



## **LES SMR**

**DEUX EXEMPLES : NUSCALE ET NUWARD**

**Bernard Laponche, Jean-Luc Thierry**

novembre 2023



## Table des matières

<b>SYNTHESE</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
<b>1. LES REACTEURS NUCLEAIRES DE FAIBLE PUISSANCE</b> .....	<b>7</b>
1.1 DES PETITS REACTEURS SANS ESPoir DE MODULARITE.....	7
1.2 DES PETITS REACTEURS AUX ETATS-UNIS.....	7
1.2.1 Applications civiles.....	8
1.2.2 Installations conçues à des fins militaires.....	8
1.3 PETITS REACTEURS NUCLEAIRES CIVILS CANDIDATS SMR EN FONCTIONNEMENT OU EN CONSTRUCTION.....	9
1.3.1 En Russie.....	9
1.3.2 En Chine.....	9
1.3.3 En Argentine.....	10
<b>2. UNE SELECTION PAR L'AIEA DE PROJETS SIGNIFICATIFS</b> .....	<b>11</b>
<b>3. DESCRIPTION DE DEUX PROJETS CANDIDATS SMR : NUSCALE ET NUWARD</b> .....	<b>15</b>
3.1 LE PROJET NUSCALE.....	15
3.1.1 Le réacteur d'un module NuScale.....	15
3.1.2 Le module NuScale.....	17
3.1.3 La centrale NuScale.....	18
3.2 LE PROJET NUWARD.....	19
3.2.1 Le réacteur d'un module NUWARD.....	19
3.2.2 Le module NUWARD.....	21
3.2.3 La centrale NUWARD.....	21
<b>4. ANALYSE TECHNIQUE, DE SURETE ET ECONOMIQUE DES DEUX PROJETS</b> .....	<b>23</b>
4.1 LES CENTRALES.....	23
4.1.1 NuScale.....	23
4.1.2 NUWARD.....	23
4.2 LES MODULES.....	24
4.3 LES REACTEURS.....	24
4.3.1 Une différence importante pour la circulation de l'eau de refroidissement :.....	24
4.3.2 Les générateurs de vapeur.....	25
4.3.3 Les soupapes du pressuriseur.....	25
4.3.4 Impact de la fluence sur la fragilité de la cuve du réacteur.....	25
4.3.5 Chargement et déchargement du combustible.....	25
4.3.6 Le démantèlement des installations.....	26
4.4 LA SURETE DU PROJET NUSCALE.....	26
4.4.1 Le processus d'instruction du projet NuScale.....	26
4.4.2 L'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire des Etats-Unis sur le projet NuScale.....	27
4.4.3 Un avis de l'« Union of Concerned Scientists ».....	28
4.4.4 Une étude récente pour l'« Environmental Working Group ».....	30
4.5 L'INSTRUCTION DE SURETE DU PROJET NUWARD.....	32
4.5.1 Le Dossier d'option de sûreté de NUWARD.....	32
4.5.2 Première information de l'ASN.....	33
4.5.3 Une revue internationale du projet NUWARD.....	33
<b>5. LES COUTS</b> .....	<b>35</b>
5.1 LE COUT DE CONSTRUCTION D'UNE PREMIERE CENTRALE NUSCALE.....	35
5.2 LE PRIX VENDU DU MWH.....	35
5.2.1 Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA).....	35
5.2.2 Environmental Working Group (EWG).....	37
5.3 L'AVENIR DOUTEUX DU PROJET NUSCALE.....	37
5.3.1 L'échec du projet NuScale actuel.....	37
5.3.2 Vers un nouveau projet.....	39
<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>40</b>
1. La route est longue.....	40
2. Un SMR, pour quoi faire ?.....	41
3. SMR et climat.....	42
ANNEXE 1 : NOUVELLE TENTATIVE PRO-SMR AUX ETATS-UNIS EN 1955.....	43
ANNEXE 2 : NOTE D'INFORMATION DE L'ASN DU 4 JUILLET 2022.....	45
ANNEXE 3 : IRSN, « SAVOIR ET COMPRENDRE » SUR LES SMR.....	46
ANNEXE 4 : LETTRE DE LA NRC A NUSCALE DU 15 NOVEMBRE 2022.....	47
ANNEXE 5 : PROGRAMME DE TRAVAIL DES AUTORITES DE SURETE SUR LE PROJET NUWARD.....	49

## SYNTHESE

Depuis quelques années, un nouveau type des réacteurs équipant des centrales nucléaires productrices de chaleur et, ou d'électricité, est apparu sur la scène mondiale : le SMR, « Small Modular Reactor », « Petit réacteur modulaire » en français.

Historiquement, nombre de « petits réacteurs » de filières très différentes ont fonctionné, petits par leur puissance par rapport aux réacteurs des centrales électronucléaires actuellement en fonctionnement dans le monde, notamment pour des usages de propulsion de navires, par exemple les sous-marins atomiques de la filière à uranium enrichi à eau sous pression.

La qualité « modulaire » d'un SMR est obtenue par sa fabrication en série dans une usine dédiée. Il serait ensuite transporté sur site d'exploitation où il serait connecté au système de production de chaleur ou d'électricité afin de constituer un « module » puis une « centrale », dits « SMR ». C'est sur le gain espéré sur le coût unitaire du réacteur par l'effet de série que repose l'espoir des promoteurs des SMR, conscients à juste titre du coût beaucoup trop élevé d'un modèle construit sur site.

Actuellement, d'après l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), il existe près d'une centaine de projets « candidats » au titre de SMR, certains basés sur des prototypes existants (« *small* » mais non « *modular* »), la plus grande partie n'existant que sur le papier, de puissances diverses, depuis les réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression, filière connue, jusqu'à des réacteurs à neutrons rapides au plutonium, des réacteurs au thorium ou à sels fondus, etc. Il n'existe pas aujourd'hui dans le monde de réacteur SMR.

Outre une présentation générale de la problématique SMR et la sélection de projets de l'AIEA, ce rapport étudie deux projets de réacteurs « candidats SMR » de la filière à uranium enrichi et eau sous pression : NuScale aux Etats-Unis et NUWARD en France.

De nombreuses questions relatives à la sûreté restent en suspens sur le modèle NuScale et le Dossier d'options de sûreté (DOS) du réacteur NUWARD, étudié par les autorités de sûreté française, tchèque et finlandaise n'est pour l'instant pas accessible

Les défis techniques à relever pour garantir la sûreté des SMR ne sont pas qualitativement différents de ceux des grands réacteurs. À ces défis, des incertitudes s'ajoutent, dues aux caractéristiques amenées par le modèle « compact » inédit du réacteur qui contient dans une même enceinte le cœur du réacteur (lieu de la réaction de fission nucléaire), les barres de contrôle, le ou les générateurs de vapeur, le pressuriseur.

Le pari SMR n'est pas seulement risqué en termes de facture, mais également en termes d'agenda climatique, de technique et de sûreté, en plus de comporter les externalités négatives des installations nucléaires telles que les risques d'accidents nucléaires et la production de déchets que nous reléguons aux générations futures, au moins pour les 100 000 prochaines années. D'autres risques apparaissent avec ces réacteurs, dont les risques de prolifération.

## INTRODUCTION

Depuis quelques années, dans le monde du nucléaire, un nouvel objet passionne les gouvernements, les entreprises et les médias : le SMR, en anglais « Small Modular Reactor » et en français, « Petits réacteurs modulaires. Tout le monde parle de SMR, sans toujours savoir ce que cela veut dire.

Historiquement, il a existé de nombreux « petits réacteurs » de puissance électrique faible ou très faible par rapport à celle des réacteurs de puissance des centrales nucléaires productrices d'électricité en fonctionnement aujourd'hui dans le monde.

Ce qui est nouveau avec le SMR est moins la puissance réduite du réacteur que la caractéristique de « modulaire » basée sur le fait que la demande d'un SMR d'un type donné pourrait être suffisamment importante (de l'ordre de 50 à 100 exemplaires) pour permettre une fabrication en série, dans une usine construite à cet effet, d'un réacteur à la fois compact et pas trop lourd afin qu'il puisse être transporté de l'usine à son site d'exploitation où il pourrait produire de la chaleur ou de l'électricité, dans ce cas grâce à un turbo-alternateur.

C'est la combinaison d'un réacteur compact et de la standardisation de sa fabrication qui permettent aux promoteurs et aux supporters les plus fervents de SMR de promettre des coûts acceptables pour la production d'électricité.

Même dans cette hypothèse, les problèmes liés au site d'implantation et à la capacité locale de gérer cette technique nouvelle sont loin d'être négligeables, surtout dans les pays en développement, cible visée par nombre de promoteurs.

Actuellement, d'après l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), il existe près d'une centaine de projets de SMR, certains basés sur des prototypes existants (« *small* » mais non « *modular* »), la plus grande partie n'existant que sur le papier, de puissances diverses, depuis les réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression, filière connue, jusqu'à des réacteurs à neutrons rapides au plutonium, des réacteurs au thorium ou à sels fondus, etc.

Il faut donc insister sur le fait que, pour l'instant, si de nombreux modèles de petits réacteurs ont été historiquement développés et que certains d'entre eux sont en fonctionnement pour des usages particuliers, notamment la propulsion navale, il n'existe pas aujourd'hui de SMR dont le réacteur eut été fabriqué en usine et livré sur le site d'une « mini-centrale » à usage civil.

Il est clair que la nécessité de construire une usine de fabrication des réacteurs nucléaires conduira à l'abandon de beaucoup de projets, même avant le stade de prototype, évidemment très cher, d'autant plus que les Etats et les entreprises présentent eux-mêmes plusieurs projets et que la concurrence est féroce pour imposer l'un des siens.

Afin de permettre au lecteur de faire un premier pas dans la « galaxie SMR », nous avons choisi de présenter dans cette note deux projets, parmi les plus simples à comprendre, de réacteurs à uranium enrichi à eau sous pression candidats au titre de SMR : le projet NuScale aux Etats-Unis et le projet NUWARD en France.

Le Chapitre 1 présente les « petits réacteurs » historiques ou en fonctionnement qui sont les précurseurs des SMR.

Le Chapitre 2 présente la sélection effectuée par l'AIEA de réacteurs candidats au statut de SMR.

Le Chapitre 3 présente de façon détaillée les caractéristiques des projets NuScale et NUWARD.

Le Chapitre 4 analyse et compare les deux projets sur les plans technique, de sûreté et économique.

**L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) définit de la façon suivante les SMR (Small Nuclear Reactor) ou PRM (Petit réacteur modulaire, en français)<sup>1</sup> :**

*« Les SMR sont des réacteurs nucléaires avancés d'une puissance pouvant atteindre 300 MW de puissance électrique, dont les composants et les systèmes peuvent être fabriqués en usine, puis transportés sous forme de modules sur des sites pour y être installés en fonction de la demande ».*

*« La communauté nucléaire mondiale a généralement défini comme "petits" les réacteurs d'une puissance inférieure ou égale à 300 MW. Les microréacteurs sont une sous-catégorie des SMR dont la puissance est inférieure à 10 MW. Les niveaux de puissance et les dimensions maximales sont limités par la capacité de fabrication et de transport, qui est une caractéristique essentielle des SMR ».*

*« La modularisation est le processus par lequel les SMR sont conçus et assemblés à partir de blocs de construction plus petits, ou modules. Les modules de SMR peuvent être construits dans une usine puis transportés sur un site, ce qui permet de mener des activités de construction parallèles et d'améliorer la productivité. Cette technique vise à normaliser les composants dans la mesure du possible, à fabriquer les modules en usine et à simplifier l'installation sur site des modules pré-assemblés ».*

---

<sup>1</sup> « Advances in small modular reactors technology development »  
[//https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf)

# 1. LES REACTEURS NUCLEAIRES DE FAIBLE PUISSANCE

## 1.1 DES PETITS REACTEURS SANS ESPOIR DE MODULARITE

Dès les années 1940, des réacteurs de faible puissance ont été développés, dont certains allaient donner lieu à la construction de réacteurs plus puissants pour la production d'électricité.

La première « pile atomique » (Chicago, équipe d'Enrico Fermi, 1942) ayant montré pour la première fois la réalisation de la fission et de la réaction en chaîne, de puissance près de 0, était constituée de barres d'uranium naturel insérées dans un massif de graphite (la « pile ») de 400 tonnes. C'était bien un petit réacteur mais qui ne pourrait jamais devenir « modulaire ».

Ce réacteur allait donner naissance à la filière uranium naturel graphite gaz (UNGG), développée notamment en France avec les réacteurs de faible puissance G1, G2, G3 à Marcoule pour la production de plutonium pour les besoins militaires, puis six réacteurs d'EDF pour la production d'électricité (Chinon A 1,2,3 ; Saint-Laurent 1,2 ; Bugey 1).

Le premier réacteur construit en France, la pile ZOE (Z pour 0 énergie, O pour oxyde d'uranium naturel, le combustible, et E comme eau lourde, le modérateur) d'une puissance thermique qui sera amenée jusqu'à 150 kW, comportait 5 tonnes d'eau lourde, entourées d'un mur de graphite de 90 cm d'épaisseur et d'une enceinte en béton de 1,5 m.

Parallèlement les réacteurs « à eau lourde » comme modérateur furent développés au Canada dès la Seconde Guerre mondiale pour donner la filière CANDU (CANada Deuterium, Uranium) de réacteurs pour la production d'électricité (mais aussi, en Inde notamment, pour la production de plutonium à usage militaire).

De leur côté, les petits réacteurs à uranium enrichi et eau ordinaire sous pression, PWR ou REP, développés initialement pour les besoins de propulsion dans le domaine militaire, allaient être les précurseurs de la filière de production d'électricité d'origine nucléaire la plus répandue aujourd'hui dans le monde, mais loin d'un système « modulaire ».

### Remarque

Le terme « petit » peut être trompeur en matière de réacteur nucléaire. Un réacteur de moins de 300 MW de puissance électrique peut nécessiter des infrastructures importantes et avoir des implications considérables en termes de sûreté, de démantèlement ou de budget.

D'autre part, de nombreux projets de SMR concernent des applications essentiellement thermiques (chauffage urbain, process industriels, dessalement de l'eau de mer) ou de la cogénération (électricité + chaleur). Dans le cas de la production d'électricité, il est nécessaire de bien distinguer la puissance électrique et la puissance thermique (chaleur produite dans le réacteur) qui peut être 3 à 5 fois supérieure.

## 1.2 DES PETITS REACTEURS AUX ETATS-UNIS

Si pendant la « Guerre froide » les deux principales puissances mondiales ont rivalisé d'imagination technique pour mettre au point de nouveaux types de petits réacteurs nucléaires, c'est aux Etats-Unis que les petits réacteurs, parfois avec l'espoir de les rendre modulaires, furent les plus développés<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Il y a eu de nombreux projets de petits réacteurs en URSS et la Russie est encore le seul pays au monde à utiliser des réacteurs embarqués sur des navires civils (brise-glaces, cargos). Il y a même eu un réacteur sur chenilles, le TES-3 (<https://nucet.pensoft.net/article/89356>) qui a démarré en 1961.

### 1.2.1 Applications civiles

Un article d'avril 2015, « *The forgotten history of small modular reactors* »<sup>3</sup> (en français : « L'histoire oubliée des petits réacteurs nucléaires »), présente un rappel historique de ces tentatives :

*« Il se trouve que l'AEC<sup>4</sup> (prédécesseur du ministère/département américain de l'énergie et de la commission de réglementation nucléaire) s'intéressait vivement aux petits réacteurs. À partir des années 1950, un certain nombre de petits réacteurs civils ont été proposés aux États-Unis, et finalement 17 réacteurs d'une puissance inférieure à 300 MW ont été mis en service. Aucun d'entre eux n'est encore en service aujourd'hui.*

*Nombre de ces projets ont été soutenus par l'AEC, qui a fait la promotion de l'énergie nucléaire auprès des compagnies d'électricité américaines. Sa première série de financements, annoncée en janvier 1955, était destinée à de petites unités pouvant servir de "réacteurs prototypes qui contribueraient au développement de grands réacteurs", a écrit Wendy Allen dans son rapport de 1977 intitulé Nuclear Reactor for Generating Electricity : U.S. Development From 1946 to 1963<sup>5</sup>.*

*Sur les quatre propositions soumises, l'AEC en a financé trois : Yankee Rowe (à ne pas confondre avec le Vermont Yankee, plus récent et beaucoup plus grand), Dresden-I et Fermi-I. Parmi ces derniers, Fermi est le plus connu, car il a subi une fusion en 1966, décrite de manière pittoresque dans le livre de John G. Fuller « We Almost Lost Detroit », publié en 1975, et dans la chanson de Gil Scott-Heron portant le même titre. Les deux autres réacteurs ont relativement bien réussi à atteindre les objectifs qu'ils s'étaient fixés.*

*Comme nous l'avons mentionné, l'AEC considérait ces réacteurs comme des prototypes de choses plus importantes à venir. Elle préférait les grands réacteurs aux petits pour une raison simple : les économies d'échelle. »*

On trouvera en Annexe 1 la poursuite des tentatives de retour à la notion de SMR aux États-Unis.

### 1.2.2 Installations conçues à des fins militaires

Aux États-Unis, l'Aviation, l'Armée de terre et la Marine tentèrent d'utiliser des petits réacteurs.

Dans le domaine de l'aviation, le programme poursuivi de 1946 à 1961 par l'Air Force afin de construire un moteur nucléaire pour les bombardiers lourds à longue portée fut reconnu comme un échec par le Président J. F. Kennedy.

Du côté de l'Armée de terre, les petits réacteurs construits sont ceux qui se rapprochent le plus des projets actuels. Le programme a consisté en la construction de 8 petits réacteurs. Plusieurs d'entre eux étaient situés dans des zones lointaines et dans des conditions hostiles et isolées où l'utilisation de SMR était a priori favorable : Antarctique, Groenland et sites militaires éloignés ou isolés. Le document suivant de 1969 résume les résultats de l'expérience qui ne fut pas renouvelée :

*« L'expérience de ces sites n'est pas encourageante. La centrale PM-3A de la station McMurdo en Antarctique, par exemple, "a connu plusieurs dysfonctionnements, notamment des fuites dans son système primaire [et] des fissures dans l'enceinte de confinement qui ont*

---

<sup>3</sup> M. V. Ramana, The forgotten history of small modular reactors – Economics killed small nuclear power plants in the past – and probably will keep doing so, IEEE Spectrum April 2015

<https://spectrum.ieee.org/the-forgotten-history-of-small-nuclear-reactors#toggle-gdpr>

<sup>4</sup> AEC : Atomic Energy Commission – Comparable au CEA (Commissariat à l'énergie atomique) en France.

<sup>5</sup> <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2007/R2116.pdf>



*dû être soudées", selon l'histoire officielle du programme par Lawrence H. Suid. Les fuites de la centrale (qui appartenait à la marine américaine et était exploitée par elle) ont entraîné une contamination importante, et 14 400 tonnes de terre ont été retirées et expédiées à Port Hueneme, une base navale située au nord de Los Angeles, pour y être éliminées.*

*Contrairement aux réacteurs sous-marins de la Marine, les réacteurs de l'Armée de terre pouvaient être remplacés par des générateurs diesel conventionnels et, en 1976, l'Armée de terre a annulé le programme. Comme l'écrit Suid, l'armée a conclu "que le développement de centrales nucléaires complexes et compactes de conception avancée était coûteux et prenait du temps... que les coûts de développement et de production de ces centrales sont en fait si élevés qu'ils ne peuvent être justifiés que si le réacteur a une capacité unique et répond à un objectif clairement défini soutenu par le ministère de la défense... [et que] l'armée et le Pentagone devaient être prêts à fournir un soutien financier proportionnel à l'effort de développement de l'AEC dans le domaine nucléaire ».*

Par contre, l'utilisation de petits réacteurs à uranium enrichi et eau sous pression (PWR ou REP en français) ou à eau bouillante (BWR) pour les moteurs de sous-marins et de porte-avions nucléaires fut un succès, permettant en particulier aux sous-marins de rester en mer pour de longues périodes sans être obligés de se recharger en carburant.

