

Introduction

Aujourd'hui, à travers le monde l'énergie nucléaire revient sur le devant de la scène. En effet, c'est une énergie bas-carbone, pilotable et avec un rendement très intéressant. Il existe plusieurs technologies qui exploitent la fission nucléaire. La principale utilisée à l'échelle industrielle reste les Réacteurs à Eau Pressurisée (REP). Cependant, il existe d'autres filières en voie de développement, tel que les réacteurs à neutrons rapides (RNR). Ces derniers présentent de nombreux avantages : notamment dans la gestion du cycle du combustible et leur capacité à transmuter certains actinides mineurs aujourd'hui considérés comme déchets ultimes. Cependant, aux regards des opposants du nucléaires cette technologie présente un risque majeur non-négligeable lié aux fluides caloporteurs qui peuvent être utilisés (plomb, sodium...). Dans notre cas, nous nous intéresseront aux réacteurs au sodium (Na). Nous tâcherons de répondre à la question suivante : comment est maîtrisé le risque sodium-eau dans les RNR-Na ?

I – Contextualisation

En France, les réacteurs à neutrons rapides ont bénéficié d'un fort développement dès les années 50 en raison de leur capacité à fertiliser l'uranium 238 en plutonium 239 pour la conception des bombes nucléaires (CEA). Depuis, la recherche française n'a eu de cesse d'étudier cette technologie à l'aide de prototypes (Rapsodie, Phénix, Superphénix). Au début des années 2010, le CEA est missionné du projet ASTRID qui a pour objectif de développer un démonstrateur au vu d'industrialiser cette technologie. Au regard de choix politiques ces différents projets ont été abandonnés avant de remplir leurs objectifs initiaux. Pour ASTRID, la raison avancée était le bas prix de l'uranium. Cependant, dans les prochaines décennies le prix de l'uranium pourrait croître pour différentes causes : instabilités géopolitiques ; besoin accru en uranium avec l'arrivée de SMR ; etc. Ces différentes raisons créent un stress sur la ressource et donc son prix.

II – Les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR)

Les éléments et leurs isotopes peuvent interagir ou non avec les neutrons. Dans notre cas, seuls les cas de capture et de fission nous intéressent.

En fonction de l'énergie du neutron, un même isotope peut interagir différemment. Pour connaître le résultat de ces interactions, on s'intéresse aux sections efficaces (voir figure 1).

Pour notre sujet, nous allons nous pencher sur les neutrons dits « rapides » ($E > 2\text{MeV}$). Par opposition il existe des neutrons dits « lents » et/ou « thermiques », notamment utilisés dans la filière des REP.

