

Aurora : un microréacteur innovant

Maxime Velleur

Master 2 Risques Environnementaux et Sûreté Nucléaire

Introduction

De nombreux sites situés dans les latitudes nordiques sont souvent isolés et ne sont pas raccordés au réseau électrique. Il s'agit pourtant de zones très énergivores puisqu'elles ont besoin de chaleur et d'électricité pour alimenter les processus industriels alors qu'elles sont très reculées donc difficiles à approvisionner. De plus, le soleil n'est pas assez abondant pour une alimentation avec panneaux solaires donc le seul recours est de tout faire fonctionner avec des **générateurs diesel** (technologie à forte émission de CO₂). Dans un objectif de limiter le réchauffement climatique, Oklo, une entreprise californienne, a conçu un microréacteur nucléaire innovant de **1.5 MWe** (la puissance d'une éolienne) et d'une autonomie de **20 ans** nommé **Aurora**. Sa mission sera d'alimenter en énergie les lieux nécessitant une source fiable d'électricité sans émission de CO₂. Nous nous sommes donc intéressés de plus près à ce réacteur doté d'une technologie de pointe afin de comprendre **quelles sont les innovations technologiques qui composent ce microréacteur ?**

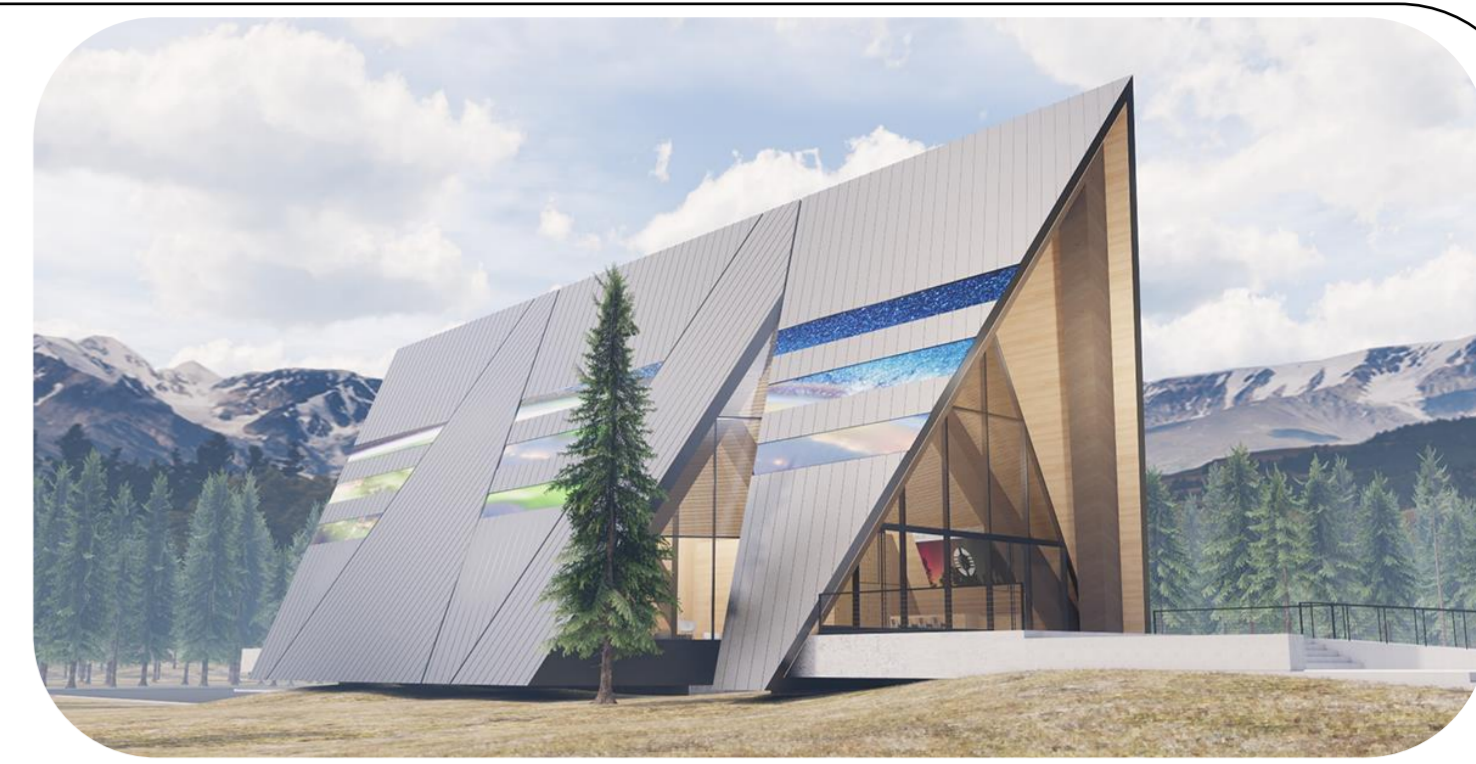


Figure 1 : Aurora vue de l'extérieur (Oklo, 2019)

Présentation d'Aurora

Ce nouveau microréacteur est un RNR (Réacteur à Neutrons Rapides) refroidi au sodium et capable de délivrer une puissance de **1,5 MWe**. Il est alimenté par du combustible **uranium métallique UFE** (Uranium Faiblement Enrichi) dont la teneur en uranium 235 est de **20 %** et la masse de combustible dans le cœur est de **3 tonnes** (100 tonnes pour un REP 1300 MWe). Le bâtiment abritant ce réacteur s'étend sur **420 m²** (600 000 m² pour un CNPE) et s'élève à **18 m** (cf. figure 1). La construction d'un réacteur opérationnel est prévue entre 2022 et 2025. Voici un tableau comparatif des microréacteurs actuellement en conception :