Mis au point aux États-Unis, ces moteurs nucléaires équipent maintenant les flottes similaires au Royaume-Uni, en France, en Russie, en Chine et en Inde.

Outre qu'ils ont servi de modèle à la plupart des réacteurs électronucléaires du parc mondial actuel, les réacteurs de propulsion navale ont également inspiré, du fait de leur compacité, plusieurs modèles de SMR. Mais ces installations étant soumises au secret militaire, il est difficile d'en tirer un bilan puisque la plupart des difficultés techniques ou les problèmes d'irradiation du personnel ont été le plus souvent passés sous silence. Certains experts estiment néanmoins que des problèmes nucléaires ont été impliqués dans le naufrage de plusieurs sous-marins atomiques américains et soviétiques.

### **1.3 PETITS REACTEURS NUCLEAIRES CIVILS CANDIDATS SMR EN FONCTIONNEMENT OU EN CONSTRUCTION**

#### **1.3.1 En Russie**

Deux réacteurs KLT-40S à uranium enrichi et eau sous pression, chacun d'une puissance électrique de 35 MW ont été installés par Rosatom sur une barge pour constituer la « centrale nucléaire sur barge » Akademik Lomonosov.

La centrale n'a pas pour but la propulsion de la barge mais la fourniture d'électricité et de chaleur aux communautés locales d'une région isolée.

Elle a été raccordée au réseau en 2019 à Pevek, ville d'environ 4 000 habitants du district de Tchoukotka, principal port de la mer de Sibérie orientale et la ville la plus au Nord de la Russie. Actuellement, l'unité 1 est à l'arrêt pour remplacement des générateurs de vapeur. Seule l'unité 2 fournit de l'électricité (20 MW) mais ses générateurs de vapeur devront également être changés en 2024<sup>6</sup>

Rosatom travaille sur un réacteur de la même filière, plus puissant (VBER-300) pour des utilisations navales et éventuellement terrestres. Une barge équipée de deux réacteurs atteindrait ainsi une puissance de 600 MW.

#### **1.3.2 En Chine**

Construction d'une unité de démonstration de deux réacteurs HTR-PM (*High Temperature Reactor – Pebble bed module*, en français : réacteur à haute température, cœur du réacteur constitué de « boulets » de combustible nucléaire et de graphite) d'une puissance de 105 MW,

<sup>6</sup> <https://peretok.ru/news/generation/26970/>

soit 210 MW de puissance électrique pour les deux « modules ». Ce réacteur de démonstration est actuellement implanté dans la province de Shandong (côte est, bord de mer).

Un autre candidat, plus crédible au statut de SMR, est le réacteur ACP100 (Linlong 1), de 125 MW, à uranium enrichi et eau sous pression, conçu à partir de l'ACP 1000. Ce réacteur est en construction depuis juillet 2021 à Changjiang, province île de Hainan, à l'extrême sud de la Chine<sup>7</sup>, et devrait démarrer en 2025.

D'autre part, ont été lancées la construction d'une première barge nucléaire équipée d'un ACPR 50 (uranium enrichi et eau sous pression de 60 MW) et celle d'un réacteur prototype de petite puissance (2 MWth), refroidi au sel fondu, le TMSR-LF1, dans une province chinoise proche de la Mongolie (Gansu)<sup>8</sup>.

### 1.3.3 En Argentine

Le réacteur « Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM) » est un prototype de petit réacteur intégré à eau légère pressurisée dont la construction est actuellement à un stade avancé en Argentine, près de Buenos Aires<sup>9</sup>. Il aurait une capacité de 27 MW de puissance électrique. Toutefois, son démarrage, initialement prévu pour 2017 est maintenant envisagé pour 2027<sup>10</sup>.

Une future version plus grande est prévue, d'une puissance comprise entre 150 et 300 MW. Tous les composants du système de refroidissement primaire ont été incorporés dans la cuve du réacteur. L'autorité de régulation a établi une approche d'autorisation par étapes adaptée à ce prototype, afin de faire la démonstration des étapes de sûreté spécifiques avant de passer à la phase suivante du projet.

Le 31 octobre 2023, le promoteur Nucleoelectrica a signé un accord avec la Commission nationale de l'énergie atomique (CNEA) pour le développement du projet CAREM<sup>11</sup>.

---

<sup>7</sup> World nuclear news, Core module completed for Chinese SMR, July 2023

<https://world-nuclear-news.org/Articles/Core-module-completed-for-Chinese-SMR>

<sup>8</sup> World nuclear news, Operating permit issued for Chinese molten salt reactor, June 2023 <https://world-nuclear-news.org/Articles/Operating-permit-issued-for-Chinese-molten-salt-re>

<sup>9</sup> Matthew Fisher, Les réacteurs de nouvelle génération : des outils sûrs et économiques pour une énergie durable, Bulletin de l'AIEA, novembre 2017

[https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull58-4/5841819\\_fr.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull58-4/5841819_fr.pdf)

<sup>10</sup> <https://www.neimagazine.com/news/newsnew-agreement-seeks-to-support-argentinas-carem-smr-11261042>

<sup>11</sup> <https://energynews.pro/accord-en-argentine-pour-le-projet-nucleaire-carem/>

## 2. UNE SELECTION PAR L’AIEA DE PROJETS SIGNIFICATIFS

Dans son rapport de 2022 précédemment cité<sup>12</sup>, l’AIEA identifie au niveau mondial 83 projets de petits réacteurs visant le statut de SMR, la plupart étant au stade de la conception « papier ». Ce document présente en page 14 les cas les plus significatifs réalisés ou en construction (voir paragraphe 1.3 de cette note) ou étudiés dans les pays déjà dotés de réacteurs nucléaires pour la production d’électricité.

Les filières ainsi présentées sont :

- Réacteurs à neutrons thermiques (modérateur eau ordinaire), uranium enrichi et à eau sous pression (PWR) ou bouillante (BWR) : 33 réacteurs.
- Réacteurs à haute température (HTGR), refroidis par un gaz : 17 réacteurs.
- Réacteurs à neutrons rapides refroidis par un métal liquide (LMFR) : 8 réacteurs.
- Réacteurs à sels fondus, MSR (*Molten salt reactors*) : 13 réacteurs.
- Microréacteurs : 12 réacteurs.

Un peu plus d’un tiers de cette sélection est constitué de réacteurs refroidis à l’eau avec une majorité de réacteurs PWR à uranium enrichi et eau sous pression (PWR).

Ces PWR, candidats SMR au stade de projet sont la transposition des réacteurs de propulsion des sous-marins nucléaires, ce qui en fait les candidats les plus avancés pour devenir éventuellement des SMR.

Les autres réacteurs n’ont en général pas de modèles satisfaisants en fonctionnement actuel ou passé et leur accès au stade de candidat SMR demandera très probablement une longue période de recherche et d’expérimentation (prototype) avant de pouvoir prétendre au statut de candidat SMR.

Dans le langage courant, le terme SMR est de fait utilisé pour désigner trois niveaux d’installations :

- **Premier niveau : le réacteur nucléaire.** Un réacteur nucléaire, pour être qualifié de SMR, doit être fabriqué en série en usine et être transportable sur le site d’implantation. Par extension, un réacteur prototype candidat au titre de SMR est souvent qualifié de « réacteur SMR ». Cela implique, par rapport aux « petits réacteurs » réalisés jusqu’ici, une « compacité » indispensable pour qu’ils deviennent un jour des réacteurs équipant des modules SMR.

- **Deuxième niveau : un « module »,** dit SMR, comprenant le réacteur et, pour ce qui concerne la production d’électricité, un turbo-alternateur. Le module est monté sur site avec des pièces standardisées. Pour que le module soit qualifié SMR par l’AIEA, son niveau maximal de puissance électrique doit être de 300 MW.

- **Troisième niveau : la centrale productrice d’électricité ou de chaleur,** composée d’un ou de plusieurs modules est installée sur le site d’implantation. Le montage sur site de l’installation recevant les modules réclame des travaux relativement importants pour réaliser la « centrale » correspondante.

Dans les tableaux suivants, la puissance électrique (« Output » en MW de puissance électrique exprimée en MW(e)) est celle du module SMR.

---

<sup>12</sup> IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, 2022 edition  
[https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf)

**Table 1 Design and Status of SMRs included in this Booklet**

Design	Output MW(e)	Type	Designer	Country	Status
<b>PART I.1: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (LAND BASED)</b>					
CAREM	30	Integral PWR	CNEA	Argentina	Under construction
ACP100	125	Integral PWR	CNNC/NPIC	China	Under construction
CANDU SMR™	300	PHWR	Candu Energy Inc.	Canada	Conceptual Design
CAP200	> 200	PWR	SPIC/SNERDI	China	Basic Design
DHR400	400 MW(t)	PWR (pool type)	CNNC	China	Basic Design
HAPPY200	200 MW(t)	PWR	SPIC	China	Detailed Design
NHR200-II	200 MW(t)	Integral PWR	Tsinghua University and CGN	China	Basic Design
TEPLATOR™	< 150 MW(t)	HWR	UWB Pilsen & CIIRC CTU	Czech Republic	Conceptual Design
NUWARD™	2 × 170	Integral PWR	EDF	France	Conceptual Design
IMR	350	PWR	MHI	Japan	Conceptual Design Completed
i-SMR	170	Integral PWR	KHNP and KAERI	Republic of Korea	Conceptual design
SMART	107	Integral PWR	KAERI and K.A.CARE	Republic of Korea and Saudi Arabia	Detailed Design
RITM-200N	55	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Detailed Design Completed
VK-300	250	BWR	NIKIET	Russian Federation	Detailed Design
KARAT-45	45 – 50	BWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
KARAT-100	100	BWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
RUTA-70	70 MW(t)	PWR (pool type)	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
STAR	10	LWR (pressure tube)	STAR ENERGY SA	Switzerland	Basic design
Rolls-Royce SMR	470	PWR	Rolls-Royce SMR Ltd.	UK	Detailed Design
VOYGR™	4/6/12 × 77	Integral PWR	NuScale Power Corporation	USA	Equipment Manufacturing in progress
BWRX-300	270 – 290	BWR	GE-Hitachi Nuclear Energy and Hitachi-GE Nuclear Energy	USA and Japan	Detailed Design
SMR-160	160	PWR	Holtec International	USA	Preliminary Design Completed
Westinghouse SMR	> 225	Integral PWR	Westinghouse Electric Company LLC	USA	Conceptual Design Completed
mPower	2 × 195	Integral PWR	BWX Technologies, Inc	USA	Conceptual Design
OPEN20	22	PWR	Last Energy Inc.	USA	Detailed Design
<b>PART I.2: WATER COOLED SMALL MODULAR REACTORS (MARINE BASED)</b>					
KLT-40S	2 × 35	PWR	JSC Afrikantov OKBM	Russian Federation	In Operation
ACPR50S	50	PWR (loop type)	CGNPC	China	Detailed Design
ACP100S	125	Integral PWR	CNNC/NPIC	China	Basic Design
BANDI-60	60	PWR	KEPCO E&C	Republic of Korea	Conceptual Design
ABV-6E	6 – 9	PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Final design
RITM-200M	50	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Basic Design Completed
VBER-300	325	Integral PWR	JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	Russian Federation	Licensing Stage
SHELF-M	up to 10	Integral PWR	NIKIET	Russian Federation	Basic Design

**PART II: HIGH TEMPERATURE GAS COOLED SMALL MODULAR REACTORS**

<b>HTR-PM</b>	210	HTGR (pebble bed)	INET, Tsinghua University	China	In operation
<b>STARCORE</b>	14/20/60	HTGR (prismatic)	StarCore Nuclear	Canada	Pre-Conceptual Design
<b>JIMMY</b>	10 – 20 MW(t)	HTGR (prismatic)	JIMMY ENERGY SAS	France	Detailed Design
<b>GTHTR300</b>	100 – 300	HTGR (prismatic)	JAEA Consortium	Japan	Basic Design
<b>GT-MHR</b>	288	HTGR (prismatic)	JSC Afrikanov OKBM	Russian Federation	Preliminary Design Completed
<b>MHR-T</b>	4 × 205.5	HTGR	JSC Afrikanov OKBM	Russian Federation	Conceptual Design
<b>MHR-100</b>	25 – 87	HTGR	JSC Afrikanov OKBM	Russian Federation	Conceptual Design
<b>AHTR-100</b>	50	HTGR (pebble bed)	Eskom Holdings SOC Ltd.	South Africa	Conceptual Design Completed
<b>PBMR-400</b>	165	HTGR (pebble bed)	PBMR SOC Ltd.	South Africa	Preliminary Design Completed
<b>HTMR100</b>	35	HTGR (pebble bed)	STL Nuclear (Pty) Ltd.	South Africa	Basic Design
<b>EM<sup>2</sup></b>	265	GFR	General Atomics	USA	Conceptual Design
<b>FMR</b>	50	GFR	General Atomics	USA	Conceptual Design
<b>Xe-100</b>	82.5	HTGR (pebble bed)	X-Energy LLC	USA	Basic Design
<b>SC-HTGR</b>	272	HTGR (prismatic)	Framatome, Inc.	USA	Preliminary Design
<b>PeLUIt / RDE</b>	40 MW(t)	HTGR (pebble bed)	BRIN	Indonesia	Conceptual Design
<b>HTR-10</b>	2.5	HTGR (pebble bed)	INET, Tsinghua University	China	Operable
<b>HTTR</b>	30 MW(t)	HTGR (prismatic)	JAEA	Japan	In operation

**PART III: LIQUID METAL COOLED FAST NEUTRON SPECTRUM SMALL MODULAR REACTORS**

<b>BREST-OD-300</b>	300	LMFR (pool type)	NIKIET	Russian Federation	Under Construction
<b>ARC-100</b>	100	LMFR (pool type)	ARC Clean Energy	Canada	Preliminary Design
<b>4S</b>	10	LMFR (pool type)	Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation	Japan	Detailed Design
<b>MicroURANUS</b>	20	LBE-cooled Reactor	UNIST	Republic of Korea	Conceptual Design
<b>LFR-AS-200</b>	200	LMFR	<i>newcleo</i> srl	Italy	Conceptual Design
<b>SVBR</b>	100	LMFR	JSC AKME Engineering	Russian Federation	Detailed Design
<b>SEALER-55</b>	55	LMFR	LeadCold	Sweden	Conceptual Design
<b>Westinghouse LFR</b>	450	LMFR (pool type)	Westinghouse Electric Company, LLC.	USA	Conceptual Design

**PART IV: MOLTEN SALT SMALL MODULAR REACTORS**

<b>IMSR400</b>	2 × 195	MSR	Terrestrial Energy Inc.	Canada	Detailed Design
<b>SSR-W</b>	300	MSR (static fuelled)	Moltex Energy	Canada	Conceptual Design
<b>smTMSR-400</b>	168	MSR	CAS/SINAP	China	Pre-Conceptual Design
<b>CMSR</b>	100	MSR	Seaborg Technologies ApS	Denmark	Conceptual Design
<b>Copenhagen Atomics Waste Burner</b>	20 MW(t)	MSR	Copenhagen Atomics	Denmark	Detailed Design
<b>FUJI</b>	200	MSR	ITMSF	Japan	Preliminary Design Completed
<b>THORIZON</b>	40 – 120	MSR	THORIZON	Netherlands	Conceptual Design
<b>SSR-U</b>	16	MSR	Moltex Energy	UK	Basic Design
<b>KP-FHR</b>	140	FHR	KAIROS Power, LLC.	USA	Conceptual Design
<b>Mk1 PB-FHR</b>	100	FHR	UC Berkeley	USA	Pre-Conceptual Design
<b>MCSFR</b>	50 / 200 / 400 / 1200	MSR (fast spectrum)	Elysium Industries	USA	Conceptual Design
<b>LFTR</b>	250	MSR	Flibe Energy, Inc.	USA	Conceptual Design
<b>ThorCon</b>	250	MSR	ThorCon International	USA and Indonesia	Preliminary Design Completed

<b>PART V: MICROREACTORS</b>					
<b>Energy Well</b>	8	FHTR	Centrum výzkumu Řež	Czech Republic	Pre-Conceptual Design
<b>MoveLuX</b>	3 – 4	Heat Pipe (sodium)	Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation	Japan	Conceptual Design
<b>ELENA</b>	0.068	PWR	National Research Centre “Kurchatov Institute”	Russian Federation	Conceptual Design
<b>UNITHERM</b>	6.6	PWR	NIKIET	Russian Federation	Conceptual Design
<b>AMR</b>	3	HTGR (prismatic)	STL Nuclear (Pty) Ltd.	South Africa	Pre-conceptual design
<b>LFR-TL-30</b>	30	LMFR	<i>newcleo</i> Ltd.	UK	Conceptual Design
<b>U-Battery</b>	4	HTGR	Urenco	UK	Conceptual Design
<b>Aurora</b>	1.5 – 50	LMFR	OKLO, Inc.	USA	Detailed Design
<b>HOLOS-QUAD</b>	10	HTGR	HolosGen LLC	USA	Detailed Design
<b>MARVEL</b>	0.015 – 0.027	LMFR	Idaho National Laboratory	USA	Equipment manufacturing in progress
<b>MMR™</b>	> 5 and > 10	HTGR	Ultra Safe Nuclear Corporation	USA	Basic Design
<b>Westinghouse eVinci™</b>	2 – 3.5	Heat Pipe	Westinghouse Electric Company, LLC.	USA	Conceptual Design Completed

**Note sur les concepteurs :**

CNEA — Commission nationale de l'énergie atomique (Argentine);

CNNC — China National Nuclear Corporation ;

EDF — Électricité de France;

CEA — Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives;

KAERI — Korea Atomic Energy Research Institute;

K.A.CARE — King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy, Saudi Arabia.

### 3. DESCRIPTION DE DEUX PROJETS CANDIDATS SMR : NUSCALE ET NUWARD

Parmi les 8 réacteurs PWR de la partie I.1 de la sélection précédente de l'AIEA, nous avons choisi deux projets de SMR de la filière REP (PWR) : l'américain NuScale, le plus avancé actuellement en termes d'autorisations, et le français NUWARD, avec dans les deux cas, une forte participation financière de l'État

#### 3.1 LE PROJET NUSCALE

La compagnie NuScale a déposé en janvier 2017 son dossier auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire des États-Unis (NRC : *Nuclear Regulatory Commission*) pour construire une centrale de 12 modules, chacun d'une puissance électrique de 60 MW qui serait construite sur le site du centre de recherche fédéral *Idaho National Laboratory*.<sup>13</sup>

NuScale a obtenu le 2 août 2022 l'approbation finale de son concept (design) par la NRC (ce qui n'est pas l'autorisation de création).<sup>14</sup>

Par la suite, en 2021, le projet a été modifié : la nouvelle centrale comporterait 6 modules de 77 MW chacun, sur le même site. Ce nouveau projet est appelé VOYGR<sup>15</sup>.

##### 3.1.1 Le réacteur d'un module NuScale

Le réacteur du module VOYGR présenté par NuScale est un petit réacteur PWR de puissance thermique de 250 MW et de puissance électrique brute de 77 MW. Le combustible est de l'uranium enrichi à 4,95%. Le taux de combustion moyen de décharge des assemblages serait du même ordre que celui des PWR de 900 MW : 33 MWj/t (megawatt.jour par tonne).

Le cœur du réacteur est constitué de 37 assemblages combustibles de 17x17 crayons combustibles. Il est immergé dans l'eau de refroidissement qui circule (équivalent du circuit primaire) par convection naturelle (pas de pompes) autour du générateur de vapeur hélicoïdal. La boucle secondaire qui achemine la vapeur des générateurs de vapeur vers les turbines nécessite des pompes à moteur situées à l'extérieur du module.

