

**MICHEL
BELAKHOVSKY**

G2E - TERE

**LES RÉACTEURS
NUCLÉAIRES "SMR"
DANS LE MONDE :
ENTRE
ENGOUEMENTS ET
RÉALITÉS**

L'énergie nucléaire est de retour. Si aujourd'hui, le nucléaire fournit 10 % de l'électricité mondiale, la puissance installée pourrait doubler d'ici 2050 selon l'**AIE**, voire nettement plus à notre avis. Nous traiterons ici des petits réacteurs modulaires (sigle anglais **SMR**), dont la puissance se situe dans la gamme de quelques MW à 300 MW. Ceux-ci bénéficient d'un véritable engouement actuellement, même si leur réalisation est encore très limitée. Nous présentons un état des projets SMR dans le monde, et décrivons trois d'entre eux : les projets français, **NUWARD** et **NAAREA** et le projet américain **NUSCALE**. Une vision prospective sur les SMR et leurs domaines d'applications spécifiques est également fournie, ainsi qu'une annexe sur le modèle prometteur des réacteurs rapides à sels fondus.

Nota Bene. En termes de puissance, nous utilisons le MW et GW, entendus comme électriques.

1. GÉNÉRALITÉS SUR LES SMR

Selon l'**Agence internationale de l'énergie atomique (IAEA)**, il existe actuellement environ 70 projets SMR dans le monde, avec une grande variété de conceptions et de technologies. Il s'agit de réacteurs à eau pressurisée, de réacteurs à eau bouillante, de réacteurs à sodium, de réacteurs à sels fondus et de réacteurs à gaz. Les technologies les plus matures de la **génération III** seraient prêts d'ici 2030 ... mais la **génération IV** pointe aussi son nez !

Il existe une documentation abondante sur les SMR (cf. les Sources de l'article). Le présent article vise à actualiser à début 2023 la situation et s'attache à présenter l'effort français qui, bien que récent, semble prometteur.

1.1 SPÉCIFICITÉS DES SMR

Pour la seule production d'énergie, la taille idéale serait de l'ordre du GW pour la plupart des marchés, et pourrait monter à 1,6 GW pour les pays industrialisés. Mais les problèmes de ces grosses centrales classiques, qui les handicapent :

- pour les pays moins développés, l'importance du financement initial
- leur durée de construction (~ 2 décennies)
- leur éloignement de la demande, en raison de l'emprise au sol et des conditions de sûreté

En revanche, les SMR souffrent moins de ces contraintes, permettant ainsi de délocaliser l'énergie nucléaire et accélérer leur utilisation industrielle. Ils pourraient être une réponse adaptée, si toutefois le coût plus élevé du MW était compensé par la modularité, autorisant la fabrication de série.

Derrière le vocable « SMR », on regroupe des produits bien différents par leur puissance et leurs usages, avec des applications d'électricité et de chaleur, dans différents secteurs, soit par ordre croissant de puissance :

- dizaine de MW : les communautés isolées etc. (voir ci-dessous \$2.2)
- jusqu'à 200 MW : les sites industriels intensifs en énergie : mines, extraction de gaz ou pétrole, production d'hydrogène, désalinisation, data centers
- 200 - 400 MW : remplacement des milliers de centrales au charbon, électrification des villes moyennes, pôles industriels isolés, réseaux de capacité limités.

Les fermes SMR présentent l'avantage, par une maintenance tournante, d'assurer la continuité du service. Leur fabrication en usine permet de plus la centralisation des compétences ainsi qu'un transport et installation plus aisés. Un seul container maritime standard suffirait pour les microréacteurs.

La *modularité* des SMR est un enjeu majeur, qui permet la standardisation : ils peuvent être construits sur site à partir de composants standards préfabriqués en usine ; l'approche est intégrée dès la phase de pré-APS.

En **génération 3 (GEN3)**, il s'agit principalement de **REP** (eau pressurisée), comme NUWARD en France ou NUSCALE aux Etats-Unis.

Pour la **4ème génération (GEN4)** un Forum international regroupe les efforts mondiaux.

En GEN4, parmi les différents prototypes, on assiste - en France notamment - à un intérêt croissant pour les SMR à sels fondus, bien que leur faisabilité reste encore à démontrer.