Nom	Entreprise	Puissance	Autonomie	Combustible
eVinci	Westinghouse (USA)	200 kWe - 5 MWe	>3 ans	TRISO
Holos generators	HolosGen (USA)	3-100 MWe	3-20 ans	TRISO
Xe-Mobile	X-energy (USA)	1 MWe	3 ans	TRISO
NuScale	NuScale Power (USA)	10-50 MWe and 1-10 MWe	>10 ans	UO ₂
SEALER	LeadCold (Suède)	3 MWe	30 ans	UO ₂
U-Battery	Urenco (UK)	4 MWe	5 ans	TRISO
MMR	Ultra Safe Nuclear Corporation (USA)	5 MWe	20 ans	TRISO

Figure 2 : tableau comparatif des microréacteurs en projet (R. Testoni, 2021)

Aurora vs générateur diesel

Le Canada compte 292 collectivités éloignées pour lesquelles Aurora pourrait être une source d'énergie. Les données ci-dessous sont basées sur une **moyenne établie parmi 114** d'entre elles, celles qui ont communiqué leurs données énergétiques.

Coût d'achat	2 x 300 000 \$
Puissance/pers	3,15 KW/pers
Demande/pers	10,1 MWh/an/pers
Volume de diesel/KWh	0,452 L/KWh
Prix du diesel	1,228 \$/L
Coût du transport	6 M\$
Coût maintenance/exploitation	2 M\$

D'après ces données, nous avons déduit que **450 personnes** peuvent être alimentées par une production électrique de 1,5 MWe. Cela correspond à un besoin global de **90 900 MWh** sur 20 ans.

Figure 7 : tableau des données d'entrée (RNCAN, 2011)

41 millions de litres de diesel sont donc nécessaires pour un coût de **50,5 M\$**. En ajoutant le coût d'achat de **2 machines** (espérance de vie de 10 ans chacune), du transport ainsi que de la maintenance/exploitation on obtient un total de **59 M\$**.



Figure 8 : groupe électrogène 1.5 MWe (Caterpillar)

Concernant Aurora, le coût de la centrale est de **10 M\$**, en ajoutant la main d'œuvre et les coûts imprévus (retard...) il a été estimé un coût de **22 M\$**.