Le pressuriseur (plusieurs éléments à l'intérieur du réacteur) maintient la pression de l'eau à 138 bars<sup>16</sup> dans le circuit primaire (en amont du générateur de vapeur) et 43 bars dans le circuit secondaire. L'ensemble est contenu à l'intérieur de la « cuve » du réacteur (*reactor vessel*), elle-même contenue dans l'enceinte de confinement (*containment vessel*).

Le contrôle de la réaction en chaîne est assuré par du bore dans l'eau de refroidissement et 16 assemblages de barres de contrôle dont le système d'entraînement est à l'extérieur au réacteur. La partie inférieure de la « cuve » du réacteur est équipée de brides situées juste au-dessus du cœur pour permettre le déchargement et le chargement des assemblages d'éléments combustibles. Le rechargement par tiers du cœur est effectué sur un cycle de 18 mois, selon un schéma "in-out"<sup>17</sup>. Au cours du processus de rechargement, un tiers des assemblages de combustible sont retirés du cœur et placés dans la piscine de combustible usé. La piscine est reliée à la source froide ultime et est donc protégée par le bâtiment du réacteur. Les râteliers de stockage du combustible usé comprennent suffisamment de stockage pour environ 18 ans d'exploitation, y compris cinq assemblages de combustible défectueux et des composants du cœur non combustibles tels qu'un assemblage de barres de contrôle.

<sup>13</sup> IAEA, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, édition 2020  
[https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)

<sup>14</sup> NRC News, NRC to issue rule certifying NuScale Small Modular Reactor, July 2022  
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/news/2022/22-029.pdf>

<sup>15</sup> <https://www.nuklearforum.ch/fr/nouvelles/etats-unis-un-soutien-massif-la-poursuite-du-projet-voygr-de-nuscale>

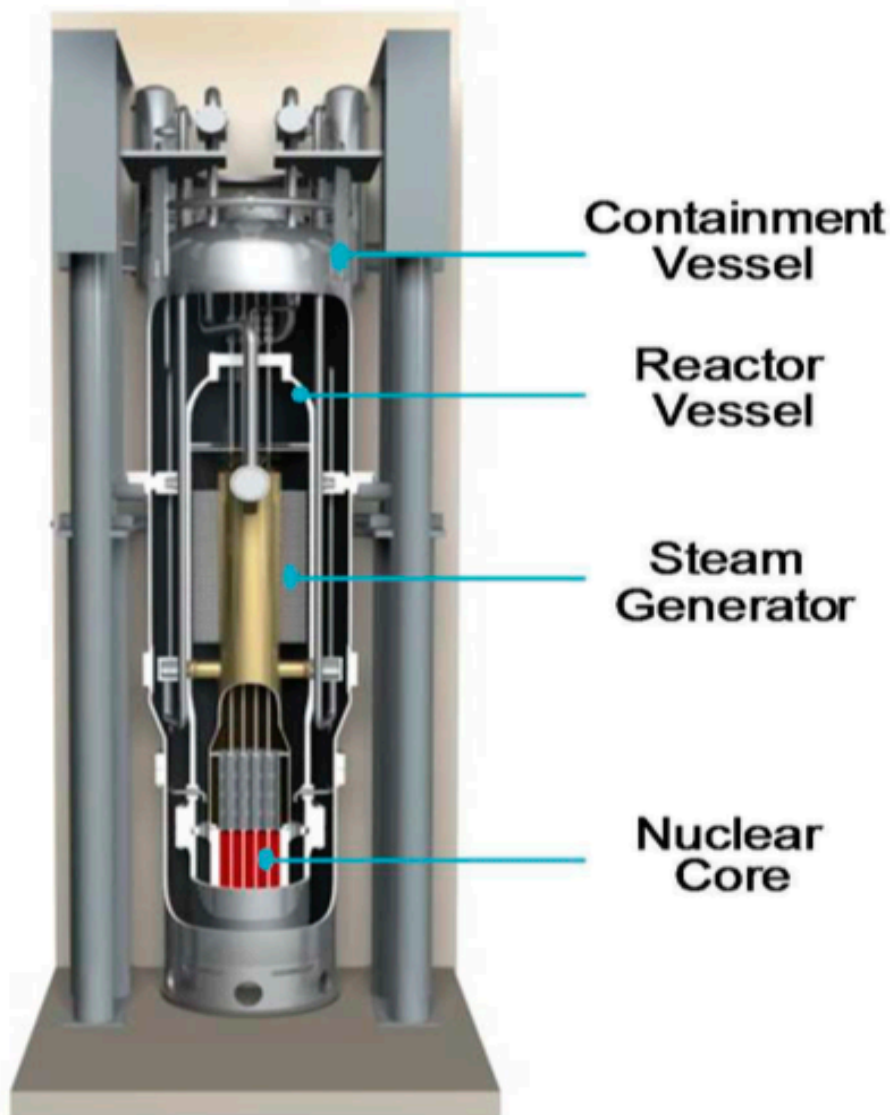
<sup>16</sup> A comparer à 150 bars dans un PWR classique de 900 MW de puissance électrique nette.

<sup>17</sup> UARGA – l'expertise des anciens du nucléaire, *Les petits réacteurs modulaires (SMR)*, 2021  
[https://www.uarga.org/nucleaire/reacteur\\_SMR.php](https://www.uarga.org/nucleaire/reacteur_SMR.php)

Les concepteurs affirment que le refroidissement d'urgence en cas de panne de courant électrique dans la centrale serait assuré en utilisant une série de vannes qui n'ont pas besoin d'énergie électrique pour s'ouvrir ou se fermer et atteindre leur position correcte (système Neve).

La figure 1 présente le réacteur du projet initial, avant la proposition du modèle VOYGR.

**Figure 1 : Description du réacteur du module NuScale**



**Source** : AIEA (2020)<sup>18</sup>

- *Containment vessel* : enceinte de confinement (hauteur 23,1 m, diamètre externe 4,5 m).
- *Reactor vessel* : la « cuve » du réacteur « intégral » comprenant le cœur du réacteur (combustibles), le générateur de vapeur (*steam generator*) et le pressuriseur.
- *Steam generator* : Générateur de vapeur.
- *Nuclear Core* : Cœur du réacteur (assemblages combustibles).

La figure 2 simule le transport du réacteur NuScale SMR depuis l'usine de fabrication en série (caractère modulaire pour la qualification de modulaire) pour être intégré sur site dans le ou les modules SMR de la centrale SMR.

<sup>18</sup> [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf), page 89.



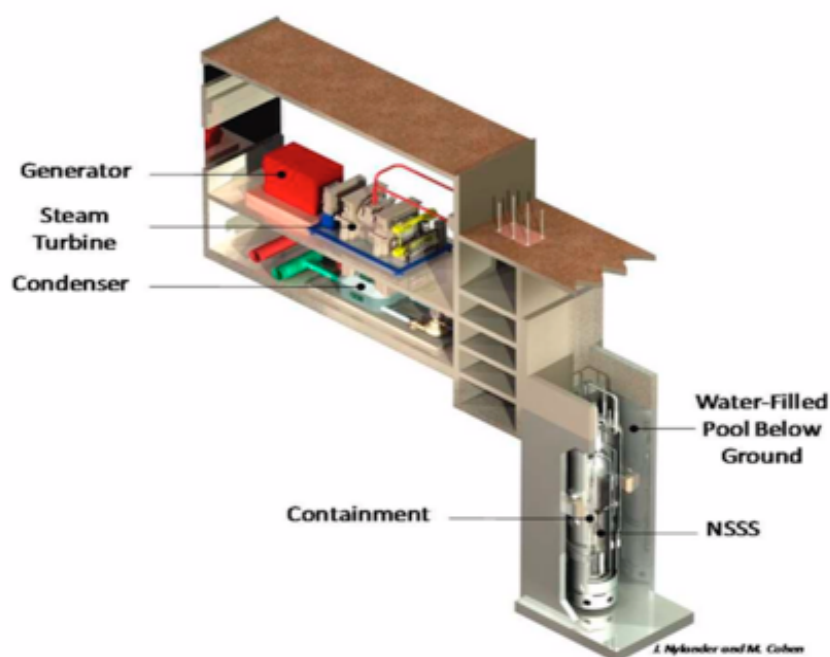
**Figure 2 : Simulation du transport d'un réacteur NuScale**



Source : NuScale

### 3.1.2 Le module NuScale

**Figure 3 : Description du module NuScale<sup>19</sup>**



Source : AIEA (2013)

- *Generator* : Générateur
- *Steam Turbine* : Turbine à vapeur
- *Condenser* : Condenseur
- *Water-filled Pool below ground* : Réservoir en sous-sol rempli d'eau.
- *Containment* : Enceinte de confinement du réacteur.
- *NSSS (Nuclear steam supply system)* : réacteur qui produit la vapeur

Chaque réacteur (*Nuclear steam supply system*) est relié à une turbine et un turbo-alternateur, comme le montre la figure 3.

<sup>19</sup> NuScale Power Modular and Scalable Reactor, July 2013 <https://aris.iaea.org/PDF/NuScale.pdf>

Ainsi, le module complet et indépendant est constitué du réacteur présenté plus haut, plongé dans un bassin d'eau vertical en sous-sol qui produit la vapeur et de la turbine, couplée au générateur d'électricité (turbo-alternateur).

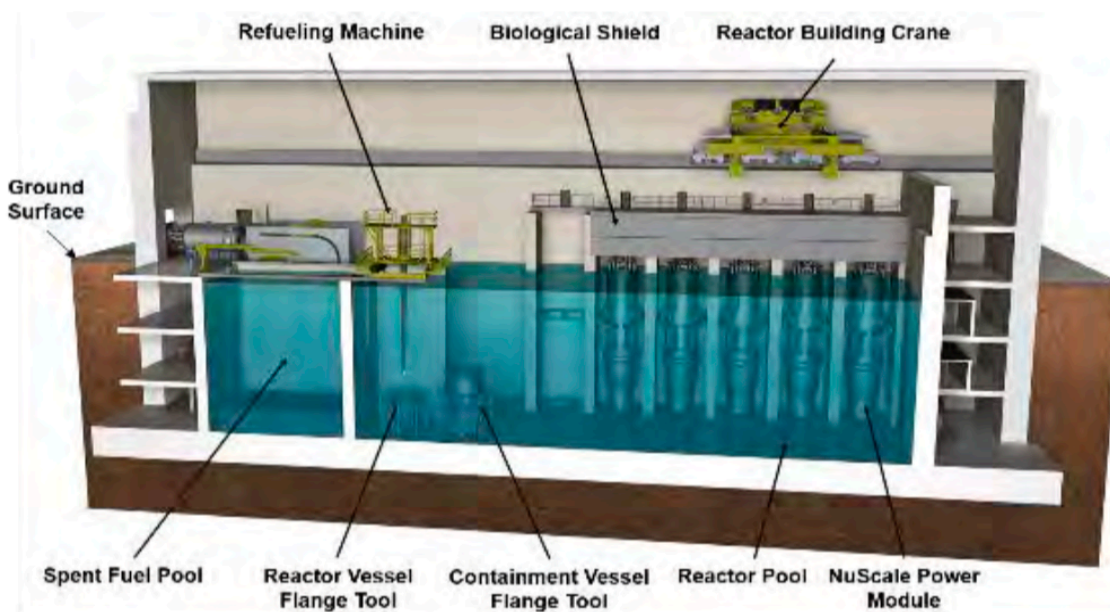
Un certain nombre de ces modules autonomes sont alignés ensuite pour former la centrale électrique décrite au paragraphe suivant.

### 3.1.3 La centrale NuScale

En regroupant 12 modules indépendants et en leur adjoignant un certain nombre d'installations nécessaires au fonctionnement de l'ensemble, on aboutit à la « Centrale nucléaire NuScale » de la figure 4.

Avec la même architecture, le nouveau modèle NuScale VOYGR est constitué de 6 modules, chacun d'une puissance électrique de 77 MW.

**Figure 4 : La centrale nucléaire SMR NuScale**



**Source :** AIEA (2020)

- *Ground Surface* : Surface du sol.
- *Spent Fuel Pool* : Bassin d'entreposage des combustibles irradiés.
- *Refueling Machine* : Machine de chargement des combustibles neufs.
- *Reactor Vessel Flange Tool* : Outil de bridage de la cuve du réacteur.
- *Biological Shield* : Protection biologique (dalle de béton).
- *Reactor Pool* : Bassin contenant les réacteurs.
- NuScale power module : Réacteur NuScale (Figure 1).
- *Reactor building Crane* : Grue du bâtiment du réacteur.

Les modules sont contenus dans un grand bassin en sous-sol rempli d'eau borée (ce qui permettrait d'assurer un refroidissement de 72 heures en cas de perte d'apport externe d'électricité en cas d'accident). En fait les modules partagent un certain nombre d'installations. Difficile de croire que l'exploitation pourrait se poursuivre normalement en cas de problème grave sur un module.

Le projet VOYGR de centrale NuScale de 462 MW (six modules de 77 MW) serait la première centrale en opération candidate au titre de « SMR » en opération (figure 5).

Ce prototype serait implanté à Idaho Falls (*Idaho National Laboratory*).

L'ensemble de l'installation occuperait une surface au sol de 140 000 m<sup>2</sup>.

En mai 2023, NuScale a annoncé la fabrication des premières pièces forgées<sup>20</sup>, en Corée du Sud.

**Figure 5 : Représentation de la centrale VOYGR-6 de type SMR**



Source : NuScale

### 3.2 LE PROJET NUWARD

Le projet NUWARD de petit réacteur à vocation de SMR est porté par le consortium français réunissant Electricité de France (EDF), le Commissariat à l'énergie atomique (CEA, civil et militaire), les entreprises TechnicAtome et Naval Group qui ont conçu et fabriqué les réacteurs PWR pour les besoins de la marine à propulsion nucléaire.

Le projet NUWARD consiste à réaliser une centrale nucléaire de production d'électricité d'une puissance électrique de 340 MW composée de deux modules de 170 MW chacun.

Quel nom bizarre pour un réacteur français !

NuWard est l'abréviation, en toute modestie, de « NUclear ForWARD ».

#### 3.2.1 Le réacteur d'un module NUWARD

Le réacteur NUWARD serait un réacteur à uranium enrichi et eau sous pression (filier PWR ou REP en français), « intégré » au sens où il rassemble dans la même cuve tous les composants principaux : le cœur du réacteur dans lequel les fissions et réactions en chaîne produisent de la chaleur, les générateurs de vapeur, le pressuriseur, les mécanismes de contrôle et les pompes primaires, agencés comme le montre la figure 6.

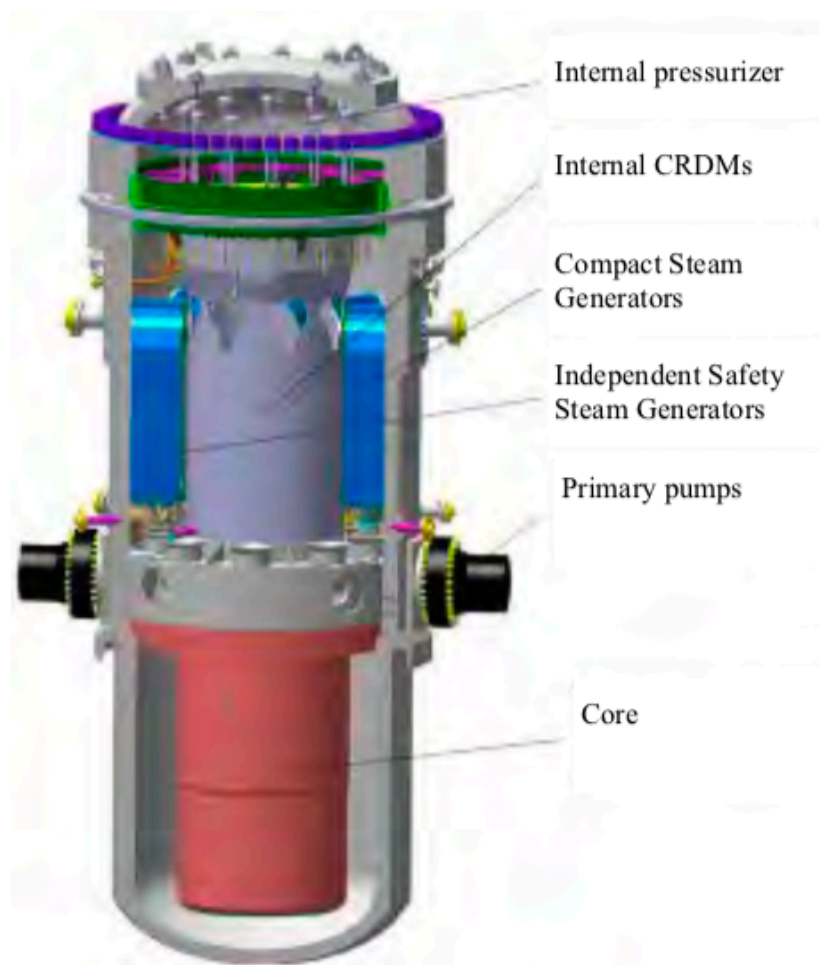
#### *Les différents éléments à l'intérieur du réacteur :*

- *Internal pressurizer* : Pressuriseur
- *Internal CRDM* : Barres de contrôle
- *Compact steam generator* : Générateurs de vapeur
- *Independent safety steam generators* : Générateurs de vapeur de secours
- *Primary pumps* : Pompes primaires
- *Core* : Cœur du réacteur

---

<sup>20</sup> Nuclear Forum, Les premières pièces forgées destinées au SMR de NuScale sont en cours de fabrication, mai 2023 <https://www.nuklearforum.ch/fr/nouvelles/les-premieres-pieces-forgees-destinees-au-smr-de-nuscale-sont-en-cours-de-fabrication>

**Figure 6 : Description du réacteur NUWARD**



Source : AIEA 2020<sup>21</sup>

Dans ce projet, les différents éléments sont :

#### ***Le cœur du réacteur***

Le cœur du réacteur est constitué de 76 assemblages de 17x17 éléments combustibles à uranium enrichi (à moins de 5%), semblables à ceux des PWR classiques mais plus courts.

Les températures d'entrée et sortie du cœur sont 280/307 °C.

Le rechargement en combustible neuf se fait par moitié tous les 24 mois (arrêt de 15 jours).

Ce rechargement se fait sur un réacteur arrêté tandis que l'autre continue de fonctionner.

La durée de fonctionnement du réacteur serait de 60 ans.

Des innovations importantes sont apportées en matière de sûreté passive.

#### ***Le système de refroidissement et le générateur de vapeur***

Six échangeurs à plaque.

Six pompes sont montées horizontalement à l'intérieur du réacteur, positionnées sous les générateurs de vapeur dans la branche froide du circuit primaire (circuit entre le retour du condenseur et le cœur du réacteur).

#### ***L'enceinte en acier de l'ensemble intégré « cœur, pressuriseur, générateurs de vapeur, barres de contrôle »***

Cette enceinte fait 4 m de diamètre et 13,50 m de hauteur.