1.2 LA R&D

On distingue les projets les SMR d'innovation de ceux demandant une rupture technologique. Les premiers sont des **RNT (réacteurs à neutrons thermiques)** à eau pressurisé ou bouillante, à combustible classique. Les autres, thermiques et surtout rapides, utilisent des combustibles spécifiques solides (**235UOX** et **Pu**) ou liquides (**U, Pu**).

La **R&D** demande une expertise multidisciplinaire sur l'ensemble du système, incluant : physique des réacteurs, chimie, sûreté, conception, matériaux et l'ensemble du cycle des combustibles. Même si la France possède dans les centres **CEA, CNRS, Framatome** et **Orano** entre autres les compétences utiles, une collaboration européenne et internationale bien structurée est nécessaire.

Même si les caractéristiques et applications recherchées sont très différentes, des sujets génériques existent comme la démonstration de sûreté, de gestion des déchets, les matériaux métalliques des composants. Le prototypage (jumeau numérique, puis démonstrateur physique) et les études de sûreté sur l'ensemble du cycle sont aussi des aspects communs.

Les SMR à combustibles liquides seront particulièrement traités dans cet article, car les plus innovants de tous et en rupture d'avec le concept classique de tous les réacteurs actuels. En exploitation, ils nécessitent un retraitement chimique en usine des sels fondus usés radioactifs contenant matière fissile et produits de fission.

1.3 LES PROJETS EN COURS

Aujourd'hui, 70 projets de SMR sont proposés dans le monde, d'abord par l'industrie nucléaire mais aussi par des start-ups, avec une dynamique forte aux Etats-Unis, Canada, Russie et Chine ; deux sont raccordés au réseau (Russie) et un en démarrage (Chine). Tous les autres projets sont à des stades divers d'avancement : concept, **APS** ou **APD**, choix de site du prototype, certification de sûreté, qualification des composants et des combustibles ... La course est lancée.

La plupart des projets SMR sont au stade du « *conceptual design* ». C'est le cas du microréacteur français décrit plus bas (\$2.2).

En revanche, plusieurs SMR sont plus avancés. Outre les concurrents directs, en termes d'énergie de **NUWARD** (\$2.1), on peut notamment citer :

- refroidis à l'eau : **CAREM** (25 MW) en Argentine, **ACP100** en Chine, **KLT-40** en Russie
- refroidis à gaz haute température : **HTR-PM 100 MW** en Chine
- en sels fondus : **IMSR 195 MW** de **Terrestrial Energy Inc.** (Canada), **KP-FHR 140 MW** de **KAIROS Power** (Etats-Unis)

1.4 LE MARCHÉ DES SMR

Le marché des SMR n'existe pas encore, mais leur potentiel est soutenu par de forts financements publics, de nombreux pays en prévoient dans leur trajectoire énergétique et de nouveaux acteurs entrent dans le monde nucléaire en termes de projets comme de clients. Ce marché devrait s'éclaircir d'ici 2030 ; certains constructeurs pourraient en construire quelques centaines, d'autres pas ... et la France est plutôt en retard sur d'autres grands pays nucléarisés, qui ont leurs réseaux.

On notera qu'il y a déjà des projets SMR aboutis pour des marchés nationaux de niche. Ainsi en Russie, une solution mobile (sur barge) pourrait alimenter les zones côtières.

Ce type de réacteur de **GEN3** peut fournir chaleur et électricité dans des lieux éloignés, comme des villes de plusieurs milliers d'habitants, et leurs alentours. Les inconvénients portent sur l'approvisionnement en combustible, la conduite d'opérations de sauvetage et les déchets à bord.

1.5 CONDITIONS DU SUCCÈS DES SMR

Pour des SMR en grand nombre et à l'export, il faut au départ certifier un modèle de réacteur. Selon la **réf. 8**, l'avenir des SMR dépend de plusieurs conditions comme la sûreté passive, la production en série massive (donc présentant peu de types différents et de sites d'assemblage), la dynamique rapide de puissance face à une forte fluctuation de la demande d'électricité, des opérateurs fiables et maîtrisant tout le cycle du combustible.