Le combustible a un coût de 7500 \$/kg soit **24 M\$** (inflation comprise) et deux opérateurs seront en charge du pilotage pour un coût annuel de 300 000 \$ soit **6,5 M\$** sur 20 ans (inflation comprise). On obtient donc un prix total de **52,5 M\$**.

	Générateur diesel	Aurora
Coût total	59 M\$	52,5 M\$
Prix du kWh	0,34 \$	0,20-0,25 \$
Rejets/déchets produits	183 000 tonnes de CO ₂	Cube de 85 cm de côté

Figure 9 : tableau bilan (R. Testoni, 2021)

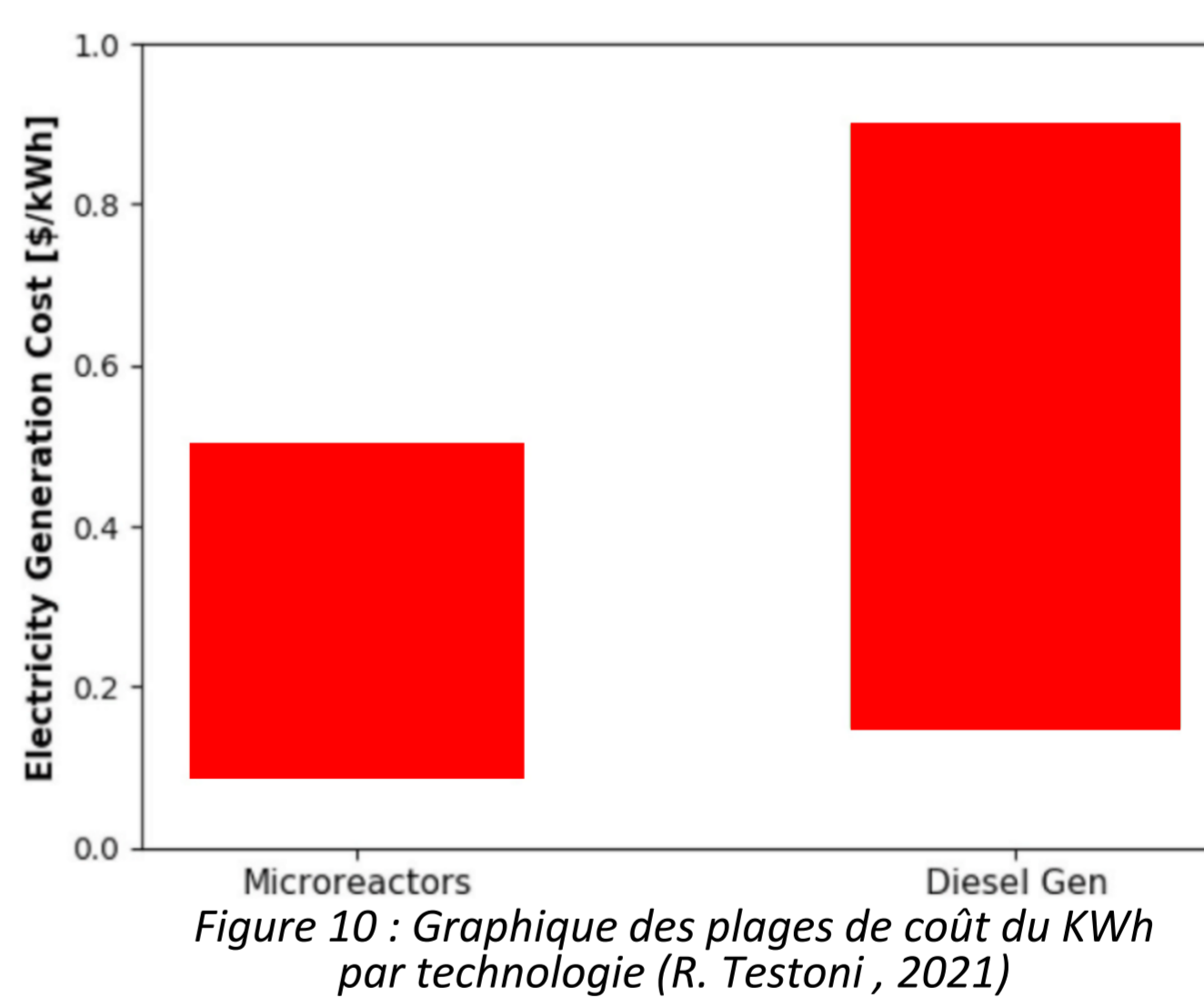
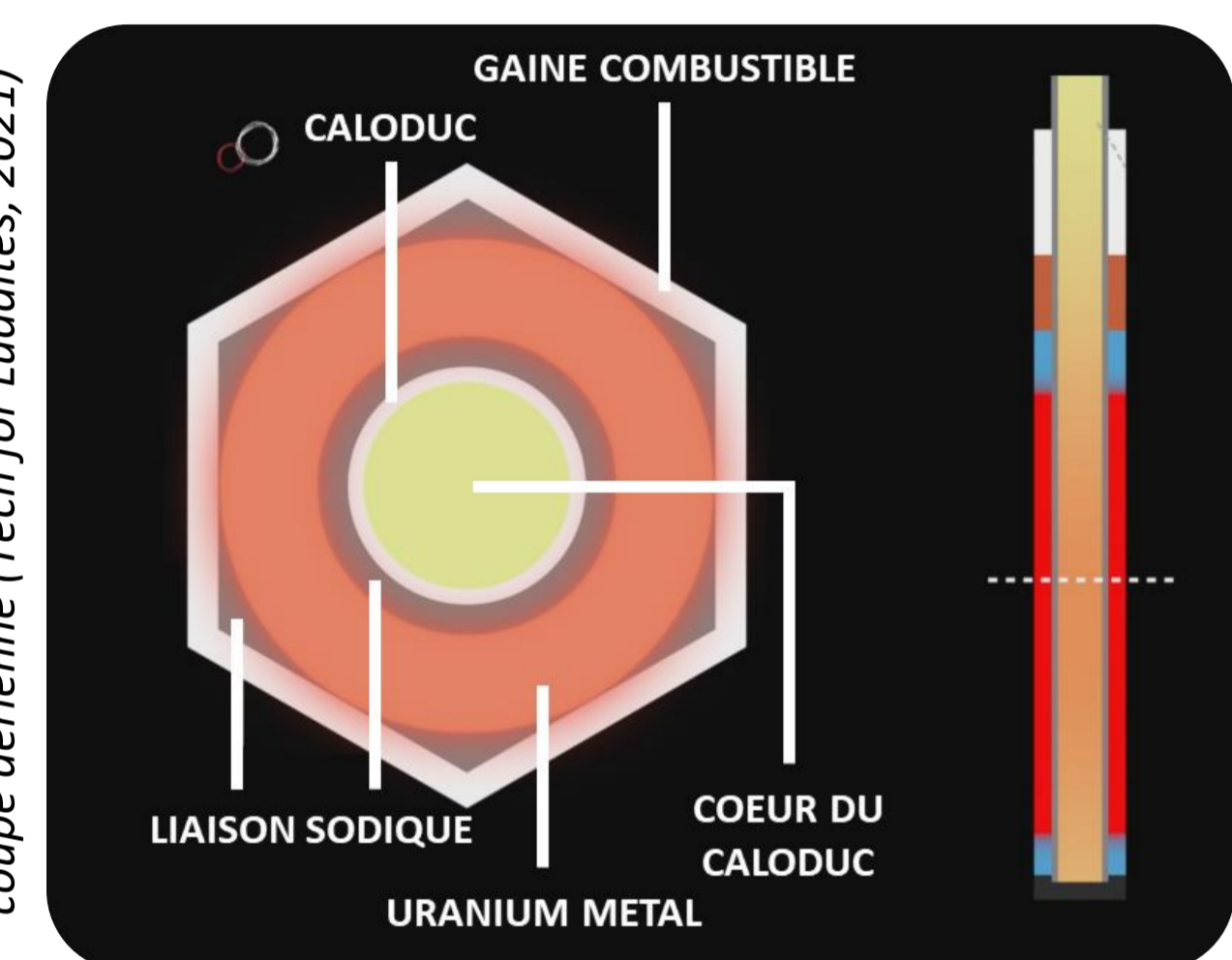


