

I – Introduction

Depuis toujours, la production énergétique représente une problématique cruciale dans le secteur du spatial. En effet, tout engin spatial et même base spatiale nécessite des systèmes énergétiques fiables, offrant une puissance stable, un rendement élevé et une longue durée de vie. Par-dessus cela se rajoute les contraintes volumiques et massiques que le monde du spatial exige.

Dans ce contexte, la production d'énergie via un réacteur à caloduc (HPR : Heat Pipe cooled Reactor) semble parfaitement adaptée à ces problématiques.

Ce poster présentera l'état d'avancement ainsi que le principe de fonctionnement de cette technologie en se penchant plus particulièrement sur le réacteur Na-STER (Sodium-based Space Thermal-Electrical Reactor).

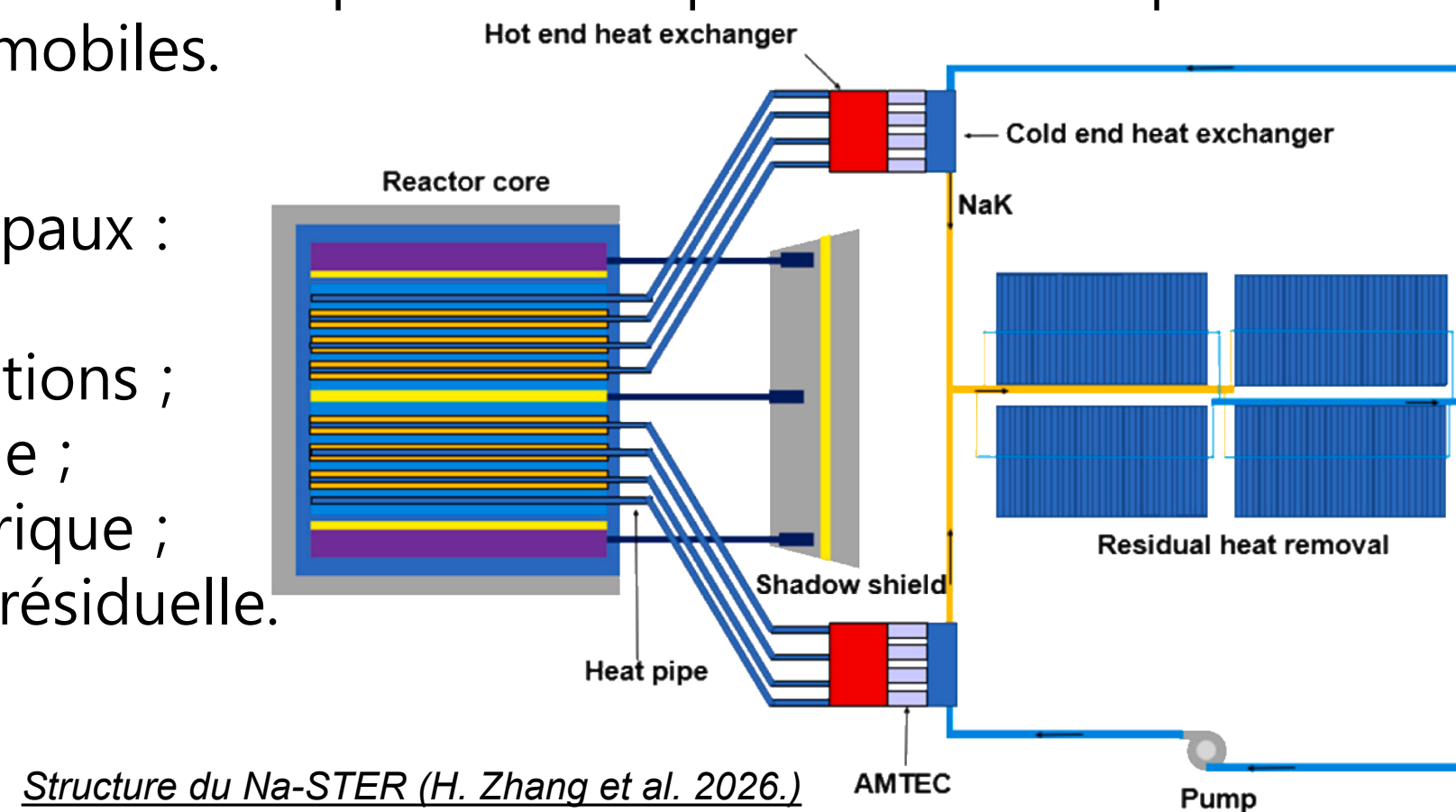
II – Fonctionnement général du Na-STER

Le Na-STER est une HPR (Heat Pipe cooled Reactor), faisant parti des SMR (Small Modular Reactor).

Afin de répondre aux exigences du domaine spatial, la conception de ce réacteur est pleinement orientée vers la fiabilité. Cela se traduit par une simplicité de conception en limitant autant que possible les éléments mobiles.

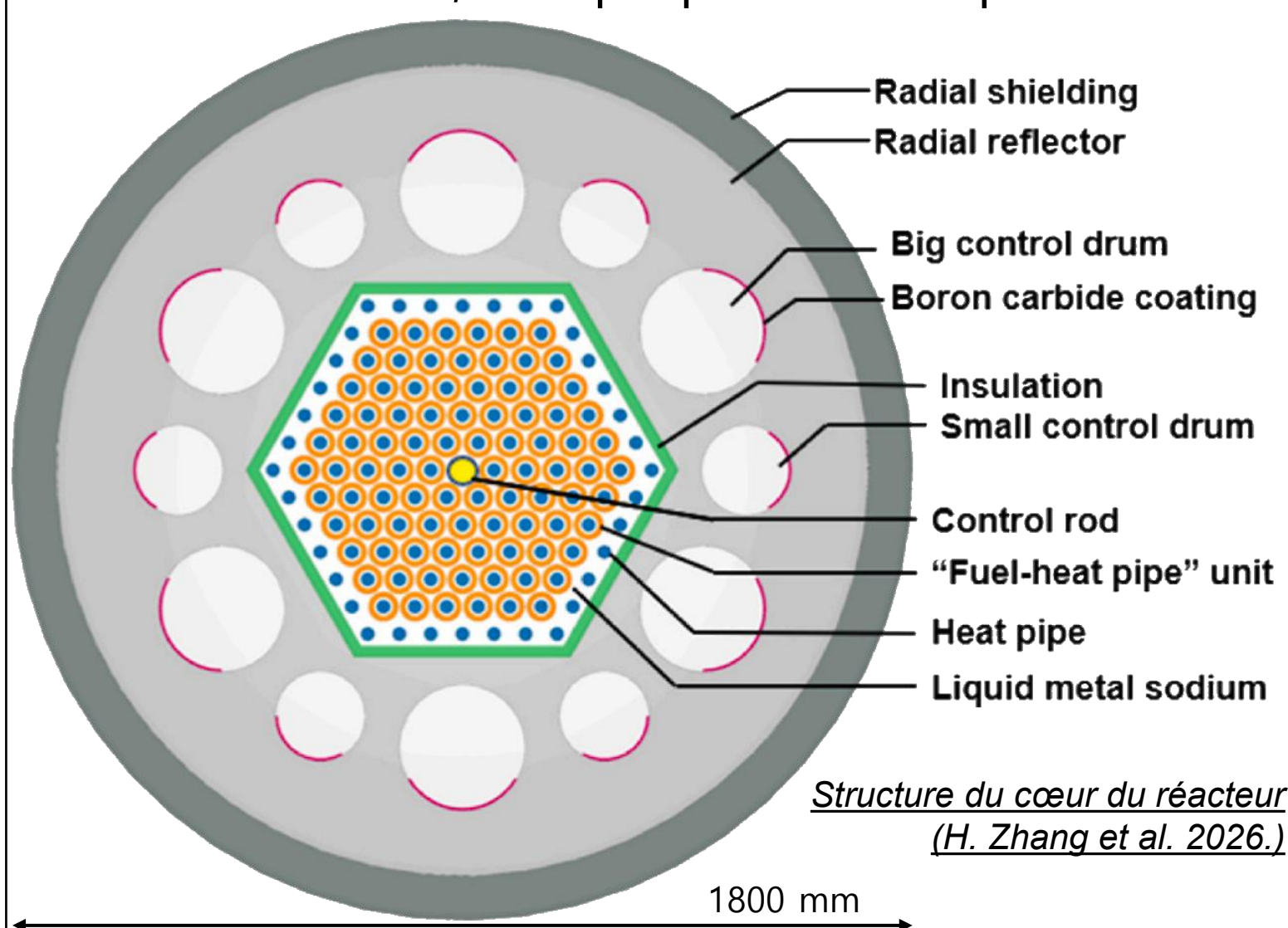
Le réacteur comprend cinq modules principaux :

