



COMMISSION NATIONALE D'ÉVALUATION  
DES RECHERCHES ET ÉTUDES RELATIVES  
A LA GESTION DES MATIÈRES ET DES DÉCHETS RADIOACTIFS  
*Instituée par la loi n°2006-739 du 28 juin 2006*

RAPPORT À L'ATTENTION DE L'OPECST

OBJET : VOYAGE D'ÉTUDES EN AMÉRIQUE DU NORD

---

OCTOBRE 2022



## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCTION .....                                             | 4  |
| 2. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS AUX ÉTATS-UNIS .....                 | 4  |
| 3. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS AU CANADA .....                      | 6  |
| 4. LEÇONS À TIRER POUR LA FRANCE – PREMIÈRES RECOMMANDATIONS..... | 6  |
| GLOSSAIRE .....                                                   | 9  |
| ANNEXE 1 : PROGRAMME DU VOYAGE D'ÉTUDES.....                      | 11 |
| ANNEXE 2 : COMPTE-RENDU CHRONOLOGIQUE .....                       | 13 |
| ANNEXE 3 : LISTE DES PERSONNES RENCONTRÉES .....                  | 29 |

## 1. INTRODUCTION

La Commission, lors de son voyage d'étude aux Etats-Unis et au Canada, a pu compléter les informations qu'elle recueille habituellement dans ses auditions des acteurs de la loi :

- Sur le développement et la sécurisation de nouveaux types de combustibles ;
- Dans le domaine de l'entreposage et du stockage des déchets ;
- Dans le domaine très dynamique du développement de réacteurs SMR (small modular reactor), AMR (advanced modular reactor) et MMR (micro-modular reactor).

Concernant ce dernier domaine, sur lequel la Commission vient d'être saisie par l'OPECST<sup>1</sup>, la nomenclature anglo-saxonne relative à l'analyse de sûreté conduite par les autorités mentionne le *licensing* qui peut être, selon le contexte, soit un avis de sûreté générique pour un type de réacteur, soit l'autorisation de réalisation d'un exemplaire de réacteur dans un lieu donné. Dans ce rapport, nous parlerons de certification pour la première étape et d'autorisation de création (par référence au système français) pour la seconde.

## 2. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS AUX ÉTATS-UNIS

4

**L'industrie se focalise sur le développement de réacteurs, avec l'appui du DOE (et du DOD pour le volet MMR) sous différentes formes :** financement, mise à disposition de technologies ou de brevets, mise à disposition d'installations d'essais.

Le positionnement des acteurs aux USA est complémentaire sur l'ensemble des sujets abordés : la puissance publique est responsable du combustible et des déchets, et le privé des réacteurs. Le DOE et ses laboratoires sont des facilitateurs, les instances de sûreté sont mobilisées pour faciliter l'innovation et les processus de certification et d'autorisation de création :

- Les acteurs aux Etats Unis envisagent une palette très large d'options technologiques.
- Certains projets (y compris AMR) ont dépassé le stade d'esquisse, avec la mise en œuvre de démonstrateurs de briques du réacteur.
- Le DOE met à la disposition des industriels des installations, par exemple une chambre d'essai (dôme étanche à l'INL) pour tester rapidement des concepts de réacteurs sous l'autorité et la responsabilité du DOE, ce qui doit permettre un très fort gain de temps sur le développement.
- La NRC et les opérateurs affirment travailler ensemble, dès les phases très amont de développement jusqu'au démonstrateur, afin de faciliter la certification du concept et ensuite le passage au réacteur commercial : la NRC se donne comme ambition d'être un facilitateur.
- Les projets de réacteurs avancent à des rythmes soutenus : les SMR (NUSCALE de technologie REP, et X-ENERGIE de type HTR), et un AMR, NATRIUM de TerraPower (RNR-Na), basés sur des technologies éprouvées, affichent des premiers réacteurs commerciaux au tout début des années 2030. En parallèle, de nombreux travaux sur des AMR de concepts innovants explorent des gammes variées de technologies, dont les réacteurs à sels fondus (MSR), et affichent des calendriers de développement parfois encore plus rapides (prototypes en 2028).

---

<sup>1</sup> Voir rapport 16 de la Commission

- Les MMR constituent une niche particulière tirée par les secteurs militaire et spatial ; Le DOE utilise le projet MARVEL<sup>2</sup> pour que la filière réapprenne à réaliser un réacteur (ingénierie, modes de construction innovant, tissu industriel, certification d'un concept générique, autorisation de construire et d'exploiter) ;
- Les opérateurs affichent tous des calendriers très ambitieux. Pourtant, il reste de nombreux verrous à lever, y compris celui de l'intégration au sein d'un même système de briques technologiques à TRL élevé. L'agilité des acteurs industriels leur permet de dégager les moyens humains et financiers nécessaires pour espérer surmonter ces difficultés. Certains calendriers peu étayés semblent optimistes.

**De très nombreux projets reposent sur l'utilisation d'un combustible HALEU (enrichissement de 5 à 20 %).**

La disponibilité de ce combustible est identifiée comme un point critique car il n'existe pas de filière de production aux Etats-Unis : seule la Russie peut actuellement fournir ce combustible ce qui n'est plus acceptable dans le contexte actuel. Temporairement, en attendant qu'une filière alternative se constitue, il semble que le DOE assurera l'approvisionnement d'une quantité suffisante de combustible HALEU au moment où il deviendra nécessaire pour les démonstrateurs (obtention du combustible par dilution d'uranium hautement enrichi provenant de programmes militaires). Sur le long terme la stratégie est encore ouverte, y compris au secteur privé et dans le cadre de collaborations internationales.

**L'aval du cycle est sous la responsabilité exclusive du DOE.**

Le processus de création d'un stockage des combustibles usés à Yucca Mountain est bloqué et les recherches sont arrêtées. Les Etats-Unis sont donc très en retard sur la mise en œuvre d'un stockage. La situation de blocage a plusieurs conséquences lourdes :

5

- Condamnation de l'Etat au civil pour manquement à ses obligations ;
- Projet de création d'un entreposage centralisé de longue durée (par l'industrie privée) en attendant qu'un stockage devienne disponible ;
- Mise en danger des projets de nouveaux réacteurs par défaut d'exutoire pour les combustibles usés.

Dans l'immédiat, les industriels se sont regroupés pour développer un site centralisé pour l'entreposage à sec des combustibles usés, en sus des installations obligatoires sur les sites de production. Cette infrastructure est financée par les indemnités que le gouvernement est condamné à verser aux industriels en l'absence de site de stockage.

Compte tenu des dispositions légales qui interdisent au DOE de réaliser un entreposage de longue durée sans disposer d'un stockage profond, le DOE envisage de proposer au parlement une démarche *consent-based*<sup>3</sup> dont l'objectif est d'aboutir à un site d'entreposage : (i) recueil des besoins auprès des communautés qui accueilleraient l'entreposage (en cours) ; (ii) appel à candidatures ; (iii) caractérisation des sites. Cette démarche pourrait ultérieurement être appliquée à la recherche d'un site de stockage.

<sup>2</sup> [https://gain.inl.gov/SiteAssets/MicroreactorProgram/MARVEL\\_Fact\\_Sheet\\_R15.pdf](https://gain.inl.gov/SiteAssets/MicroreactorProgram/MARVEL_Fact_Sheet_R15.pdf)

<sup>3</sup> Par consentement des parties prenantes

## En résumé

L'ensemble des acteurs rencontrés aux Etats-Unis ont réussi à aligner leurs stratégies respectives dans une approche compétitive et avec le soutien déterminant du DOE dans le domaine du développement de réacteurs. L'objectif est la lutte contre le changement climatique avec le remplacement du charbon par le nucléaire pour la production d'électricité, la production d'hydrogène et de chaleur, et d'autres usages industriels. Les marchés visés concernent à la fois les besoins domestiques et l'export. Les études et réalisations dans le domaine du cycle sont très en retard par rapport aux projets de réacteurs : la plupart des projets prévoient des combustibles plus fortement enrichis (HALEU) par rapport aux combustibles actuels alors qu'aucune solution industrielle pérenne n'est envisagée. Enfin, la gestion de l'aval du cycle est au point mort.

### 3. SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS AU CANADA

Sous la contrainte du changement climatique qui entraîne des besoins croissants en électricité décarbonée, l'Ontario mise sur le développement rapide d'une capacité nucléaire. OPG, opérateur privé à capitaux publics en charge de la production d'électricité a fait le choix des SMR, sur la base de technologies éprouvées, afin d'accélérer le calendrier : revue des options réacteurs en 2021 ; choix du concept et début de la certification en 2022 et enfin début de construction en 2024. OPG souligne l'importance de respecter le calendrier, sous peine d'être exclu des nouveaux marchés de l'électricité si la tête de série arrive après 2030. OPG prévoit également des développements AMR et MMR, mais uniquement après que le SMR sera sécurisé.

