalhousie, vice-présidente à la recherche et à l'innovation
- Walter Dixon, Université de l'Alberta, vice-président à la recherche et à l'innovation
- Thad Harroun, Institut canadien de la diffusion des neutrons, président

Voici les établissements d'appui :

1. Université Brock
2. Institut canadien de la diffusion des neutrons
3. Centre canadien de rayonnement synchrotron
4. Association nucléaire canadienne
5. Université Dalhousie
6. Université McGill
7. Université McMaster
8. Université Memorial de Terre-Neuve
9. Nema Canada Corp.
10. Université Queen's
11. Université Simon Fraser
12. Centre canadien d'innovation nucléaire Sylvia Fedoruk
13. Université de l'Alberta
14. Université de la Colombie-Britannique
15. Université de Calgary
16. Université de Guelph
17. Université de Montréal
18. Université du Québec à Trois-Rivières
19. Université de Toronto
20. Université de la Saskatchewan
21. Université de Windsor
22. Université de Winnipeg
23. Université Western