

L'Electronucléaire en Amérique du Nord : un secteur en pleine mutation

Sunil Felix
Conseiller Nucléaire
Ambassade de France - Washington DC

SFEN Provence
15 octobre 2021

1/ Organisation de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis et état de la filière

- 1.a. La place actuelle du nucléaire dans le mix énergétique
- 1.b. Cycle du combustible
- 1.c. Stockage des déchets radioactifs
- 1.d. Principaux acteurs de l'énergie nucléaire
- 1.e. Synergie entre nucléaire civil et défense

2/ Les obstacles auxquels fait face à ce jour le nucléaire civil aux Etats-Unis

- 2.a. Réacteurs
- 2.b. Cycle
- 3.c. Assainissement-démantèlement

3/ Perspectives à moyen et long terme du parc nucléaire civil aux Etats-Unis

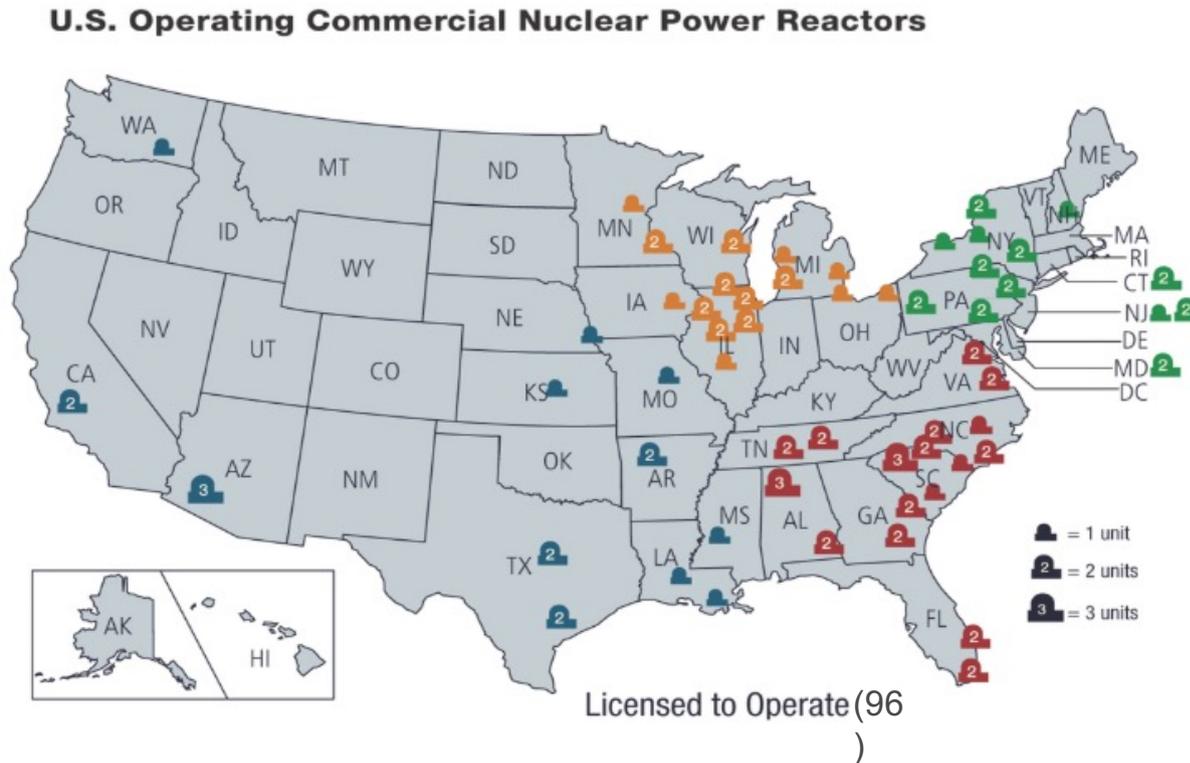
- 3.a Le décrochage des Etats-Unis en matière de nucléaire civil
- 3.b La réponse par l'innovation
- 3.c Les SMR et les Advanced Reactors
- 3.d Le Programme ARDP
- 3.e Le couple nucléaire-hydrogène aux États-Unis

4/ Stratégie des entreprises nucléaires américaines – Réflexions sur notre positionnement

1. Organisation de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis et état de la filière

1.a La place actuelle du nucléaire dans le mix énergétique

LE PLUS GRAND PARC NUCLEAIRE MONDIAL - 93 REACTEURS



- **93 réacteurs** en exploitation dans **29 Etats** par **28 exploitants** différents
- Le parc est composé de **61 REP** et **32 REB** (95,5 GWe de capacité disponible)
- 2 réacteurs AP1000 en construction

- 19,5% du mix électrique
- Première source d'énergie zéro carbone aux Etats-Unis (49,9%)
- 475 000 emplois enduits
- 60 Mds\$ au PIB

Mix électrique:

Gaz :	40,19%
Nucléaire :	19,50%
Charbon :	19,10%
Eolien :	8,33%
Hydro :	7,19%
Solaire :	2,24%
Autres ENR :	1,80%
Imports:	1,22%
Pétrole :	0,43%