Les travaux sur le stockage reposent sur le dialogue avec les parties prenantes, dont les Premières Nations et leurs autorités. Le processus a abouti à retenir deux sites (roche sédimentaire et granite) dont les analyses de sûreté sont satisfaisantes. Le calendrier prévoit une sélection en 2024. Les recherches sur l'ingénierie sont bien avancées, le dialogue avec les parties prenantes continue.

### 4. LEÇONS À TIRER POUR LA FRANCE – PREMIÈRES RECOMMANDATIONS

#### Sur les réacteurs innovants

Le positionnement des acteurs de la filière nucléaire d'Amérique du Nord est complémentaire sur l'ensemble des sujets abordés (réacteur, cycle du combustible, certification, ingénierie, ...). La Commission constate **qu'il n'y a pas en France une synergie aussi forte ; elle devrait y être promue.**

Un exemple de cette synergie est le cas des démonstrateurs que les startups prévoient de construire et tester dans les infrastructures du DOE. Des moyens pourraient être fournis au CEA pour héberger les projets portés par des startups françaises, et ainsi les faire profiter de son expertise et de ses infrastructures. Cette approche aurait le mérite de maintenir et renforcer les compétences en recherche industrielle au CEA, dans une démarche gagnant (pour la R&D publique) – gagnant (pour l'industriel du secteur privé).

Enfin, les modalités de développement des futurs réacteurs innovants français pourraient s'inspirer plus largement de la pratique canadienne qui introduit la notion de *vendor design review*, avant l'étape traditionnelle de certification. Cette étape permet à un industriel de recueillir un premier avis de l'autorité de sûreté sur la conception de la solution technologique qu'il projette de développer. Cet avis n'engage pas l'autorité de sûreté mais renforce la crédibilité du projet. Au Canada, ce type d'étude, effectuée à l'initiative de l'industriel, est à la charge financière du demandeur.

**La France opère avec des moyens limités par rapport aux Etats Unis et au Canada.** Elle ne peut pas envisager seule une R&D à large spectre avec de nombreux projets de réacteurs innovants. **Il est donc important de faire des choix qui évitent la dispersion.** La Commission a fait plusieurs recommandations dans ce sens dans son rapport n°16. Elle retient que, à l'instar de la situation américaine, les petits réacteurs trouveront probablement leur utilité en France (métropole et outre-mer), ce qui aura un impact sur le cycle du combustible.

### Sur le combustible et son cycle

La fabrication des combustibles (HALEU) pour un parc futur est un domaine où la France, Orano principalement, détient un savoir-faire historique grâce aux efforts entrepris dans les domaines de la séparation, de l'enrichissement, et du retraitement. La France est présente, parfois seule, à chaque étape de la chaîne industrielle qui permettra à terme de fabriquer ces combustibles.

**Or, la disponibilité de ces combustibles est critique** pour le déploiement d'un parc de réacteurs AMR, dans le monde anglo-saxon pour l'instant et peut-être en Europe dans le futur. L'industrie française se tourne donc naturellement vers ce futur marché, aux États Unis en particulier, pour valoriser son savoir-faire<sup>4</sup>. Il est souhaitable que la France continue à bénéficier de ce savoir-faire dans le domaine des combustibles pour les réacteurs innovants et à l'enrichir. Pour cela il importe de définir une perspective industrielle en France et en Europe sur ce sujet afin d'y créer les conditions du maintien d'un tissu industriel.

Le développement de nouveaux combustibles requiert enfin des installations de qualification. Celles-ci sont de plus en plus rares et l'accès à de nouvelles infrastructures pourrait être l'objet d'une coopération internationale avec le monde anglo-saxon.

7

---

### Sur l'aval du cycle

Par opposition aux Etats Unis et au Canada, **la France est plus avancée sur les projets de stockage des déchets. Il s'agit bien d'un avantage décisif**, qui permet d'envisager le développement de la filière nucléaire en ayant l'assurance de disposer en parallèle d'un savoir-faire sur l'aval du cycle. Par comparaison, l'absence d'exutoire pour les déchets se révèle un handicap aux Etats-Unis et au Canada, qui induit une incertitude sur le développement de la filière.

**Il faut éviter qu'un ralentissement des progrès sur le stockage en France ne conduise à l'avenir à une situation comparable.** Ces observations confirment l'importance d'avancer sur le projet Cigéo, plusieurs fois soulignée par la Commission. Il convient par ailleurs de ne pas sous-estimer l'avantage significatif apporté par la stratégie française de fermeture même partielle du cycle, laquelle commence à faire l'objet de réflexions aux Etats Unis pour des raisons de souveraineté.

---

<sup>4</sup> A ce sujet, les questions relatives à la maîtrise de la propriété intellectuelle mériteraient d'être revisitées.





## GLOSSAIRE

AMR : advanced modular reactor (réacteur avancé – de 4<sup>ème</sup> génération- modulaire de faible ou moyenne puissance, i.e. inférieure à 500 MWe)

CEA : commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

DOD : department of defense (ministère américain de la défense)

DOE : department of energy (ministère américain de l'énergie)

HALEU : high-assay low enriched uranium (combustible ayant un enrichissement en uranium entre 5 et 20 %)

HTR : high- temperature gas-cooled reactor (réacteur à haute température et à caloporteur gaz ayant un spectre de neutrons thermiques)

INL : Idaho national laboratory

MMR : micro-modular reactor (réacteur modulaire de puissance inférieure à 20 MWe)

MSR : molten salt reactor (réacteur à sel fondu)

MWe : mégawatt électrique, soit un million de watts ( $10^6$  W)

NRC : nuclear regulatory commission (autorité de sûreté américaine)

OPG : Ontario power generation

R&D : recherche et développement

REL : réacteur à eau légère (à eau pressurisée ou bouillante)

REP : réacteur à eau pressurisée (neutrons thermiques)

REB : réacteur à eau bouillante (neutrons thermiques)

RNR-Na : réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium

SMR : small modular reactor (réacteur modulaire de faible ou moyenne puissance, i.e. inférieure à 500 MWe, basé sur une technologie éprouvée de type REL).

TRL : technology readiness level (niveau de maturité technologique évalué sur une échelle de 1 à 9)



## ANNEXE 1 : PROGRAMME DU VOYAGE D'ÉTUDES

### Etas-Unis :

20 juin 2022 (Washington DC)

- Rencontre avec la société *Terrapower*
- Rencontre avec le thinktank Thirdway
- Rencontre avec l'US Nuclear Industry Council (USNIC) et l'American Nuclear Society (ANS)

21 juin 2022 (Washington DC)

- Rencontre avec l'US Nuclear Waste Technical Review Board (US NWTRB)
- Réunion au Department of Energy (DoE)
- Rencontre avec la Nuclear Regulatory Commission (NRC)

22 juin 2022 (Andrews, Texas)

- Rencontre avec la société *Waste Control and Services* (WCS) et visite de site

23 juin 2022 (Carlsbad, Nouveau Mexique)

- Visite du Waste Isolation Pilot Plan (WIPP)

11

24 juin 2022 (Idaho)

- Rencontre avec l'Idaho National Laboratory (INL) et visites de laboratoires

### Canada :

27 juin 2022 (Toronto, Canada)

- Rencontre avec *Laurentis Energy* et visite de site
- Rencontre avec la Nuclear Waste Management Organization (NWMO)

28 juin 2022 (Courtice, Canada)

- Rencontre avec la société Ontario Power Generation (OPG)

29 juin 2022 (Ottawa, Canada)

- Rencontre avec l'organisme *National Ressources Canada* (NRCAN)
- Rencontre avec la Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC)
- Rencontre avec l'organisme *Atomic Energy of Canada Limited* (AECL)
- Rencontre avec la société *Terrestrial*



## ANNEXE 2 : COMPTE-RENDU CHRONOLOGIQUE

---

20 Juin (USA)

---

### *Terrapower*

TerraPower est une société créée en 2006 par [Bill Gates](#) pour la conception de [réacteurs nucléaires](#) dont le siège est à [Bellevue, Washington, États-Unis](#). TerraPower a lancé deux projets de réacteurs à neutrons rapides : le réacteur [Natrium](#), refroidi au sodium et le *Molten Chloride Fast Reactor* (MCFR), à sels fondus. Ces deux projets ont été présentés à la Commission.

Le programme Natrium est conduit par Terrapower en association avec GE-Hitachi Technology. Le principe de l'installation projetée consiste à découpler les installations nucléaires des installations de production de vapeur, puis d'électricité. La zone nucléaire contient seulement le réacteur et les dispositifs de manipulation du combustible. Une zone « énergie » distincte regroupe des réservoirs de stockage de l'énergie dans des sels fondus, les générateurs de vapeur et les turbines de production de l'électricité. Les deux zones sont reliées par un réseau de circulation de sels fondus. La zone « énergie » est analogue à celles des centrales solaires à concentration. La puissance nominale est 345 MWe, pouvant être portée pendant quelques heures à 500 MWe en utilisant l'énergie stockée dans les réservoirs de sels fondus, ce qui permettrait de s'adapter à la charge et de compléter efficacement des sources d'énergie renouvelables. TerraPower illustre la maturité du projet par le fait que des essais et des irradiations sont réalisées à son profit depuis 2009 dans des installations telles que FFTF, TRAT ou BOR60 (Russie).