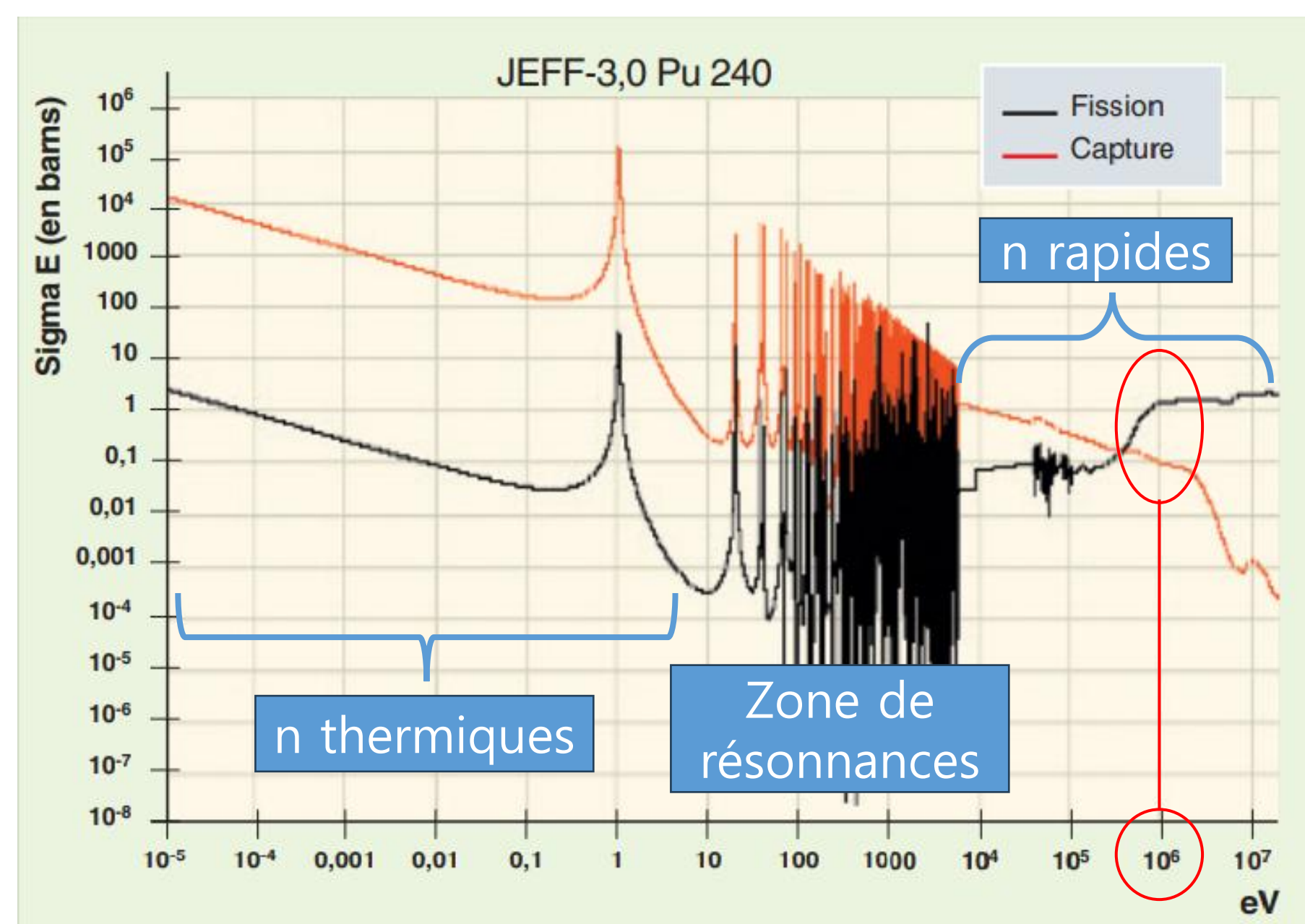


Figure 1 : sections efficaces de capture et de fission du ^{240}Pu , CEA

III – Le sodium (Na)