2. LES SMR EN FRANCE ET EN EUROPE

La France est présente dans la « course » aux SMR, avec les 2 projets suivants pour la production d'énergie :

- le projet **NUWARD**
- le microprojet **X-SMR**

Ces projets peuvent être vus comme complémentaires sous plusieurs angles : en termes de statut (public vs privé), de puissance (haut et bas de gamme), de génération (3 et 4) et de degré d'innovation (incrémentale vs de rupture). De plus, les déchets du premier - uranium appauvri, plutonium et actinides mineurs - pourraient, après traitement de l'uranium appauvri servir de combustible ainsi qu'à la première charge du second.

Pour être complet pour la France, il faut mentionner des études sur un petit **SMR calogène** (30 MW) et 2 **SMR RNR-Na** (150 MW), ainsi que le démarrage d'une nouvelle *startup* de production d'énergie pour l'industrie (70 MW) (Nicolas BREYTON, communication privée).

Au plan européen enfin, la European SMRs Partnership Initiative a été lancée en juin 2021, en vue de développer un modèle unique.

2.1 LE PROJET NUWARD

CALENDRIER

L'**avant-projet sommaire (APS)** de **NUWARD**, date de 2019. Il est issu des compétences du réacteur naval repris par **TechnicAtome**, et d'une R&D en 2012-15. Les partenaires co-investisseurs en sont **EDF, CEA, TechnicAtome** et **Naval Group**. En fin 2022, l'architecture devrait être finalisée, et la demande de licence à l'**ASN** déposée en vue d'un démonstrateur.

DESCRIPTION

La puissance totale de **NUWARD**, de 340 MW est obtenue par 2 réacteurs identiques de **GEN3** dans une même piscine. L'assemblage de ces 2 réacteurs est réalisé en usine.

NUWARD présente les caractéristiques éprouvées des **REP** – sous la forme compacte de propulsion navale : un combustible connu (**U** enrichi à 5%, similaire au parc actuel), des composants faisables dans les ateliers de **Framatome**. Le coût visé est de 4 k€ / kW, mais serait supérieur dans le cas de systèmes intermittents en raison du suivi de charge.

La conception est la plus modulaire possible, y compris l'enceinte métallique, pour un assemblage avec peu de soudures (déjà en test sur l'**EPR2**). La durée de vie visée est de 60 ans.

La cuve inclut tout le circuit primaire avec, en haut, les sorties vapeur et les entrées d'eau, et en dessous les pompes primaires de convection forcée et les générateurs de vapeur à plaques – une innovation majeure. Cette cuve se retrouve dans une enceinte métallique en « *coquetier* » immergée dans un bassin d'eau qui assure la source froide ultime en refroidissement passif, en cas de coupure d'électricité et d'eau (cf. Figure 1).

Les 3 innovations à « *dérisquer* », qui permettent la simplicité et la compacité sont le générateur de vapeur à plaques, les mécanismes de commande immergés et le système de refroidissement passif.

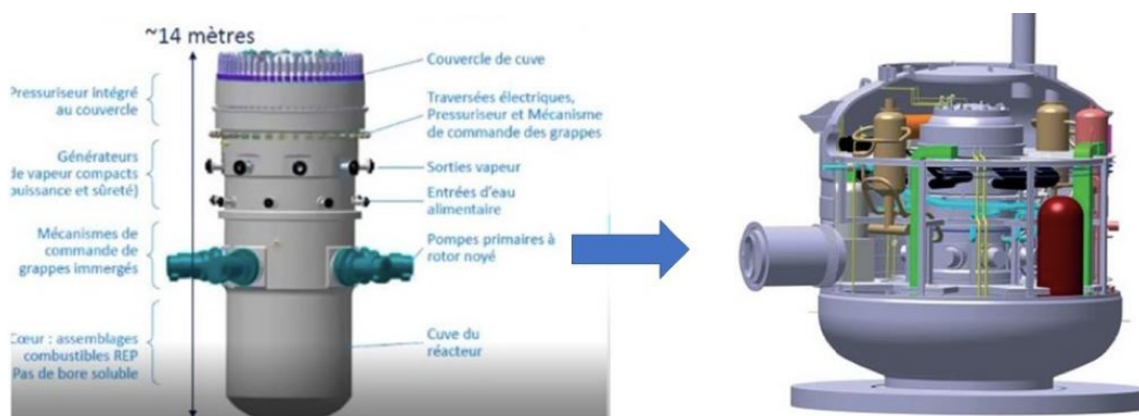


Figure 1. Cuve et enceinte "coquetier"

Source: Nuward.