13

TerraPower insiste sur la sûreté passive du réacteur et sur le fait que l'architecture retenue simplifie significativement la zone nucléaire, ce qui apporterait de substantielles réductions de coût de réalisation, d'exploitation et de maintenance.

Le combustible sera métallique du type HALEU (enrichissement = 16.5%) sans joint sodium. Le cycle du combustible est ouvert mais Terrapower affirme que le volume de déchets sera fortement réduit par rapport à un réacteur PWR. La durée d'utilisation du combustible pourrait être de 15 à 22 mois. L'entreposage du combustible usé est envisagé en piscine pendant 10 ans puis à sec pendant une durée pouvant atteindre 100 ans après la fermeture de la centrale dans un dispositif étudié en collaboration avec Orano. Le calendrier présenté prévoit la construction d'un réacteur de démonstration d'ici 2027 dans le Wyoming, puis d'une première version de réacteur commercial vers 2030, une deuxième version étant envisagée vers 2040. Les clients envisagés pour ces réacteurs sont les États-Unis et les « pays amis ».

La Commission observe que la présentation qui lui a été faite est d'un très bon niveau technique ce qui accrédite l'affirmation de Terrapower concernant la disponibilité prochaine d'un premier réacteur. La difficulté principale sera probablement la disponibilité du combustible HALEU. Le recyclage du combustible n'a pas été envisagé à l'occasion de cet exposé, mais d'autres entretiens laissent entendre que le sujet n'est plus aussi tabou aux États-Unis.

Le développement du MCFR (*Molten Chloride Fast Reactor*) s'appuie sur deux programmes de recherche lancés par le DOE : *Advanced Reactor Concepts* (ARC15) et *Advanced Reactor Demonstration Program* (ARDP).

Les applications envisagées vont de réacteurs de faible ou moyenne puissance (30-300 MWe), dans un premier temps, à des réacteurs de puissance plus élevée (300-800 MWe) ultérieurement, voire à des brûleurs de Pu. Le calendrier présenté évoque les jalons suivants :

- Une installation d'essais intégrés non nucléaires (IET : *integrated effects test*) sera réalisée à Everett (Washington). Les premiers modules sont en cours de livraison.
- Un réacteur expérimental (MCRE : *Molten Chloride Reactor Experiment*) est envisagé entre 2025 et 2030 sur le site de l'INL. Ce réacteur dont la puissance pourrait atteindre 200 MW utilisera un sel  $\text{NaCl-UCl}_3$  avec un uranium hautement enrichi fourni par le DOE.
- Le premier démonstrateur de réacteur MCFR, situé au début des années 2030, devrait utiliser du combustible HALEU. Les versions commerciales sont annoncées à partir de 2035.

TerraPower reconnaît que les études sur le cycle du combustible sont encore embryonnaires « *much further work is needed* ».

La présentation, par ailleurs brillante, montre que seule l'étape des tests intégrés non nucléaires, financée (au moins en partie) par les programmes de recherche du DOE, est réellement concrète et décrite avec une certaine précision. Les caractéristiques indiquées pour le réacteur expérimental MCRE sont encore extrêmement générales et les étapes ultérieures (démonstrateur puis versions commerciales) ne sont pas décrites du tout. Globalement, l'exposé de TerraPower confirme l'appréciation de la Commission sur la différence importante de maturité entre les réacteurs au sodium et les réacteurs à sels fondus et incite à considérer avec circonspection les annonces calendaires qui peuvent correspondre à des jalons de significations assez différentes.

### Thirdway

14

Third way est un "Think Tank" proche du parti démocrate, qui conseille l'administration Biden dans différents secteurs, en particulier dans celui de l'énergie et du climat. Son programme de travail sur l'énergie et le climat a pour objet d'une part de promouvoir des énergies à faible émission de gaz à effet de serre, et d'autre part de promouvoir toutes les applications possibles des technologies existantes.

Deux points ont été abordés lors des échanges avec la Commission. Le premier a trait aux AMR et fait le constat d'une accélération des développements technologiques visant à réaliser des prototypes. Alors que les premiers prototypes d'AMR étaient envisagés bien après les SMR à eau pressurisée, la situation s'est, selon Third Way, inversée depuis peu. Aujourd'hui 4 AMR affichent des prototypes réalisés d'ici à 2028 (Terrapower, X-energy, OKLO, Kairos Power), bien avant Nuscale.

Cette présentation est assez cohérente avec les échéances qui ont été données à la Commission par ailleurs. Elle confirme l'optimisme généralement observé aux USA et au Canada, dès lors qu'il s'agit d'afficher des calendriers. Elle confirme aussi qu'en l'absence de moyens d'irradiation destinés à qualifier le combustible, il est projeté d'irradier progressivement des combustibles dans les prototypes et ainsi de s'en servir comme outil de qualification.

Le second point a trait au cycle du combustible : Third Way met en avant tout d'abord la démarche "Consent-Based Siting", prônée par le DOE. Il s'agit de la recherche d'un site d'entreposage des déchets qui recueille le "consentement" des habitants et des collectivités. La présentation porte ensuite sur le retraitement et l'aval du cycle dans le contexte des AMR, susceptibles de brûler le Pu. Dans le cadre de l'initiative ARPA-E (sur le modèle de la DARPA pour la défense qui concentre les moyens sur une ambition précise) deux programmes sont évoqués : "Curie" qui traite de la séparation et "Onwards" qui a pour objet d'optimiser la gestion des déchets d'une flotte d'AMR.

Bien que le discours soit assez général et peu détaillé s'agissant des programmes de recherche de l'initiative ARPA-E, il est important de noter que le retraitement du combustible en vue de valoriser les matières énergétiques n'est plus – au moins pour un Think tank – un sujet tabou. Sous l'impulsion du DOE, les USA relancent les recherches de sites pour leurs déchets dans une démarche très ouverte à (et par) la concertation. Pour l'instant, il s'agit de définir un site d'entreposage faute de rechercher un site de stockage, ce qui ne semble pas pouvoir être à l'ordre du jour pour l'instant.

## ANS and USNIC

L'US Nuclear Industry Council (USNIC) représente plus de 80 acteurs industriels du nucléaire (développement des technologies nécessaires, construction, opération et maintenance). Les représentants de l'USNIC rencontrés par la CNE avaient en charge l'« *Advanced Nuclear Working Group* » et le groupe de travail de cet organisme sur la certification des AMR. L'un de nos interlocuteurs, travaillant actuellement au sein d'un cabinet d'avocat, a été membre de la NRC (nommé en 2012). Des représentants (universitaires) de l'American Nuclear Society (ANS) accompagnaient cette délégation. L'ANS est une société savante qui a pour but la promotion des sciences du nucléaire. Elle compte environ 10 000 membres. Ses objectifs sont comparables à ceux de la SFEN.

Les débats ont porté sur l'initiative ARPA-E (voir au-dessus), sur la nécessité, pour le secteur industriel, de fluidifier les procédures de certification des futurs nouveaux réacteurs et de disposer des combustibles requis (HALEU), et enfin sur les progrès à attendre dans le domaine du stockage des déchets. Il a été fait mention des possibilités envisagées à un moment de mettre ces déchets dans des forages (horizontaux) profonds, solution abandonnée depuis. Enfin, s'agissant des déchets, l'ANS a mentionné que l'EPA (Environmental protection Agency) travaille sur l'élaboration de standards (en parallèle à la NRC).

---

21 Juin (USA)

---

## US NWTRB

15

Le Nuclear Waste Technical Review Board a été créé par le Nuclear Waste Policy Act (NWPA) en 1987. Son rôle est très semblable à celui de la Commission nationale d'évaluation (CNE), avec un périmètre d'action qui est toutefois restreint aux déchets de haute activité. Sa mission est d'évaluer le fondement technique et scientifique des activités du Department of Energy (DOE) des Etats-Unis. Ces activités sont :

- L'emballage et le transport des combustibles usés (CU) et des déchets de hautes activités (HAVL) vers un site d'entreposage ou de stockage,
- La caractérisation du site, la conception et le développement des installations de stockage de CU ou HAVL.

Le Board rapporte au Congrès et au secrétaire à l'énergie. Il a accès aux documents préparatoires des organismes audités ce qui lui permet d'être proactif. Comme la CNE, il procède à des auditions publiques et effectue des visites techniques. Les rapports et activités du Board figurent sur son site internet ([www.nwtrb.gov](http://www.nwtrb.gov)). Les avis et publications du Board sont purement scientifiques et techniques ; ils ne portent en aucun cas sur la politique suivie ou à établir.