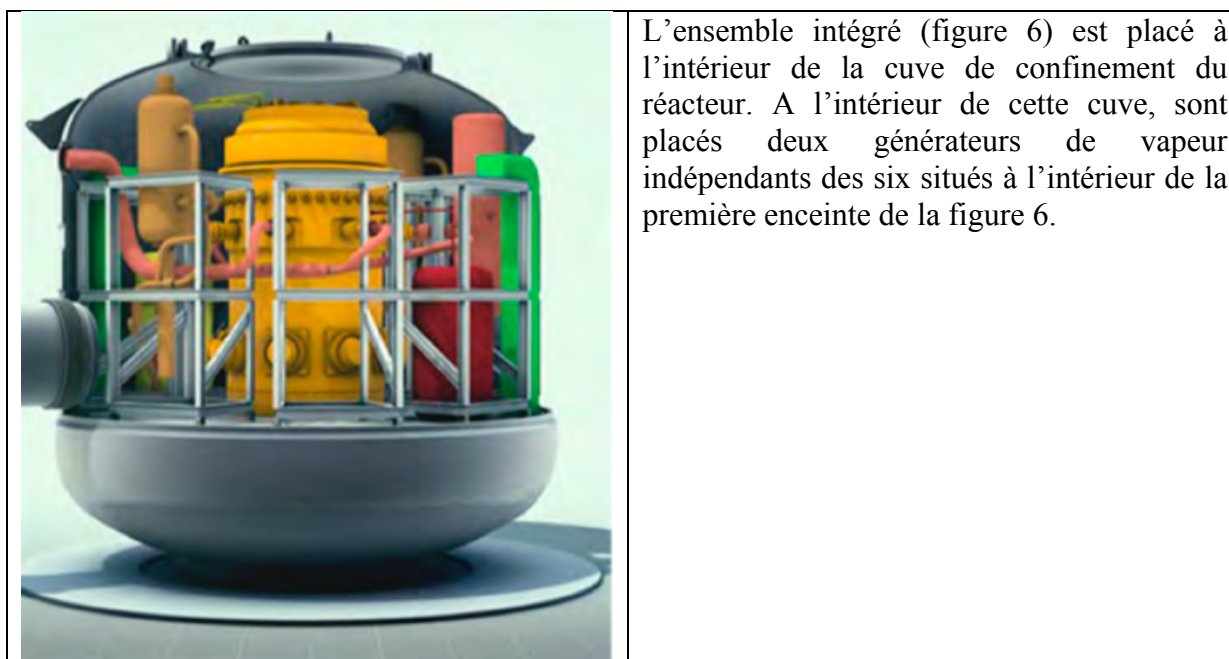
Par analogie avec les réacteurs classiques, on peut considérer que cette première enceinte serait la « cuve du réacteur ».

<sup>21</sup> [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf), page 37.

### *Une deuxième enceinte en acier, cuve de confinement*

La première cuve est ensuite logée à l'intérieur d'une nouvelle enceinte métallique remplie d'eau, le tout d'un poids de 310 tonnes, l'ensemble constituant le réacteur NUWARD (figure 7). Cette seconde cuve est l'équivalent de l'enceinte de confinement des réacteurs classiques. Ses dimensions et son poids pourraient poser des problèmes pour son transport de sur le site de la centrale.

**Figure 7 : Le réacteur NUWARD**



Source : AIEA (2020)

### **3.2.2 Le module NUWARD**

Le module NUWARD d'une puissance électrique de 170 MW est constitué du réacteur (figure 7), de la turbine, du condenseur et de l'alternateur, puis du transformateur relié au réseau de transport de l'électricité. Le réacteur serait livré à partir de son lieu de fabrication (usine produisant en série dans le cas d'un vrai SMR). Le module et les autres installations seraient également livrées et montées sur place.

### **3.2.3 La centrale NUWARD**

La centrale NUWARD est constituée de deux modules NUWARD accolés (Figure 8).

Chaque réacteur serait plongé dans un bassin d'eau de 25 mètres sur 25.

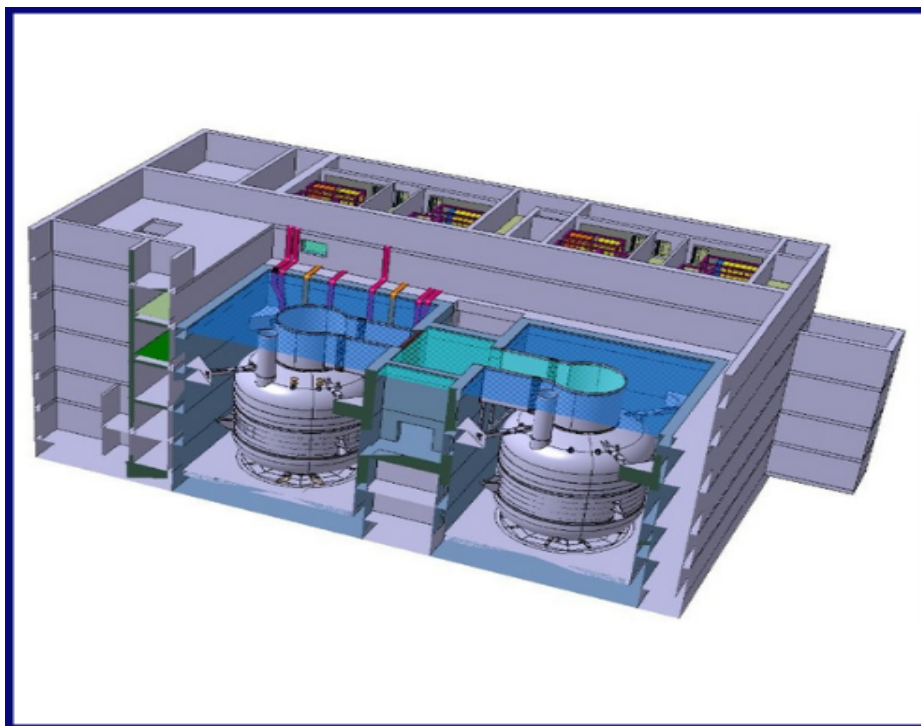
L'ensemble serait semi-enterré pour le protéger des agressions extérieures.

Son emprise au sol serait de 3500 m<sup>2</sup>. Cette emprise est probablement celle de l'installation montrée en figure 8, L'ensemble montré par la figure 9 serait certainement d'une superficie beaucoup plus importante.

La figure 8 ne montre que la juxtaposition des deux modules.

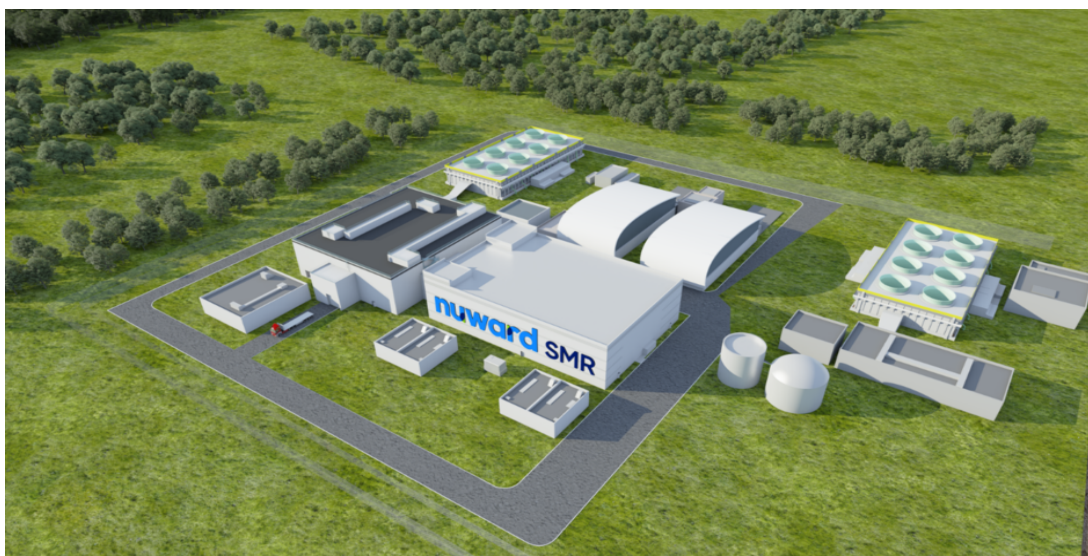
D'autres installations restent à prévoir, notamment pour la salle de contrôle, les piscines installations de chargement et déchargement des combustibles, l'entreposage des combustibles irradiés, les ateliers de maintenance, les bâtiments de logement et de vie des travailleurs, les parkings et garages, etc.

**Figure 8: La centrale nucléaire NUWARD**



Source : Usine Nouvelle

**Figure 9 : la maquette de la future centrale NUWARD**



Source : Ambassade de France en Finlande<sup>22</sup>.

<sup>22</sup> <https://fi.ambafrance.org/Le-petit-reacteur-modulaire-francais-NUWARD-SMR-developpe-en-partenariat-avec>

## 4. ANALYSE TECHNIQUE, DE SURETE ET ECONOMIQUE DES DEUX PROJETS

Les deux candidats au titre de SMR, NuScale et NUWARD, appartiennent à la filière à uranium enrichi et eau sous pression (PWR ou REP). Cette communauté de filière avec les réacteurs qui équipent les moteurs de sous-marins nucléaires comme avec la majorité des réacteurs des centrales productrices d'électricité dans le monde laisse à penser qu'ils devraient avoir plus de facilité pour l'octroi des autorisations nécessaires comme pour leur déploiement industriel.

Mais, malgré ces ressemblances et ces facilités apparentes, il faut se rendre compte que ces deux projets sont très différents de leurs « modèles » et très différents entre eux.

C'est ce que nous allons analyser.

### 4.1 LES CENTRALES

#### 4.1.1 NuScale

Ayant obtenu le 2 août 2020 l'approbation finale de son design par la NRC, NuScale visait le premier démarrage d'un premier module de 60 MW en 2029.

NuScale a proposé en décembre 2021 une centrale, baptisée VOYGR, composée de six petits réacteurs à eau pressurisée de 77 MW de puissance électrique. Cette nouvelle centrale NuScale aurait une puissance électrique brute de 462 MW.

La puissance – et le nombre de modules – ayant varié au cours du temps, le projet doit à nouveau faire l'objet d'un examen technique de la NRC. Mais d'autres difficultés se trouvent ailleurs : son premier client serait une union de municipalités (UAMPS) dont certaines n'ont pas encore souscrit à des contrats de vente d'électricité suite à l'annonce en novembre 2022 d'une révision à la hausse du coût du projet.

Le choix se fera notamment sur la question économique que nous abordons plus loin, non seulement entre les options nucléaires mais aussi, évidemment, notamment par comparaison à la production d'origine renouvelable (éolien, photovoltaïque).

D'après ses concepteurs le fait de fonctionner avec 12 ou 6 modules indépendants présente un avantage : si l'un des modules connaît une panne, il peut être isolé et la production de la centrale ne serait diminuée que de 8% ou 17%. Cette possibilité largement mise en avant par le promoteur est probablement assurée en cas d'arrêt du réacteur pour une vérification ou une maintenance mais très probablement disparaît en cas d'incident ou d'accident selon la gravité de l'un ou de l'autre.

La durée de fonctionnement de la centrale est prévue de 60 ans par son promoteur.<sup>23</sup>

#### 4.1.2 NUWARD

La centrale NUWARD est très différente puisque, constituée de deux modules de 170 MW, elle doit avoir une puissance de 340 MW. Le projet n'en est encore qu'au stade des études.

Outre des raisons économiques, réelles ou supposées, le choix de placer deux réacteurs a pour objectif d'assurer un fonctionnement permanent d'au moins un des deux réacteurs, lorsque l'autre devrait être arrêté, soit pour une moindre demande d'électricité, soit pour le rechargement du combustible, soit pour un autre motif d'interruption du fonctionnement.

On se pose alors la même question que pour NuScale : si cette configuration à deux réacteurs peut présenter un intérêt réel en site isolé pour assurer au maximum la continuité de la production, on voit mal son intérêt sur des sites reliés au réseau de transport d'électricité interconnecté.

Quant à l'intérêt économique, il est, comme pour NuScale, loin d'être assuré.

---

<sup>23</sup> [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)

Une question se pose pour les deux projets, NuScale et NUWARD : quel sera le personnel nécessaire pour l'exploitation de la centrale, en fonctionnement normal et en période de rechargement, pour les travaux de maintenance, en cas d'incident ou d'accident... ?

En ce qui concerne NUWARD, le directeur de projet a cité récemment le chiffre de 250 personnes en fonctionnement normal.

Comme pour NuScale, la durée de fonctionnement prévue par le promoteur est de 60 ans.

## 4.2 LES MODULES

Dans NuScale, les modules sont nettement indépendants et on peut probablement en retirer un s'il y a problème. Cependant, en cas d'accident, il peut être nécessaire d'arrêter tous les réacteurs.

Il semble que ce ne soit pas le cas pour NUWARD, d'après le schéma de la figure 7.

Pour l'un comme l'autre des modules NuScale ou NUWARD, la question se pose de l'alimentation externe en électricité en cas d'une panne du système turbine, alternateur et condenseur, ne serait-ce que sur un seul module. Est-ce qu'il est prévu des diesels de secours, nécessaires pour faire fonctionner les réacteurs et donc les réserves de carburant sur le site ? Cette question n'apparaît pas dans les présentations des projets.

Autre question : on sait que les réacteurs PWR « classiques », par exemple ceux du parc électronucléaire français<sup>24</sup>, connaissent en fonctionnement normal de fréquents incidents qui ne mettent pas en cause la sûreté du réacteur mais entraînent l'arrêt du réacteur pour une intervention de maintenance. Il est difficile de penser que cela ne puisse pas se produire sur ces réacteurs, qu'ils soient des prototypes ou des SMR fabriqués en usine. Dans ce dernier cas, une malfaçon en usine aurait des conséquences économiques considérables. Faudrait-il « rapatrier » les réacteurs comme on le fait pour des voitures par exemple ou les réparer sur place ?

Cette éventualité ne paraît pas être envisagée dans les deux projets.

## 4.3 LES REACTEURS

Un point commun aux deux projets : le caractère « compact » du réacteur qui contient dans une même enceinte, le cœur du réacteur (éléments combustibles, lieu des fissions et réactions en chaîne qui chauffent l'eau du caloporteur), les barres de contrôle, le ou les générateurs de vapeur et le pressuriseur. Cette promiscuité fait que les flux neutroniques issus des fissions dans le cœur peuvent endommager les autres équipements.

### 4.3.1 Une différence importante pour la circulation de l'eau de refroidissement :

Dans NuScale, le refroidissement du cœur est assuré par convection naturelle pour le circuit de refroidissement primaire qui transporte la chaleur vers les générateurs de vapeur, donc sans pompe de refroidissement, tandis que le circuit secondaire qui achemine la vapeur depuis les générateurs de vapeur vers les turbines nécessite des pompes à moteur situées à l'extérieur du module. Voir à ce propos en 3.3.2 le problème éventuellement posé par l'alimentation de ces pompes ainsi que pour le système d'entraînement des barres de contrôle qui est également à l'extérieur du réacteur.

Dans NUWARD, le système de transfert de la chaleur du cœur aux générateurs de vapeur à plaques s'effectue grâce à six pompes montées horizontalement à l'intérieur du réacteur, positionnées sous les générateurs dans la branche froide du circuit primaire (circuit entre le

---

<sup>24</sup> Bernard Laponche, Jean-Luc Thierry, L'accumulation d'incidents graves témoignent de l'état inquiétant du parc électronucléaire », Global Chance, décembre 2020  
<https://www.global-chance.org/L-accumulation-d-incidents-graves-temoigne-de-l-etat-inquietant-du-parc-electronucleaire>



retour du condenseur et le cœur du réacteur). Il doit donc y avoir une alimentation électrique à l'intérieur du réacteur, soumise à l'irradiation provenant du cœur du réacteur.

#### 4.3.2 Les générateurs de vapeur

L'intégration des générateurs de vapeur dans le même espace restreint que le cœur du réacteur nécessite des géométries compactes. Cela augmente l'intensité de l'environnement radioactif dans lequel les générateurs de vapeur doivent fonctionner, par rapport à la situation des grands réacteurs de puissance, ce qui pourrait conduire à des corrosions les rendant inutilisables. On sait que dans des conditions moins difficiles, les générateurs de vapeur de grands réacteurs de puissance sont remplacés au moins une fois au cours de la durée de leur fonctionnement. Ce remplacement paraît impossible sur le site d'un SMR : un générateur défectueux entraînerait très probablement l'arrêt définitif du module concerné.

#### 4.3.3 Les soupapes du pressuriseur

Les soupapes du pressuriseur peuvent être « attaquées » par le flux neutronique issu du cœur ou par des variations thermiques (problème détecté sur les grands réacteurs de puissance).

#### 4.3.4 Impact de la fluence sur la fragilité de la cuve du réacteur

En physique des réacteurs nucléaires, la fluence de la cuve du réacteur est l'intégrale sur une durée de fonctionnement donnée du flux de neutrons produits dans le cœur du réacteur qui bombardent la paroi de la cuve. La fluence s'exprime en nombre de neutrons par  $\text{cm}^2$ . La température de transition ductile-fragile de l'acier de la cuve augmente avec la fluence. Son évolution au cours du temps pourrait conduire à une durée de fonctionnement de la cuve, et donc du réacteur, inférieure à celle envisagée par les promoteurs du projet. C'est un paramètre essentiel pour la sûreté dans certains scénarios accidentels.

#### 4.3.5 Chargement et déchargement du combustible

Pour les deux réacteurs, le combustible est classique : assemblages de crayons contenant les pastilles d'uranium enrichi, comparables à ceux des réacteurs de puissance classiques, mais plus courts.

On a vu dans NuScale que le déchargement du combustible irradié et son remplacement par du combustible neuf, cœur entier, se feraient par tiers tous les 8 mois à 2 ans.

Pour ce faire, le réacteur du module concerné, après arrêt de la réaction en chaîne et débranchement de tous les liens extérieurs, est traité de la façon suivante<sup>25</sup> :

- a) Déplacement du réacteur, sous eau, dans un premier bassin d'eau borée où la « cuve » du réacteur (« *reactor vessel* ») est extraite de l'enceinte de confinement (dont le couvercle est dévissé pour permettre cette extraction par les brides prévues à cet effet).
- b) La cuve est transférée dans un second bassin d'eau borée où elle est à son tour ouverte (brides) pour permettre l'extraction des assemblages de combustible irradié.
- c) Les assemblages de combustibles irradiés sont transférés dans le bassin d'eau borée d'entreposage des combustibles irradiés (« *spent fuel pool* ») où sont également entreposés les assemblages de combustible neuf.
- d) Les opérations inverses permettent de placer les assemblages neufs dans la cuve du réacteur (deuxième bassin) puis de déplacer celle-ci dans l'enceinte de confinement (premier bassin) et de replacer le réacteur dans sa position normale.

Nous ne possédons pas d'information plus récente sur cette opération.

Dans le cas de NUWARD, d'après AIEA 2022<sup>26</sup>, le déchargement du combustible irradié et le chargement de combustible neuf de chaque réacteur se ferait par demi-cœur tous les 24 mois.

<sup>25</sup> <https://www.nrc.gov/docs/ML0908/ML090850080.pdf>. « *Refueling operations report for the NuScale power module* ». Document de 2009 dont toutes les figures sont malheureusement « caviardés ».

<sup>26</sup> [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf)

Nous n'avons pas d'information détaillée sur le chargement et le déchargement des combustibles.

Dans le cas de NuScale, il est probable que l'on aura recours à un entreposage à sec des combustibles irradiés après leur séjour en piscine, comme pour les centrales nucléaires existantes aux Etats-Unis.

Dans le cas de NUWARD, ou bien ce sera la même solution, ou bien, si la politique de retraitement des combustibles irradiés est maintenue, un envoi des combustibles irradiés à l'usine de retraitement. Dans ce cas, comme d'ailleurs pour les réacteurs « classiques », on se heurte au fait que l'usine actuelle de La Hague ne devrait pas fonctionner au-delà de 2040-2050 et que le coût d'une nouvelle usine serait probablement prohibitif.

#### **4.3.6 Le démantèlement des installations**

On ne trouve pas d'information sur le démantèlement d'un SMR, qu'il en soit au stade du prototype ou celui d'un véritable SMR produit en série en usine.