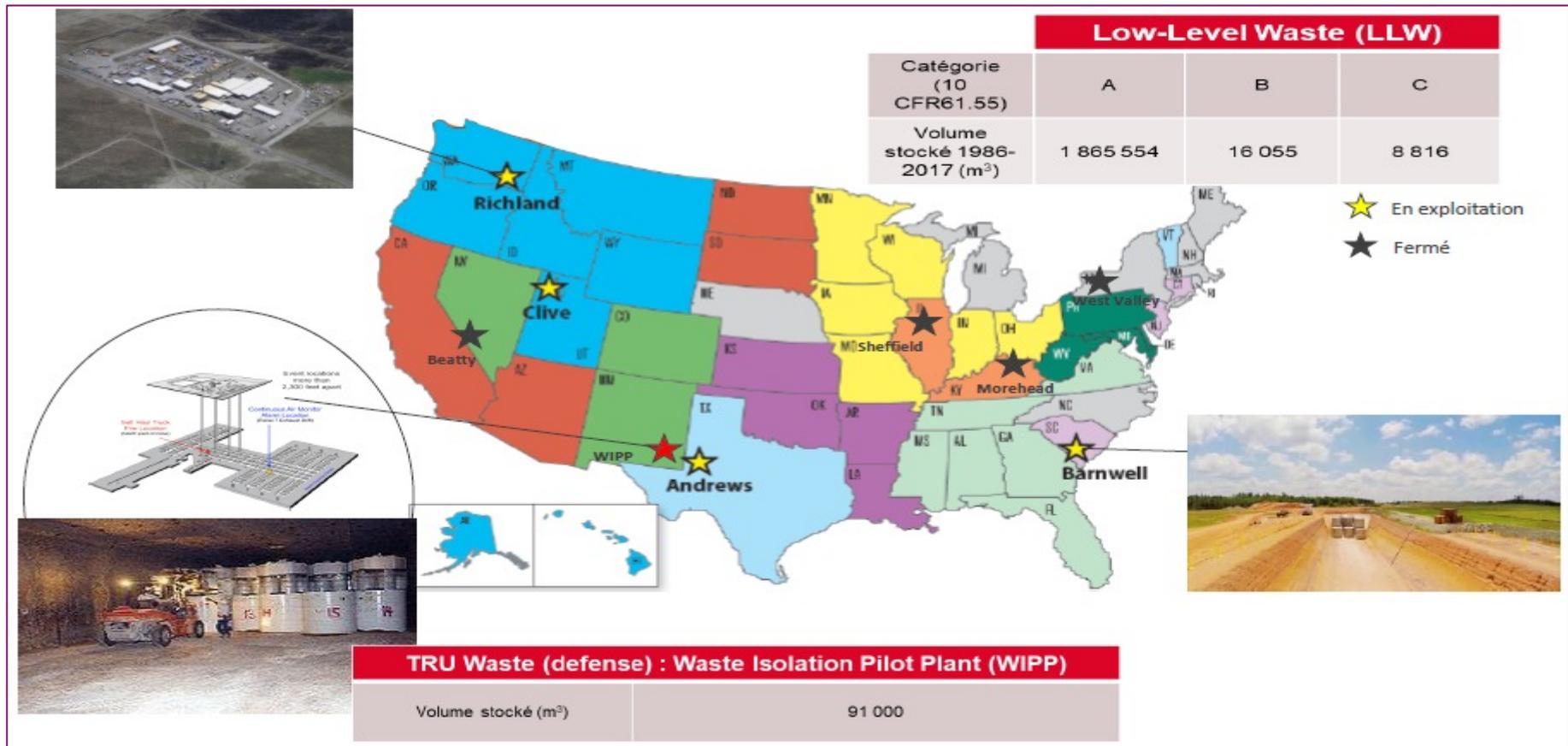
- 86 des réacteurs en fonctionnement ont déjà reçu un premier renouvellement leur licence (40+20 → 60 ans)
- **4 des réacteurs en fonctionnement ont déjà reçu un second renouvellement leur licence (40+20+20 → 80 ans)**

1. Organisation de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis et état de la filière

1.b Le cycle du combustible

- Nuclear Non Proliferation Act (NNPA) adopté sous le Président Carter en 1978: interdit le retraitement sur le territoire américain ainsi que toute exportation de matériel qui pourrait aider un pays à le faire.
- Etudes sur un stockage direct des combustibles usés, qui devient l'exutoire de référence → Ces études se focalisent sur le site de Yucca Mountain. Dossier au point mort...

1.c Le stockage de déchets radioactifs



1. Organisation de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis et état de la filière

1.d Principaux acteurs de l'énergie nucléaire

i. Le Department of Energy (DOE)

Mission : assurer la sécurité et la prospérité des Etats-Unis au regard des défis posés en matière d'énergie, d'environnement ou de sécurité nucléaire, auxquels il apportera des réponses scientifiques et technologiques innovantes

- « All-of-the-above » (déjà sous Obama), axée sur la sécurité et l'indépendance énergétique, la croissance économique et la création d'emploi, ainsi que le déploiement des technologies bas carbone et des énergies propres ;
- « Energy dominance » (renforcé sous Trump), visant à faire des Etats-Unis le leader des exportations.

ii. La Nuclear Regulatory Commission (NRC)

Missions : réglementer et d'accorder les licences nécessaires pour l'utilisation à des fins civiles des matières nucléaires, tout en assurant la protection de la santé de la population et la sûreté, la promotion de la défense et de la sécurité, ainsi que la protection de l'environnement

La NRC joue un rôle capital dans l'adaptation des réglementations (licensing et exploitation) pour faciliter un développement et un déploiement rapide des nouveaux types de réacteurs SMR, MMR, réacteurs avancés

1. Organisation de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis et état de la filière

iii. Le Congrès

Rôle central sur grandes orientations de la politique sur l'énergie nucléaire, via l'action législative, l'adoption du budget fédéral annuel et donc la définition des actions menées par les divers ministères ou agences fédérales (DOE, NRC, etc.), ainsi que via les commissions examinant des points spécifiques.