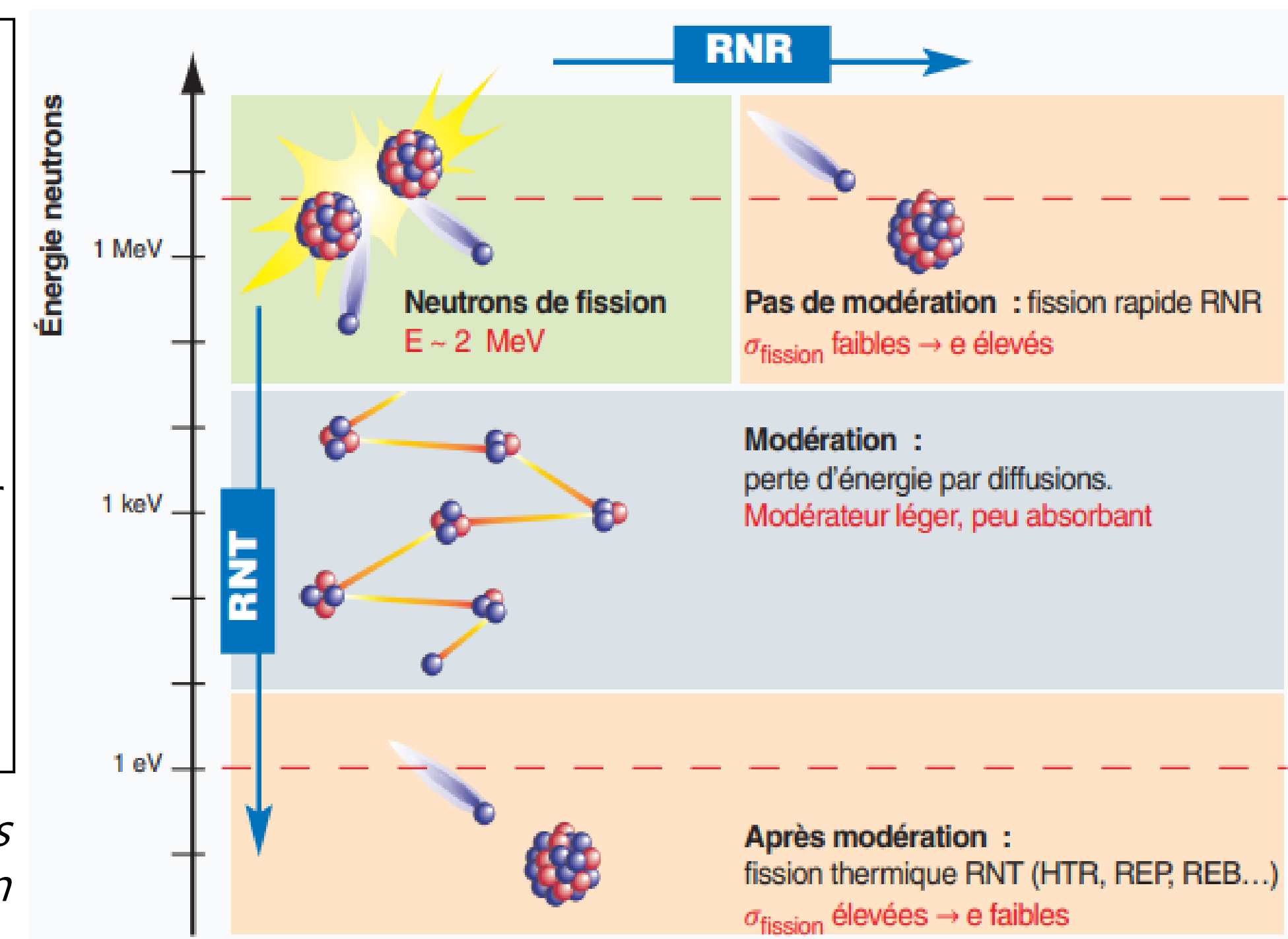
Le fluide caloporteur transfère la chaleur du cœur au fluide du circuit secondaire. Dans un REP, ce fluide est de l'eau sous pression, avec l'objectif d'interagir fortement avec les neutrons ; on dit qu'elle les thermalise. Pour les RNR, on ne souhaite pas les thermaliser. Il nous faut un élément chimique qui interagit peu avec les neutrons. Le sodium (Na) est l'élément majoritairement utilisé à travers le monde des RNR. Voici une fiche technique :

Caractéristiques du Sodium

- $T^\circ(\text{K})$ fusion : 370,97 K
- $T^\circ(\text{K})$ ébullition : 1156,15 K
- Activation sous flux neutronique ($P \approx 15\text{h}$)
- Vecteur de l'hydrogène et du tritium
- Corrode les aciers si teneur en O_2 est trop forte (on la souhaite $< 3\text{ ppm}$)

(Sources : CEA & FDS)

Figure 2 : utilisation des neutrons issus de la fission selon la filière RNT ou RNR



Malgré tous ses avantages, lorsqu'il interagit avec l'eau, une réaction chimique s'opère :