Sur les réacteurs classiques des centrales nucléaires actuelles, le démantèlement se fait entièrement sur le site avec l'objectif du « retour à l'herbe » et dans les délais les plus brefs après la fermeture définitive du réacteur, l'enlèvement de la totalité des assemblages combustibles et un temps suffisant (plusieurs dizaines d'années) pour la réduction des émissions radioactives des équipements situés à l'intérieur de l'enceinte de confinement.

Dans le cas d'un prototype d'un futur SMR du type que nous étudions ici, on peut penser que le réacteur, après extraction de l'ensemble des assemblages combustibles et une réduction suffisante de la radioactivité du réacteur pour permettre son transport, serait transporté sur un site dédié.

Pour le premier prototype de NuScale, implanté sur le site de l'Idaho National Laboratory (INL), le démantèlement pourrait probablement se faire sur ce site lui-même. Pour NUWARD, ce pourrait être également le cas si le site choisi possède les installations nécessaires (un centre du CEA, Marcoule par exemple).

La question est plus complexe pour de véritables SMR construits en série en usine. Il faudra alors construire une « usine de démantèlement », éventuellement proche de l'usine de construction. Certes, la méthode de démantèlement pourra être standardisée mais, même fabriqués en usine, les réacteurs peuvent présenter des différences par certains aspects, notamment la qualité des aciers.

### **4.4 LA SURETE DU PROJET NUSCALE**

#### **4.4.1 Le processus d'instruction du projet NuScale**

En septembre 2020, l'Autorité de sûreté nucléaire des États-Unis (NRC : *Nuclear Regulatory Commission*) a approuvé la demande de certification (*standard design certification*) d'un ensemble intégré (« centrale ») composé de 12 petits réacteurs modulaires NuScale, modèle « NuScale US600 »<sup>27</sup>.

La NRC a publié la certification de ce modèle en juillet 2022<sup>28</sup>.

Mais, par la suite, NuScale a modifié son projet standard et proposé le modèle « NuScale US460 », VOYGR, constitué de 6 modules de 77 MW de puissance électrique, soit une centrale de 462 MW.

En novembre 2022, la NRC a adressé à l'entreprise NuScale son rapport d'évaluation de l'état de préparation de NuScale à la demande d'approbation de la conception standard de son projet de SMR, document que nous présentons au paragraphe suivant.

---

<sup>27</sup> Design Certification – NuScale US600, United State Nuclear Regulatory Commission  
<https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/nuscale.html>

<sup>28</sup> Office of nuclear energy, NRC Certifies first U.S. small modular reactor design, January 2023  
<https://www.energy.gov/ne/articles/nrc-certifies-first-us-small-modular-reactor-design>

Début 2023, la NRC a annoncé qu'elle allait commencer à examiner la majeure partie de la demande d'approbation de la conception standard (SDA) – NuScale modèle US460 (VOYGR) pour la technologie des petits réacteurs modulaires améliorés de NuScale Power, le reste de l'examen étant suspendu jusqu'à ce que l'entreprise fournisse des détails supplémentaires sur un point clé de la sécurité.<sup>29</sup>

#### 4.4.2 L'avis de l'Autorité de sûreté nucléaire des Etats-Unis sur le projet NuScale<sup>30</sup>

##### *Lettre de la NRC à NuScale*

On trouvera en Annexe 4 la lettre de la NRC adressée à NuScale.  
La démarche est bien expliquée dans les extraits suivants :

*« Le rapport d'observation ci-joint présente les observations du personnel de la NRC sur le projet de demande de SDA<sup>31</sup> de NuScale. Le personnel a observé et reconnu que le projet de SDAA<sup>32</sup> de NuScale est un travail en cours et que plusieurs chapitres sont incomplets ou n'ont pas été mis à jour pour prendre en compte le modèle US460. En outre, plusieurs documents référencés dans le projet de SDAA (rapports thématiques, rapports techniques, calculs, tableaux techniques, références, informations sur l'analyse probabiliste des risques, etc.) qui n'ont pas été mis à la disposition de l'équipe la NRC lors de l'évaluation de l'état de préparation. Ainsi, la NRC n'a pas observé l'intégralité de la proposition de demande de SDAA et ne peut donc pas fournir une évaluation complète du projet de demande. En outre, le rapport d'observation de l'équipe de la NRC n'inclut pas les informations dont NuScale sait qu'elles sont manquantes ou incomplètes et les observations (incluses) ne prédéterminent pas si la demande de SDA sera acceptée pour examen ».*

...

*« Dans l'ensemble, le personnel a identifié plusieurs questions difficiles et/ou importantes qui pourraient être des domaines d'intérêt pour l'acceptation de la SDAA et/ou l'examen de la sûreté. Bien qu'il y ait eu un engagement précoce sur ces sujets, l'équipe encourage le maintien de la mobilisation sur ces sujets jusqu'à la soumission de la SDAA. Ces sujets sont les suivants :*

- *Classification de la sûreté du système d'alimentation en courant continu renforcé (EDAS)*
- *Plan global d'évaluation des vibrations et soutien aux tubes des générateurs de vapeur*
- *Analyse de l'oscillation des ondes de densité*
- *Matériaux de la cuve de confinement et de la cuve du réacteur*
- *Analyse des accidents de perte de réfrigérant*
- *Optimisation de la SDA »*

##### *Le rapport de la NRC*

Ce rapport est très intéressant et mérite d'être lu attentivement.  
Nous en signalons certains points :

a) Dans la rubrique « All » s'adressant à l'ensemble du dossier, trois paragraphes :

---

<sup>29</sup> Nuclear Newswire, NRC to start review of NuScale updated SMR design, march 2023  
<https://www.ans.org/news/article-4865/nrc-to-start-review-of-nuscale-updated-smr-design/>  
et : Federal Register/Vol. 88, No. 149 / Friday, August, 2023 / Notices  
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2023-08-04/pdf/2023-16679.pdf>

<sup>30</sup> United States nuclear Regulatory Commission, Preapplication readiness assessment report of the NuScale power, November 2022  
[https://static.ewg.org/upload/pdf/NRC\\_readiness\\_assessment\\_report\\_111522.pdf?\\_gl=1\\*i2ys8w\\*\\_gcl\\_au\\*MjkzMjAzNDU5LjE2OTIyODUxNzA.\\*\\_ga\\*MTc2MTU5NzAwMS4xNjkyMjg1MTcw\\*\\_ga\\_CS21GC49KT\\*MTY5MjM1MzQ3Ny4yLjAuMTY5MjM1MzQ3Ny4wLjAuMA..&\\_ga=2.108660288.376542262.1692285170-1761597001.1692285170](https://static.ewg.org/upload/pdf/NRC_readiness_assessment_report_111522.pdf?_gl=1*i2ys8w*_gcl_au*MjkzMjAzNDU5LjE2OTIyODUxNzA.*_ga*MTc2MTU5NzAwMS4xNjkyMjg1MTcw*_ga_CS21GC49KT*MTY5MjM1MzQ3Ny4yLjAuMTY5MjM1MzQ3Ny4wLjAuMA..&_ga=2.108660288.376542262.1692285170-1761597001.1692285170)

<sup>31</sup> SDA : « *Standard design approval* ». Approbation de la conception standard.

<sup>32</sup> SDAA : « *Standard design approval application* ». Demande de l'approbation de la conception standard.

« L'équipe d'experts (NRC) a constaté que l'effort d'« optimisation » de la demande d'agrément de conception standard (SDA) peut avoir supprimé des informations nécessaires pour étayer une assurance raisonnable de santé et de sécurité publiques ».

...

« La demande fait de nombreuses références à d'autres sections qui ne sont pas disponibles pour que l'équipe de la NRC puisse les examiner et confirmer leur conformité. Par exemple, la référence à la section 9.2.5 pour la conception de l'instrument de mesure du niveau de la piscine de combustible usé (SFP), pour les niveaux d'eau de sécurité pour le blindage et le refroidissement, et l'évaluation thermique du scénario d'accident ».

...

Citation partielle :

« Les discussions avec NuScale ont montré que la SDAA sera une demande autonome et qu'une grande partie de la documentation mise à disposition est en cours de développement. Au cours de l'examen de l'évaluation de l'état de préparation des systèmes du chapitre 10, l'équipe de la NRC a constaté que les informations relatives à la conception et au fonctionnement des systèmes étaient insuffisantes pour permettre de comprendre la conception du système et l'impact potentiel du fonctionnement ou de la défaillance du système sur la sûreté de la centrale ou sur le potentiel de rejet radiologique ».

b) Certains points particuliers, à titre d'exemples :

- Entre le rapport relatif au modèle précédent (US600), et le présent rapport sur le modèle US460, plusieurs éléments ont été supprimés, notamment en ce qui concerne le risque sismique.
- Des demandes concernant, par exemple :
  - Les supports des générateurs de vapeur
  - les risques d'inondation
  - les protections contre les missiles et autres agressions externes
- Des manques d'information sur :
  - les calculs concernant le cœur, les barres de contrôle, les injections de bore
  - la qualité des aciers (ductilité ?)
  - le vieillissement des équipements
  - les soudures

On voit que l'on retrouve pour les projets SMR beaucoup des problèmes qui se sont posés et se posent encore pour les grands réacteurs de puissance.

Il faut noter en particulier l'importance donnée par la NRC aux questions de sécurité (agressions extérieures malveillantes, terrorisme ou actes de guerre), ainsi qu'aux agressions extérieures naturelles, séismes, canicules, inondations, qui vont inéluctablement s'aggraver avec les bouleversements climatiques.

#### 4.4.3 Un avis de l'« Union of Concerned Scientists »

Nous reproduisons ici des extraits d'un article de l'« Union of concerned scientists » de septembre 2013<sup>33</sup>. Bien que relativement ancien, cet article conserve toute sa pertinence.

« D'une manière générale, les défis techniques à relever pour garantir la sûreté des petits réacteurs modulaires ne sont pas qualitativement différents de ceux des grands réacteurs. Quelle que soit la taille du réacteur, des systèmes doivent être mis en place pour garantir que la chaleur générée par le cœur du réacteur est évacuée, dans des conditions normales et en cas d'accident, à un rythme suffisant pour empêcher le combustible de surchauffer, d'être endommagé et de relâcher de la radioactivité. L'efficacité de ces systèmes dépend des détails

---

<sup>33</sup> Union of Concerned Scientists, « Small isn't always beautiful », Edwin Lyman, September 2013  
<https://www.ucsusa.org/sites/default/files/2019-10/small-isnt-always-beautiful.pdf>

*de leur conception. Même le combustible nucléaire dans les piscines de combustible usé, qui ont généralement des charges thermiques beaucoup plus faibles que les cœurs des réacteurs, peut surchauffer et se rompre si un refroidissement adéquat n'est pas assuré ».*

...

*« Certains modèles de SMR [...] sont suffisamment petits pour que le **refroidissement par convection naturelle** suffise à maintenir le cœur à une température sûre en cas d'accident grave tel qu'une panne d'électricité dans la centrale ».*

...

*« S'il ne fait aucun doute que le refroidissement par circulation naturelle pourrait être efficace dans de nombreuses conditions pour de si petits réacteurs, il n'est pas vrai que ces réacteurs seraient intrinsèquement sûrs dans toutes les conditions d'accident. Dans certains scénarios d'accident, les conditions de transfert de chaleur ne seraient pas idéales et le refroidissement par convection naturelle pourrait être entravé. Par exemple, pour la conception NuScale, un tremblement de terre important pourrait envoyer des débris de béton dans la piscine, obstruant la circulation de l'eau ou de l'air. En effet, aucune conception de réacteur crédible n'est totalement passive : aucune conception ne peut s'arrêter et se refroidir d'elle-même dans toutes les circonstances sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours à un système de refroidissement par convection naturelle.*

*Même les réacteurs à sécurité passive nécessitent certains équipements, tels que des vannes, qui sont conçus pour fonctionner automatiquement. Mais aucune vanne n'est à 100 % fiable ».*

...

*« En outre [...] les accidents affectant plus d'une petite unité peuvent entraîner des complications susceptibles de dépasser la capacité à faire face à des défaillances multiples, ce qui l'emporte sur les avantages d'une réduction des exigences en matière d'évacuation de la chaleur par unité. »*

On a vu que la circulation passive de l'eau de refroidissement dans NuScale n'était que pour la boucle primaire et qu'il fallait une pompe (à alimentation électrique extérieure) pour le circuit secondaire. Dans NUWARD les pompes assurant la circulation de l'eau de refroidissement sont situées à l'intérieur du réacteur (à alimentation électrique interne au réacteur).

*« La nécessité de réduire les coûts d'investissement des SMR conduit à réduire la taille et la robustesse d'un important système de sécurité passive, la structure de confinement. Aucun des modèles de PWR n'a de structure de confinement d'une taille d'environ 1,5 mètre autour du réacteur avec une résistance et un volume suffisants pour résister aux forces générées par la surpression et les explosions d'hydrogène en cas d'accidents graves. Les SMR doivent donc s'appuyer sur des moyens d'empêcher l'hydrogène d'atteindre des concentrations explosives. Cependant, ni les moyens actifs (igniteurs d'hydrogène) ni les moyens passifs (recombineurs d'hydrogène) de contrôle de l'hydrogène ne sont susceptibles d'être aussi fiables qu'une enceinte de confinement robuste. En outre, les enceintes de confinement de petite taille entraînent généralement un couplage plus important entre le cœur du réacteur et l'enceinte de confinement, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur la sûreté ».*

...

*« Certains fournisseurs de SMR proposent d'installer leurs réacteurs sous terre, ce qui, selon eux, constituerait un avantage majeur en termes de sécurité. Si l'implantation souterraine renforce la protection contre certains événements, tels que les attaques d'avions et les tremblements de terre, elle peut aussi présenter des inconvénients ».*

Il faut y ajouter la vulnérabilité des installations semi-enterrées aux inondations.

En outre, en cas d'accident grave, les équipes d'urgence pourraient avoir plus de difficultés à accéder aux réacteurs souterrains.

#### **« Complications liées à la présence de plusieurs réacteurs sur un même site »**

*Les partisans des SMR affirment souvent que, comme pour la prochaine génération de grands réacteurs, la probabilité d'endommagement du cœur du réacteur peut être plus faible pour les SMR que pour les réacteurs actuellement en service. Bien que cela soit vrai, il est important de noter que ces affirmations se réfèrent à la fréquence d'événements internes tels que les ruptures de conduites. Cependant, lorsque des événements externes tels que des tremblements de terre, des inondations et des incendies sont ajoutés à une évaluation probabiliste des risques, le Nuclear Energy Institute (NEI) - l'organisation politique de l'industrie nucléaire - a souligné que "les paramètres de risque calculés pour les nouveaux réacteurs sont susceptibles d'augmenter et donc d'être plus proches des centrales actuelles que de celles qui sont présentées aujourd'hui" (NEI) ».*

...

*« Les partisans des SMR soulignent également que le risque pour le public lié aux petits réacteurs est plus faible que celui lié aux grands réacteurs, du fait qu'il y a moins de matières radioactives dans le cœur. Bien que cela soit certainement vrai, ce n'est pas la comparaison la plus utile.*

***Le facteur pertinent en ce qui concerne le risque sociétal n'est pas le risque par unité, mais le risque par mégawatt d'électricité produite. Selon cette mesure, les petits réacteurs n'impliquent pas nécessairement des risques moindres s'ils sont plus nombreux ».***

...

*« Pour que chacun des réacteurs reste indépendant, les effectifs du personnel de support et la quantité des équipements de sûreté devraient augmenter en fonction du nombre de réacteurs sur un site. Toutefois, ce n'est qu'en partageant de manière significative les systèmes et le personnel entre plusieurs unités que l'on pourrait modérer l'augmentation des coûts qui en résulterait. C'est pourquoi les fournisseurs de SMR souhaitent réduire le nombre de salles de contrôle et d'opérateurs agréés que la NRC exigerait normalement pour un certain nombre d'unités. Par exemple, dans la conception de NuScale, un seul opérateur de salle de contrôle pourrait être chargé de 12 unités, dont la faisabilité devrait être vérifiée par des tests de performance ».*

#### **4.4.4 Une étude récente pour l'« Environmental Working Group »**

Nous citons des extraits significatifs concernant la sûreté nucléaire d'un article très complet de A. Makhijani et M.V. Ramana du 9 avril 2023 dont nous recommandons la lecture en intégralité : **« Questions for NuScale VOYGR Reactor Certification : When will it be done ? And then, will it be safe ? ».**<sup>34</sup>

*« Parmi les projets dont le déploiement est actuellement prévu, le concept de réacteur à eau pressurisée NuScale de 77 mégawatts (nommé VOYGR) est celui pour lequel le processus de certification de la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis (NRC) est le plus avancé pour les petits réacteurs modulaires (SMR). Mais la suite du processus n'est pas claire ; il sera encore probablement retardé une nouvelle fois en raison des questions de sûreté qui se posent pour ce modèle. La saga du NuScale laisse une nouvelle fois présager que le boom des SMR prendra beaucoup de temps, s'il arrive un jour ».*

...

#### **I. Problèmes liés au modèle NuScale de 50 MW**

*« La décision finale de la Commission de réglementation nucléaire (NRC) a identifié « trois problèmes non résolus ». La NRC a indiqué qu'elle ne disposait pas d'informations suffisantes « concernant (1) la conception du mur de protection dans certaines zones de la centrale, (2) l'éventualité d'une fuite du confinement du système de surveillance des gaz combustibles et (3) la capacité des tubes du générateur de vapeur à maintenir leur intégrité structurelle et*

---

<sup>34</sup> A. Makhijani et M.V. Ramana, Questions for NuScale VOYGR Reactor Certification : When will it be done ? And then, will it be safe ?, 9 avril 2023  
[https://static.ewg.org/upload/pdf/FINAL\\_NuScale\\_analysis\\_for\\_EWG.pdf](https://static.ewg.org/upload/pdf/FINAL_NuScale_analysis_for_EWG.pdf)

leur étanchéité pendant les oscillations des ondes de densité dans le circuit secondaire. » Nous développons ci-après le troisième problème, que nous considérons comme particulièrement important pour la conception du modèle de 50 MW et encore plus pour la version 77 MW.

#### *i. Générateurs de vapeur*

Une préoccupation majeure qui est apparue au cours du processus de certification du modèle de 50 MW portait sur la stabilité du générateur de vapeur ; elle a été identifiée dans une lettre de mars 2020 du Comité consultatif de la NRC sur la sûreté nucléaire (ACRS). La lettre de l'ACRS signalait que « la conception et les performances des générateurs de vapeur [n'avaient] pas encore été suffisamment validées ». Aucune centrale nucléaire civile n'utilise la conception de générateur de vapeur proposée par NuScale ; le Comité consultatif a souligné que celle-ci « introduit différents modes de défaillance ».

La NRC a confirmé les conclusions de l'ACRS, reprenant à son compte la conclusion de l'ACRS selon laquelle « la conception et les performances des générateurs de vapeur n'ont pas encore été suffisamment validées en raison des incertitudes associées aux oscillations des ondes de densité (DWO) instables du côté secondaire du générateur de vapeur ».

L'intégrité du générateur de vapeur représente un problème de sûreté important. Dans les réacteurs à eau sous pression en fonctionnement, l'eau du circuit primaire circule à travers une grande quantité de tubes recourbés en forme de U ; il n'y a jamais d'ébullition. L'eau du circuit secondaire s'écoule verticalement dans ces tubes et est en ébullition ; la vapeur s'accumule au sommet afin d'être envoyée pour alimenter le groupe turbo-alternateur où l'électricité est produite. (Un schéma simplifié sur le site web de la NRC peut aider à visualiser ce processus : <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-pwr.html>). Le générateur de vapeur se trouve à l'extérieur de la cuve du réacteur mais à l'intérieur du confinement du secondaire. Il n'est pas facile de remplacer ce composant massif, mais cela peut être fait et cela a été fait dans de nombreux réacteurs à eau sous pression.