Apporte un soutien de principe à l'énergie nucléaire, comme composante stratégique du mix américain, mais aussi pour assurer une cohérence d'ensemble avec le nucléaire militaire (la National Nuclear Security Administration est l'agence semi-autonome au sein du DOE, qui a en charge le maintien et la modernisation de l'arsenal militaire).

Soutien matérialisé par l'adoption de divers textes de soutien à l'innovation nucléaire, considérée comme la clé du redressement du nucléaire américain :

- Nuclear Energy Innovation Capabilities Act (NEICA) :
- Nuclear Energy Innovation and Modernization Act (NEIMA) :
- Nuclear Energy Leadership Act (NELA) : cette loi prévoit la construction du VTR en 2026
- Strategic Energy Initiative qui vise à renforcer les dispositifs de soutien financier d'accompagnement des projets nucléaires américains à l'export

1. Organisation de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis et état de la filière

iv. Les Think-Tanks

Rôle d'influence dans la politique américaine

v. Les exploitants de réacteurs nucléaires et les industriels

93 réacteurs sur 29 Etats, opérés par 28 exploitants. Certains exploitants ne comptent qu'un seul réacteur. Le plus important est Exelon, avec 22 réacteurs.

L'industrie nucléaire génère 475 000 emplois et contribue à hauteur de 60 Mds\$ au PIB du pays (correspondant à 0,3%).

vi. Les industriels français présents

-Orano USA : (i) produits et services à l'amont du cycle, (ii) transport, logistique et entreposage de CU, (iii) mise hors service et démantèlement de réacteurs, (iv) services de gestion des déchets, (v) radioéléments pour usage médical.

-Framatome Inc : (i) les services et le combustible au parc installé (50% des réacteurs environ), (ii) ingénierie et design de réacteurs, (iii) combustibles innovants (EATF, métallique), (iv) I&C.

-EDF Inc prend du recul avec le nucléaire américain,

vii. Le Nuclear Energy Institute (NEI)

Regroupe la très grande majorité des exploitants/industriels, sans conteste le meilleur porte-parole de l'industrie nucléaire américaine

1. Organisation de l'énergie nucléaire aux Etats-Unis et état de la filière

1.e Synergie entre nucléaire militaire et nucléaire civil

Traditionnellement réticente à reconnaître liens avec nucléaire de défense, l'industrie du nucléaire civil, maintenant sous pression économique, revendique un soutien du gouvernement car essentielle pour la sécurité nationale.

Au-delà de son apport à la sécurité énergétique du pays, permet de développer une expertise et une supply chain essentielles pour les besoins militaires et nécessaires pour maintenir une capacité à limiter la prolifération des armes nucléaires.

Matérialisations de ces liens :

- (i) la NNSA, bien que semi-autonome, fait partie du DOE,
- (ii) nombre d'entreprises œuvrent dans les deux domaines (BWXT, Bechtel, Centrus, General Atomics, etc.).

Ces liens vont s'accroître avec l'intérêt croissant du Department of Defense pour les MMR*.

***MMR** : Micro Modular Reactors ($1 < MWe < 10$)

2. Les obstacles auxquels fait face à ce jour le nucléaire civil aux Etats-Unis

2.a Les réacteurs

L'évolution de la place du nucléaire dans le mix américain dépendra de sa capacité à assurer sa compétitivité face aux énergies concurrentes pour produire l'électricité, à savoir (i) le gaz en hausse, (ii) le charbon en baisse, (iii) les renouvelables en hausse

Pistes identifiées d'amélioration de la compétitivité du nucléaire sont les suivantes :

- Mise en place de revenus complémentaires grâce à la prise en compte des avantages intrinsèques du nucléaire : a permis de sauver une dizaine de réacteurs;
- Réduction des coûts d'exploitation du parc : l'initiative « Delivering the Nuclear Promise » du NEI, visant à baisser les coûts d'exploitation de -30% entre 2012 à 2020;
- Innovation dans de nouvelles générations de réacteurs : investissements dans le développement de réacteurs modulaires de plus faible puissance, que ce soit des réacteurs à eau légère ou de 4e génération ;
- Renforcement du positionnement à l'exportation, afin de permettre à l'industrie nucléaire américaine de renforcer sa position et d'accroître ses revenus, et donc de mieux supporter la pression liée à un marché domestique tendu.

2. Les obstacles auxquels fait face à ce jour le nucléaire civil aux Etats-Unis

2.b Cycle

Conditions d'un basculement rapide vers le cycle fermé non réunies

Deux projets d'entrepôts centralisés (Consolidated Interim Storage Facility, CISF) proposés et en cours d'évaluation par la NRC :

(i) projet de WCS et Orano dans le Texas,

(ii) projet d'Holtec au Nouveau Mexique.

2.c Assainissement-démantèlement

Plusieurs stratégies de démantèlement sont possibles :

(i) DECON : démantèlement immédiat ;

(ii) SAFSTOR : démantèlement différé ; une fois le combustible usé extrait, installation mise sous cocon pour permettre décroissance de la radioactivité qui facilitera les opérations d'assainissement-démantèlement ;

(iii) ENTOMB : mise sous sarcophage de l'installation ; stratégie jamais mise en œuvre pour un réacteur du parc de production d'électricité, seulement pour des installations du DOE.