- Le cœur du réacteur ;
- Un écran de protection contre les radiations ;
- Un système de transmission énergétique ;
- Un système de conversion thermoélectrique ;
- Un système d'évacuation de la chaleur résiduelle.



IV – Le cœur du réacteur

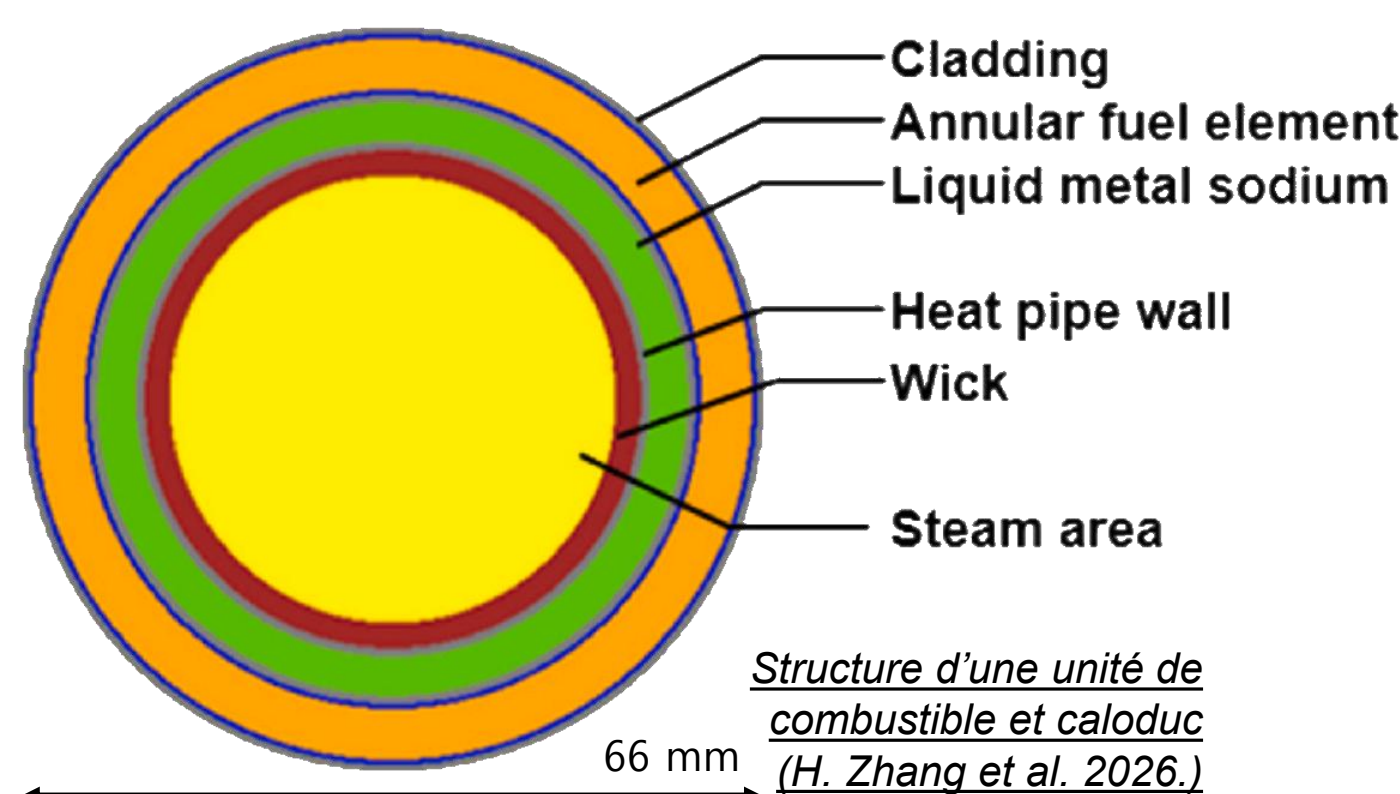
Le Na-STER est doté d'un cœur à neutron rapides agencé selon une structure hexagonale. Contrairement aux précédents designs de HPR qui utilisaient un alliage solide comme matrice, ce qui posait des problèmes de dilatation thermique. C'est pourquoi le Na-STER utilise du Sodium liquide.