Parmi les rapports récents publiés par le Board, il faut signaler celui relatif au comportement des combustibles usés à haut taux de combustion publié en juillet 2021 (*Evaluation of the Department of Energy's Research Program to Examine the Performance of Commercial High Burn-up Spent Nuclear Fuel During Extended Storage and Transportation*). Il faut noter qu'en principe, le conteneur utilisé en entreposage est également celui destiné au stockage.

À la suite de l'échec de l'implantation d'un stockage sur le site de Yuka Mountain, qui reste cependant le site légalement désigné, diverses actions sont entreprises, notamment des activités génériques concernant le stockage et le développement d'une approche basée sur le consentement tournée en priorité vers la recherche d'un site fédéral pour un entreposage intérimaire en attente d'une installation

de stockage. Aucune stratégie globale n'est fixée à ce jour ; toute nouvelle stratégie requiert en effet l'assentiment du Congrès.

Le Board est ouvert à la coopération internationale, bilatérale ou multilatérale, avec ses homologues étrangers.

## DOE

La Commission a été reçue par une délégation de haut niveau menée par le *Deputy Assistant Secretary of the Office of Spent Fuel and Waste Disposition*. Plusieurs thèmes ont été abordés.

### Gestion des déchets

Des progrès doivent être réalisés si l'on souhaite continuer à déployer l'énergie nucléaire pour décarboner, accroître l'accès à l'énergie et s'attaquer à la question climatique. C'est au DOE de gérer l'aval du cycle du combustible et en particulier de trouver des sites où entreposer et stocker les combustibles usés (CU) et les déchets de haute activité à vie longue (HAVL)

Il est acté que la situation est actuellement bloquée quant au choix d'un site pour la réalisation d'un stockage ; le site de Yuka Mountain, n'est plus considéré comme réaliste aujourd'hui et une nouvelle approche doit être envisagée. Toutefois, le site de Yuka Mountain étant le site légalement désigné, seule une R&D générique est aujourd'hui possible. Celle-ci porte sur le stockage géologique, l'entreposage de longue durée et le transport des CU et HAVL.

La priorité est la réalisation d'un entreposage fédéral centralisé destiné à recevoir les CU actuellement entreposés sur les sites des producteurs sous leur responsabilité. Pour ce faire, le DOE développe une approche de recherche de site basée sur le consentement (« consent-based siting ») ; cette approche consiste à se concentrer sur les besoins et préoccupations des communautés locales. La procédure pour valider ce concept au niveau légal a été entamée et devrait aboutir fin 2022.

Les déchets sont traités selon une vision intégrée sur l'ensemble du cycle du combustible. La R&D porte essentiellement sur les fondamentaux de recyclage des matières et la réduction des rejets des usines du cycle (I129 et Kr85). Différentes techniques de recyclage sont étudiées et développées dans le but de fournir à l'industrie les quantités initiales de *High Assay Low Enriched Uranium* (HALEU). Il est reconnu que la gestion des déchets produits par les nouveaux cycles du combustible et réacteurs sont une question importante à laquelle trop peu d'attention est accordée aujourd'hui.

### Small Modular Reactors (SMR's) et microréacteurs

Le DOE considère trois catégories de réacteurs classés selon leur puissance :

- Les grands réacteurs conventionnels : autour de 1000 MWe ou plus
- Les SMR's : quelques dizaines à quelques centaines de MWe
- Les microréacteurs : d'un à quelques dizaines de MWe

La vision actuelle est d'intégrer ces différents types de réacteur dans un mix énergétique comprenant une part significative d'énergie renouvelable (EnR) et couvrant à la fois la production d'électricité et d'autres applications industrielles. Dans ce cadre, les SMR et microréacteurs sont destinés à la production d'électricité (avec suivi de charge) et à d'autres applications industrielles (hydrogène, chaleur de procédé). Au niveau du concept, la distinction essentielle entre les SMR et les



microréacteurs est que ces derniers sont quasi intégralement montés en usine et transportables sur le site où ils seront utilisés par camions, rail, bateau ou avion. Les microréacteurs sont aussi semi-autonomes et contrôlables à distance ; l'intervalle de temps entre deux recharges de combustible pourrait être de dix ans ou plus. Ces réacteurs ont une sûreté passive par conception qui devrait permettre de contenir les conséquences d'un accident à l'intérieur du site.

Le DOE a depuis une décennie environ mis en place et financé différents programmes d'évaluation, de soutien et de tri des projets proposés par l'industrie :

- Advanced Reactor Technologies (ART) program
- Microreactor Applications, Research, Validation & Evaluation (MARVEL) program
- Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP)

Ces programmes doivent permettre de lever les verrous technologiques spécifiques aux différents concepts (réacteurs à neutrons rapides, réacteurs à gaz, réacteurs à sels fondus, microréacteurs). Dans le cadre du programme MARVEL, une plateforme expérimentale est mise à disposition de l'industrie par le DOE, dans le complexe de l'Idaho National Laboratory (INL), qui a été rénové, pour tester la viabilité de projets de microréacteurs. Les essais, effectués dans le cadre réglementaire spécifique du DOE, doivent permettre de qualifier, au moins partiellement, la sûreté du concept. Les éléments de qualification acquis permettront d'accélérer l'obtention ultérieure de l'autorisation de construire un réacteur commercial qui doit être délivrée par la *National Regulatory Commission* (NRC).

Tous ces efforts sont destinés à permettre la démonstration à l'échelle industrielle, avant la fin de la décennie, de différents concepts de SMR's et de microréacteurs. A cette fin le DOE accorde aux projets jugés crédibles des financements conséquents :

- NuScale : 6 modules de 77 MWe (soit 462MWe) sur le site de INL ; utilise un combustible eau légère éprouvé ; mise en service d'un premier module en 2029. Le projet est estimé à 5,3 GUSD dont 1,4 financés par le DOE.
- Terra Power : 345 MWe, jusqu'à 550MWe pendant 5,5h en suivi de charge ; réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium ; sera construit sur le site d'une ancienne centrale à charbon dans le Wyoming. Le projet est estimé à 8 GUSD dont 4 financés par le DOE.
- Xe-100 : 4 modules d'une puissance totale de 320 MWe ; réacteur à haute température refroidi au gaz utilisant du combustible à particules dit TRISO destiné à la production d'hydrogène et de chaleur de procédé ; le projet est estimé à 2,4 GUSD dont 2 financés par le DOE.

---

17

### **Entreposage à sec des combustibles usés**

Le DOE entrepose en conteneurs également destinés au transport les CU issus de ses activités de recherche. Les CU sont d'origines et de natures très diverses : gaines en aluminium, zirconium, acier inoxydable ... ; combustibles métalliques, oxydes, carbures .... L'expérience acquise et les programmes de surveillance en place conduisent le DOE à conclure qu'il n'y a pas de problème de sûreté en entreposage et que la technologie mise en place est viable. Cette technologie devrait également pouvoir être appliquée pour les nouveaux combustibles.

Des efforts de R&D sont actuellement consentis pour confirmer la tenue des conteneurs en entreposage de longue durée.

En ce qui concerne la tenue des combustibles usés dans le conteneur, le DOE renvoie aux études et essais en cours à l'*Electric Power Research Institute* (EPRI).

## NRC

La NRC peut être considérée comme l'équivalent de l'ASN aux Etats Unis. Les lois applicables sont les suivantes :

- Loi sur l'énergie atomique de 1954 telle que modifiée
- Loi de 1982 sur la politique en matière de déchets nucléaires
- Loi de 1978 sur la non-prolifération

### Cycle du combustible

La NRC supervise les licences pour les installations de production de combustible, comme la conversion de l'uranium, l'enrichissement de l'uranium et la fabrication de combustible. Une surveillance approfondie de ces installations est régulièrement effectuée par la NRC. La NRC est également responsable de la délivrance de la certification des colis de transport ainsi que des fûts d'entreposage et des permis des installations indépendantes de stockage de combustible usé.

Les activités de gestion du vieillissement constituent une des tâches importantes concernant le stockage du combustible nucléaire irradié. Cela est important pour assurer l'intégrité du combustible usé avant les prochaines étapes à l'avenir, y compris le transport et le stockage définitif.

En ce qui concerne le cycle du combustible, la NRC s'attend notamment à émettre le permis de construire les installations d'entreposage provisoire consolidées, commerciales et privées. Deux installations, l'une au Texas et l'autre au Nouveau-Mexique, sont actuellement en attente du permis de construire et de la mise en exploitation, respectivement.

### Réacteurs nucléaires avancés

La NRC se transforme et se modernise stratégiquement pour se préparer au déploiement des réacteurs avancés en sécurité. Afin d'adapter et de faciliter le déploiement de ces réacteurs, la NRC a mis en place un cadre réglementaire nouveau (part 53) qui s'appuie sur une base solide de décisions de la Commission.