2c. Assainissement-démantèlement

• Activités réglementées par la NRC

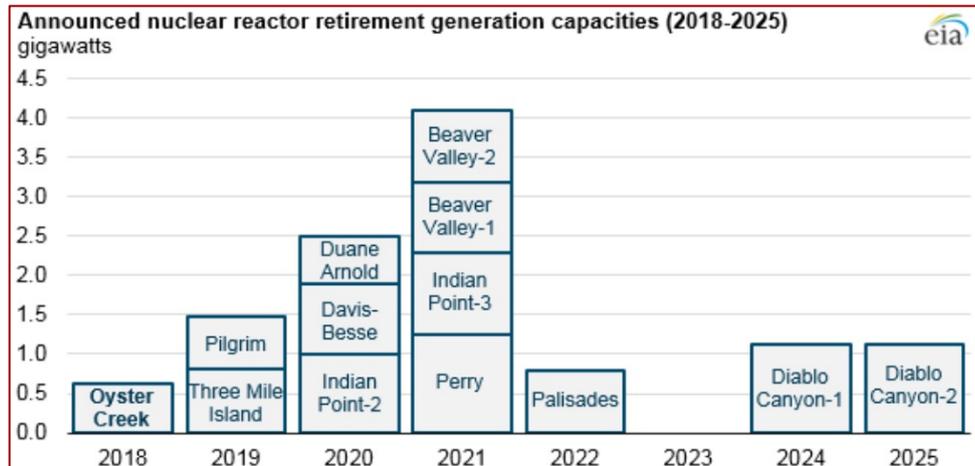
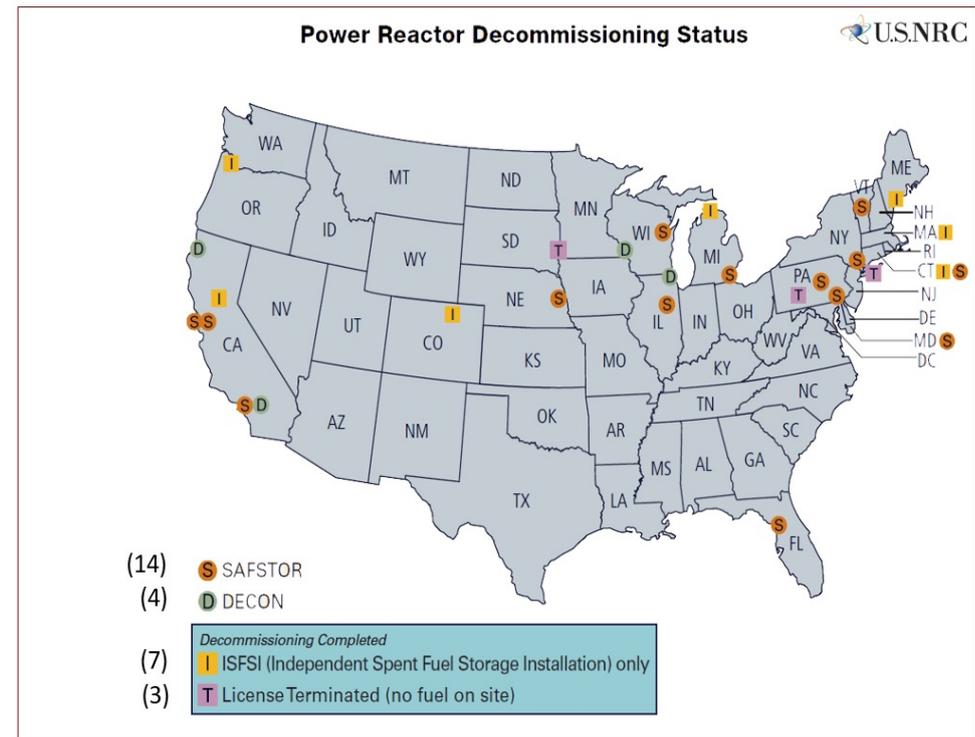
- Durant l'exploitation du réacteur : l'exploitant doit élaborer sa stratégie et mettre en place un fonds de démantèlement
- Après : les opérations continuent d'être menées sous licence NRC

• 10 réacteurs déjà démantelés avec succès

• Nouveaux business model = transfert de propriété du réacteur à un acteur privé pour démantèlement

- Transfert de l'installation et du fonds dédié → le repreneur assure le financement et l'exécution des travaux
- Transfert potentiel des CU → mais in fine le DOE reprendra la propriété des CU pour stockage; lien avec CISF
- 1^{er} transfert en janvier 2019 : Vermont Yankee à NorthStar (Orano sera impliqué)

• Des perspectives industrielles importantes du fait du grand nombre d'arrêts de réacteurs à venir



3. Perspectives à moyen et long terme du parc nucléaire civil aux Etats-Unis

3.a Le décrochage des Etats-Unis en matière de nucléaire civil

Les Etats-Unis = berceau occidental des technologies électronucléaires

Cependant:

- Nombre de réacteurs en exploitation en baisse (peu compétitifs face au gaz)
- Seuls chantiers en cours : Vogtle et VC Summer (dérapages coûts/calendrier).
- Sur la scène nationale, urgence climatique
- Sur la scène internationale, perte du leadership US au profit Russie / Chine.

3.b La réponse par l'innovation

Investissement dans l'innovation pour répondre aux défis techniques, économiques, environnementaux, géostratégiques qui se posent aux Etats-Unis

- GAIN : Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear
- ARDP: Advanced Reactor Development Program

Changement de paradigme : Les autorités nationales financent la R&D sans censure aucune, et mettent à disposition des industriels différentes briques technologiques, dont certaines seront alors choisies par l'industrie pour des développements ultérieurs devant conduire à des réalisations industrielles.

➔ Prise de risque moindre pour les industriels

3. Perspectives à moyen et long terme du parc nucléaire civil aux Etats-Unis

→ Budgets du DOE consacrés à l'énergie nucléaire ont globalement connu une hausse spectaculaire (+85%) en passant de 800M\$ en 2011 à 1500 M\$ en 2020.