MARCHÉ VISÉ

NUWARD pourrait atteindre le marché d'ici 2030, si le processus obtient le feu vert d'ici 2-3 ans. La cible prioritaire de NUWARD est la décarbonation des centrales au charbon – 3 300 tranches dans le monde (de moins le 400 MW pour les 3/4 et vieillissantes pour 1/2 au moins) – suivie par les besoins multi-usages de cogénération, de production d'hydrogène, de désalinisation, de valorisation du CO2.

Les concurrents de **NUWARD** – en **GEN3** et dans sa gamme de puissance – figurent sur la Tab.1, ainsi que leur niveau d'avancement :



Tabl.1. Phase de développement des concurrents de Nuward

Source: R. CRASSOUS.

2.2 LE MICRORÉACTEUR XSMR DE LA STARTUP NAAREA

La référence mondiale en sels fondus est le **MSFR** de conception grenobloise de 1,4 GW (cf. l'Annexe 1).

LE XSMR : UN MINI-RÉACTEUR À SELS FONDUS COMMERCIAL D'ICI 2030 ?

Une caractéristique majeure du **MSFR** est de pouvoir adapter sa conception à différents usages, on peut parler en ce sens d'un véritable « *couteau suisse* ». En particulier, sa puissance maximale peut être choisie sur une large gamme, du MW au GW.

La suite décrit le projet de microréacteur de la *startup* française **NAAREA** (« **Nano Abundant Affordable Resourceful Energy for All** »), constituée en 2020. Celle-ci s'est dotée d'un conseil scientifique dans lequel figurent les chercheurs grenoblois. La *startup* va proposer une source d'énergie décarbonée ultra-compacte, abondante, propre, autonome, compétitive, pilotable. La production en grande série de ces microcentrales d'énergie permettrait un coût du kWh inférieur à celui des renouvelables intermittents.

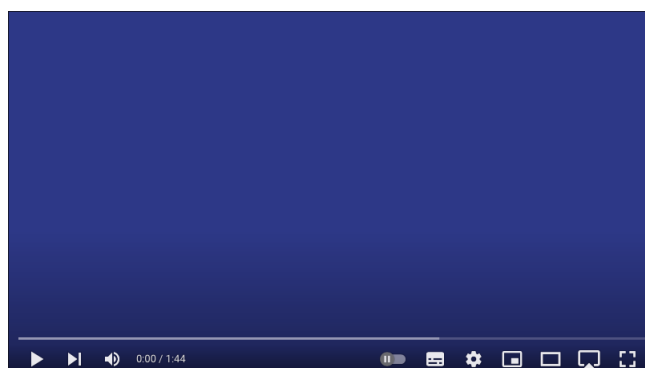
Le **XSMR**, de **GEN4**, présente une triple innovation de rupture : d'abord technologique (sels fondus avec sécurité intrinsèque, simplicité de fonctionnement, excursion de puissance très rapide etc. ; mais aussi sa petite taille et sa production modulaire ; et enfin par le combustible, les « déchets » radioactifs disponibles.

Les utilisations visées par **NAAREA** sont variées, avec 4 grands secteurs d'application : les transports terrestres, maritimes, voire aérien, l'agriculture et l'alimentation, les communautés isolées et les pays en voie de développement et enfin les bâtiments intelligents.

3. LE PROJET AMÉRICAIN NUSCALE

NUSCALE, de **GEN3**, au stade de préconception - certification, est un concept original en termes d'exploitation, car il comprend 12 modules à eau pressurisée, de puissance 60 MW (voire 77 MW pour réduire le coût). Chaque module (~ 20 m sur 5) intègre en une seule unité génération et échangeur de chaleur, à l'intérieur d'une enceinte de confinement.

Le réacteur fonctionne en circulation naturelle sans pompe. L'eau est chauffée lorsqu'elle passe dans le cœur et s'élève à travers une colonne montante. Au sommet, elle est entraînée vers le bas par le circuit d'eau refroidie dans les générateurs de vapeur. Une vidéo fournit une explication plus détaillée:



CONCLUSION

Parmi toutes les utilisations potentielles, les premières pourraient être - outre la production d'électricité et l'alimentation des réseaux, la production d'acier, de ciment, d'hydrogène ; et par la suite les réseaux de chaleur ou le dessalement d'eau de mer (ou en utilisation mixte avec l'électricité).