La réactivité du réacteur est quand à elle contrôlée par 12 tambours influençant la réactivité en absorbant ou en réfléchissant les neutrons vers le cœur. Une barre de contrôle est également présente au centre en cas de nécessité.

En raison de sa densité d'uranium élevée, son point de fusion élevé (1408 K), de sa conductivité thermique correct et de son faible gonflement sous irradiation, le combustible choisi est une céramique de nitrure d'uranium (UN).

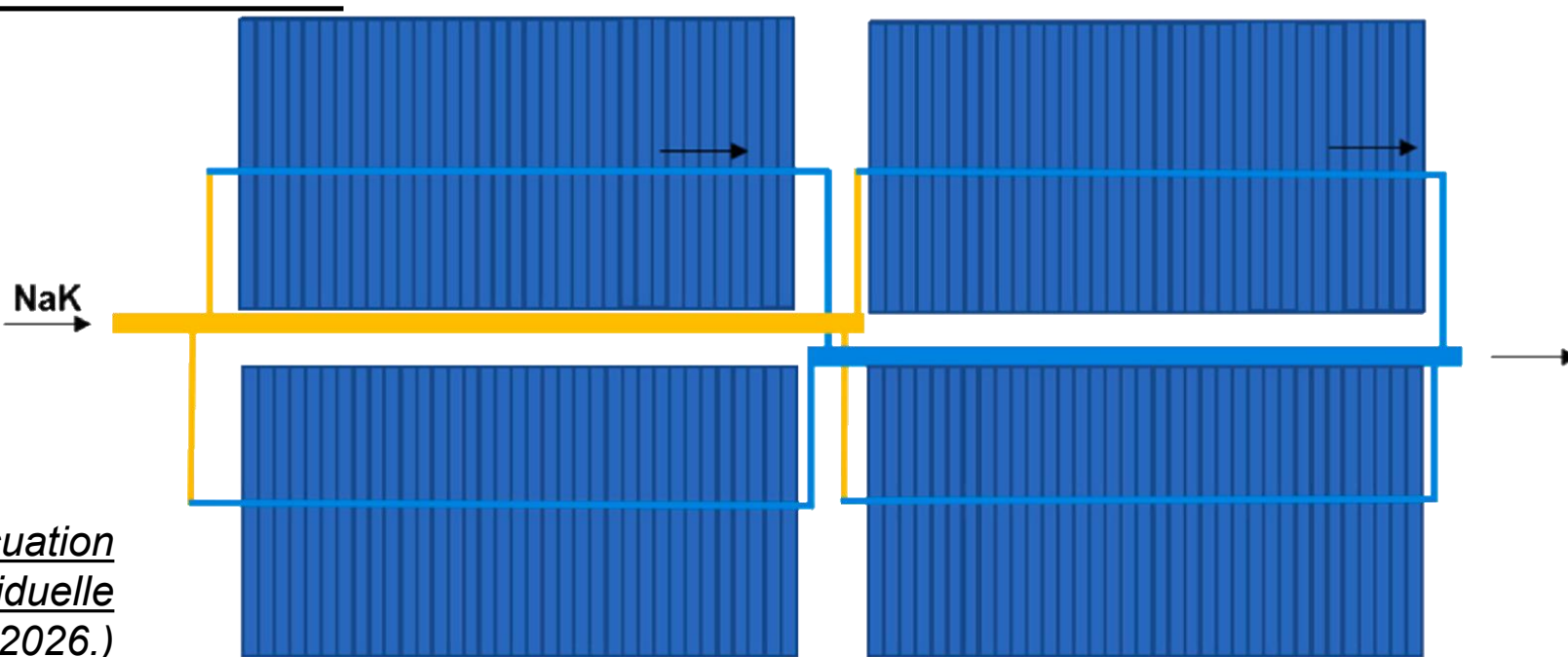
Le combustible est positionné suivant une structure annulaire, le long de caloducs. Cela a pour effet une meilleure efficacité de transfert thermique, réduisant considérablement la température du cœur, améliorant la sûreté et le rendement du réacteur.