Ce cadre réglementaire vise à :

- faire évoluer l'utilisation du risque ;
- tirer parti des exigences basées sur les performances ;
- moderniser le processus de changement de la base de licence ;
- inclure des exigences évolutives axées sur les conséquences ;
- permettre une flexibilité opérationnelle ;
- optimiser l'équilibre entre flexibilité et prévisibilité.

On observe une approche plus inclusive sur le plan technologique, axée sur les conséquences, avec une prise en compte explicite de la défense en profondeur ainsi qu'une utilisation élargie de la performance graduée. Le NRC entreprend un dialogue continu avec différents intervenants de la société pour l'élaboration du cadre réglementaire pour les réacteurs avancés.

## CISF-WCS

### Le consortium

Le *consolidated interim storage facility* (CISF) est un projet d'installation d'entreposage de longue durée. Le projet est porté par un consortium privé, *Interim Storage Partners LLC*, *joint venture* entre WCS et Orano.

WCS (*Waste Control and Services*) est une entreprise privée spécialisée dans le traitement et le stockage des déchets radioactifs. Elle opère déjà un centre de stockage de déchets de faible activité (classe A, B et C) sur son site d'Andrews (Texas). La géologie du site est favorable : sous une faible épaisseur de sables et graviers récents (~10 m) se trouve une épaisse couche d'argiles (~300 m). La topographie très plate et la faible pluviométrie limitent les risques d'érosion. Les déchets sont placés au sein de la couche argileuse, jusqu'à 30 m de profondeur ; à terminaison une couverture argileuse sera remise en place.

### Le CISF

19

D'après la loi, la gestion des combustibles usés, après leur sortie de l'usine, est de la responsabilité du DOE. Le DOE lui-même est tenu par la loi de proposer un stockage géologique sur le site de Yucca Mountain. La loi interdit par ailleurs au DOE d'opérer un entreposage de longue durée (pas avant qu'un site de stockage géologique soit opérationnel), cela dans le but d'empêcher une solution d'entreposage par nature temporaire de devenir de fait pérenne. Devant le blocage du développement d'un stockage par le DOE, un consortium privé propose un service d'entreposage centralisé (c'est légal, puisque ce n'est pas le DOE qui opère). Le business modèle de cette entreprise repose sur une offre d'entreposage de combustibles usés auprès des électriciens : les électriciens entreposent en pratique leurs propres déchets sur leurs sites de production, mais l'offre devient intéressante lorsque les sites commencent à fermer afin de permettre leur démantèlement complet. Les électriciens paient pour ce service... mais reçoivent de l'argent du DOE qui a été condamné pour non-respect de ses engagements contractuels liés à l'absence de solution de stockage.

Le site envisagé pour le CISF est localisé juste à côté de celui de WCS, les aménagements envisagés sont minimaux : nivellement et imperméabilisation des sols, entreposage des colis à l'air. Le site devrait accueillir 5 000 TEHM (en commençant par des combustibles à faible taux de combustion), avec une extension possible jusqu'à 40 000 TEHM. Les combustibles seront entreposés dans leurs colis de transport. La licence a été obtenue fin 2021.

### Intégrité des colis

Le CISF est prévu pour accueillir des combustibles usés sur une durée de 100 ans (autorisation initiale 40 ans, renouvelable). Les questions d'intégrité des combustibles sont assez largement balayées, la sûreté reposant sur l'intégrité des colis :

- l'ouverture éventuelle des colis au moment de leur reprise sort du champ d'activité de WCS ;

- WCS indique par ailleurs que les options de stockage définitif dans les colis de transport est une option largement envisageable ce qui limiterait la manutention.

Cette stratégie est conforme aux recommandations de la NRC, qui considère (d'après WCS) que l'entreposage à sec dans ces conditions peut être poursuivi quasi indéfiniment avec des opérations de reconditionnement si besoin. Si cela devenait nécessaire, l'opération de reconditionnement devrait faire l'objet d'une demande d'autorisation... et poserait alors la question de l'intégrité des combustibles.

Aujourd'hui, outre la vérification régulière des propriétés du colis, rien n'est prévu pour le suivi du combustible lui-même. Cependant, WCS indique qu'Orano disposerait d'informations sur le comportement du combustible en entreposage à sec, avec un retour d'expérience sur quelques dizaines d'années.

---

23 Juin (USA)

---

## WIPP

Le Waste Isolation Pilot Plan (WIPP) est une installation de stockage géologique de déchets transuraniens de faible à moyenne activité d'origine militaire implantée à Carlsbad dans le Nouveau-Mexique. Les déchets concernés sont des vêtements, outils, chiffons et débris divers faiblement contaminés, par du plutonium notamment. Le WIPP, construit dans une couche de sel à environ 650 mètres de profondeur, est la seule installation de stockage géologique en service (depuis 1999) dans le monde.

20

En 2014, deux accidents distincts se sont produits dans l'installation : d'abord l'incendie d'un camion de transport de sel et quelques jours plus tard une réaction exothermique à l'intérieur d'un colis de déchets qui se révélera à l'analyse contenir des matières incompatibles. Les conséquences radiologiques sur les personnes et l'environnement ont été très limitées, mais la contamination d'une partie de l'installation a nécessité de la fermer de manière anticipée. Les opérations nécessaires à la reprise de l'exploitation ont duré environ 3 ans.

Une présentation des mesures prises à la suite de ces accidents a été faite à la Commission :

- La ventilation de l'installation fait l'objet d'une amélioration en plusieurs étapes. Il s'agit de filtrer la totalité de l'air sortant pour éviter les rejets radioactifs en cas d'incident. Une ventilation intermédiaire a été mise en place à la réouverture de l'installation mais son débit limité contraint l'exploitation du site. Le système pérenne, dit *safety significant confinement ventilation system*, devrait entrer en service vers 2025, avec un débit de 540 000 cfm (soit 252 m<sup>3</sup> par seconde).
- Une caractérisation plus rigoureuse des colis entrant dans l'installation doit permettre d'éviter le mélange de matières incompatibles entre elles en s'appuyant notamment sur les méthodes de l'agence américaine de protection de l'environnement (US EPA).
- Le management de l'installation a été amélioré - séparation des fonctions de conduite et de contrôle – et la formation du personnel significativement renforcée.

La Commission a pu visiter l'installation souterraine. Les alvéoles de stockage, appelées ici *panels*, sont de section rectangulaire ; ils sont creusés dans le sel entre deux galeries de circulation et étayés par un simple boulonnage complété d'un grillage. Ce dispositif rustique, par comparaison à ce qui est prévu pour Cigéo, est jugé suffisant par les Américains, malgré la déformation significative des plafonds des galeries de circulation. Les colis de déchets sont empilés dans les alvéoles et recouverts de sacs d'oxyde de magnésium, lequel réagit avec le CO<sub>2</sub> issu de la dégradation des matières organique et régule le pH de l'installation. Les alvéoles sont fermés au fur et à mesure de leur remplissage et les galeries de circulation, quand elles ne sont plus nécessaires, sont utilisées pour le stockage.

La situation géologique du WIPP, comme la nature des déchets qui y sont stockés, étant très différentes de celles de Cigéo, il n'y a que peu d'enseignement à tirer sur la réalisation du stockage. En revanche, le retour d'expérience des accidents de 2014, et des mesures correctrices qui ont été prises, montre l'importance du maintien dans la durée de la rigueur de l'organisation et de la formation des personnels.

---

24 Juin (USA)

---

## INL

L'*Idaho National Laboratory* est totalement isolé à 80 kms d'Idaho Falls sur un immense terrain appartenant au DOE. Il emploie 5400 personnes et dispose d'un budget d'1,5 milliard \$.

### Visite de la partie réacteurs

- 1- *Advanced Test Reactor (ATR)* : c'est un REP qui fonctionne à très basse température (70°C) avec un cœur de 45 Kg d'oxyde d'uranium.

La caractéristique principale de l'installation réside dans la structure du cœur en lobes qui peuvent opérer à des puissances différentes et donc permettre des expériences simultanées d'irradiation de combustible ou de matériaux de structure. Cet outil d'irradiation permet de travailler avec des impulsions brèves de neutrons. Propriété du DOE, ce réacteur test très polyvalent est accessible aux divers projets de nouveaux réacteurs. Parmi de multiples tâches, il produit le  $^{60}\text{Co}$  pour la médecine et le  $^{238}\text{Pu}$  pour la NASA.

21

Ainsi, contrairement à la France et à l'Europe, les Etats-Unis disposent d'un outil d'irradiation accessible aux organismes de recherche et à l'industrie nucléaire.

- 2- *MARVEL* : c'est un microréacteur De puissance 100 KW th utilisant un combustible UZr (HALEU) et refroidi par un mélange sodium-potassium. A noter que ce réacteur est construit sous le dôme d'un réacteur démantelé. C'est une approche démantèlement-réutilisation qui pourrait être explorée en France.

Ce réacteur permettra d'explorer les applications de microréacteurs comme le branchement sur le réseau pour compenser les énergies renouvelables, le traitement de l'eau, la production d'hydrogène ou encore l'utilisation de la chaleur dans l'industrie chimique. Accessible aux organismes de recherche et à l'industrie, il permettra d'explorer toutes les potentialités des microréacteurs.

