

Transport maritime et course aux SMR avancés

Samuel Furfari*, Ernest Mund**

@ 49074

Mots-clés : *transport maritime, émissions de CO₂, transition énergétique, combustibles, nucléaire*

Le transport maritime a connu de nombreuses transitions technologiques au cours de son histoire. La prochaine transition — liée aux impératifs du climat — est annoncée. Elle affectera tout le secteur dont la flotte commerciale (porte-conteneurs, vraquiers) est une composante essentielle, consommatrice d'hydrocarbures très polluants. Une tendance (amorcée en Russie) vise à équiper ces flottes de systèmes de propulsion munis de réacteurs avancés (génération IV). L'article décrit divers projets très innovants basés sur une flotte équipée de réacteurs nucléaires à sels fondus dotés d'une grande sûreté dont le combustible initial suffira à couvrir toute la durée de vie des installations.

1. Le transport maritime, une histoire ancienne en évolution

Comme aux époques de la Renaissance et des comptoirs européens d'Asie du Sud-Est, le transport maritime reste cinq siècles plus tard le vecteur essentiel du commerce international. La mondialisation est devenue réalité et a profondément changé l'économie. Le transport maritime permet d'opérer les échanges de marchandises à l'échelle globale.

La navigation commerciale a commencé avec les galères, dont l'énergie de déplacement était celle des muscles des rameurs; cette dépense limitée ne permettait la navigation qu'au long des côtes — en particulier celles de Méditerranée. Vint ensuite la navigation à voile, véritable innovation technologique, qui permit la conquête des océans et la découverte de nouveaux continents. Vers 1840 apparut

la navigation à vapeur à partir du charbon et au début du xx^e sous l'impulsion de Winston Churchill, le passage à l'utilisation du fuel pour la propulsion de navires de guerre appelés à «gagner les futures batailles navales».

Les transports maritimes sont bon marché avec des rejets atmosphériques faibles par tonne de marchandise transportée. Environ 80 à 90 % des marchandises achetées ou vendues aujourd'hui voyagent sur les océans. Le développement est énorme; en 40 ans (1980 à 2020), le tonnage de port en lourd des porte-conteneurs est passé de 11 millions de tonnes à environ 281 millions de tonnes. Si près de 10 000 avions circulent constamment dans les airs, 90 000 navires sillonnent les mers avec la distribution suivante (cf. Tableau 1) par types de navires [United Nations conference on trade and development, 2021]. Les ports en lourd sont exprimés en milliers de tonnes.

* ESCP London.

** Université catholique de Louvain.

Principaux types	2021	Pourcentage
Vraquiers	913 032	43
Pétroliers	619 148	29
Porte-conteneurs	281 784	13
Approvisionnement <i>offshore</i>	84 094	4
Méthaniers	77 455	4
Chimiquiers	48 858	2
Marchandises diverses	76 754	4
Autres	33 516	2
Total mondial (en milliers de tonnes)	2 134 640	100

Tableau 1. Flotte mondiale par types de navires — 2021

L'aviation et le transport maritime représentent respectivement 3,0 % et 3,2 % des émissions mondiales de CO₂.

2. Le transport maritime, en quête de protection de l'environnement

Le développement du transport maritime n'est pas près de se tarir et entraînera une demande accrue d'énergie. Jusqu'à présent, le combustible principal de ce secteur est le «fond du baril», c'est-à-dire la fraction la plus lourde du raffinage du pétrole. Cette «coupe» — appelée «fuel soute» (bunker) — est fortement chargée en métaux lourds et en soufre ce qui la rend bon marché, mais polluante en termes de rejets de dioxyde de soufre et de particules. Comme l'usage en est pratiqué essentiellement en haute mer, cette pollution a été longtemps tolérée par les instances internationales, dont l'Organisation maritime internationale (OMI), émanation des Nations unies.