Cette croissance du budget gouvernemental en soutien à l'énergie nucléaire se matérialise principalement dans :

-le domaine des réacteurs avec un engagement important dans la phase de démonstration des nouveaux concepts,

-dans l'amont du cycle avec un investissement ciblant notamment les combustibles résistants aux accidents,

-et enfin sur les infrastructures équipant les laboratoires nationaux.

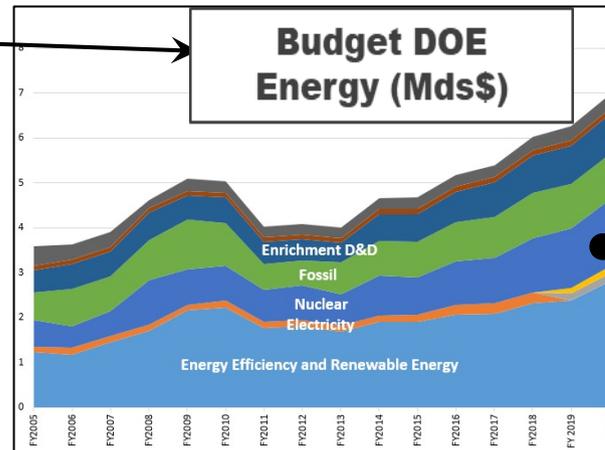
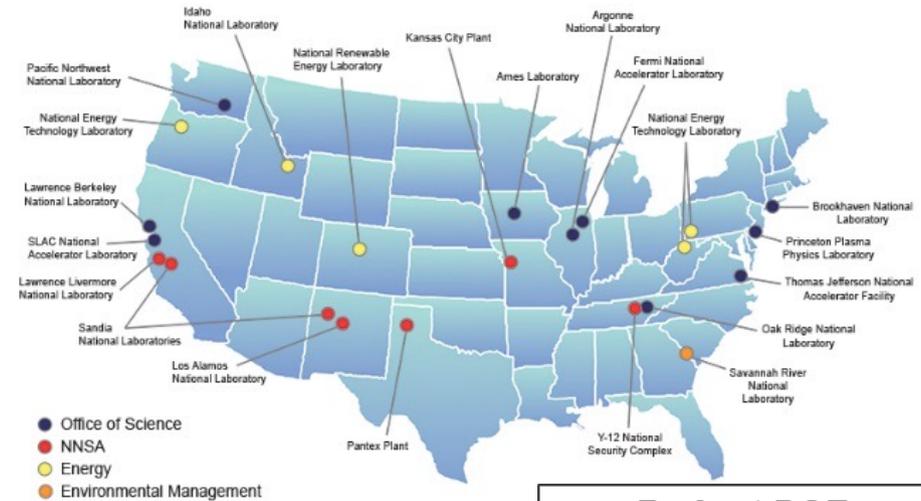
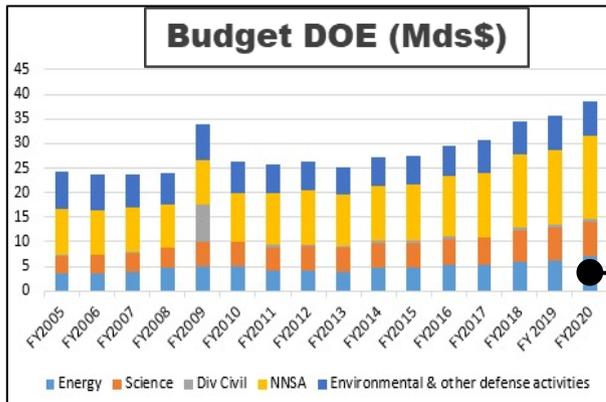
→ Le retour à une domination américaine sur la scène internationale passera donc par de nouveaux concepts et produits, les SMR et les réacteurs avancés.

3. Perspectives à moyen et long terme du parc nucléaire civil aux Etats-Unis

Budget du Department of Energy (DOE)



17 Laboratoires Nationaux
39 Mds\$ (1,5 Md\$ pour le nucléaire)
110 000 agents



Budget DOE Nuclear Energy (1493 M\$)

Concepts réacteurs :	267
Advanced Reactors dem :	230
Amont du cycle :	42
Advanced Fuels :	126
Aval du Cycle :	138
Simulation :	113
INL et infrastructures :	568
Divers :	10

3.c Les SMR et les Advanced Reactors

-Generating Electricity Managed by Intelligent Nuclear Assets (GEMINA): programme du DOE, visant à réduire les coûts d'opération & maintenance (O&M) de ces futurs designs à 2\$/MWh contre 13 \$/MWh pour la flotte actuelle.

-Transformational Reactor Challenge (TRC) de l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL) du DOE : imprimer en 3D la totalité du cœur d'un High-Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), qui devrait être opérationnel en 2023, afin de démontrer la faisabilité de la fabrication additive pour l'industrie nucléaire.

3.d Le Programme ARDP : Advanced Reactor Development Program

Il s'articule autour de 3 voies :

Voie 1 : Advanced Reactors Demonstrations : construction de 2 démonstrateurs d'ici 5-7 ans, s'appuyant sur un budget total du DOE pouvant atteindre 4 Mds\$ (2 x 2) ;

- Natrium (SMR de type RNR-Na)
- Xe-100 (HTGR)

Voie 2 : Risk Reduction for Future Demonstrations : soutien de 2 à 5 autres concepts moins matures pour en accompagner le développement, bénéficiant d'un budget total du DOE pouvant atteindre 400 M\$;

- Hermes Reduced-Scale Test Reactor: 4G, zero power, caloporteur = sels fondus, combustibles TRISO
- eVinci Microreactor
- BWXT Advanced Nuclear Reactor (BANR) : microréacteur transportable, utilisant un combustible à particule TRISO
- Holtec SMR-160 (REL)
- Southern Molten Chloride Reactor Experiment : « zero power » à sels fondus (MCRE)

3.d Le Programme ARDP : Advanced Reactor Development Program

Voie 3 : Advanced Reactor Concepts - 20 : soutien d'autres concepts encore moins matures pouvant être démontrés d'ici 2035, avec un financement global du DOE pouvant s'élever à 40 M\$.