Le concept du NuScale est différent. Dans le cadre de sa « conception passive », l'eau du circuit primaire circule verticalement vers le haut depuis le réacteur jusqu'au générateur de vapeur, qui se trouve à l'intérieur de la cuve du réacteur. L'eau du circuit secondaire circule dans des tubes hélicoïdaux, où elle bout en captant de la chaleur lorsque l'eau primaire s'écoule entre les tubes. Deux problèmes liés à la conception ont joué un rôle important dans le refus d'approbation du générateur de vapeur. Le premier portait sur l'usure prématurée des tubes du générateur de vapeur. Le deuxième, en lien avec le premier, concernait les vibrations appelées « oscillations des ondes de densité ». La circulation de l'eau et l'ébullition intense à l'intérieur du tube hélicoïdal soumettent les tubes à des forces mécaniques différentes de celles des modèles actuels de réacteurs à eau sous pression. Celles-ci ont été étudiées de manière approfondie car « les oscillations du débit et de la pression du système induites thermiquement sont indésirables » ; de telles oscillations « peuvent provoquer des vibrations mécaniques, une fatigue thermique, des problèmes de contrôle du circuit et, dans des circonstances extrêmes, perturber les caractéristiques de transfert de chaleur du circuit ».

## **II. Problèmes liés à la demande préalable pour le modèle Nuscale de 77 MW**

« Comme indiqué ci-dessus, dans la communication de novembre 2022, la NRC a identifié 99 observations « importantes » et six « problèmes difficiles et/ou importants » qui devront être résolus pour l'examen de la sûreté. Nous en reprenons quelques-uns dans ce bref rapport.

#### *ii. Informations supprimées*

Une conclusion globale de la NRC était que NuScale semble « **avoir supprimé des informations nécessaires pour prendre une décision avec une assurance raisonnable en matière de santé et de sécurité du public** » dans ses documents de demande. La communication de la NRC n'a pas décrit en détail les éléments supprimés mais laissait

entendre que cela pourrait être lié à la forte augmentation de la puissance en indiquant que ces suppressions « étaient peut-être » liées à l'effort « d'optimisation » pour demande d'approbation de la conception standard [Standard Design Approval]. [...]

### *iii. Évaluation des accidents graves*

**La NRC a identifié une préoccupation spécifique portant sur l'augmentation de la puissance et son impact sur l'évaluation des accidents** : les experts de la NRC ont indiqué qu'il faut s'attendre à ce que « l'augmentation de la puissance de 160 MWth à 250 MWth [c'est-à-dire de 50 MW électriques à 77 MW électriques] et d'autres modifications de conception aient un impact sur toutes les étapes de l'évaluation des accidents graves, qu'il s'agisse des séquences d'accidents identifiées, des termes sources dérivés, ou des analyses des conséquences radiologiques ». Pourtant, ont remarqué les experts, il « semble [que] toutes... les analyses de “progression d'accident grave” soient restées identiques dans les documents de pré-demande de certification de NuScale. C'est clairement l'un des domaines dans lesquels les « nouveaux éléments » mentionnés par NuScale en janvier 2022 auraient dû être ajoutés. En raison de l'augmentation de 50 % de la puissance, on peut s'attendre à ce que les conséquences des accidents soient plus graves. Il semble donc injustifié de laisser l'analyse des accidents « à l'identique ». L'intention de NuScale était-elle de vérifier si le personnel de la NRC lisait réellement les documents ? Si tel est le cas, la bonne nouvelle pour le public est que la réponse semble être « oui ».

### *iv. Générateurs de vapeur*

Malgré plus de deux années écoulées depuis les problèmes évoqués à propos des générateurs de vapeur – et la claire opinion dissidente concernant l'octroi de la certification au modèle de réacteur de 50 MW – la NRC a de nouveau déterminé que **le « plan complet d'évaluation des vibrations et le support pour les tubes du générateur de vapeur » et une « analyse des oscillations des ondes de densité » demeuraient au nombre des difficultés à surmonter pour le modèle Nuscale de 77 MW**. En d'autres termes, NuScale n'a apparemment pas fait beaucoup de progrès au cours des deux dernières années pour répondre à l'un des problèmes de sûreté fondamentaux liés à son concept de réacteur. Parce que le générateur de vapeur NuScale se trouve à l'intérieur de la cuve du réacteur, son remplacement, en cas de panne, obligera à ouvrir la cuve du réacteur, avec des risques potentiels de dommages plus importants à la cuve ainsi qu'aux structures extérieures. La situation est également compliquée par le fait que les réacteurs seraient sous l'eau : leur positionnement dans une piscine fait partie de la conception ».

## **4.5 L'INSTRUCTION DE SURETE DU PROJET NUWARD**

### **4.5.1 Le Dossier d'option de sûreté de NUWARD**

En tant que futur exploitant de la potentielle première centrale NUWARD SMR en France, EDF a soumis son Dossier d'Options de Sûreté (DOS) à l'ASN le 19 juillet 2023 conformément au calendrier du projet, sur la base des éléments préparés par les équipes de NUWARD et de ses partenaires.

Le Dossier d'options de sûreté est un document présentant les objectifs de sûreté, les caractéristiques de conception d'ensemble et les principes essentiels de fonctionnement et de gestion des risques du SMR NUWARD. Selon la législation française, l'évaluation des options de sûreté constitue dans le cadre d'un projet d'installation nucléaire la première étape de la procédure d'autorisation : « Cette étape va permettre de recueillir un avis précoce de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) avant le dépôt de la demande d'autorisation de création (DAC), un prérequis pour démarrer la construction de la première centrale en France ».



Nous n'avons pas pour l'instant accès à ce dossier d'options de sûreté. Dans le cas du réacteur NuScale, des milliers de pages de documentation sont fournies pour la consultation sur la Certification de la conception (Design Certification)<sup>35</sup>.

#### 4.5.2 Première information de l'ASN

On trouvera en Annexe 2 le texte de la note d'information de l'ASN du 4 juillet 2022 sur le : « Développement des petits réacteurs modulaires en collaboration avec les autorités de sûreté finlandaise et tchèque, l'ASN engage un examen préliminaire commun inédit du projet de réacteur NUWARD », dont :

*« Le 10 juin 2022, les autorités de sûreté française (ASN), finlandaise (STUK) et tchèque (SUJB) ont engagé, avec leurs appuis techniques respectifs, l'examen préliminaire des principales options de sûreté du projet de petit réacteur modulaire NUWARD™ porté par EDF ».*

Sur ce sujet, l'IRSN a produit une note dans la rubrique « Savoir et comprendre » du 5 avril 2023, présentée en Annexe 3.

#### 4.5.3 Une revue internationale du projet NUWARD

L'ASN a publié le 26 septembre 2023, une nouvelle note d'information<sup>36</sup> sur les petits réacteurs modulaires qui annonce la publication des « enseignements tirés de la revue menée conjointement avec ses homologues STUK et SUJB sur les options de sûreté du projet de réacteur NUWARD SMR développé par une filiale d'EDF ».

Cette publication en anglais, intitulée « NUWARD SMR, Joint Early Review, Pilot Phase Closure Report », a été également publiée par les trois autorités de sûreté en septembre 2023<sup>37</sup>. Ce rapport succinct (29 pages), est essentiellement consacré à la préoccupation de parvenir à une homogénéisation des pratiques et méthodes des autorités de sûreté nucléaires des trois pays, avec une première application au projet NUWARD SMR, porté par EDF comme chef de file.

Dans le cas des SMR, l'harmonisation des exigences des autorités de sûreté nationales est particulièrement cruciale, dans la mesure où la standardisation des réacteurs joue un rôle central dans la compétitivité économique de ce modèle.

#### **Présentation du projet**

Le projet lui-même est présenté de façon très succincte au paragraphe 2.2, avec une appréciation très positive et l'annonce d'une première construction en France à partir de 2030 :

*« NUWARD SMR est une centrale SMR de 340 MW<sup>38</sup> avec deux réacteurs indépendants (170 MW(e) chacun). Chaque réacteur est un réacteur à eau pressurisée (REP) compact et intégré de type Génération III+, avec une intégration complète du circuit primaire (y compris les pompes primaires, le pressuriseur et les générateurs de vapeur compacts) dans la cuve sous pression du réacteur. Les deux réacteurs sont immergés et logés dans un seul bâtiment nucléaire, qui abrite également une piscine commune de combustible usé.*

---

<sup>35</sup> United State Nuclear Regulatory Commission, Application Documents for the NuScale US600 Design <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/licensing-activities/nuscale/documents.html>

<sup>36</sup> ASN, Petits réacteurs modulaires : pour la première fois, une revue conjointe a été réalisée par trois autorités de sûreté européennes sur des options de sûreté d'un projet de SMR, septembre 2023 <https://www.asn.fr/l-asn-informe/actualites/petits-reacteurs-modulaires-revue-conjointe-realisee-par-trois-autorites-de-surete-europeennes>

<sup>37</sup> ASN, STUK, SUJB, Nuward SMR Joint Early Review, Pilot Phase Closure Report, Septembre 2023 [https://www.asn.fr/content/download/192690/file/NUWARD%20SMR%20Joint%20Early%20Review\\_Closure%20Report\\_Final\\_Version%20sign%C3%A9\\_vf.pdf](https://www.asn.fr/content/download/192690/file/NUWARD%20SMR%20Joint%20Early%20Review_Closure%20Report_Final_Version%20sign%C3%A9_vf.pdf)

<sup>38</sup> 340 MW de puissance électrique nette.

*Pour étayer la sûreté inhérente à son projet SMR, EDF met notamment en avant l'autonomie de NUWARD SMR, car aucun système ni aucune ressource (y compris la source froide) en dehors de l'îlot nucléaire n'est nécessaire pour garantir l'état de sûreté **pendant au moins trois jours**. En effet, il est affirmé que l'îlot nucléaire est autonome pour au moins cette période grâce à l'adoption d'une piscine (appelée "water-wall"<sup>39</sup>) dans laquelle chaque troisième barrière, les cuves de confinement en acier, sont immergées. Cette autonomie est essentielle car EDF affirme que tous les scénarios DBC<sup>40</sup> peuvent être gérés passivement, sans intervention de l'opérateur, sans source froide externe, sans injection de bore ou sans alimentation électrique externe pendant au moins 3 jours.*

*Bien que les REP soient une technologie avec laquelle EDF et les régulateurs dans le cadre de l'examen précoce conjoint ont une grande expérience, le réacteur NUWARD présente des caractéristiques innovantes **pour lesquelles il n'y a pas d'expérience d'exploitation**.*

*Selon les plans d'EDF, la construction d'un réacteur unique en son genre devrait commencer en 2030 en France. Le réacteur NUWARD SMR est conçu pour remplacer les centrales électriques à combustibles fossiles **dans le monde entier** et pour alimenter les sites industriels à forte consommation d'énergie. En outre, NUWARD SMR est conçu pour favoriser la cogénération d'électricité et de chaleur (pour l'industrie ou le chauffage urbain), la production d'hydrogène ou le dessalement de l'eau ».*

### **Programme de travail du groupe international**

Le paragraphe 2.3 présente un programme de travail sur les principales questions de sûreté nucléaire, pendant une durée de six mois, ce qui semble très « accéléré ».

Ce programme de travail est intéressant et présenté en Annexe 5.

Le paragraphe 2.4 décrit la méthode de travail des trois autorités de sûreté.

Il apparaît que l'entreprise EDF intervient de façon très concrète dans ces travaux.

On peut lire en effet au paragraphe 3.2 que, par la synthèse commune, le groupe de travail a transmis ses conclusions sur le projet NUWARD SMR. Cette synthèse compare en particulier les guides et pratiques des autorités de sûreté nucléaire des trois pays concernés, notamment dans leur traitement éventuel du projet NUWARD SMR. Certains exemples « de haut niveau » mis en évidence par leur analyse sont présentés mais, à la demande d'EDF, cette synthèse n'est pas publique pour des raisons de propriété industrielle.

On a bien le sentiment d'une opération cherchant à la reconnaissance internationale ou tout au moins de certains pays européens, de l'intérêt du projet NUWARD SMR porté par un consortium français dominé par EDF.

---

<sup>39</sup> Water wall : Mur d'eau.

<sup>40</sup> DBC : *Design Basic Conditions*. Conditions de fonctionnement de référence.

## 5. LES COÛTS

La question des coûts est évidemment essentielle pour avoir un avis sur l'intérêt de développer les modèles de SMR que nous avons présentés.

Disons tout de suite que nous n'avons trouvé aucune information sur le coût de NUWARD, qu'il s'agisse de celui d'un premier prototype ou de celui d'un véritable SMR dont le réacteur serait fabriqué en série et en usine avant son transfert sur le site de la centrale.

On sait seulement que les promoteurs du projet estiment que « le développement du projet NUWARD SMR nécessitera des conditions financières, institutionnelles et réglementaires favorables »<sup>41</sup>.

Nous allons donc présenter ce que l'on peut savoir actuellement des coûts prévus pour le modèle NuScale.

### 5.1 LE COUT DE CONSTRUCTION D'UNE PREMIERE CENTRALE NUSCALE

Le plus simple à comprendre est le coût de construction du premier prototype NuScale.

Il s'agit d'un projet très concret : la compagnie d'électricité d'un groupe de communes de l'Utah, *Utah Association Municipal Power Systems (UAMPS)*, a décidé en février 2023 de poursuivre son engagement pour l'achat de la production de la centrale NuScale de 6 modules de 77 MW dont la construction est prévue au centre de recherche fédéral « *Idaho National Laboratory* »<sup>42</sup> (Figure 4).

La référence<sup>43</sup> fournit les valeurs suivantes pour les coûts :

- Coût de développement et de construction, incluant les frais financiers : 9,3 milliards \$
- Total des subventions fédérales (*Cost Share Award*) et autres aides ; 4,2 milliards \$
- Coût net pour UAMPS : 5,1 milliards \$.

Elle nous explique les conditions contractuelles de ce projet :

*« Le projet global est composé de six des modules de puissance de 77 MW de NuScale pour générer 462 MW d'électricité. Les services publics membres de l'UAMPS "s'abonnent" pour les quantités d'électricité qu'ils souhaitent acheter qui seront produites par les six SMR. Si trop d'entre eux se retirent, le projet ne sera pas construit ou du moins pas dans les conditions financières actuelles. L'UAMPS aura la possibilité de mettre fin au projet et d'être remboursé si le total de tous les abonnements aux services publics membres n'atteint pas 370 MW (sur 462 MW disponibles) d'ici la fin de 2023 ».*

De nombreux commentateurs considèrent que les coûts réels seront plus élevés, au vu de l'expérience acquise sur la construction des grands réacteurs de puissance, même dans des filières dites bien connues (AP-1000 de Westinghouse et EPR français).

### 5.2 LE PRIX VENDU DU MWH

#### 5.2.1 Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA)

Dans « De nouvelles estimations de coûts spectaculaires pour le petit réacteur modulaire NuScale »<sup>44</sup>, on lit :

---

<sup>41</sup> <https://www.nuward.com/sites/nuward/files/2023-07/OpportunitystudyEN.pdf> p. 36

<sup>42</sup> Timothy Gardner, Western US cities vote to move ahead with novel nuclear power plant, Reuters, march 2023 <https://www.reuters.com/business/energy/western-us-cities-vote-move-ahead-with-novel-nuclear-power-plant-2023-02-28/>

<sup>43</sup> Neutron Bytes, NuScale's SMR costs hit hard by inflation, january 2023 <https://neutronbytes.com/2023/01/24/nuscales-smr-costs-hit-hard-by-inflation/>

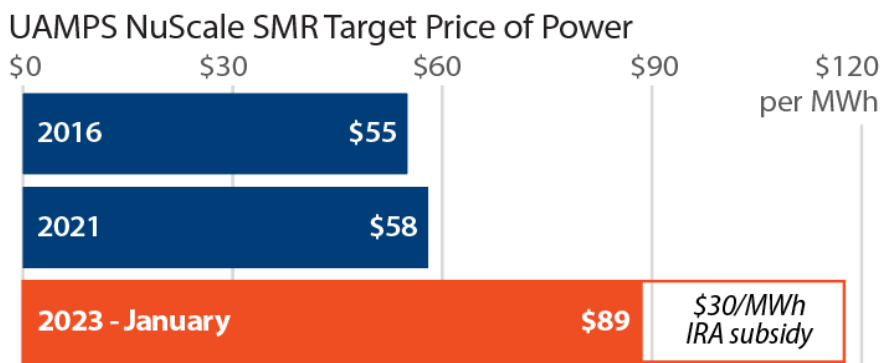
<sup>44</sup> Institute for energy economics and financial analysis, Eye-popping new cost estimates released for NuScale small modular reactor, January 2023 <https://ieefa.org/resources/eye-popping-new-cost-estimates-released-nuscale-small-modular-reactor>

« La semaine dernière, NuScale et Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) ont annoncé ce que beaucoup attendaient depuis longtemps. Les estimations du coût de construction et du prix cible du petit réacteur modulaire (SMR) de 462 mégawatts (MW) sont en hausse, très en hausse ».

...

« De 2016 à 2020, le prix cible de l'électricité était de 55 dollars par mégawattheure (MWh). Ce prix a ensuite été porté à 58 \$/MWh<sup>45</sup> lorsque le projet a été ramené de 12 à 6 modules de réacteurs (de 924 MW à 462 MW). Aujourd'hui, après avoir préparé une nouvelle estimation des coûts beaucoup plus détaillée, le prix cible de l'électricité produite par le réacteur SMR proposé est monté en flèche pour atteindre 89 \$/MWh ».

### Prix cible de l'électricité produite par le réacteur NuScale de l'UAMPS :



Sources: UAMPS statements; January 3, 2023 Talking Points IEEFA

Pratiquement stabilisé jusqu'en 2021 à 55 puis 58 dollars, le prix annoncé du MWh est à 89\$ en janvier 2023 et serait de 119\$ si l'on intègre les différentes subventions, notamment fédérales.

« Il faut noter que le nouveau prix de l'électricité de 89 \$/MWh serait beaucoup plus élevé s'il n'y avait pas plus de 4 milliards de dollars de subventions que NuScale et UAMPS espèrent obtenir des contribuables américains grâce à une contribution de 1,4 milliard de dollars du ministère de l'énergie et à la subvention estimée à 30 \$/MWh dans le cadre de la loi sur la réduction de l'inflation (Inflation Reduction Act - IRA).

Il est également important de rappeler que le prix cible de 89 \$/MWh est exprimé en dollars de 2022 et qu'il sous-estime considérablement ce que les compagnies d'électricité et leurs abonnés paieront réellement si le SMR est achevé. Par exemple, en supposant un taux d'inflation modeste de 2 % jusqu'en 2030, les services publics et les contribuables paieraient 102 \$ pour chaque MWh d'électricité produite par le SMR, et non les 89 \$ que NuScale et l'UAMPS veulent leur faire croire qu'ils paieront.

L'augmentation de 53 % du prix cible de l'électricité produite par le SMR depuis 2021 est due à une hausse spectaculaire de 75 % du coût estimé de la construction du projet, qui est passé de 5,3 milliards de dollars à 9,3 milliards de dollars. Cette nouvelle estimation rend le réacteur NuScale SMR à peu près aussi cher (20 139 dollars par kilowatt) que le projet nucléaire à deux réacteurs VOGTLE actuellement en cours de construction en Géorgie, ce qui met à mal l'affirmation selon laquelle les réacteurs SMR seront peu coûteux à construire.

NuScale et l'UAMPS attribuent l'augmentation des coûts de construction à la pression inflationniste sur la chaîne d'approvisionnement énergétique, en particulier à l'augmentation des prix des matières premières qui seront utilisées dans la construction des centrales nucléaires.

<sup>45</sup> En dollar de 2020.