La prise en compte de la pollution conduit aujourd'hui à la recherche de substituts au *bunkering*. Utiliser du «gazole pêche» ou du «diesel marin léger» moins polluants est possible, mais les armateurs — sur qui il est difficile d'exercer des pressions à cause des pavillons de complaisance — s'y opposent à cause de son prix plus élevé que le fuel de soute. On peut également continuer à utiliser le fuel polluant en lavant les fumées dans des

installations appelées *scrubbers*, mais cela est plus coûteux. Une solution intéressante et en plein essor est l'utilisation du GNL qui offre des avantages notables en matière de pollution et de coûts [Furfari, 2015]. Les nouveaux bateaux de croisières fonctionnent à présent au GNL, également pour une question d'image. Il convient de noter que lors des chocs pétroliers des années 1970, l'énergie éolienne a été proposée comme alternative avec des voiles en métal léger, mais cette solution a été rapidement abandonnée. Certains aujourd'hui pensent y revenir.

On estime que le transport maritime devrait réduire ses émissions de CO₂ d'ici 2050 à 50 % de leur valeur de 2008. À défaut, ces émissions qui représentent aujourd'hui 3,2 % des émissions globales pourraient atteindre 10 % de ces émissions à la date en question; voire 50 % si la réduction de la trace carbone du système énergétique était conforme aux attentes. Envisager un recours à l'énergie nucléaire pour le transport maritime futur s'inscrit dans ce cadre.

3. Transport maritime et énergie nucléaire

L'intérêt pour la propulsion navale nucléaire n'est pas nouveau. Il dérive à l'origine des préoccupations liées à la guerre froide et des applications militaires qui en ont résulté aux États-Unis puis ailleurs. Après le développement de bâtiments militaires équipés de réacteurs en différents pays, l'attention s'est aussi portée sur la navigation civile. L'intérêt fut cependant de courte durée et il n'a produit que très peu de réalisations. La réalisation principale inscrite dans la perspective de l'Atoms for Peace Program du président Eisenhower est celle du NS Savannah, un navire-cargo équipé d'un réacteur nucléaire comme source de propulsion. Lancé en 1959, il navigua de 1964 à 1972. L'installation vint avant l'heure, mais elle permit toutefois de réaliser les avantages potentiels de cette technologie face aux éléments plus difficiles liés à la sûreté et aux impacts proprement nucléaires tels la radioactivité et les déchets.

Le temps semble arrivé aujourd'hui où la propulsion nucléaire peut être envisagée sous un angle nettement plus favorable et bénéfique, compte tenu des systèmes nucléaires nouveaux en cours de développement. De manière générale, cette propulsion pourrait rendre les navires plus légers et plus rapides sur les longs trajets. Un autre avantage est que leur équipement pourrait accessoirement permettre la fourniture d'énergie électrique dans les ports où ils font escale, ce qui est important pour les régions isolées, faiblement électrifiées et difficiles d'accès comme celles situées le long des côtes de Sibérie.

L'application future de la propulsion nucléaire, principalement à des fins commerciales, sera particulièrement intéressante dans le secteur des vraquiers et des porte-conteneurs dont le nombre ira en croissant pour couvrir les échanges mondiaux. Les grands porte-conteneurs ont besoin d'une quantité importante d'énergie pour atteindre une vitesse de 30 nœuds considérée comme normale. La consommation d'énergie pour la

propulsion répond à une équation qui contient le cube de la vitesse et une fonction à la puissance $2/3$ d'un ensemble de paramètres qui tiennent compte de la charge et du type de bateau [Network for transport measures, 2015]. La conséquence pour la technologie actuelle est son coût dû au poids de fuel embarqué en plus de son impact environnemental. Les moteurs diesel consomment plus de 200 tonnes de carburant par jour et émettent 600 tonnes de CO_2 par jour.