### Visite des installations du cycle du combustible

- L'INL dispose d'un plateau analytique remarquable permettant toutes les analyses post-irradiation ainsi que la caractérisation des combustibles avec notamment un microscope donnant accès au nanomètre.

- La visite de la partie séparation n'a pas été possible (pas été souhaitée ?) et a été remplacée par un exposé de l'approche de l'INL concernant le cycle du combustible...  
INL considère la voie pyrométallurgie et hydrométallurgie. Aucune indication n'a été fournie concernant les extractants utilisés et pour la partie électrochimie les questions précises concernant l'électrolyse des actinides mineurs en milieu chlorure n'ont pas reçu de réponse. La nature du combustible n'a pas été révélée.

On peut cependant en conclure que les combustibles métalliques tout comme les combustibles oxydes font partie des études en cours à l'INL.

## Impressions

Le centre de recherche rassemble sur un même lieu recherche sur les réacteurs et recherche sur le cycle amont et aval du combustible. Les installations sont remarquables et disponibles à toute la communauté nucléaire américaine. La nature précise des objets à l'étude n'a pas été révélée mais on peut déduire que les recherches en cours couvrent un champ très large qui devrait permettre une réactivation de l'industrie nucléaire américaine très rapidement dès que des choix stratégiques concernant les réacteurs auront été faits.

### *Laurentis Energy (site de Hamilton)*

Filiale de l'opérateur *Ontario Power Generation* (OPG) qui exploite 18 réacteurs Candu dans l'Ontario, *Laurentis Energy* propose différents services : inspection et surveillance du parc nucléaire, soutien aux opérations de rénovation des réacteurs Candu et gestion des déchets.

Son établissement de Hamilton, créé en 2021, a pour devise : « *Clean Energy Materials Sorting and Recycling Facility* ». Situé à proximité de commerces et d'habitations, il se consacre au traitement des déchets provenant de l'exploitation des usines d'hydroélectricité ou de centrales nucléaires, en excluant les déchets médicaux ou miniers. *Laurentis Energy* centralise notamment les déchets LLW de faible activité de 8 établissements d'OPG ou d'autres clients. L'entreprise estime que la construction de 10 à 20 SMR au Canada développera ses débouchés.

Contrôlé par l'autorité de sûreté – CNSC (*Canada Nuclear Safety Commission*) –, l'établissement édicte ses propres règles de sûreté et de radioprotection, sur la base du triptyque – Sûreté, Formation, Contrôle.

Les déchets radioactifs LLW de faible activité – chiffons, couvre-chaussures, outils - entrent dans une chaîne de traitement similaire à celle des autres déchets industriels, moyennant des précautions pour les manipuler et les entreposer localement.

Les opérations faites à Hamilton ne nécessitent pas d'installations lourdes de protection. La mission de l'établissement d'Hamilton est le tri, le compactage – réalisé à hauteur de 55% des volumes entrants – et la libération des matières recyclables – plus de 25% des matières entrantes.

L'entreprise cherche à augmenter la part du recyclage, sur la base d'une réglementation de la radioprotection qui fixe – élément par élément - , d'une part, des seuils de libération inconditionnelle en Bq/g, et, d'autre part des quantités d'exemption en Bq/g et en Bq.

Par ailleurs, une installation « *d'entreposage à long terme* » de déchets radioactifs à faible ou moyenne activité en couches géologiques profondes est à l'étude. Située près de la centrale de Bruce, elle devrait reprendre les déchets des trois centrales en Ontario de Bruce, Pickering et Darlington.

## NWMO

NWMO, *Nuclear Waste Management Organization* ou Société de gestion des déchets nucléaires est responsable de l'élaboration et de la mise en œuvre du plan canadien pour la gestion à long terme du combustible nucléaire irradié.

### Avancement des travaux

Le concept repose sur le stockage géologique définitif. NWMO place le *consent-based siting* au centre de sa réflexion, avec une démarche de médiation de près de vingt ans auprès du public et également auprès des *first nations*. Le processus de recherche de site arrive presque à son terme : seuls deux sites candidats restent en lice (Wabigoon Lake Ojibway Nation et Saugeen tous les deux dans l'Ontario), le premier dans du granite, le second dans une roche argileuse.

23

La visite a eu lieu dans la halle d'essai technique d'Oakville, elle a été largement orientée vers les dispositifs techniques du stockage : mise en forme de surconteneurs en bentonite compactée, tests de remplissage des vides dans une maquette à l'échelle 1.

Les dispositifs techniques sont intéressants et manifestement bien avancés. Ils reposent sur l'insertion des assemblages dans des colis en acier recouverts d'une couche de cuivre. Les colis sont placés dans des surconteneurs en bentonite compactée et usinée. On note que la récupérabilité des colis est très limitée, du fait des choix techniques : remplissage des vides avec des granulés de bentonite au fur et à mesure de l'avancement du dépôt des colis.

Le calendrier suivant est annoncé : 2023 sélection du site, 2029 demande de licence, 2033 début des travaux, 2043-2088 opérations.

---

28 Juin (Canada)

---

## OPG

Pour atteindre son objectif de « Net Zero » émissions de gaz à effet de serre en 2050<sup>5</sup>, le Canada, géant mondial des énergies fossiles, va devoir augmenter et faire évoluer fortement sa production

---

<sup>5</sup> Faisant partie intégrante du plan fédéral « Net Zero » en 2050, le Canada SMR Action Plan<sup>5</sup> rassemble, sous l'égide du Gouvernement fédéral, plus de cent intervenants, dont sept provinces, les organismes publics du nucléaire et la quasi-totalité des entreprises du secteur de l'énergie. Le Gouvernement fédéral subventionne la R&D sur les SMR, au travers de son Strategic Innovation Fund et de son Net-Zero Acceleration Initiative d'un montant de 8 milliards de Can\$ (6 milliards €)<sup>5</sup>. Une fois qu'ils aborderont la phase de la commercialisation, les projets de SMR seront soutenus par la Business Development Bank of Canada.

d'électricité. La part des différents moyens de production d'électricité varie fortement d'une province à l'autre, selon leurs dotations en ressources naturelles. A titre d'exemple, l'hydroélectricité a, en 2019, représenté 93,7% du total au Québec, contre 59,2 % au niveau national. Les centrales thermiques à charbon ont contribué pour 7,1% à la production nationale, avec un maximum de 51,9% en Nouvelle Ecosse et 36,7% en Alberta. Les centrales à gaz ont contribué pour 10,2% au total national, contre 51% en Alberta. Pour sa part, le nucléaire a assuré 15% de la production électrique nationale, dont 58,4% en Ontario<sup>6</sup>.

Groupe entièrement contrôlé par la Province de l'Ontario, OPG (Ontario Power Generation), le plus grand producteur d'électricité de l'Ontario, veut jouer un rôle majeur dans l'essor du nucléaire au Canada, avec le développement des nouveaux réacteurs modulaires. OPG est d'ores et déjà le principal exploitant nucléaire du pays, avec 4 réacteurs Candu à Darlington, 6 à Pickering (et 2 à l'arrêt) et 8 avec sa filiale Bruce. L'entreprise possède également des centrales hydroélectriques, des centrales thermiques à gaz et à fuel et des centrales solaires et à biomasse.

Selon OPG, les filières nucléaires nord-américaines disposent de deux atouts fondamentaux. D'une part, le constructeur d'une installation nucléaire aux Etats-Unis et au Canada ne se lance dans la réalisation concrète de celle-ci, qu'une fois arrêté définitivement son design détaillé. La procédure de certification se déroule alors une fois pour toutes. D'autre part, le référentiel de sûreté d'une installation est, pour la durée de vie de celle-ci, celui en vigueur lors son autorisation de création. Cette intangibilité traduit, peu ou prou, la confiance de l'autorité de sûreté dans ses normes.

## **La stratégie globale d'OPG dans le nucléaire**

Pour atteindre le « Net Zero » en 2050, le Canada doit multiplier par 5 sa production d'électricité nucléaire - celle de l'hydroélectricité ne pourra être accrue que d'un facteur 2.

La sûreté des nouveaux réacteurs à implanter – probablement plus d'une dizaine – est un facteur clé pour y réussir. Elle doit résulter de dispositifs simples à construire et à mettre en œuvre. D'éventuels accidents, quel que soit leur type, ne devront pas obliger à évacuer la population.

OPG compte sur l'entrée en service en 2030 du SMR BWR-X de GE Hitachi, dont le développement constitue l'absolue priorité des années à venir. Plusieurs conditions du succès sont déjà remplies. Le projet détaillé sera totalement défini avant la construction, le régulateur - la CNSC (*Canadian Nuclear Safety Commission*) - étant de surcroît associé à sa définition. La plus grande rigueur est accordée à la planification des opérations, à la création et au bon fonctionnement d'une équipe projet rassemblant des partenaires tenus d'investir financièrement dans son développement. La rénovation du parc actuel a permis de reconstituer à la fois le tissu industriel canadien et le vivier d'ingénieurs et techniciens nucléaires<sup>7</sup>.