Figure 10 : Graphique des plages de coût du kWh par technologie (R. Testoni, 2021)

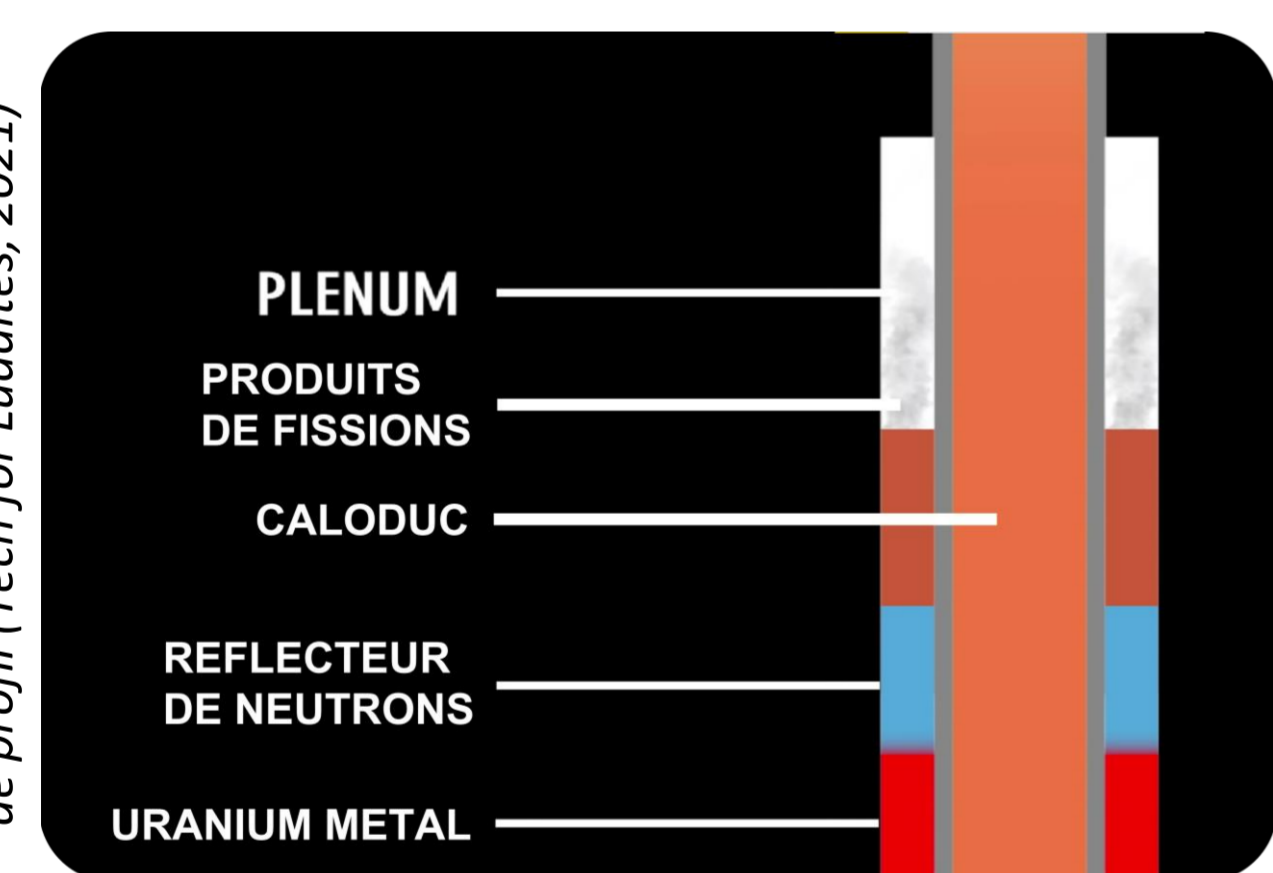
Le coût du générateur diesel possède une limite inférieure et supérieure plus élevée. Ceci est principalement dû au coût du carburant (le produit lui-même et le transport). Par conséquent, les microréacteurs sont économiquement compétitifs par rapport aux générateurs diesel.