Une vitesse de 30 nœuds ne pose pas de problème à la propulsion nucléaire. Celle-ci permettra de réduire sensiblement les temps de navigation par rapport à leurs valeurs actuelles du fait d'une réduction considérable des nécessités de ravitaillement en combustible. Core Power, société d'ingénierie anglaise spécialisée dans le transport maritime, estime qu'une traversée du Pacifique, actuellement de 12 jours, en prendra 7 avec la propulsion nucléaire. Le voyage aller-retour de Corée du Sud vers l'UE pourrait passer de 80 à 85 jours aujourd'hui, à seulement 45 jours, le gain de temps permettant d'éviter le canal de Suez, dont le coût justifie un contournement du continent africain.

Si ces espoirs se réalisent, il s'agira d'une véritable révolution de la navigation en haute mer.

4. De quelle propulsion nucléaire parle-t-on ?

En 1944, à la suite des travaux d'Enrico Fermi, plusieurs technologies sont à l'étude aux États-Unis pour exploiter l'énergie de fission : l'eau légère, les hautes températures (pile de Daniels) et la technologie des neutrons rapides dans des milieux refroidis au sodium. Toutes trois utilisent un combustible sous forme de pastilles d'uranium enrichi en ^{235}U . Certains envisagent des installations dont le cœur est homogène et fluide [Briant, Weinberg, 1957; Weinberg, 1997; Weinberg, 1994]. La fin de la Deuxième Guerre mondiale (Hiroshima et Nagasaki), suivie de l'entrée en guerre froide

contre l'Union soviétique, va donner la prééminence aux applications militaires.

L'amiral Hyman Rickover, responsable de la flotte de sous-marins de l'US Navy, est convaincu qu'une propulsion nucléaire permettrait à ceux-ci de rester très longtemps en immersion et de devenir par là des armes de dissuasion. Rickover opte pour la technologie à eau légère qui permet de réaliser des systèmes compacts indispensables dans ce cas. Le Nautilus, premier bâtiment équipé d'un réacteur à eau sous pression (REP/PWR), le STR (*Submarine Thermal Reactor*) construit par Westinghouse, est mis à flot en 1954. C'est l'ancêtre des réacteurs à eau légère, la technologie majoritaire aujourd'hui pour la production d'électricité. Un autre sous-marin nucléaire appelé Seawolf est construit peu après par General Electric. Il est équipé d'un réacteur refroidi au sodium. Pour des raisons de commodité et de sûreté, c'est le concept PWR qui va prévaloir pour la propulsion des sous-marins dans les pays occidentaux (États-Unis, Royaume-Uni, France). Le NS Savannah, dont il a été question plus haut, était lui aussi équipé d'un PWR. L'URSS en construira également, refroidis aux métaux liquides (alliage plomb/bismuth).

Les États-Unis possèdent actuellement 82 bâtiments nucléaires (dont 71 sous-marins et 11 porte-avions), la Russie 58, le Royaume-Uni 12, la France 11, la Chine 10 et l'Inde 2. L'ensemble des bâtiments nucléaires de l'US Navy a accumulé à ce jour 6200 réacteur-an de fonctionnement sans accident, montant très supérieur à celui des réacteurs électrogènes du pays (4000 réacteur-an), illustrant la maîtrise de cette technologie de propulsion. Elle est, comme on va le voir, amenée à évoluer [Ragheb, 2011].

En 1946, l'US Air Force s'intéresse elle aussi à la propulsion nucléaire pour des raisons stratégiques analogues. Il n'est pas encore question de missiles balistiques et un avion muni d'un système de propulsion nucléaire pourrait rester très longtemps dans les airs. L'initiative est accueillie avec beaucoup de scepticisme dans les laboratoires de recherche, car ce qui