- Inherently Safe Advanced SMR for American Nuclear Leadership –conceptual design of a seismically isolated advanced sodium-cooled reactor facility that builds upon the initial pre-conceptual design of a 100 MWe reactor

- Fast Modular Reactor Conceptual Design – General Atomics (San Diego, CA) - fast modular reactor conceptual design with verifications of key metrics in fuel, safety, and operational performance. The design will be for a 50-megawatt electric (MWe) fast modular reactor (FMR).

- Horizontal Compact High Temperature Gas Reactor – Massachusetts Institute of Technology (MIT) (Cambridge, MA) will mature the Modular Integrated Gas-Cooled High Temperature Reactor (MIGHTR) concept from a pre-conceptual stage to a conceptual stage to support commercialization.

Cas du Canada

Contexte de forte croissance de la demande électrique, choix d'intégrer l'atome parmi ses stratégies de lutte contre le réchauffement climatique.

En 2016, dans un rapport remis à la convention cadre des Nations unies, sur les six scénarii énergétiques présentés par le Canada, cinq prévoient un accroissement de la capacité nucléaire installée, d'un facteur sept à huit selon trois d'entre eux.

A l'origine de ces prévisions, le contexte énergétique national, caractérisé par :

- La perte de 3,1 GWe sur un total de 13,5 GWe (dont 12,9 GWe dans l'Ontario) de capacité totale installée du fait de la fermeture prévue en 2024 et 2025 des six réacteurs de Pickering opérés par OPG ;
- La décision de sortie du charbon en 2030 ;
- L'adoption du principe d'une taxe carbone sur le gaz ;
- L'impact environnemental de moins en moins acceptable des projets hydrauliques ;
- Des conditions environnementales peu favorables au développement du solaire.



Depuis, le pays promeut la technologie des SMR,

Des sites ont par ailleurs été identifiés pour la construction de réacteurs nucléaires, en particulier de SMR:

- Le site de Darlington B :
 - accueille actuellement 4 réacteurs exploités par OPG.
 - Permis (Site Preparation License) obtenu du régulateur CNSC en vue d'un ajout de 4,8 GWe supplémentaire, valable jusqu'en 2022.
 - Pour des questions économiques, plutôt que des CANDU, dont le coût de construction de 2 unités de 750 MWe s'élèverait, du fait de la faiblesse de la chaîne d'approvisionnement, à 20 Mds USD (estimation 2012), des SMR seraient envisagés ;
- Celui de Chalk River : déjà certifié, proposé par son propriétaire, les Canadian Nuclear Laboratories (CNL), pour y implanter des SMR.

2/ En 2020, OPG annonçait avoir retenu trois concepts de SMR, qu'il souhaite co-développer en partenariat avec chacun de leurs concepteurs :

- Le SMR BWRX-300 de GE Hitachi (GEH) ;
- L'« Integral Molten Salt Reactor –IMSR- » de Terrestrial Energy ;
- Le SMR Xe-100 d'X-Energy.

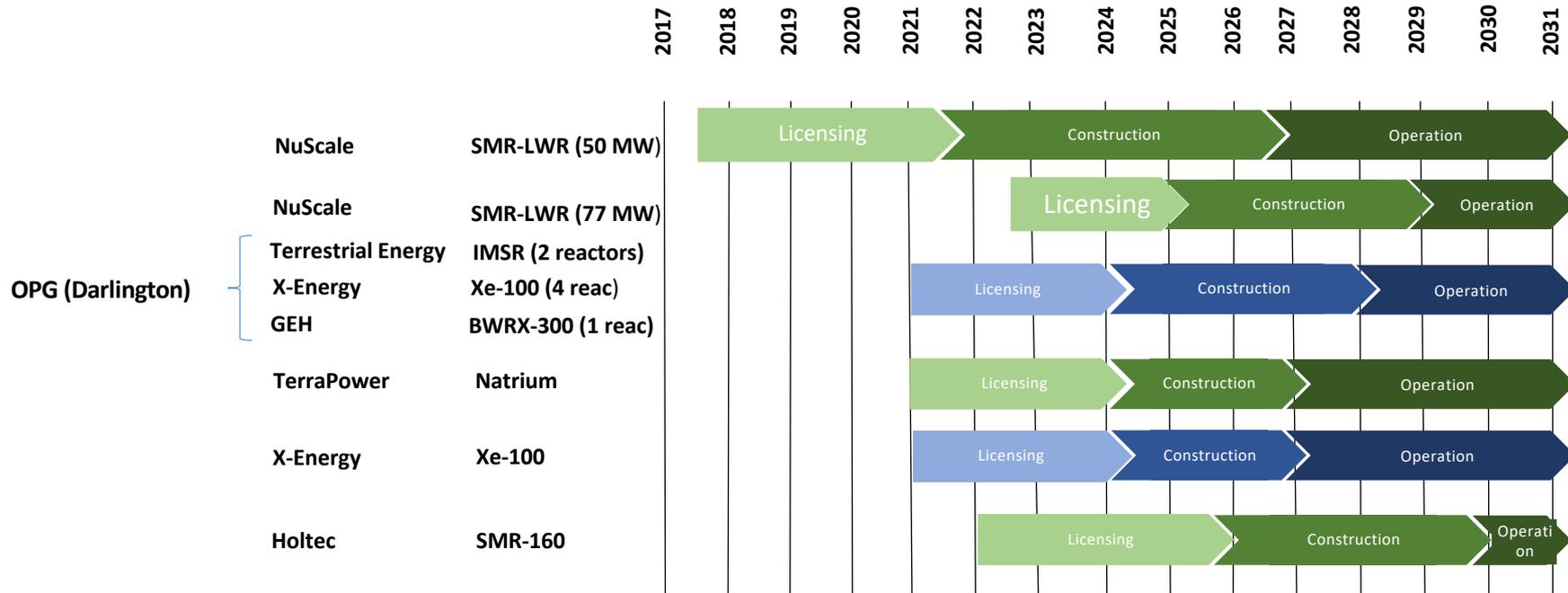
Nombre de Projets ont vu le jour, avec des réalisations commerciales prévues pour la fin de la décennie