L'avenir des SMR semble prometteur. Mais il faudra réduire la dispersion des efforts et des technologies et mutualiser les expériences. Si le microréacteur à sels fondus démontrait son intérêt, nous préconiserions le recentrage mondial sur cette approche, sur quelques échelles adaptées aux différents besoins, et en surgénération (fermeture du cycle du combustible).

RÉFÉRENCES

- Académie des Sciences**, "Les réacteurs nucléaires modulaires de faible puissance (SMR) état des lieux et perspectives", *Rapport de l'Académie des Sciences* (Octobre 2022). <https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/reacteurs-nucleaires-modulaires-de-faible-puissance-smr.html>
- CRASSOUS Renaud**, "Petits réacteurs: le monde des SMR en ébullition", *Polytechnique insights* (Mars 2021). <https://www.polytechnique-insights.com/dossiers/energie/les-dernieres-avancees-technologiques-de-lenergie-nucleaire/petits-reacteurs-le-monde-des-smr-en-ebullition/>
- EDF**, "NUWARD™, le SMR développé par EDF pour un monde bas-carbone", *EDF* (2023). <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/nous-preparons-le-nucleaire-de-demain/le-projet-smr-nuwardtm/le-projet>
- European SMR pre-Partnership**, "Steering Committee (SC) and specific Work - Streams (WSs)", *European SMR pre-Partnership* (2021). <https://snetp.eu/wp-content/uploads/2022/06/SNETP-TSI-PI-Foratom.pdf>
- GREENWOOD Matthew**, "Russia Put a Nuclear Power Plant on a Boat", *Engineering* (Septembre 2019). <https://www.engineering.com/story/russia-put-a-nuclear-power-plant-on-a-boat>
- LIOU Joanne**, "What are Small Modular Reactors (SMRs)?", *International Atomic Energy Agency* (Novembre 2021). <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- MERLIN Charles**, "Les petits réacteurs modulaires dans le monde: perspectives géopolitiques, technologiques, industrielles et énergétiques", *Études de l'Ifri* (Mai 2019). https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/merlin_petits_reacteurs_2019.pdf
- NAAREA**, *Site internet* (2023). <https://www.naarea.fr>
- NuScale Power**, "Normal System Operation", *Youtube* (2019). <https://www.youtube.com/watch?v=vU-llqiP4sU>
- T. INGERSOLL Daniel**, *Small Modular Reactors: Nuclear Power Fad or Future?*, Woodhead Publishing. (Novembre 2015).
- Transitions et Énergies**, "L'énergie nucléaire est vraiment de retour", *Transitions et Énergies* (Septembre 2022). <https://www.transitionsenergies.com/energie-nucleaire-est-de-retour/>
- World Nuclear News**, "NuScale announces SMR power uprate", *World Nuclear News* (Novembre 2020). <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/NuScale-announces-SMR-power-uprate>

ANNEXE 1. LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES À SELS FONDUS

Grenoble a joué le rôle majeur, grâce au laboratoire **CNRS/LPSC**, qui en 2 décennies, a conçu le **MSFR (Molten Salts Fast Reactor)**, de conception simple, intrinsèquement sûr, sa dynamique rapide en puissance etc. Cette avancée grenobloise majeure est devenue LA référence tant européenne (programmes **EVO**, **SAMOFAR** puis **SAMOSAFER.eu** lancé en 2019) que mondiale (**Forum GIF-4**, **gen-4.org**, **base ARIS de l'AIEA**). Une description détaillée des réacteurs à sels fondus est donné en *réf.14* :

Les réacteurs nucléaires sont classés en générations au cours du temps. Actuellement les **générations 2 et 3** sont en service, la génération suivante (**GEN-4**) se prépare. Cette dernière prévoit la possibilité de réutiliser le combustible utilisé une fois retraité, d'où peu de déchets résiduels et peu d'extraction de minerai.

Rappel sur les 4 objectifs de la **GEN4** sont :

- Une sûreté accrue
- Des déchets réduits
- La résistance à la prolifération
- Une amélioration économique

Le scénario de référence pour un déploiement à grande échelle des réacteurs rapides est le multirecyclage de matériaux « déchets », avec mise à l'échelle au niveau industriel.