est possible en milieu marin est beaucoup plus difficile à garantir dans l'atmosphère. Certains chercheurs veulent cependant y croire. En collaboration avec la firme Fairchild Engine, ils lancent le projet ANP (*Aircraft Nuclear Propulsion*). Il est exclu de recourir aux réacteurs à eau, l'objectif de propulsion dans l'air ne pouvant être atteint qu'à l'aide de températures élevées (> 700 °C). Des systèmes métalliques s'imposent. L'avion à propulsion nucléaire ne verra jamais le jour, mais il va donner naissance aux réacteurs à sels fondus, fruits des travaux à son sujet. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) met au point en 1954 *Aircraft Reactor Experiment* (ARE), une installation à sels fondus de 3 MWth dont le combustible à base de tétrafluorure d'uranium (UF₄) circule à la température de 815 °C dans une matrice en oxyde de béryllium (BeO) pour la modération des neutrons [Bettis et al, 1957]. Démantelée en 1955, l'installation est remplacée par *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) avec un combustible semblable dans lequel on introduira de l'uranium ²³³U à titre d'essai, de puissance double et modérée au graphite. Rendue critique en 1965, MSRE sera opérationnelle pendant quatre ans, fournissant une belle moisson de résultats [Haubenreich, Engel, 1970]. À cette date, les recherches sur les systèmes à sels fondus sont abandonnées, l'industrie et la recherche étant focalisées sur les réacteurs à eau légère (LWR) et les surgénérateurs à neutrons rapides, refroidis au sodium.

5. Gen-IV et avenir du transport maritime

5.1 Génération IV (Gen-IV)

On reparle de la technologie des sels fondus en 2001 lorsque le Department of Energy (DOE) des États-Unis lance le Generation-IV International Forum (GIF), un groupement d'étude destiné à identifier les technologies nucléaires du futur répondant de manière stricte à des critères de sûreté, d'économie, de respect de l'environnement et d'absence de risque de prolifération. Une invitation est adressée aux pays dotés de programmes

nucléaires importants. Dix d'entre eux répondent à l'appel et, à la suite d'études approfondies, identifient six technologies conformes aux exigences. La technologie des sels fondus (*Molten Salt Reactor – MSR*) en fait partie comme le montre la Figure 1. Elle est même considérée par les rédacteurs du Gen-IV Roadmap comme une des technologies les plus sûres.

Les raisons de cette sûreté accrue sont multiples. Sans entrer dans les détails (qu'on trouvera dans [Dolan, 2017]), on notera qu'un ensemble de caractéristiques réduit considérablement le spectre des accidents potentiels de ces systèmes. L'absence d'eau dans le cœur du réacteur élimine les risques d'accident par

perte de réfrigérant primaire (LOCA) comme ce fut le cas à Three Mile Island. Elle élimine aussi les risques d'explosion d'hydrogène à la suite de réactions zirconium/eau qui peuvent se produire sur des crayons de combustible à haute température mis à nu (un événement qui eut lieu à Fukushima). De même, l'absence de sodium écarte les risques de réactions chimiques fortement exothermiques. Une pression proche de la pression atmosphérique, l'état liquide du combustible et des propriétés neutroniques favorables (coefficient de réactivité de température fortement négatif) vont également dans le sens de la sûreté.

Le fait qu'aux températures de fonctionnement ($\approx 700\text{ °C}$) le combustible des MSR soit