VI - Evacuation de la chaleur résiduelle

Afin de garantir une température optimale pour le procédé AMTEC, la chaleur résiduelle transportée par des caloducs vers des ailettes en composite graphite-fibre de carbone (C-C). Elle est finalement dissipée dans l'espace par rayonnement.

Schéma du système d'évacuation de la chaleur résiduelle (H. Zhang et al. 2026.)



Conclusion

De part sa conception simple, autonome et largement passive, le réacteur Na-STER apparaît comme une solution adaptée aux contraintes du nucléaire spatial. La limitation de pièces mobiles (caloduc, AMTEC) permet d'augmenter la fiabilité. L'utilisation d'un spectre à neutron rapide et d'un combustible à haute densité lui permet d'atteindre une durée de vie d'environ dix ans sans rechargement. Couplé au procédé AMTEC le réacteur Na-STER permet une production d'électricité fiable, stable et de longue durée, répondant aux besoins des missions spatiales de longue durée.

Ce concept illustre ainsi une voie prometteuse non seulement pour l'exploration spatiale, mais aussi pour le développement futur des petits réacteurs modulaires, où la compacité, la robustesse et la sûreté passive sont des critères essentiels. A plus long terme, ce type de réacteur pourrait contribuer à élargir les champs d'application du nucléaire, en particulier pour l'alimentation de bases lunaires ou martiennes, ou les réacteurs terrestres de demain.

Bibliographie

- Advanced Cooling Technologie (2026), <https://www.1-act.com>
- MyHeatSinks (2026), Heat Pipe Basics, <https://myheatsinks.com/standard-heat-pipe/>
- Pole Cristal (2026), Transfert thermique, <https://www.pole-cristal.fr/le-point-sur-les-modes-de-transferts-thermiques/>
- H. Zhang, P. Li, Z. Zhang, C. Wang, W. Tian, et S. Qiu, « Conceptual design of heat pipe cooled reactor with liquid sodium core for space power systems », Progress in Nuclear Energy, vol. 191, p. 106093, janv. 2026
- M. A. Al-Nimr, A. I. Dawahdeh, et A. Abu Irshed, « An integrated alkali metal thermoelectric converter with sodium hydroxide thermoelectric water splitter and organic Rankine cycle for efficient power and hydrogen production », Applied Thermal Engineering, vol. 240, p. 122257, mars 2024