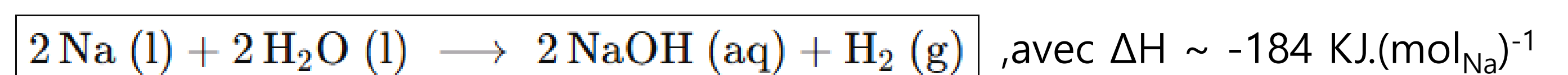


Figure 3 : Équation chimique sodium/eau

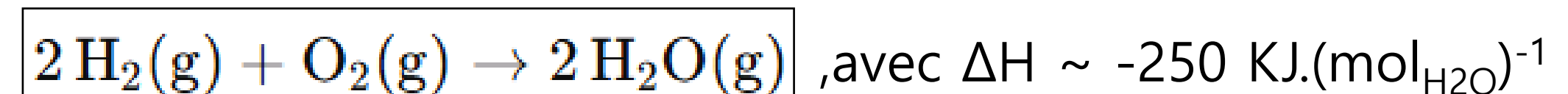


Figure 4 : Équation chimique dihydrogène/dioxygène



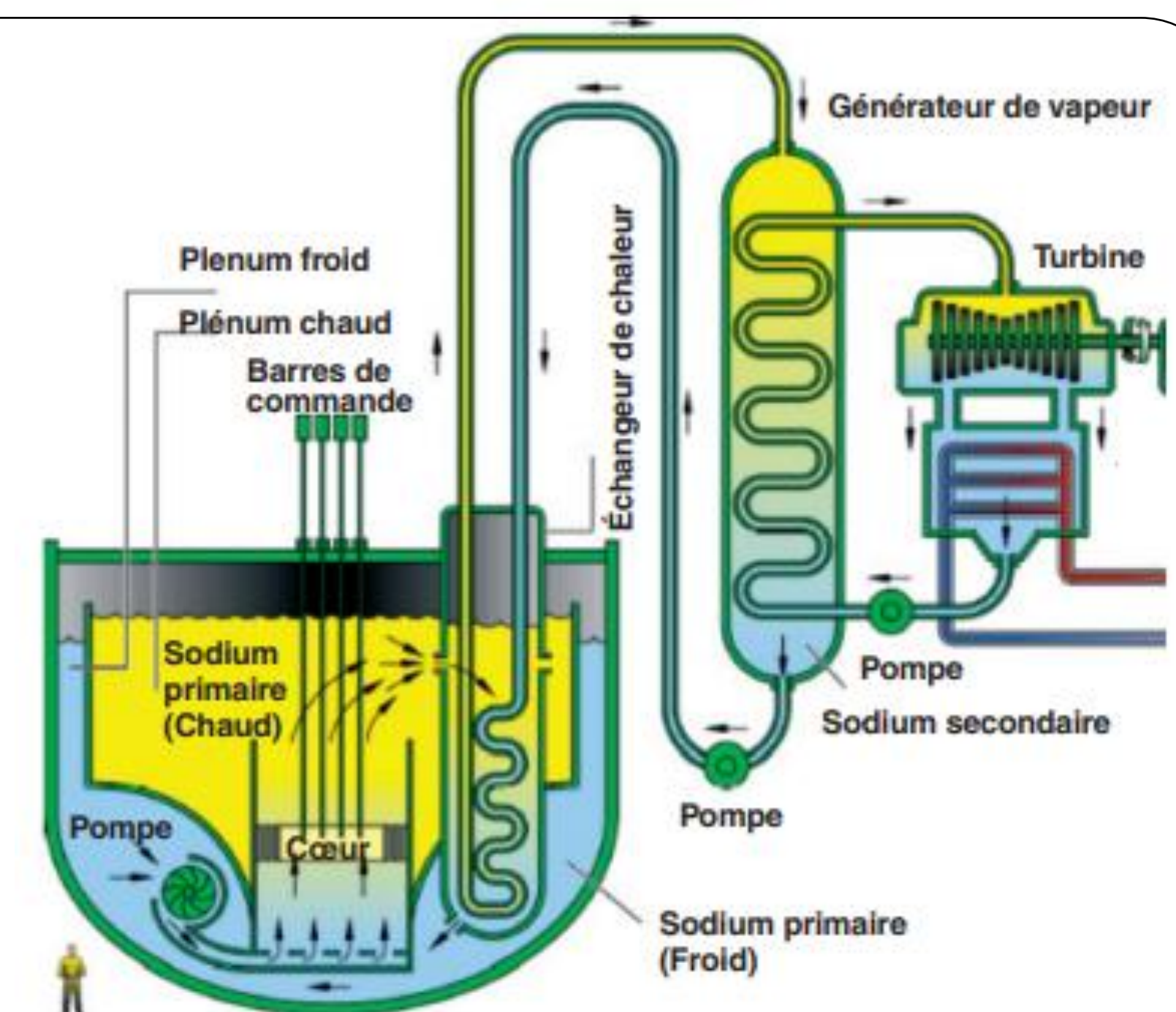
IV – Les éléments de maîtrise du Risque Sodium Eau (RSE)