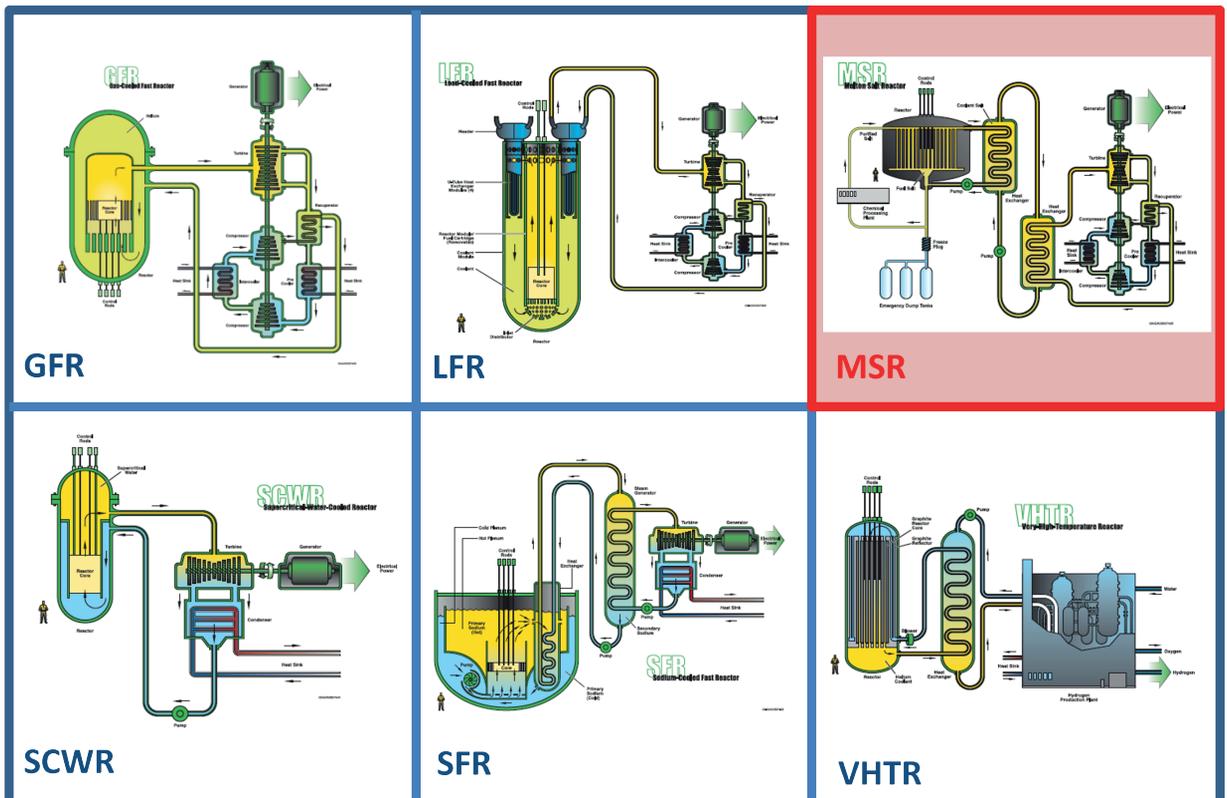


Figure 1. Les six technologies phares de Gen-IV : GFR (*Gas Fast Reactor*), LFR (*Lead Fast Reactor*), MSR (*Molten Salt Reactor*), SCWR (*Super Critical Water Reactor*), SFR (*Sodium Fast Reactor*), VHTR (*Very High Temperature Reactor*)

(voir [U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum, 2022])

en phase liquide rend l'alimentation en combustible frais plus aisée que pour les systèmes à combustible solide. Bien que l'opération soit délicate, une alimentation régulière est envisageable, ce qui n'est pas le cas pour ces derniers. Il n'est donc pas besoin de prévoir — comme pour ceux-ci — une réserve de réactivité de longue durée, ce qui écarte les risques d'accident de criticité de type Tchernobyl. Les MSR ne sont d'ailleurs pas pourvus de barres de réglage. La composition du sel fondu est telle que l'état liquide peut être maintenu jusqu'à 1 400 °C, bien au-delà des valeurs de fonctionnement. Enfin, si pour l'une ou l'autre raison, la température du sel descend en dessous de 459 °C, température de fusion du fluorure de lithium et béryllium (FLiBe) qui le compose, il y a solidification de ce dernier avec retenue en masses des produits de fission non volatils. De telles caractéristiques ont un impact positif au plan économique, via la réduction des systèmes actifs garantissant la sûreté de l'installation.

Dernier aspect et non des moindres qui place les MSR dans la catégorie des technologies disruptives : l'utilisation de sels fondus chlorés (plutôt que fluorés) permet de concevoir des systèmes à spectre de neutrons rapides et de procéder à l'élimination complète des actinides tels le plutonium, américium, ou curium à demi-vies de plusieurs centaines de milliers d'années produits au cours de leur fonctionnement. Cela implique que, moyennant un traitement adéquat, le combustible utilisé des réacteurs à eau actuels, stocké en piscines, devient une ressource énergétique au même titre que les ressources minières. Toutes les matières fissiles et fertiles contenues dans ce stock peuvent disparaître à l'exclusion des seuls produits de fission, réduisant de manière drastique la durée de vie des déchets.