*Par exemple, l'UAMPS indique que les augmentations de l'indice des prix à la production au cours des deux dernières années ont fait grimper le coût des éléments suivants :*

- des tôles d'acier fabriquées, de 54 %
- des tuyauteries en acier au carbone (+ 106 %)
- de l'équipement électrique (+ 25 %)
- l'acier de construction fabriqué, de 70 %
- les fils et câbles en cuivre, de 32 %.

*En outre, l'UAMPS note que le taux d'intérêt utilisé pour la modélisation des coûts du projet a augmenté d'environ 200 points de base depuis juillet 2020. Le taux d'intérêt plus élevé augmente le coût du financement du projet, ce qui accroît le coût total de la construction.*

*En supposant que les augmentations des prix des matières premières citées par NuScale et l'UAMPS soient exactes, **les prix de la construction de tous les SMR que NuScale commercialise – et, en fait, de tous les modèles de SMR actuellement commercialisés par n'importe quelle entreprise – seront beaucoup plus élevés que ce qui a été reconnu, et les prix de l'électricité produite par ces SMR seront beaucoup plus élevés.***

*Enfin, comme nous l'avons déjà dit, personne ne doit se tromper en croyant que cette augmentation des coûts sera la dernière pour le réacteur NuScale/UAMPS. Le projet doit encore faire l'objet de travaux de conception supplémentaires, d'une autorisation de la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis, d'une construction et d'essais pré-opérationnels. L'expérience d'autres réacteurs a montré à maintes reprises qu'il fallait s'attendre à de nouvelles augmentations significatives des coûts et à des retards importants dans le calendrier à tous les stades du développement du projet.*

*L'augmentation des coûts annoncée la semaine dernière rend encore plus impératif que l'UAMPS, les services publics et les communautés participant au projet lancent des appels d'offres pour savoir s'il existe d'autres ressources capables de fournir la même puissance, la même énergie et la même fiabilité que le SMR, mais à un coût et un risque financier moindres. L'histoire montre que ce ne sera pas la dernière augmentation des coûts du projet SMR ».*

**David Schlissel est directeur de l'analyse de la planification des ressources à l'IEEFA.**

## **5.2.2 Environmental Working Group (EWG)**

Extrait de l'article de A. Makhijani et M.V. Ramana<sup>46</sup> : « Questions for NuScale VOYGR Reactor Certification : when will it be done ? And then, will it be safe ? » :

*« Le 2 janvier 2023, UAMPS<sup>47</sup> a publié un document sur des « sujets d'intérêt » qui révèle une nouvelle estimation du coût du projet NuScale qui le ferait passer des 5,32 milliards de dollars jusqu'à alors prévus à 9,3 milliards de dollars ».*

## **5.3 L'AVENIR DOUTEUX DU PROJET NUSCALE**

### **5.3.1 L'échec du projet NuScale actuel**

De récents reportages ont jeté le doute sur le projet NuScale, tant sur le plan juridique que financier. Le 14 novembre, le magazine "Nuclear Engineering International" a publié l'article "UAMPS and NuScale cancel plan to build SMRs at Idaho National Laboratory (INL)"<sup>48</sup>.

Dans son premier paragraphe, l'article écrit :

<sup>46</sup> [https://static.ewg.org/upload/pdf/FINAL\\_NuScale\\_analysis\\_for\\_EWG.pdf](https://static.ewg.org/upload/pdf/FINAL_NuScale_analysis_for_EWG.pdf)

<sup>47</sup> UAMPS : Utah Associated Municipal Power Systems, réseau électrique du groupe de communes intéressées jusqu'ici par le projet NuScale.

<sup>48</sup> <https://www.neimagazine.com/news/newsuamps-and-nuscale-cancel-plans-to-build-smrs-at-inl-11297083>

*« Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) et NuScale Power, basée dans l'Oregon, ont décidé d'un commun accord de mettre fin au Carbon Free Power Project (CFPP). Ce projet prévoyait la construction de six petits réacteurs modulaires (SMR) sur le site de l'Idaho National Laboratory (INL) du ministère américain de l'énergie (DOE) ».*

*"Malgré les efforts considérables déployés par les deux parties pour faire avancer le projet CFPP, il semble peu probable que le projet bénéficie d'une souscription suffisante pour poursuivre son déploiement".*

Une déclaration commune a été publiée :

*« Par conséquent, l'UAMPS et NuScale ont décidé d'un commun accord que l'arrêt du projet était la décision la plus prudente pour les deux parties ».*

L'article rappelle ensuite les différentes étapes du projet NuScale et livre une information dévastatrice :

*« Cependant, au début du mois, la société a été mise sous pression après un long rapport d'Iceberg Research intitulé " NuScale Power (\$SMR) : A fake customer and a major contract in peril cast doubt on NuScale's viability". Iceberg affirme que NuScale a vendu 24 réacteurs à un "faux client". Cela faisait référence à un contrat que NuScale avait annoncé en octobre pour fournir à Standard Power 1 848 MWe d'énergie fournie par 24 SMR pour alimenter deux sites de centres de données américains. Iceberg a prédit que Standard Power ne serait pas en mesure d'honorer le contrat. NuScale, dans sa réponse, a déclaré que les allégations d'Iceberg étaient "truffées d'affirmations spéculatives sans fondement et démontrent une compréhension limitée des petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR) et du secteur de l'énergie nucléaire ».*

et :

*« L'effondrement du projet soulève des questions dans d'autres pays qui ont des projets de petits réacteurs nucléaires modulaires.*

*L'échec du projet américain "met en lumière les subventions publiques qui pourraient maintenir une technologie similaire en développement au Canada, même si elle est sujette aux mêmes dépassements de coûts que ceux qui ont fait échouer le Carbon Free Power Project (CFPP) de NuScale Power Corporation dans l'Utah", a déclaré la publication en citant Gordon Edwards, président du Regroupement pour la surveillance du nucléaire : "Des investisseurs privés de l'Utah ont forcé NuScale à divulguer des informations financières concernant le coût de l'électricité produite par la centrale nucléaire qu'elle proposait", et "le coût est devenu le facteur décisif".*

*Il a ajouté : "Au Canada, les entreprises de services publics ne sont pas tenues de rendre des comptes de la même manière. Le public n'a guère la possibilité de leur demander des comptes et de déterminer le coût de l'électricité produite par ces nouveaux réacteurs nucléaires, qui sont les premiers du genre".*

*De même, Romanian Insider a noté : "La technologie des petits réacteurs nucléaires (SMR) et le projet SMR en Roumanie ont fait l'objet d'un examen minutieux après que NuScale a abandonné l'un de ses projets aux États-Unis en raison des coûts excessifs qui ont augmenté de 53 % et l'ont rendu économiquement inefficace. En Roumanie, NuScale développe un projet SMR similaire à Doicesti. NuScale a aujourd'hui quatre projets en développement aux États-Unis, un au Canada, trois en Asie, un au Moyen-Orient et trois en Europe (Pologne, Bulgarie et Roumanie) ».*

### 5.3.2 Vers un nouveau projet

Le 21 novembre 2023, World Nuclear News (WNN) a publié l'article suivant : "NuScale, ORNL to assess SMR use by industry"<sup>49</sup>

#### Citations :

« NuScale Power et l'Oak Ridge National Laboratory (ORNL) du ministère américain de l'Énergie vont collaborer à une évaluation technico-économique (AET), étudiant la capacité d'un petit réacteur modulaire NuScale à mettre en œuvre une conception permettant une augmentation rentable de la chaleur de la vapeur ».

« L'étude sera basée sur les données de processus d'une installation chimique américaine afin d'aider l'usine à répondre à ses besoins en électricité et en vapeur industrielle grâce à la technologie des petits réacteurs modulaires (SMR) de NuScale. L'AET évaluera la viabilité de la technologie SMR de NuScale avec l'augmentation de la chaleur de la vapeur pour une utilisation dans un système chimique, notamment l'examen de la fiabilité de la vapeur, les coûts opérationnels et la stabilité du système ». Elle étudiera également l'adéquation du site à l'implantation d'un SMR.

« L'AET bénéficie d'un financement dans le cadre de l'initiative Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (GAIN) du ministère de l'Énergie, qui met en relation l'industrie et les laboratoires nationaux américains afin d'accélérer le développement et la commercialisation de technologies nucléaires avancées. Le financement du projet a été annoncé en septembre, dans le cadre de la quatrième série de « chèques » GAIN attribués au cours de l'année fiscale 2023 ».

Il faut noter que cette nouvelle initiative est loin de l'approche commerciale de la première proposition NuScale. Il s'agit maintenant d'une évaluation technico-économique recevant des fonds du département de l'énergie.



<sup>49</sup> <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/NuScale,-ORNL-to-assess-SMR-use-by-industry>

## CONCLUSIONS

### 1. La route est longue

Des petits réacteurs nucléaires, pour être qualifiés de SMR, doivent être fabriqués en série en usine, essentiellement pour des avantages économiques espérés par un effet de série, puis transportés sur le site de la centrale où ils sont branchés sur le turbo-alternateur et le condenseur permettant de transformer la vapeur qu'ils produisent en électricité.

C'est la condition de cette « transportabilité » qui conduit au caractère « compact » de ces réacteurs dans lesquels sont rassemblés dans une même enveloppe en acier le cœur du réacteur contenant les assemblages de combustible et les barres de contrôle, les générateurs de vapeur et le pressuriseur.

Cette configuration qui est la « marque de fabrique » d'un SMR fait que ces modèles sont des nouveaux réacteurs, très éloignés de leurs modèles classiques de même filière, dont la conception et la réalisation doivent être examinées et contrôlées avec la plus grande vigilance.

Nous avons présenté deux modèles, NuScale et NUWARD de « centrales nucléaires », candidates au statut de SMR. Ces centrales sont constituées de « modules », chacun équipé d'un réacteur nucléaire de faible ou moyenne puissance qui, étant de la filière à uranium enrichi et eau ordinaire sous pression (PWR ou REP), bien connue tant pour les réacteurs civils que militaires, devraient être les premiers, ou parmi les premiers, susceptibles de recevoir l'ensemble des autorisations nécessaires à leur début de construction.

On a pu suivre l'évolution du modèle NuScale, plus ancien que NUWARD dans son élaboration. Malgré son avance, la centrale NuScale reste encore loin de l'autorisation de construction au vu de toutes les questions et demandes de l'Autorité de sûreté nucléaire des États-Unis (NRC). On imagine mal un début de construction avant la fin des années 2020.

Et il ne s'agit que d'un prototype dont on voit que le lieu d'implantation a été soigneusement choisi : un Centre fédéral de recherche sur le nucléaire, l'énergie et la défense (INL).

Ce modèle est d'ailleurs déjà contesté, notamment sur le plan économique et financier.

De son côté, le projet NUWARD, étudié depuis plusieurs années de façon assez confidentielle, porté par un consortium autour d'EDF, en est à l'examen de son dossier d'options de sûreté (DOS), non publié, par les autorités de sûreté de trois pays de l'Union européennes, dont la France. NUWARD fait aujourd'hui l'objet d'une considérable offensive de communication-propagande de qualité médiocre et porteuse de nombreuses contre-vérités.

Même si un certain nombre de prototypes verront sans doute le jour à coup de subventions publiques, c'est une toute autre affaire de passer au niveau supérieur : le SMR.

La première condition est d'avoir suffisamment de commandes fermes pour se lancer dans la construction d'une usine capable de fabriquer en série des réacteurs « compacts » sur la base de l'expérience acquise sur le ou les prototypes. C'est en effet sur le gain espéré sur le coût unitaire par l'effet de série que repose l'espoir des promoteurs des SMR, conscients à juste titre du coût beaucoup trop élevé d'un modèle construit sur site.

Mais l'historique du parc nucléaire français a également montré que, en cas de défaut générique, la standardisation pouvait se traduire par des pertes économiques importantes.

Une telle usine est à inventer. On a bien l'expérience de l'automobile et de l'aviation. En sera-t-il de même pour la construction d'équipements qui sont appelés à contenir des combustibles très radioactifs, contenant notamment du plutonium, dans lesquels un défaut de conception ou de construction pourrait conduire à des accidents graves ? Certes, la standardisation peut amener à des améliorations sur la qualité des équipements mais l'expérience prouve qu'un accident grave ou majeur se produit par la juxtaposition de plusieurs facteurs et notamment le vieillissement d'un équipement, le manque de maintenance, une agression extérieure (naturelle ou volontaire), une erreur d'exploitation, un non-respect des normes de sûreté.



La qualité du personnel de contrôle et de conduite est un élément fondamental. De fortes interrogations demeurent sur le nombre de personnels qui doivent être présents sur le site, tant pour l'exploitation que pour la maintenance et la capacité d'intervention en cas d'incident ou d'accident.

Enfin, toute l'attention est portée aujourd'hui sur les réacteurs dits SMR et peu ou pas d'information est fournie sur le « cycle » du combustible, les déchets radioactifs, le démantèlement de ces installations.

## 2. Un SMR, pour quoi faire ?

On comprend très bien l'intérêt d'installer des petits réacteurs dans des zones isolées, loin de tout réseau électrique, par exemple dans le Grand Nord, ce qui est d'ailleurs déjà le cas. Dans ce cas, la miniaturisation ou le caractère compact du réacteur ne présente pas un intérêt particulier.

Qui aurait donc besoin d'un SMR ?

Prenons l'exemple du modèle NuScale US460 de six réacteurs, chacun de 77 MW de puissance électrique, soit une puissance totale de 462 MW.

Certes, un ensemble de communes se sont engagées pour l'achat de l'électricité produite par le prototype prévu, à un prix déjà élevé mais loin de la réalité du fait de diverses subventions. Il n'est d'ailleurs pas certain que toutes les communes actuellement candidates maintiendraient leur engagement si le projet prenait du retard et que son coût augmentait encore (ce qui est probable).

On ne voit pas l'intérêt que présente un SMR dans une région interconnectée qui peut avoir recours à d'autres sources et notamment une production d'électricité d'origine renouvelable (en particulier photovoltaïque et éolien) dont les coûts sont en baisse rapide alors que ceux du nucléaire augmentent.

On cite également souvent le cas de la Pologne qui serait intéressée par des SMR pour remplacer des centrales à charbon de 300 à 600 MW, cela dans un pays doté d'un réseau électrique couvrant l'ensemble du territoire, y compris évidemment les centrales à charbon à remplacer.

Au-delà de la construction éventuelle d'un prototype probablement financé en partie par le vendeur et des organisations internationales, beaucoup de questions se posent ensuite, pour de vrais SMR :

- Y aurait-il une usine fabriquant des SMR en Pologne ? Peu vraisemblable.
- Y en aurait-il une en Europe ? Peut-être, mais avec quel SMR ? Tout le monde se dispute pour avoir le sien !
- Les SMR seraient-ils importés ? Nombreux problèmes juridiques de responsabilité et de coûts (hors prototype qui bénéficierait très probablement de différentes subventions).

De façon générale, l'exportation d'un SMR se heurterait à d'énormes difficultés, sur les responsabilités respectives en termes d'assurance, sur la question du combustible et des déchets, etc.

**Quant à l'exportation « tous azimuts », prônée par certains promoteurs de SMR, notamment dans les pays pauvres dits « en développement », elle serait extrêmement dangereuse sans un degré élevé de compétences locales, d'autorités de sûreté nucléaire indépendantes, de forces de sécurité, sans oublier le déploiement des contrôles de l'AIEA sur les risques de prolifération.**

### 3. SMR et climat

Les émissions de gaz à effet de serre provoquées par la production d'électricité d'origine nucléaire sont loin d'être négligeables : émissions de CO<sub>2</sub> par l'exploitation des mines d'uranium, la construction et l'exploitation des réacteurs et des usines du combustible, la gestion des déchets radioactifs, mais aussi l'émission d'autres gaz à effet de serre (le SF<sub>6</sub> par exemple). De futurs SMR y contribueraient.

Le plus fort de ces émissions se situe dans la phase de construction des installations (acier, béton, chantiers) qui peuvent être estimées et dans les mines d'uranium (excavation, transports), en quantités pratiquement inconnues.

La valeur des émissions par kWh produit qui est utilisée est le rapport de la valeur estimée des émissions totales du « système nucléaire » qui permet cette production, divisée par la production d'électricité du parc nucléaire considéré (en France par exemple) pendant les 60 ans supposés de la durée de vie des réacteurs.

Ce mode de calcul appelle deux remarques.

La première remarque est qu'un programme de construction de réacteurs, envisagé à partir de 2030 environ, ce qui serait celui d'un développement des SMR, émettrait une quantité importante de gaz à effet de serre justement dans la période où tous les efforts doivent être faits pour amener à 0 en 2050 les émissions de gaz à effet de serre. Effet négatif donc.

La seconde remarque est que si l'on envisage la construction de nouveaux réacteurs nucléaires à partir de 2030 environ, SMR ou « classiques » (le gouvernement français envisage la construction de plusieurs EPR2 à partir de cette date), ces réacteurs, prévus pour fonctionner 60 ans, devraient fonctionner dans des conditions de tensions considérables dues aux bouleversements climatiques dont nous subissons déjà aujourd'hui la rigueur, annoncés depuis des lustres par le GIEC et superbement « ignorés » jusqu'ici par la plupart des États, les grands entreprises des énergies fossiles et des organisations internationales, malgré les engagements pris.

Partout, et tout particulièrement en Europe et en France, nous allons connaître l'augmentation drastique des températures, les canicules, les incendies, les inondations, la sécheresse, la montée des eaux, la destruction des littoraux.

Or, les réacteurs nucléaires sont consommateurs d'eau pour leur construction et leur exploitation, ils réchauffent l'eau des fleuves et des rivières dont le débit a tendance à diminuer (d'ores et déjà des réacteurs sont arrêtés en France pour cette raison) ou sont implantés dans bien des cas sur des côtes inondables. Sans parler de l'évolution du risque sismique et des risques géopolitiques.

Tous ces risques vont s'accroître année après année.

Comment accepter des décisions de construction de réacteurs qui devraient fonctionner au-delà de 2100, « comme si de rien n'était » ?

Il est peu vraisemblable que de véritables SMR, donc « modulaires », fonctionnent un jour. Si c'était le cas, ce serait une solution dangereuse et ruineuse.

## ANNEXE 1 : NOUVELLE TENTATIVE PRO-SMR AUX ETATS-UNIS EN 1955

Confronté à ces arguments et désireux d'étendre l'énergie nucléaire aux régions qui ne pouvaient pas accueillir de grands réacteurs, l'AEC a annoncé en septembre 1955 un deuxième cycle de financement. Cette fois, les petits réacteurs étaient l'objectif, et non un moyen de parvenir à une fin. La Commission a reçu sept propositions et en a financé deux : un réacteur de 22 MW à Elk River (Minnesota), à environ 50 kilomètres au nord-ouest de Minneapolis, et un réacteur de 12 MW près de la ville de Piqua (Ohio). Deux autres réacteurs ont ensuite été ajoutés au programme : le réacteur Boiling Nuclear Superheater (Bonus) à Punta Higuera, à Porto Rico, et le réacteur à eau bouillante de La Crosse à Genoa, dans le Wisconsin.

Elk River a été présentée par son exploitant comme la "première centrale atomique de l'Amérique rurale". À l'instar des SMR envisagés aujourd'hui, elle était constituée de composants préfabriqués, et la cuve de son réacteur était suffisamment compacte pour être transportée sur le site dans un wagon plat standard de chemin de fer.

La conception du réacteur était une variante du réacteur à eau bouillante, qui est le deuxième type de réacteur le plus courant aujourd'hui. Mais son combustible était inhabituel, consistant en un mélange d'uranium hautement enrichi (qui contenait plus d'isotope 235 de l'uranium réagissant en chaîne que le combustible nucléaire habituel) et de thorium. De nombreux experts considéraient le thorium comme l'espoir de l'énergie nucléaire à long terme, en partie parce qu'ils craignaient que l'uranium ne vienne à manquer ; aujourd'hui encore, certains pensent que le thorium est la réponse à tous les problèmes de l'énergie nucléaire.