Les SMR en Amérique du Nord

Tableau 5 : Designs de SMR les plus avancés en Amérique du Nord

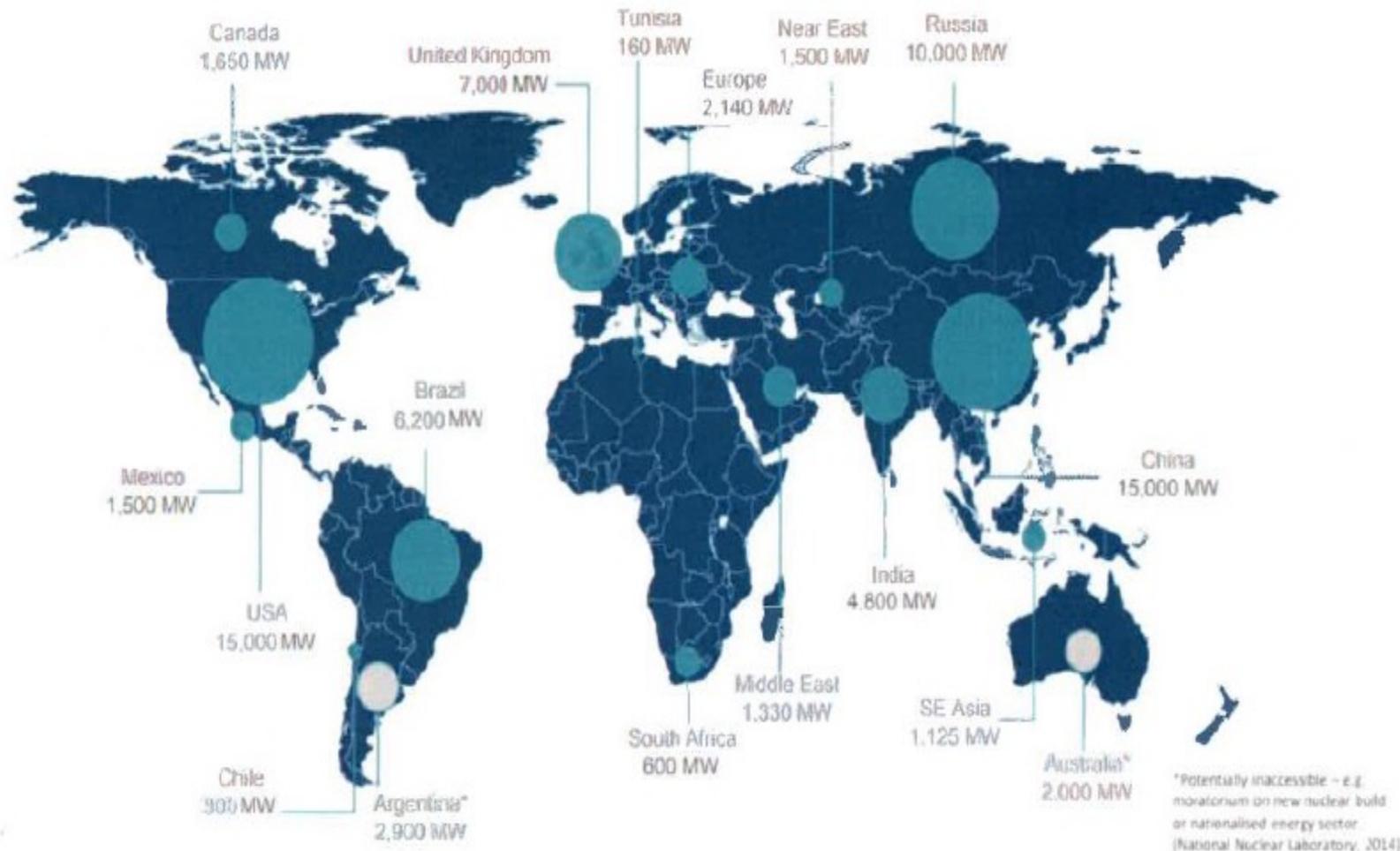
Entreprise	Réacteur	Type	Puissance (MWe)	Pays d'Origine	NRC Certification (6 phases)	CNSC Vendor Design Review (3 phases)
NuScale	NuScale	REP	60	États-Unis	Phase 5	Phase 2
GE-Hitachi	BWRX-300	REB	300	États-Unis	Phase 1	Phase 2
Holtec	SMR-160	REP	160	États-Unis	Pré-Application	Phase 2
Terrestrial Energy	IMSR	RSF-F	190	Canada	Pré-Application	Phase 2
Advanced Reactor Concepts	ARC-100	RNR-Na	100	États-Unis	Pas de demande	Phase 1
X-energy	Xe-100	HTGR TRISO	75	États-Unis	Pré-Application	Phase 2
SNC-Lavalin	CANDU-SMR	Eau Lourde	300	Canada	Pas de demande	Application à venir
Moltex Energy	SSR	RSF-F Dual	150	Royaume-Uni	Pas de demande	Phase 1
Kairos Power	KP-FHR	RSF-F TRISO	140	États-Unis	Pré-Application	Pas d'application
TerraPower	MCFR	RSF-C	Variable	États-Unis	Pré-Application	Pas d'application
TerraPower & GEH	Natrium	RNR-Na	345	États-Unis	Pré-Application à venir	Pas d'application