5.2 Avenir du transport maritime

Plusieurs concepteurs de réacteurs à sels fondus voient le jour dans les années 2000-2020 un peu partout dans le monde (voir [Dolan, 2017]). Parmi eux, TerraPower dont le prototype *Molten Chloride Fast Reactor*

(MCFR) en cours de développement est un réacteur à spectre rapide.

Le bureau d'ingénierie Core Power ambitionne de réduire la trace carbone de la navigation maritime à l'échéance 2050, conformément aux exigences de l'OMI. Il a mis sur pied un projet dénommé Maritime-MSR (m-MSR) qui regroupe TerraPower, la compagnie d'électricité Southern Company et Orano International, société de combustible nucléaire. L'objectif visé est de permettre aux quelque 17 000 plus gros navires commerciaux de bénéficier d'une propulsion nucléaire. Au total, ces navires représentent une puissance installée de 318 GW, avec des valeurs unitaires de 15 à 50 MW. Pour les navires plus légers, la propulsion nucléaire se ferait par l'entremise de combustibles synthétiques (hydrogène et ammoniac) produits sur des plateformes flottantes connues sous le nom de *Floating, Production, Storage and Off loading vessels* (FPSO).

Les navires les plus lourds seraient équipés d'un réacteur MCFR parfaitement protégé en cale par des blindages adéquats. Au lancement du navire, le réacteur serait équipé de tout le combustible nécessaire pour une navigation en continu pendant 20 à 30 ans. Au déclassement du navire, le réacteur serait une masse inerte (hormis une décroissance résiduelle de produits de fission). En cas d'accident maritime, au fond des océans, une telle masse ne représenterait aucun risque de dommage à l'environnement. À titre d'exemple, Core Power fournit les chiffres relatifs aux rejets (déchets, CO₂ et gaz à effet de serre) d'un navire chargé d'une cargaison de minerai de fer (180 000 tonnes) lors d'un trajet aller-retour de 60 jours entre le Brésil et l'Asie [Core-Power Archives – NAMEPA, 2021]. Pour les trois modes de propulsion (GNL, combustibles synthétiques et propulsion nucléaire), ces rejets exprimés en valeurs relatives s'élèvent à :

GNL	H ₂ – NH ₃	MCFR
1,12 × 10 ¹³	9,0 × 10 ¹⁰	1

Ces valeurs sont le reflet de la densité en énergie (en J/kg) particulièrement élevée de la matière fissile en comparaison des combustibles fossiles.

L'absence de ravitaillement et des opérations simplifiées de maintenance par du personnel hautement qualifié à bord du navire devraient faciliter les négociations entre armateurs et autorités portuaires. Ce sont d'ailleurs les éléments réglementaires qui sont les plus délicats à négocier. Core Power s'efforce de vérifier que ce programme ambitieux soit compatible avec l'ensemble des règles internationales en vigueur, notamment les conventions internationales relatives à la sûreté de la vie en mer (SOLAS), à la prévention de la pollution des navires (MARPOL), à l'entraînement des équipages (STCW) dont l'OMI détient la responsabilité et des dispositions en matière de non-prolifération. Elle est relativement confiante dans l'avenir de son projet.

Core Power et ses partenaires ont récemment signé un accord avec le DOE pour la construction d'une installation d'essai de la technologie au laboratoire INL (Idaho National Laboratory) sous le nom de MCRE [World Nuclear News, 2021]. Cette démarche est le prélude aux changements annoncés pour la navigation commerciale dans les prochaines décennies.