Comme nous l'avons vu, la réaction chimique entre le sodium et l'eau est une réaction explosive. Pour prévenir ce risque un ensemble d'éléments de maîtrise ont été apportés. En voici une liste non exhaustive :

- Possibilité d'ajouter un circuit fermé intermédiaire de sodium entre le primaire et le secondaire.
- Une « chasse de sodium » (vidange du circuit) immédiate en cas fuite.
- circuit équipé d'un hydrogène-mètre afin de détecter la présence de dihydrogène et donc d'une fuite sodium-eau.
- Un système de « piège froid » est mis en place pour filtrer les impuretés, dont l'hydrogène.
- Injection d'un « gaz de couverture » (azote ou argon) dans la cuve pour chasser l'oxygène.

Sur le projet ASTRID, une version a même été proposée où l'eau du circuit secondaire est remplacée par de l'azote. Supprimant ainsi le risque sodium-eau, ce qui selon les 9 principes généraux de prévention (Art. L.4121-2, code du travail) reste la meilleure des solutions.

Figure 4 : schéma simplifié d'un RNR-Na



Conclusion

En conclusion, les réacteurs à neutrons rapides (RNR) utilisent une technologie complémentaire à celle des réacteurs à neutrons thermiques (RNT). D'ici quelques décennies, le gouvernement français pourrait souhaiter industrialiser cette technologie pour étoffer son parc de production électrique, fermer le cycle du combustible et réduire la quantité de déchets de haute activité (HA). Comme nous l'avons vu, les RNR-Na est une technologie dont nous disposons d'un excellent retour d'expérience. Elle présente de nombreux avantages en termes de production (température d'exploitation d'environ 500°C), de disponibilité (le sodium est disponible en grande

quantité, idem pour le plutonium et l'uranium 238), de sûreté (température d'ébullition du sodium élevée ; peu dense ; liquide à pression atmosphérique ; etc.). Cependant, le RSE reste non-négligeable. Il demande de nombreux éléments de maîtrise. Aussi bien a priori qu'a posteriori d'un événement de rencontre entre le sodium et l'eau (ex : brèche générateur de vapeur). Le retour d'expérience de Phénix et Superphénix nous indique un haut niveau de maîtrise de ce risque. Sans compter sur le projet ASTRID 600 gaz qui remplace l'eau du circuit secondaire par de l'azote, ce qui élimine la principale source du RSE pendant la phase d'exploitation.

Bibliographie

- Pourquoi des réacteurs rapides refroidis au sodium ? Alain ZAETTA, Bernard BONIN, Christian LATGÉ, CEA. Consulté la dernière fois le 02/12/25 <https://www.cea.fr/Documents/monographies/reacteurs-nucleaires-sodium-pourquoi-reacteurs-rapides-sodium.pdf>
- La technologie des RNR-Na. Gilles RODRIGUEZ, Joël GUIDEZ, Pierre LE COZ, Manuel SAEZ Christian LATGÉ, CEA. Consulté la dernière fois le 02/12/25 <https://www.cea.fr/Documents/monographies/reacteurs-nucleaires-sodium-technologie-RNR-Na.pdf>
- Fiche de Données de Sécurité – Sodium. Thermofisher Scientific. Date de révision : 29/09/23. Consulté la dernière fois le 06/12/25 <https://www.fishersci.fr/store/msds?partNumber=10141052&productDescription%3DSodium%2C+dry+stick+250g&countryCode=FR&language=fr>
- Le caloporteur Sodium. Gilles Rodriguez, publié le 10/01/19. Consulté la dernière fois le 14/09/25 <https://doi-org.federation.unimes.fr:8443/10.51257/a-v2-bn3680>