Composition du réacteur

Aurora possède une centaine de barres de combustible métallique dans son noyau. Chacune des cellules est constituée d'une boîte contenant le combustible. Voici une liste non exhaustive des éléments innovants qui composent ce réacteur :



- Des **réflecteurs de neutrons** dont le rôle est d'essayer de garder les neutrons à l'intérieur de la cellule.
- Des **caloducs** passent au milieu de cette boîte et sont reliés au combustible par du sodium qui transportera la chaleur générée par la fission vers les échangeurs de chaleur. Ces caloducs contiennent du potassium dont l'évaporation et la condensation conduiront la chaleur.
- Il n'y a **pas de pompes, pas de vannes et pas d'interrupteurs** grâce aux caloducs qui agissent essentiellement comme des supraconducteurs thermiques. Cela signifie donc que la conception est extrêmement simplifiée ce qui réduit les points de défaillance ainsi que les coûts de fabrication.



- L'utilisation de **caloducs et du sodium** a l'avantage d'éviter une mise sous pression du réacteur ce qui limitera l'épandage des matières nucléaires en cas d'accident. En effet la température de fonctionnement de 550°C permet un maintien du sodium sous forme liquide (100-1000°C à Patm). De ce fait, la taille de la cuve sera nettement moins imposante que pour un REP classique.