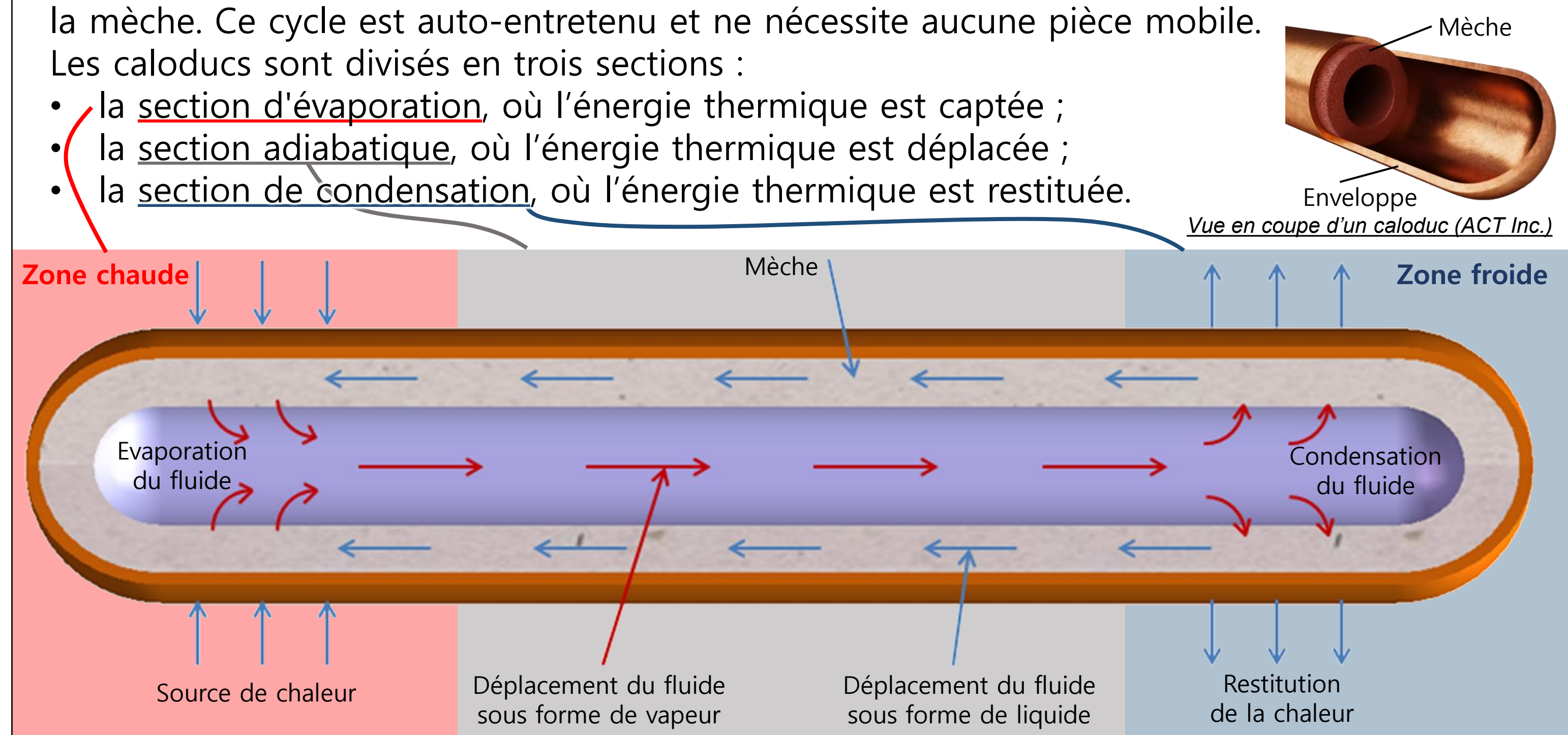
III – Le système de transmission énergétique

Contrairement aux traditionnels REP qui utilisent un circuit d'eau sous pression pour transférer leur énergie thermique, le Na-STER utilise des caloducs (ou heat pipe).



Le caloduc est un tube fermé contenant un fluide caloporteur qui, lorsqu'une extrémité est chauffée, s'évapore. Il se déplace alors vers la zone froide où il se condense en libérant l'énergie thermique puis retourne vers la zone chaude par capillarité par le biais de la mèche. Ce cycle est auto-entretenu et ne nécessite aucune pièce mobile.