6. La Russie navigue rapidement vers le nucléaire...

La Russie a lancé début janvier 2022 un nouveau brise-glace à propulsion nucléaire baptisé Sibir. Rien de particulier en apparence, le pays ayant une longue pratique dans ce domaine avec l'exploitation d'une dizaine de navires équipés de réacteurs PWR de génération II (Gen-II) depuis le milieu des années 1950. Ce lancement vient un peu plus d'un an après celui d'Arktika, brise-glace de caractéristiques identiques. Ces événements sont passés à peu près inaperçus — hormis de sources et de commentateurs spécialisés [World Nuclear News, 2022; Taccon, 2021]

— malgré un intérêt stratégique évident. Ils montrent la progression des Russes dans le secteur des SMR (*Small Modular Reactors*) regroupant sous un nom générique des réacteurs de puissance limitée (≤ 300 MWe) pour la production d'énergie sous forme d'électricité ou de chaleur. Les brise-glaces mis en exploitation — et prochainement un troisième dénommé Oural — sont tous les trois équipés de deux unités du réacteur RITM-200, aux fins de propulsion. Ce réacteur est un PWR de Gen-III+, de 50 MWe construit par OKBM-Afrikantov, une filiale de Rosatom. Au plan technologique, le réacteur a des caractéristiques semblables à celles du concept NuScale développé aux États-Unis. Comme ce dernier, il est de type intégré avec des générateurs de vapeur inclus dans la cuve, ce qui rend le système plus modulaire et en améliore la sûreté intrinsèque face aux risques d'accidents par perte de réfrigérant. Le réacteur RITM-200 succède au KLT-40, également développé par OKBM-Afrikantov, qui équipe les brise-glaces d'ancienne génération. La barge Akademik Lomonossov, mise en service en 2019 et installée à Pevek au bord de l'océan glacial Arctique, est équipée de deux unités de ce type, des PWR de Gen-II, pour couvrir les besoins en énergie électrique des industries du nord de la Sibérie et de communautés locales isolées traditionnellement couverts par des combustibles fossiles très difficiles à acheminer. Des SMR de type RITM-200M vont produire l'électricité et la chaleur nécessaire à de nouvelles mines d'or ou de cuivre dans la région d'Irkoutsk au nord de la Mongolie ainsi qu'une mine d'or dans la région de Tchoukotka.

L'industrie russe va de l'avant dans le développement d'un créneau de SMR dont les retombées sur le transport maritime commercial sont importantes. Comme nous l'avons vu, elle n'est pas la seule à s'intéresser à ce créneau, mais le choix technologique des PWR lui donne de l'avance sur d'autres projets dont la maturité nécessite des compléments de R&D.

Conclusion

Ceux qui, malgré le scepticisme général, avaient appuyé l'initiative de l'US Air Force en étant conscients que les résultats de ces travaux aboutiraient à des avancées concrètes dans la production de hautes températures, domaine très utile pour des secteurs tels celui de la chimie, étaient en avance sur leur temps. Le domaine était en dehors des préoccupations du moment, la seule application civile qui ait fait sens à l'époque (en dehors de l'extension des ressources, par génération de plutonium) étant la production d'électricité. C'est la « pile » à neutrons rapides EBR-1 (*Experimental Breeder Reactor-1*) (et non un réacteur à eau légère) qui produira les premiers kilowattheures d'électricité fin 1951, suivie en 1953 par les kilowattheures délivrés par l'installation à sels fondus du programme *Aircraft Nuclear Propulsion* (ANP) : étonnant clin d'œil de l'histoire, aucune des deux installations n'ayant été conçue pour produire de l'électricité!

En ce qui concerne la navigation civile, les développements ont été beaucoup plus limités, la navigation commerciale propulsée à l'énergie nucléaire ayant été rapidement abandonnée en raison des problèmes de sécurité qu'elle posait ainsi que des craintes soulevées dans l'opinion publique. Comme nous l'avons vu, beaucoup d'éléments sont en place; ils devraient permettre à la situation de changer dans les années à venir.

RÉFÉRENCES

Bettis, E.S. et al., 1957. "The Aircraft Reactor Experiment-Design and Construction", *Nuclear Science and Engineering*, 2, 804-825.