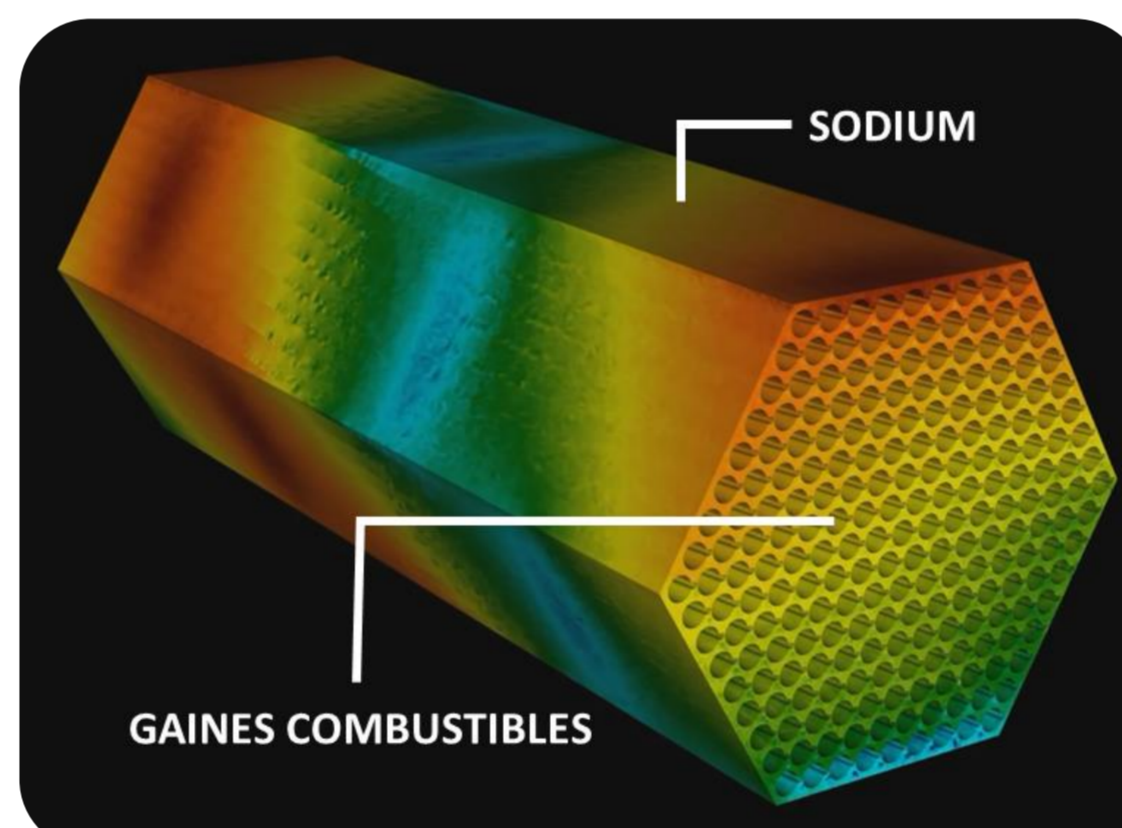


Figure 5 : répartition du sodium autour du combustible (Tech for Luddites, 2021)

- Un **plénum** est situé au-dessus des barres de combustible où les produits de fission gazeux (¹³³Xe, ⁸⁵Kr) peuvent s'accumuler si le taux de combustion du réacteur atteint 2-3 % (1 % en fonctionnement normal). Ces produits de fission s'y désintègrent et leur isolement limite la baisse de la réactivité.

- Trois tambours de contrôle** sont placés autour du cœur, ils ont pour rôle d'absorber le maximum de neutrons au démarrage et limitent ainsi la réactivité. Puis, au cours des vingt années de fonctionnement, ils tourneront lentement pour renvoyer de plus en plus de neutrons dans le cœur afin de compenser la réduction de la réactivité due aux produits de fission.

- Ce réacteur utilise un **cycle de dioxyde de carbone supercritique**, qui nécessite des turbines beaucoup plus petites que celles à vapeur (10 fois plus petites qu'avec un cycle utilisant la vapeur d'eau) et réduit donc également son empreinte au sol.