Les caloducs sont divisés en trois sections :

- la section d'évaporation, où l'énergie thermique est captée ;
- la section adiabatique, où l'énergie thermique est déplacée ;
- la section de condensation, où l'énergie thermique est restituée.



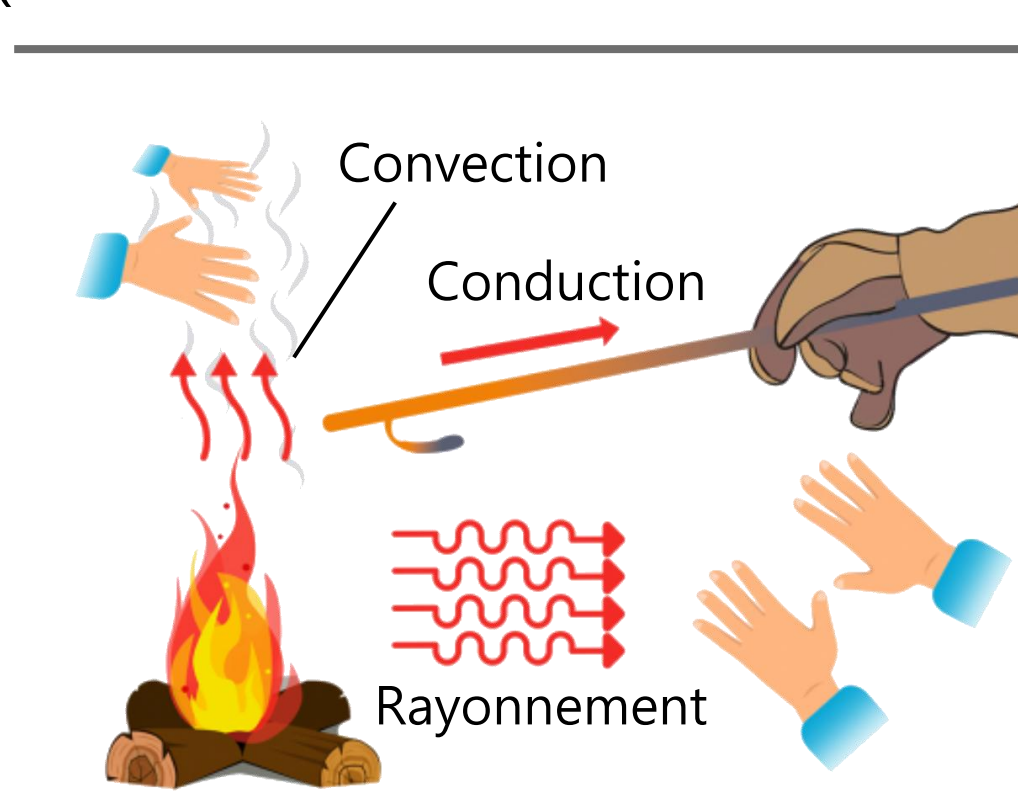
L'utilisation du changement de phase d'un même fluide a comme conséquence une faible différence de température entre l'extrémité chaude et froide du caloduc (de l'ordre de quelques degrés). Cela lui permet d'obtenir une conductivité thermique élevée.

Bon conducteur thermique	• Cuivre $\approx 400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	
	• Caloduc $\approx 10\,000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	