Les perspectives des AMR à l'horizon 2035 sont également suivies de très près par OPG, un classement des différents projets étant d'ores et déjà arrêté. La filière sodium se heurtera toujours aux craintes suscitées par ce caloporteur. La filière d'AMR haute température (HTGCR) correspond aux besoins de l'Alberta pour sa production de pétrole à partir de sables bitumineux. Enfin, le CFS (*Commonwealth Fusion System*) pourrait apporter une solution opérationnelle pour l'énergie de fusion, à une date beaucoup plus rapprochée que celle d'ITER. Bénéficiant d'un apport de 1,8 milliard de US\$

---

*Au plan politique, les projets nucléaires du Canada se déroulent dans une transparence totale, en informant le public - et en particulier les Nations premières - sur les nouvelles technologies en cours de développement et la recherche de sites potentiels pour les nouveaux réacteurs et le stockage géologique des combustibles usés*

<sup>6</sup> Energy Fact Book 2021-2022, Natural Resources Canada.

<sup>7</sup> Le programme de « *Refurbishment* » ou de rénovation du parc nucléaire de OPG s'est étalé sur dix ans de planification et dix années d'exécution, pour un coût total de 12,8 milliards de Can\$ et l'emploi de 14 000 personnes.



par le fonds *Tiger Management* réunissant des investisseurs et des industriels, ce tokamak à aimants supraconducteurs pourrait donner lieu, selon OPG, à la mise en service en 2025 d'un démonstrateur d'une puissance de 50 MW, et en 2028 d'un réacteur commercial de 200 MW.

### La stratégie d'OPG pour le nouveau nucléaire

Grâce à la mise en service rapide de 12 SMR, OPG compte parvenir au « Net Zero » en 2040, soit dix ans plus tôt que l'objectif national. Ce qui est attendu des SMR, c'est d'être modulaires et donc de pouvoir fonctionner hors réseau si nécessaire, d'être complémentaires du solaire et de l'éolien, d'avoir une sûreté passive renforcée, d'avoir des coûts d'investissement, d'exploitation et de production du MWh inférieurs à ceux des réacteurs de puissance et de répondre à différents types de besoins – remplacement des centrales thermiques classiques, sites ou réseaux isolés, production de chaleur ou d'hydrogène.

OPG distingue trois catégories de nouveaux réacteurs, au sein desquelles ses choix sont déjà arrêtés :

- Pour un déploiement commercial en 2030, les SMR de technologies dérivées des existantes et d'une puissance comprise entre 150 et 300 MWe pour une production en base : OPG a retenu le GE Hitachi BWRX-300 ;
- Pour un déploiement vers 2035, les AMR (Advanced Modular Reactor) d'une puissance allant de 10 à 150 MWe pour l'industrie lourde, notamment le traitement des sables bitumineux : OPG s'intéresse en premier lieu au projet de réacteur X-Energy HTGR (réacteur à haute température refroidi au gaz), au projet ARC de 100 MWe refroidi au sodium et au projet Moltex de réacteur à sel fondu ;
- Pour un démonstrateur vers 2025, les MMR (Micro Modular Reactor) de puissance de 1 à 10 MWe pour des sites industriels isolés ou des réseaux locaux : OPG accorde une priorité aux projets de GFP (*Global First Power*)<sup>8</sup> de réacteur HTGCR à haute température de 5 MWe couplé à un stockage de chaleur en sels fondus, en cours de certification par la CNSC ; OPG suit également avec attention le projet eVinci de Westinghouse, microréacteur transportable de cogénération (5 MWe et chaleur jusqu'à 600 °C).

25

OPG a noué avec les constructeurs Westinghouse et Hitachi un partenariat de développement du BWRX-300, dont le démonstrateur sera implanté sur son site de Darlington avec une emprise au sol de 8 acres soit celle d'un terrain de football et une consommation d'eau inférieure d'un facteur 3 à celle d'un BWR classique. D'une durée d'exploitation fixée à 60 ans par conception, ce SMR d'une puissance de 300 MWe, fondé sur la technologie bien connue des réacteurs à eau bouillante, utilisera une circulation naturelle et passive du caloporteur refroidissant le cœur, avec une autonomie totale de 7 jours en cas d'incident ou d'accident, sans intervention d'un opérateur ni source électrique extérieure. Il fonctionnera sur des cycles de 12 mois, avec un rechargement rapide du combustible. La procédure de *licensing* ou certification du réacteur par la CNSC commencera en 2024. L'objectif est le déploiement commercial en 2030.

Le BWRX-300 est conçu pour le Canada, mais des débouchés seront recherchés en Europe de l'Est (Roumanie, Estonie, Pologne, République tchèque, Lettonie), en Australie, à Singapour et aux Émirats Arabes Unis.

---

<sup>8</sup> Filiale de OPG et de USNC (Ultra Safe Nuclear Corp.) présidée par M. Dominique Minière.

### *NRCAN and CNSC*

CNSC est un organisme indépendant du gouvernement du Canada, qui relève directement du Parlement par l'entremise du ministre des Ressources naturelles. La CNSC réglemente l'utilisation de l'énergie et des matières nucléaires pour protéger la santé, la sécurité et l'environnement et mettre en œuvre les engagements internationaux du Canada en matière d'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire.

La CNSC réglemente toutes les installations et activités liées au nucléaire, comme l'extraction d'uranium, la fabrication de combustible, les centrales nucléaires, les installations de gestion des déchets et bien d'autres activités. La CNSC mène un dialogue approfondi avec toutes les parties prenantes de la société y compris le Gouvernement Indigène du Canada.

#### **Adaptation aux SMR (petits réacteurs modulaires)**

La CNSC dispose d'un budget pour 2022 afin de travailler sur son cadre réglementaire et ses procédures pour :

- Assurer la capacité et la capacité de répondre à l'innovation liée aux nouveaux réacteurs ;
- Assurer la prévisibilité et la clarté de la réglementation pour les demandeurs ;
- Coordonner les responsabilités partagées / soutenir l'élaboration de politiques ;
- Promouvoir l'harmonisation internationale / nouveau cadre international.

26

La CNSC examine et réglemente toutes les étapes d'un SMR, de la préparation du site à la construction, en passant par l'exploitation, le déclassé et la délivrance des permis de fin de cycle.

#### **Examen de la conception du fournisseur, VDR**

CNSC a mis au point un processus facultatif dans le cadre duquel elle fournit une rétroaction précoce au développeur de la technologie sur :

- Comment le fournisseur répond aux exigences canadiennes dans ses activités de conception et d'analyse de la sûreté en tenant compte des caractéristiques et des approches de conceptions innovatrices ;
- Les principaux enjeux découlant d'une conception qui pourraient avoir une incidence sur un processus de licence ;
- Les progrès réalisés par le fournisseur pour résoudre les problèmes anticipés par la commission.

Le processus VDR n'approuve pas une conception générique et n'est pas une partie de la licence. Ce processus est toutefois mis en place pour permettre au fournisseur d'identifier les obstacles fondamentaux potentiels pour obtenir une licence découlant de la conception proposée. CNSC examine actuellement les conceptions de différents fournisseurs à différentes étapes, phase 1 ou phase 2. La phase 1 consiste à examiner l'intention de se conformer aux exigences réglementaires et la phase 2 consiste en une évaluation préalable à l'obtention d'un permis.

Les propriétaires de déchets sont encouragés dès ce stade précoce à prêter attention à tous les flux de déchets nucléaires résultant de ces nouveaux réacteurs. MWMO (organisme en charge de la gestion des déchets nucléaires au Canada) a également commencé à évaluer comment ces déchets nucléaires vont s'inscrire dans les critères d'acceptation pour le stockage définitif des déchets nucléaires. MWMO a l'intention de faire une sélection de site de stockage d'ici 2023 parmi les deux sites candidats. MWMO prévoit soumettre une demande de permis de construire en 2024.

## AECL

AECL est le laboratoire national (fédéral), créé en 1944, qui centralise une grande partie de la recherche et du développement dans le domaine de la science et de la technologie des réacteurs nucléaires, ainsi que de la production et du développement de radio-isotopes pour des applications médicales. Son siège social se trouve au laboratoire de Chalk River, dans la province de l'Ontario, au Canada. Il emploie environ 3 000 personnes et son organe directeur est Ressources Naturelles Canada (RNCan).