Parmi les prototypes possibles en **GEN-4**, le seul à combustible liquide fait l'objet d'un intérêt croissant. Son schéma (cf. Figure 2) est similaire à celui des réacteurs existants à ceci près, qu'il est immergé dans un chlorure ou fluorure (sous forme liquide à haute température), probablement le sel de cuisine **NaCl**. Pour le caloporteur ou sel intermédiaire, il est plutôt envisagé un mélange eutectique de **LiCl, NaCl et KCl**. Le système inclut le réacteur lui-même, la boucle d'extraction pour la production électrique et de chaleur ainsi que l'unité de retraitement/réinjection des produits de fission.

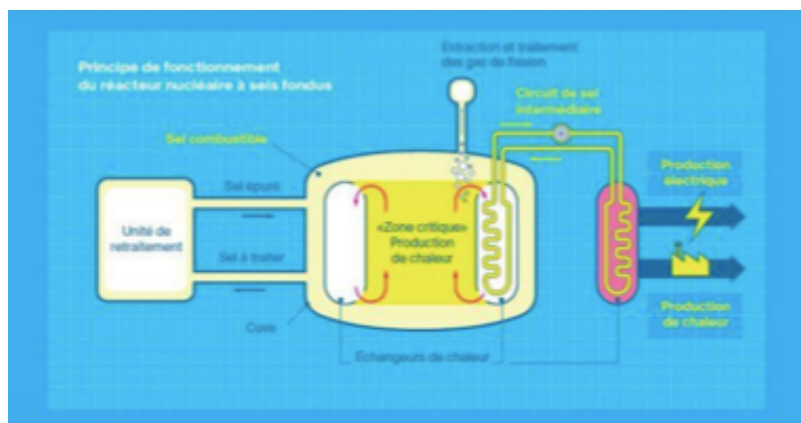


Figure 2. Principe de fonctionnement du réacteur à sels fondus

Source: Schéma présenté au Bootcamp d'Avignon en Octobre 2021. .

Le 1er prototype à sels fondus date de 1954, aux Etats-Unis (**ORNL**) ; l'armée états-unienne prévoyait d'en équiper ses avions bombardiers, projet réussi (le réacteur a fonctionné au sol comme prévu et a permis de développer un matériau adapté aux sels fondus, l'**hastelloy-N**) mais abandonné par les militaires. Dans les 2 décennies suivantes un second prototype civil cette fois a également fonctionné à basse puissance avec beaucoup de succès, toujours à **ORNL** aux Etats-Unis, puis un projet de haute puissance a été conçu mais n'a pas vu le jour du fait de la concurrence des réacteurs à eau déjà existants.

L'intérêt pour les sels fondus a repris à partir des années 80's au Japon, puis au cours de la décennie suivante en France - d'abord sur un réacteur surrégénérateur (**CEA, EDF**) puis incinérateur en Russie et Tchéquie. Enfin dans les années 2000, **EDF** s'est intéressé aux sels fondus comme brûleur de Pu, et par ailleurs a été créé un réseau européen.

A noter que le recyclage du combustible dépendra de la réussite de la séparation des produits de fission du mélange de sels fondus, en surmontant les problèmes chimiques et techniques. De plus, la gestion des sels usés doit être prise en compte.

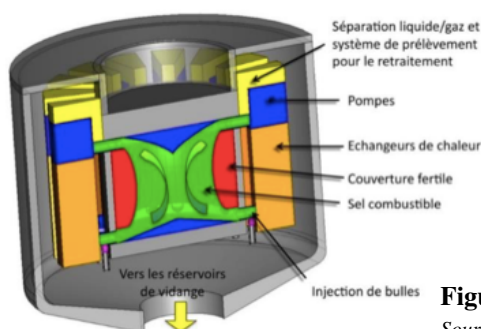


Figure 3. Schéma du cœur du MSFR de référence

Source: D. HEUER, Elsa MERLE.

Le schéma de la cuve du réacteur de référence est donné sur la Figure 3. C'est un réacteur régénérateur de 1,4 **GWélec**. Il comprend 3 circuits : le circuit combustible dans la cuve réacteur, le circuit intermédiaire faisant circuler le sel de refroidissement et le circuit de conversion pour transformer la chaleur en électricité. L'ensemble est protégé par plusieurs barrières de confinement. Le circuit combustible est entièrement confiné dans une cuve sans effort mécanique ou thermique.