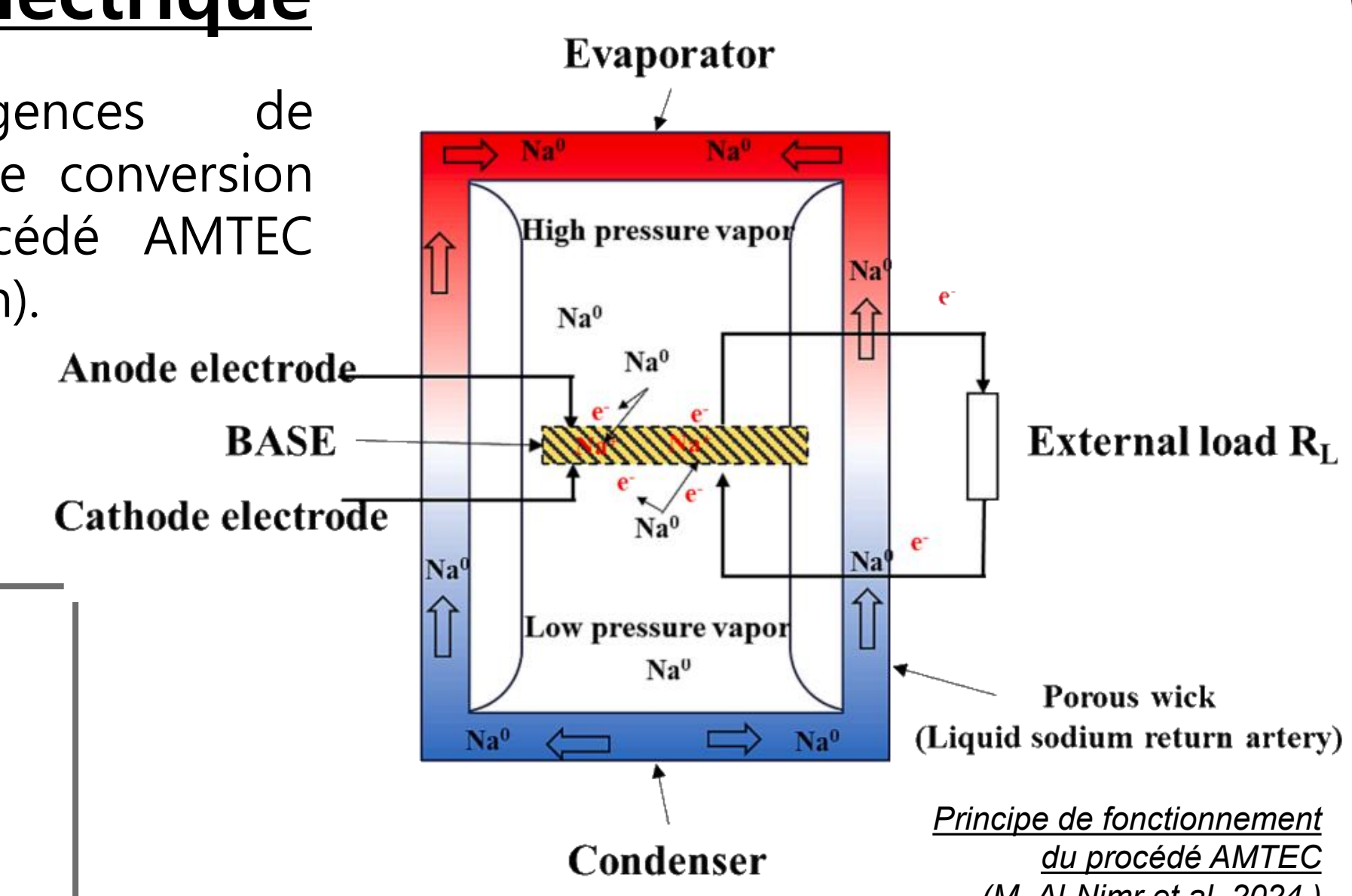
Avantages : Haut transfert énergétique, simplicité de fonctionnement.

V – Conversion thermoélectrique

Compte tenu des exigences de l'environnement spatial, le système de conversion thermoélectrique retenu est le procédé AMTEC (Alkali Metal ThermoElectric Conversion).



La convection se reposant sur un déplacement de matière, ce phénomène n'est pas possible dans le vide spatial.



- Procédé statique (sans pièce mobile)
- Fonctionnement à haute température
- Courant stable en sortie
- Rendement d'environ 20 %