Briant, R. C., Weinberg, A. M., 1957. "Molten Fluorides as Power Reactor Fuels", *Nuclear Science and Engineering*, 2, 797-803.

Core-Power Archives – NAMEPA (North American Marine Environment Protection Association), 2021. <https://namepa.net/wp-content/uploads/2021/03/2021.CORE-POWER-K37-EN-NAMEPA.pdf>.

Dolan, Thomas J. (ed.), 2017. "Molten Salt Reactors and Thorium Energy", Woodhead Publishing Series in Energy, 815 pp.

Furfari Samuel, «Le GNL dans les transports, une alternative sur la bonne voie», 2015. *La Revue de l'Énergie*, n° 627, septembre-octobre 2015.

Haubenreich, P. N., Engel, J. R., 1970. "Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment", *Nuclear Applications & Technology*, 8, 118-136.

Network for transport measures, 2015. 7.5 Fuel Consumption as a function of the load, <https://www.transportmeasures.org/en/wiki/manuals/sea/fuel-consumption-as-a-function-of-load/>.

Ragheb, Magdi, 2011. "Nuclear Naval Propulsion" In *Nuclear Power: Deployment, Operation and Sustainability*, edited by Pavel Tsvetkov. London: IntechOpen.

Taccoen, L., 2021. "SMR (Petits Réacteurs Modulaires) – Les Cent Fleurs Les Américains et les Autres", <https://www.geopolitique-electricite.fr/documents/ene-316.pdf>.

United Nations conference on trade and development, 2021. Review of maritime transport, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2021_en_0.pdf.

U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum, 2022. "A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems", GIF-002-00, 91 pp.

Weinberg, A. M., 1994. "The First Nuclear Era – The Life and Times of a Technological Fixer", Springer New York.

Weinberg, A. M., 1997. "The proto-history of the molten salt system", *J. Accel. & Plasma Research*, 2, 23-26.

World Nuclear News, 2021. "Fast spectrum salt reactor to be built at INL", <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Fast-spectrum-salt-reactor-to-be-built-at-INL>.

World Nuclear News, 2022. "Nuclear icebreaker Sibir enters service", <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Nuclear-icebreaker-Sibir-enters-service>.

BIOGRAPHIES

SAMUEL FURFARI est ingénieur civil chimiste (1978) et docteur en sciences appliquées (1982) de l'Université Libre de Bruxelles. Il a été professeur de géopolitique de l'énergie dans la même université de 2003 à 2021. Il enseigne à présent cette discipline à ESCP London. Il a travaillé pendant 36 ans comme haut-fonctionnaire à la Direction générale énergie de la Commission européenne, où il a conçu et mis en œuvre des politiques énergétiques, en particulier pour le développement durable. Il est président de la Société Européenne des Ingénieurs et Industriels. Il est auteur d'une quinzaine de livres en diverses langues. Son dernier ouvrage est *L'utopie hydrogène*.

ERNEST MUND est ingénieur civil mécanicien électricien de l'Université Libre de Bruxelles (1964), ingénieur en sciences nucléaires appliquées et docteur en sciences appliquées. Il est actuellement directeur de recherches honoraire du FNRS et professeur émérite à l'Université catholique de Louvain où il a dispensé des enseignements en génie nucléaire. Ses travaux de recherches ont été consacrés aux méthodes de résolution de problèmes de transport de neutrons. Il est auteur (et co-auteur) d'une centaine d'articles scientifiques ainsi que de deux livres sur les techniques d'éléments finis.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- Regards d'un pétrolier sur l'avenir des petits réacteurs modulaires, *Pierre-René Bauquis (n° 651, juillet-août 2020)*
- Les petits réacteurs modulaires, une nouvelle ère nucléaire? Approche géopolitique et stratégique, *Michel Derdevet, Nicolas Mazzucchi (n° 657, juillet-août 2021)*
- Le projet NUWARD™, une nouvelle offre nucléaire européenne au service de la neutralité carbone, *Renaud Crassous (n° 661, mars-avril 2022)*

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.