Lors des auditions du Congrès sur le programme de démonstration, O.N. Gravgaard, président de la Rural Cooperative Power Association, qui construisait la centrale, a déclaré : "Dans le domaine de l'énergie rurale, nous sommes partis de zéro, par nécessité. Il n'y avait pas d'électricité il y a plusieurs années.... Nous ferons tout pour que ce réacteur soit un succès financier".

La construction d'Elk River a commencé en janvier 1959 et le réacteur a atteint la criticité en novembre 1962. Mais il n'a été déclaré commercialement opérationnel qu'en juillet 1964, avec trois ans et demi de retard sur le calendrier prévu. Ce long retard est dû à divers problèmes techniques, notamment des fissures dans certains composants. Selon les auditions du Congrès en 1967, le coût de construction d'Elk River a plus que doublé, passant de 6,2 millions de dollars à 16 millions de dollars. Certes, d'autres réacteurs construits à l'époque et par la suite ont fini par coûter au moins trois fois plus cher que les estimations initiales ; en comparaison, Elk River paraissait plutôt bien.

Pour un réacteur dont la construction a duré plus de cinq ans, Elk River a eu une durée de vie remarquablement courte : trois ans et demi seulement. Le réacteur a été définitivement arrêté en février 1968 après l'apparition de fissures dans la tuyauterie du système de refroidissement. Confrontée à des coûts de réparation estimés à un million de dollars, la coopérative a choisi de ne pas les réparer. Un porte-parole de la coopérative a déclaré au Chicago Tribune que le groupe "n'avait pas envie de dépenser cet argent, d'autant plus que le réacteur n'a pas été très économique parce qu'il est trop petit", ajoutant que le réacteur avait produit de l'électricité à un coût deux fois supérieur à celui de l'électricité produite par les centrales au charbon.

Comme l'a noté le physicien nucléaire Walt Patterson dans son livre Nuclear Power (1976), Elk River est devenu le premier réacteur de démonstration à être déclassé. La cuve du réacteur étant très radioactive, il a fallu mettre au point de nouvelles torches sous-marines qui ont été manipulées à distance pour découper l'épaisse structure d'acier. Le processus a duré trois ans

et a coûté 6,15 millions de dollars, soit presque le même montant que l'estimation initiale pour la construction.

Le traitement du combustible irradié à base d'uranium-thorium s'est également avéré difficile. Finalement, le combustible usé a été expédié à une usine de retraitement dans le sud de l'Italie. Apparemment, la plus grande partie de ces combustibles irradiés est toujours entreposée en l'état.

En 1968, l'année même de la fermeture d'Elk River, le dernier des petits réacteurs de l'Atomic Energy Commission été raccordé au réseau : le réacteur à eau bouillante de La Crosse, d'une puissance de 50 MW. Cette centrale a fonctionné pendant 18 ans ; à la fin, son électricité coûtait trois fois plus cher que celle de la centrale voisine au charbon, selon un article paru en 2012 sur l'élimination du combustible usé de la centrale. Dans cet article, un ancien directeur d'usine est cité comme ayant déclaré que l'usine de La Crosse "était très bien conçue. Le seul problème était qu'elle était trop petite".

Depuis lors, aucun petit réacteur n'a été mis en service aux États-Unis. En fait, la taille des réacteurs aux États-Unis a explosé, atteignant 800 à 1 300 MW au milieu des années 1970.

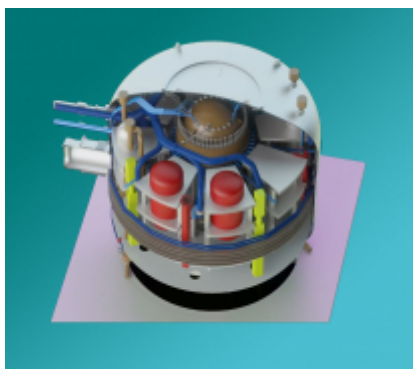
La seule exception à cette tendance de croissance a été un réacteur expérimental refroidi au gaz à haute température de 330 MW, la centrale de Fort St. Vrain à Platteville, Colorado. Il a été mis en service en 1976, avec une conception promue comme étant ultra-sûre. Mais le réacteur a été un échec. Un article du New York Times sur la décision de 1988 de le fermer a bien cerné l'essentiel du problème : "Le réacteur le plus sûr se ferme parce qu'il fonctionne rarement." Les données de l'Agence internationale de l'énergie atomique ont montré que la centrale produisait environ 15 % de l'électricité qu'elle aurait dû produire si elle avait fonctionné à pleine capacité.

**Développement des petits réacteurs modulaires : en collaboration avec les autorités de sûreté finlandaise et tchèque, l'ASN engage un examen préliminaire commun inédit du projet de réacteur NUWARD™**

Publié le 04/07/2022 à 13:52

**Note d'information**

Le 10 juin 2022, les autorités de sûreté française (ASN), finlandaise (STUK) et tchèque (SUJB) ont engagé, avec leurs appuis techniques respectifs [1], l'examen préliminaire des principales options de sûreté du projet de petit réacteur modulaire NUWARD™ porté par EDF[2].



Projet de petit réacteur modulaire NUWARD™

Cette initiative tripartite, lancée au 1er trimestre 2022 par l'ASN, constitue une première au niveau européen. Elle vise à évaluer conjointement les principales options de sûreté envisagées par EDF, notamment les objectifs de sûreté visés, la démarche de sûreté utilisée pour la conception, le recours à des systèmes passifs et l'intégration de deux modules de réacteur au sein d'une même installation.

Cette initiative permettra également d'identifier, sur un cas concret, les opportunités et les interrogations que soulèvent les petits réacteurs modulaires en termes de sûreté et d'adaptation aux différents cadres réglementaires nationaux.

L'expérience et les conclusions de cet examen multilatéral d'un projet de petit réacteur modulaire de conception avancée permettront des avancées concrètes dans l'harmonisation et la convergence des processus d'autorisation applicables à de tels réacteurs.

En particulier, l'ASN, le STUK et le SUJB partageront leur expérience et les conclusions de leur évaluation conjointe des options de sûreté avec leurs homologues européens, dans le cadre de l'initiative communautaire sur le développement des SMR, lancée en 2021 par l'Union européenne.

[1] Pour conduire ce travail, l'ASN s'appuiera sur l'expertise de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire).

[2] Le projet NUWARD™ est un concept d'unité de production d'électricité constituée par deux réacteurs nucléaires à eau sous pression, chacun de 170 MW de puissance électrique. Ce projet appartient à la catégorie des petits réacteurs modulaires, désignés à l'international sous l'acronyme de SMR (Small Modular Reactors).

## **ANNEXE 3 : IRSN, « SAVOIR ET COMPRENDRE » SUR LES SMR**

### **Du 5 avril 2023**

Les « Small Modular Reactors » (SMR) sont des petits réacteurs modulaires d'une puissance inférieure à 300 MW de puissance électrique. Certains concepts proposent une architecture permettant l'installation de plusieurs modules indépendants les uns des autres pour atteindre une puissance globale plus importante (de l'ordre de 600 – 800 MW).

Les promoteurs affichent différentes applications des SMR pouvant répondre au contexte actuel :

Ils constituent un moyen de production d'électricité pouvant satisfaire des besoins variés, exploiter la cogénération et se prêter à des applications non électriques (chaleur industrielle, production d'eau douce...)

Ils constituent une solution adaptée pour des régions isolées ou disposant d'infrastructures limitées

Ils affichent des performances accrues en matière de sûreté grâce à des dispositifs de sûreté intrinsèque et passive. En cas d'incident ou d'accident, les réacteurs pourraient être mis et maintenus en arrêt sûr pendant une plusieurs jours sans intervention humaine.

Du fait de leur faible puissance et de leur petite taille, les SMR permettent des choix variés en termes de conception, certains pouvant être en effet favorables à la sûreté. La plupart des concepts font appel à des solutions techniques innovantes dont la faisabilité et l'efficacité restent toutefois à démontrer.

Il existe plus de 80 concepts qui reposent sur différentes technologies de réacteurs (filiale à eau légère, à haute température, à gaz, à métal fondu ...). Selon la technologie utilisée, des travaux de recherche et développement importants peuvent être nécessaires pour concevoir et démontrer la sûreté des réacteurs.

### **Pour en savoir plus :**

- [Note d'information sur la sûreté des réacteurs modulaires de faible puissance \(Small Modular Reactors\)](#)
- [Forum des organismes de réglementation des petits réacteurs modulaires \(PRM\)](#)
- [Programme PASTIS \(PASSive Systems Thermalhydraulic Investigations for Safety\)](#)

#### ANNEXE 4 : LETTRE DE LA NRC A NuSCALE DU 15 NOVEMBRE 2022

Mme Carrie A. Fosaaen  
Directrice des affaires réglementaires NuScale Power, LLC  
1100 Circle Boulevard, Suite 200 Corvallis, OR 97330  
Le 15 novembre 2022

OBJET : Rapport d'évaluation de l'état de préparation à la demande du projet d'approbation de la conception standard de NuScale Power, LLC.

#### Chère Madame Fosaaen

Le 21 octobre 2022, les membres du personnel de la Commission de réglementation nucléaire des États-Unis (NRC) ont réalisé une évaluation de l'état de préparation préalable à la demande (ci-après "évaluation de l'état de préparation") du projet de demande et des documents justificatifs que NuScale Power, LLC<sup>50</sup>, a l'intention de soumettre dans le cadre de sa demande d'approbation de la conception standard (SDAA : *Standard Design Approval Application*). La lettre de NuScale demandant l'évaluation de l'état de préparation se trouve dans le système d'accès et de gestion des documents de l'Agence (ADAMS : *Agency wide Documents Access and Management Systems*), sous le numéro d'accès ML22145A460. NuScale a demandé l'évaluation de l'état de préparation afin (1) d'identifier toute information requise manquante dans la SDAA proposée et (2) d'identifier les problèmes techniques ou réglementaires susceptibles de compliquer l'acceptation ou les examens techniques de la SDAA. Le plan d'évaluation de l'état de préparation utilisé par le personnel pour procéder à l'examen du projet de SDAA de NuScale se trouve à l'adresse ML22178A254.

Le personnel a effectué l'évaluation de l'état de préparation via la salle de lecture électronique de NuScale, conformément à l'instruction LIC-116 du bureau de la NRC, "*Preapplication Readiness Assessment*" (ML20104B698). L'évaluation de l'état de préparation ne fait pas partie du processus officiel d'examen de l'acceptation de la NRC ; toutefois, le personnel a//les experts ont effectué l'évaluation de l'état de préparation dans le cadre d'une activité de pré-demande approuvée qui lui a permis de comprendre les problèmes importants ou les lacunes d'information entre le projet de demande et le contenu technique devant être inclus dans la demande finale soumise à la NRC.

Le rapport d'observation ci-joint présente les observations de l'équipe de la NRC sur le projet de demande de SDA de NuScale. Cette équipe a observé et constaté que le projet de SDAA de NuScale est un travail en cours et que plusieurs chapitres sont incomplets ou n'ont pas été mis à jour pour prendre en compte le modèle US460. En outre, plusieurs documents référencés dans le projet de SDAA (rapports thématiques, rapports techniques, calculs, tableaux techniques, références, informations sur l'analyse probabiliste des risques, etc.) n'ont pas été mis à la disposition de l'équipe lors de l'évaluation de l'état de préparation. Ainsi, la NRC n'a pas observé l'intégralité de la proposition de demande de SDAA et ne peut donc pas fournir une évaluation complète du projet de demande. En outre, le rapport d'observation du personnel n'inclut pas les informations dont NuScale sait qu'elles sont manquantes ou incomplètes et les observations (incluses) ne prédéterminent pas si la demande de SDA sera acceptée pour examen.

Lors de l'évaluation de l'état de préparation, le personnel a utilisé une approche progressive avec des regroupements de chapitres et de sections pertinents. Le recueil des observations

---

<sup>50</sup> LLC : « *Limited liability company* ». Une LLC est une entité commerciale hybride ayant à la fois certaines caractéristiques d'une corporation et celles d'un partenariat ou d'une entreprise. Il s'agit d'une forme juridique de société qui prémunit ses propriétaires d'une responsabilité illimitée dans la grande majorité des États des États-Unis (Wikipedia).

dans le rapport est organisé par chapitre et tous les chapitres qui n'ont pas fait l'objet d'observations sont absents du rapport.

Dans l'ensemble, l'équipe de la NRC a identifié plusieurs questions difficiles et/ou importantes qui pourraient être des domaines d'intérêt pour l'acceptation de la SDAA et/ou l'examen de la sécurité. Bien qu'il y ait eu un engagement précoce sur ces sujets, l'équipe encourage un engagement continu sur ces sujets jusqu'à la soumission de la SDAA. Ces sujets sont les suivants :

- Classification de la sûreté du système d'alimentation en courant continu renforcé (EDAS)
- Plan global d'évaluation des vibrations et soutien aux tubes des générateurs de vapeur
- Analyse de l'oscillation des ondes de densité
- Matériaux de la cuve de confinement et de la cuve du réacteur
- Analyse des accidents de perte de réfrigérant
- Optimisation de la SDA

Vous trouverez ci-joint deux rapports d'observation - une version non exclusive (pièce jointe 1) et une version exclusive (pièce jointe 2). Le dossier ADAMS complet se trouve sous le numéro ML22305A518. Les observations incluses sont celles que l'équipe de la NRC a considérées comme significatives. D'autres observations moins importantes ont été identifiées et communiquées à NuScale tout au long de l'examen. Le personnel recommande à NuScale de tenir compte de l'ensemble des observations lors de la finalisation de la demande et de la date de soumission de la demande, en fonction de votre évaluation du temps nécessaire pour répondre aux observations.

Si vous avez des questions, veuillez contacter Getachew Tesfaye, Senior Project Manager, au (301) 415-8013 ou à l'adresse Getachew.Tesfaye@nrc.gov.

Docket No. 99902078

Pièces jointes :

1. Rapport d'observations
  2. Rapport d'observation, propriété
- cc : w/encl : DC NuScale Power LLC Listserv

Je vous prie d'agréer, Madame, Monsieur, l'expression de mes salutations distinguées,  
/RA/

Brian Smith, Directeur de division  
Division des licences nouvelles et renouvelées Bureau de la réglementation des réacteurs nucléaires

**OBJET : RAPPORT D'EVALUATION DE L'ETAT DE PREPARATION DE LA DEMANDE D'APPROBATION DE LA CONCEPTION STANDARD DE NUSCALE, POWER, LLC PROJET DE DEMANDE 15 NOVEMBRE 2022**  
**DISTRIBUTION : PUBLIC GTesfaye, NRR RVivanco, NRR BBavol, NRR DDrucker, NRR ASchiller, NRR MDudek, NRR BSmith, NRR BThomson, NRR RidsNrrDnrl RidsNrrDnrlNrlb RidsEdoMailCenter RidsAcrsMailCenter RidsOgcMailCenter**



## **ANNEXE 5 : PROGRAMME DE TRAVAIL DES AUTORITES DE SURETE SUR LE PROJET NUWARD**

### **Présentation de l'examen précoce conjoint**

#### **NUWARD SMR Joint Early Review • Pilot Phase Closure Report • September 2023**

Avant le début de l'initiative, le groupe de travail a convenu d'un processus de travail et d'un programme de travail. La portée du programme de travail a été limitée aux sujets les plus importants, car il n'a pas été jugé possible ni "rentable" de revoir l'ensemble de la conception à ce stade, en particulier en utilisant une forme innovante de collaboration internationale.

Le programme de travail était initialement composé de 5 sujets. Ces sujets ont été sélectionnés parce qu'ils remplissaient au moins l'une des conditions suivantes :

1. il s'agit d'un sujet qui apporte des réponses sur le niveau de sûreté que l'on peut attendre, et sur l'approche pour atteindre ce niveau ;
2. il s'agit d'un sujet spécifique aux SMR pour lequel il n'existe pas ou très peu d'exigences de sûreté, de recommandations ou d'orientations, ou d'informations et de retours d'expérience significatifs ;
3. il s'agit d'un élément important de la démonstration de sûreté dont l'élaboration et l'évaluation nécessitent beaucoup de temps en raison de sa complexité ou de sa nouveauté. Commencer l'examen de ce sujet le plus tôt possible pourrait contribuer à réduire le délai de la procédure d'autorisation.
4. il s'agit d'un sujet pertinent pour la conception du réacteur NUWARD SMR, dans la mesure où un changement de régime aurait un impact important sur la conception ou la démonstration de sûreté. Un retour d'information aussi précoce que possible peut permettre au fournisseur de répondre plus facilement et plus rapidement aux attentes des régulateurs.

En outre, l'une des conditions essentielles pour qu'un sujet soit pris en compte dans le programme de travail est qu'il soit suffisamment mûr et que la documentation correspondante soit disponible.

Enfin, il était possible d'ajouter un sujet supplémentaire au cours de l'initiative, s'il remplissait les conditions ci-dessus, s'il avait un impact limité sur le calendrier de l'initiative et s'il faisait l'objet d'un consensus au sein du groupe de travail.

Sur la base de ces conditions, une proposition de liste de thèmes a été proposée, discutée et acceptée. Le programme de travail initial comprenait les thèmes suivants :

- Thème 1 : définition des objectifs de sûreté. Ce thème couvre les objectifs généraux de sûreté, les principales exigences et approches en matière de sûreté, la mise en œuvre de la défense en profondeur dans la conception et les règles d'étude pour les "conditions de base de la conception" (DBC) et les "conditions d'extension de la conception" (DEC). Ce thème remplit les conditions 1), 2) et 4) ;
- Thème 2 : identification des conditions de base de la conception (DBC). Dans ce thème, une liste préliminaire de DBC, le processus général d'identification des DBC et la manière dont la liste des DBC sera consolidée tout au long du projet ont été présentés. Les approches globales pour les conditions du DEC et l'élimination pratique ont également été présentées. Ce thème remplit les conditions 1), 3) et 4) ;
- Thème 3 : utilisation de systèmes de refroidissement passifs. Dans ce thème, EDF a présenté la stratégie de refroidissement du réacteur et de la piscine de combustible usé. L'approche de la classification de la sûreté a également été présentée, car elle pourrait aider à comprendre certains aspects de ce thème. Ce thème remplit les conditions 1), 2), 3) et 4) ;
- Thème 4 : plan de développement des outils de calcul scientifique. Dans ce thème, EDF a présenté la liste des principaux outils de calcul scientifique qui devraient être utilisés pour la conception du réacteur NUWARD SMR et les études transitoires, ainsi que le programme de validation associé. Ce thème remplit les conditions 2) et 3) ;
- Thème 5 : intégration des modules jumeaux. Ce thème couvre l'approche de sûreté concernant le risque d'interactions entre les deux réacteurs, ainsi que la piscine de combustible usé, étant donné

qu'ils sont tous situés dans le même bâtiment. Quelques exemples de systèmes partagés ont également été présentés. Ce sujet remplit les conditions 2) et 4).

Au cours de la réunion technique sur les objectifs de sûreté, il a été observé que l'étude probabiliste de sûreté (PSA) devait être discutée. Par conséquent, et considérant que ce sujet remplit les conditions 1), 2) et 3), ce sujet a été ajouté au programme de travail (sujet 6). Dans ce thème, EDF a présenté la manière dont la PSA serait utilisée pour soutenir le processus de conception, ainsi que les méthodes et les outils pour le développement de la PSA.

L'examen était basé sur des extraits préliminaires du dossier des options de sûreté. Ce niveau de détail correspond au début de la phase de conception de base. La réunion technique a fourni des informations supplémentaires par le biais de présentations et de discussions entre experts.