La majeure partie de la présentation a été faite sur l'expérience de la gestion des déchets nucléaires de faible et moyenne activité, produits au laboratoire de Chalk River tout au long de l'histoire de l'exploitation du laboratoire (depuis 1944). Plusieurs prototypes de réacteurs ont historiquement été développés au sein du laboratoire, en particulier toute la technologie qui a conduit au développement de la technologie des réacteurs CANDU (uranium naturel modéré à l'eau lourde). En outre, plusieurs types de réacteurs ont été développés au niveau expérimental, et surtout une grande variété de types de combustibles. Au total, Chalk River a une expérience de plus de 20 types de combustibles différents (métalliques, oxydes, alliages...). Toutes ces activités antérieures sur de nombreuses années ont généré environ 1 million de mètres cubes de déchets de moyenne et faible activité, qui ont été gérés en interne. Le laboratoire de Chalk River a donc une grande expérience de la gestion sûre de ce type de déchets. Le laboratoire est actuellement dans les dernières étapes de la procédure légale pour obtenir l'autorisation de construire une installation de stockage (proche de la surface) pour les déchets de faible à moyenne activité, d'un volume total de 1 million de mètres cubes, au sein de ses propres installations.

27

Les aspects de la recherche et du développement de nouveaux réacteurs (AMR-SMR) ont aussi été présentés. Dans cette partie du développement des nouveaux réacteurs (AMR SMR), il existe une forte collaboration entre l'industrie (par exemple OPG) et AECL (Chalk River), qui se propose d'assembler les prototypes des futurs réacteurs, à l'image de l'INL (Idaho, États-Unis). Cependant, les résultats de cette collaboration sont encore loin de la symbiose observée à l'INL (Idaho, États-Unis). Peu de détails spécifiques ont été donnés sur les nouveaux types de réacteurs dans lesquels AECL est impliquée ; seule la philosophie de collaboration entre l'industrie, le centre de développement et l'autorité de sûreté nucléaire a été soulignée.

Les connaissances disponibles à AECL (Chalk River) sont de très haute qualité et peuvent constituer une référence dans divers domaines du développement de nouveaux réacteurs, ainsi que de la gestion des déchets nucléaires. Le laboratoire fait l'objet d'un processus de rénovation et de réinvestissement dans plusieurs domaines. La partie déchets est basée sur une longue expérience de gestion depuis de nombreuses années. Une procédure administrative avec la CNSC est actuellement engagée en vue du stockage permanent et en sécurité sur place des déchets historiques. AECL a une forte vocation à participer au développement et à la mise au point de nouveaux types de réacteurs (AMR et SMR), en collaboration avec l'industrie et le secteur de l'énergie au Canada. D'autre part, elle participe en tant qu'agence consultative en la matière pour le gouvernement fédéral (<https://smractionplan.ca>), mais les décisions concernant la construction de nouveaux réacteurs ou le mix énergétique sont prises par chaque « province (état) », et non par le gouvernement fédéral.

## Terrestrial

Le projet présenté par Terrestrial (start-up canadienne) est l'IMSR (*Integral Molten Salt Reactor*) présenté comme un « burner » de 195 MWe fonctionnant avec un combustible HALEU < 5% sous forme liquide dans des fluorures de lithium et de béryllium.

C'est un réacteur avec une enceinte scellée, modéré au graphite. Terrestrial annonce un rechargement du combustible tous les 7ans. Le cœur du réacteur, transportable, mesure 5 mètres de haut pour un diamètre de 4 mètres. Le circuit de refroidissement est constitué par un mélange, non radioactif, de sels fondus. Le combustible n'est que très partiellement retraité (sans autre précision quant au procédé utilisé).

Ce réacteur pourrait consommer sa production de plutonium et également fermer le cycle avec de faibles ajouts de LEU. De même ce réacteur pourrait consommer le Pu issu des réacteurs CANDU et PWR...Un procédé par voie sèche serait utilisé pour récupérer le Pu.

S'agissant des déchets fluorés ils pourraient être entreposés sur le site du réacteur (procédure courante en Amérique du Nord) après avoir été vitrifiés (étude en cours car les très fortes teneurs en fluorures sont peu compatibles avec la vitrification) ou bien immobilisés grâce au procédé SYNROC développé il y a une trentaine d'années par ANSTO (Australie) mais à ce jour non appliqué à des sels fluorures. Un contrat d'étude est passé.

La chaleur pourrait être utilisée pour produire de l'électricité, de la chaleur industrielle (chimie, pétrochimie, hydrogène), pour alimenter des réservoirs de sels fondus pour stocker de l'énergie...

Le projet est conduit en faisant appel à de multiples collaborations pour faire progresser chaque brique technique et technologique et une difficulté majeure pourrait surgir au moment de l'assemblage de ces briques.

Dès 2017, CNSC a conclu que ses recommandations en matière de sûreté avaient été comprises par Terrestrial. La question de la tenue de la cuve en cas d'accident grave posée à cette époque reste cependant ouverte.

La démarche est intéressante puisque cette approche par briques élémentaires a permis de lever 115 millions \$ ; il reste que, comme pour tous les projets de MSR, le TRL est de l'ordre de 2 ou 3 ce qui rend l'hypothèse d'une mise sur le marché en 2030-2035 très optimiste.

## ANNEXE 3 : LISTE DES PERSONNES RENCONTRÉES

### Etats-Unis :

#### Ambassade de France à Washington :

- Aurélie Bonal, ministre conseillère
- Sunil Félix, conseiller nucléaire

#### Ambassade de France à Ottawa :

- Franck Marchetti, ministre conseiller
- Carole Semichon, conseillère développement durable

#### TerraPower:

- Tara Neider, Senior Vice President and Project Director, Natrium Demonstration Project
- Jeff Latkowski, Senior Vice President, Innovation, MCFR Project

#### ThirdWay:

- Alan Ahn, Senior Resident Fellow for the Climate and Energy Program

29

#### ANS

- Craig Piercy, Executive Director/CEO

#### USNIC:

- Cyril Draffin, Senior Fellow, Advanced Nuclear
- Jeffrey S. Merrifield, Partner and Energy Section Leader

#### US-NWTRB:

- Bret W. Leslie, Senior Professional Staff, Geoscience and External Affairs
- Daniel G. Ogg, Senior Professional Staff
- Steven M. Becker, Board Member

#### US-DOE :

- Sam Brinton, Deputy Assistant Secretary for Spent Fuel and Waste Disposition
- Josh Jarrell, Pyrochemistry and Molten Salt Systems Department Manager, INL
- Janelle Eddins, Advanced Reactor Development Team Lead, Office of Nuclear Energy
- Kimberly Gray, Office of Materials and Chemical Technologies Office of Nuclear Energy
- Edgard Espinosa, Office of Environmental Management

US-NRC :

- Shana Helton, Director, Division of Fuel Management, Office of Nuclear Materials Safety & Safeguards, Mohamed Shams, Director, Division of Advanced Reactors and Non-Power Production and Utilization Facilities, Office of Nuclear Reactor Regulation
- Shawn Smith, Senior Physical Scientist (International Programs), Office of Nuclear Material Safety and Safeguards
- Randy Howell, Desk Officer, International Cooperation and Assistance Branch, Office of International Programs

CISF-WCS:

- Jeffery Isakson, Chief Executive Officer, Interim Storage Partners

WIPP:

- Mark Percy, Chief Operating Officer

Idaho National Lab (INL):

- John Wagner, Laboratory Directory, INL
- Jess Gehin, Associate Laboratory Director, Nuclear Science and Technology (NS&T)
- Ursula Carvajal Nunez, Spent Nuclear Fuel Management Analyst
- Doug Crawford, Division Director, TREAT
- Matt Fisher, MFC Communications Liaison
- Bonnie Hong, Director, International Programs (NS&T)
- Ken Marsden, Senior Technical Advisor
- Shelly Norman, Communications Tour Team Lead
- Andrew Orrel, Senior Technical Advisor Spent Nuclear Fuel Management
- Daniel Thomas, Senior Spent Nuclear Fuel Management Analyst
- Jeff Wass, Deputy Division Director, MFC Production Facilities

Canada :

Laurentis Energy (site de Hamilton) :

- Daniel Orr, Operations Site Manager
- Jessica Jones, Senior, Public and Corporate Relations
- Erik Rogerson, Operations Manager
- Sheena MacRitchie, Supervisor, Radiation Protection

NWMO :

- Kochie Dakota, NWMO Discovery and Demonstration centre, Public Affairs Leader.
- Chris Boyle, Vice-President and Chief Engineer
- Bob Watts, Vice-President, Indigenous Relations and Strategic Programs

OPG :

- Dominique Minière, Executive Vice President, New Nuclear Domestic & International Strategy
- Gary Rose, Executive Vice President, New Nuclear Growth
- Jesara Holla, Senior Manager, Corporate Relations&Projects, New Nuclear Division

NRCAN

- Andre Bernier, Director General

CNSC :

- Sarah Eaton, Director, Advanced Reactors Licensing Division
- Caroline Ducros, Director, Nuclear Processing Facilities Division, Directorate of Nuclear Cycle and Facilities Regulation.

AECL :

- Steve Bushby, Senior Director, Science andTechnology

Terrestrial :

- David Leblanc, President, Chief Technical Officer, Director, Co-Founder