SMR Development timeframe (based on information given by the developers)



Perspectives de déploiement de SMR à travers le monde (source: NuScale)

A Global Market Opportunity for SMRs



Potential global SMR market estimated at 65-85 GW by 2035 – a market value up to \$550B

Les combustibles avancés

Les réacteurs avancés vont utiliser des combustibles bien différents des réacteurs à eau légère qui constituent la flotte américaine actuelle, nécessitant du HALEU avec des taux d'enrichissement proches de 20%.

En particulier, les réacteurs à haute température refroidis au gaz (HTGR) vont être alimentés en TRISO (*Tristructural-Isotropic*) :

Trois compagnies sont en ligne pour obtenir une certification pour leurs modèles de TRISO par la NRC afin d'alimenter de futurs HTGR : d'un cote GNF et X-Energy en collaboration, BWXT de l'autre.

Le HALEU sera également nécessaire pour les autres types de réacteurs avancés utilisant des combustibles sous forme de sels, ou encore métalliques pour réacteurs au sodium.

L'émergence d'une économie de l'hydrogène pourrait constituer dès 2030 aux États-Unis un secteur d'une valeur de 140 milliards de dollars (G\$) par an, employant 700 000 personnes.

Ces estimations sous-tendent les plans de la nouvelle administration Biden en matière d'énergie, avec notamment la promesse extrêmement ambitieuse de décarboner le système électrique américain à l'horizon 2035.

H2@Scale: programme du DOE, clé de voûte de la stratégie fédérale pour déployer l'hydrogène de façon holistique dans un système énergétique toujours plus intégré. Il se décline en pratique par des partenariats public-privé de recherche concernant aussi bien la production, le stockage, l'acheminement et les applications de ce vecteur.

Pour le couple nucléaire-hydrogène, quatre initiatives majeures, menées conjointement par des électriciens et les laboratoires nationaux, ont émergé :

1/ Exelon et Nel Hydrogen pour l'utilisation sur site :

-Exelon recevra du DOE 3,6 M\$ afin d'installer un électrolyseur « classique » à membrane échangeuse de proton de 1 mégawatt électrique (MWe) développé par l'industriel norvégien Nel Hydrogen sur une de ses centrales équipées de REB.

-Le projet, d'un coût total estimé de 7,2 M\$, fera la démonstration d'un couplage complet nucléaire-hydrogène sur site dès 2023.

2/ Energy Harbor pour les utilisations hors site :

-Energy Harbor retenu en 2019 par le DOE pour un projet d'installation d'électrolyseur PEM sur une de ses centrales, celle de David-Besse dans l'Ohio. -

-Objectif : évaluer les gains de compétitivité associés pour les exploitants sur un marché dit « dérégulé » de l'électricité, qui pourraient ainsi choisir de produire de l'hydrogène avec l'électricité générée par une centrale plutôt que de vendre à perte lors des périodes de forte production des sources renouvelables intermittentes.

-Projet mené avec l'INL, le DOE apportant un financement de 9 M\$ sur deux ans.

3/ Xcel pour la démonstration d'un électrolyseur haute-température :

- L'exploitant nucléaire Xcel installera un électrolyseur en phase vapeur (high temperature steam electrolysis – HTSE) sur la centrale de Prairie Island.
- Une très faible partie de la vapeur du circuit secondaire d'un des deux réacteurs à eau pressurisée sera extraite entre les turbines haute et basse pression afin de préchauffer l'eau pure de l'électrolyseur d'une capacité avoisinant 1 MWe, permettant un gain de 33 % de rendement énergétique comparé à un électrolyseur PEM. Projet à 10 M\$, financé à 80 % par le DOE.

4/ Arizona Power System et la réversibilité des piles à combustible :

- Arizona Power System (APS) a lancé une étude en collaboration avec le DOE pour évaluer l'intérêt d'installer des électrolyseurs de type PEM réversibles (piles à combustible) sur sa centrale de Palo Verde.
- La réversibilité permettrait d'utiliser l'hydrogène produit pour produire de l'électricité en période de pic de demande, la centrale produisant de l'hydrogène lorsque la consommation électrique est faible.

Marchés visés

BWRX 300 :

- Pologne : 4 à 6 unités : Négociations exclusives
- Estonie : 2 à 4 unités : Négociations exclusives
- UK : 10 unités : tender face à l'AP1000
- Canada : 1 unité : option sur 4 au Saskatchewan (tender face à 3 modèles)

NuScale :

- UK
- Pologne
- Ukraine
- Roumanie
- République Tchèque
- Bulgarie (?)

Discussions en cours

AP 1000:

- UK: 2 unités en compétition avec SMR
- Ukraine: 5 unités Négociations exclusives
- Pologne: 3 x 2

MERCI DE VOTRE ATTENTION !