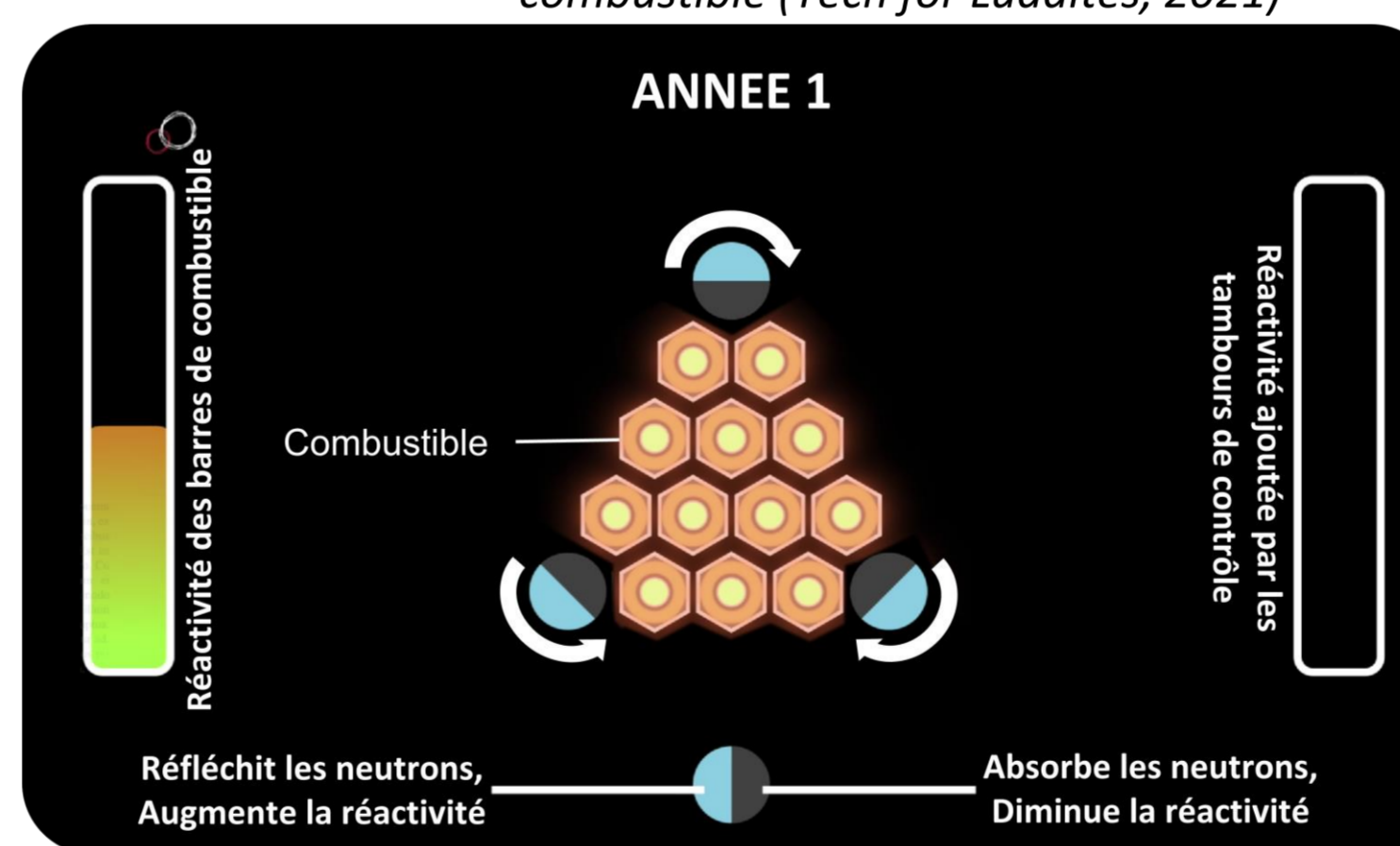


Figure 6 : fonctionnement des tambours de contrôle (Tech for Luddites, 2021)

Conclusion

Les préoccupations croissantes concernant le **changement climatique** et la **pollution de l'environnement** attirent l'attention sur l'adoption de **l'énergie nucléaire** comme source d'énergie à faible émission de carbone. En effet, ces réacteurs d'un nouveau genre vont très prochainement voir le jour étant donné leur **compétitivité financière et technique**. À ce propos, Oklo vient officiellement d'entrer dans le processus d'obtention d'une « **licence combinée** ». Elle autorise à la fois la construction et l'exploitation d'un réacteur sur un site donné (l'Idaho National Lab (INL) dans le cas d'Aurora). C'est la première fois que l'Autorité de Sûreté Américaine (NRC) accepte de lancer ce processus pour une **technologie de fission avancée**. De plus, le laboratoire national américain de l'Idaho a annoncé qu'il donnerait à Oklo l'accès à du **combustible nucléaire** initialement destiné à un ancien réacteur à neutrons rapides ayant fonctionné pendant 30 ans (EBR II), afin de tester le concept Aurora. Toutes ces évolutions technologiques amènent néanmoins à se questionner en matière de réglementation, notamment concernant l'actualisation des textes de loi (initialement créés pour des grands réacteurs) voire la création de nouvelles procédures plus adaptées à ces concepts.

Bibliographie

I. Chatzis, 2020. Petits réacteurs, grand potentiel. URL : <https://www.iaea.org/fr/bulletin/eletronucleaire-et-la-transition-vers-une-energie-propre/petits-reacteurs-grand-potentiel>. (consulté le 05.11.2021 novembre 2021). AIEA.
Oklo, March 11, 2020. Oklo Power Combined Operating License Application for the Aurora at INL. Part IV : Technical Specifications ; Part III : Aurora Environmental Report – Combined License. U.S. Nuclear Regulatory Commission.
RNCAN, 2011. État de la situation des collectivités éloignées/hors réseau au Canada. Rapport final. Gouvernement du Canada.
R. Testoni et al., 2021. Review of nuclear microreactors : Status, potentialities and challenges. Progress in Nuclear Energy 138. ScienceDirect.
Tech for Luddites, 10 septembre 2021. MIT Alumni Designed Micro-Reactor BURNS Nuclear Waste For Fuel. URL : <https://www.youtube.com/watch?v=OlcwqivrLZU> (consulté en novembre 2021). Youtube.

