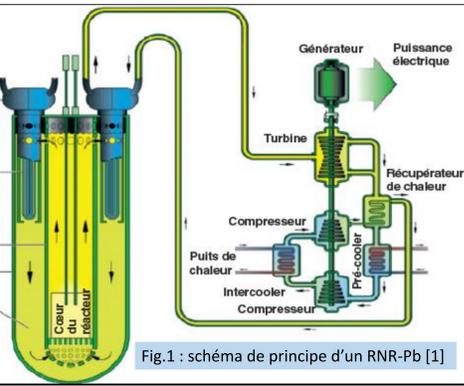


#### Introduction

La 4<sup>e</sup> génération de réacteurs est étudiée par le GIF (Generation 4 international forum). Le but de cette organisation est de développer de nouveaux principes de réacteurs nucléaires, en suivant 4 grands axes d'amélioration : l'aptitude au développement durable, la compétitivité économique, la sûreté et la résistance à la prolifération. Six systèmes ont été retenus, dont trois réacteurs à neutrons rapides (RNR). [1]



Nous allons ici étudier un RNR en particulier : le réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb) (fig.1).

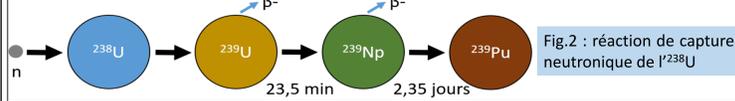
Après avoir listé les avantages des RNR, nous étudierons le problème posé par le plomb : la corrosion. Nous décrirons les phénomènes en jeu, et proposerons des moyens de s'en protéger. Enfin nous concluons avec une revue des projets en cours.

#### Les Réacteurs à neutrons rapides

Les RNR n'utilisent pas de modérateur afin de conserver des neutrons rapides. Cela apporte plusieurs avantages [2] :

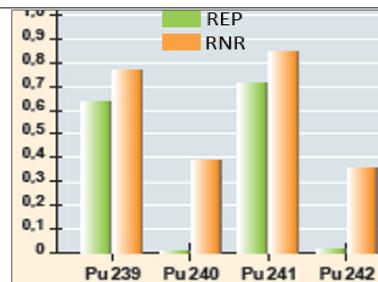
##### Utilisation de tout l'uranium naturel

- Par capture neutronique,  $^{238}\text{U}$  se transforme en  $^{239}\text{Pu}$  (fig.2)
- La surgénération de combustible est possible



##### Multi-recyclage du combustible

- Consommation de  $^{240}\text{Pu}$  et  $^{242}\text{Pu}$  (fig.3)
- Baisse des besoins d'extraction
- Diminution des volumes de déchets ultimes



##### Moins d'actinides mineurs

- Fission possible en RNR (fig.4)
- Volume de déchets ultimes plus petit
- Radiotoxicité moins élevée

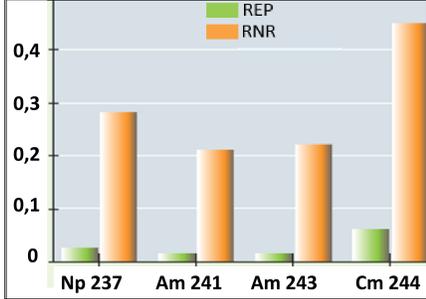


Fig.3 et 4 : proportion de fissions par rapport aux captures dans un REP et dans un RNR [2]

#### Phénomènes de corrosion des aciers

Nous allons présenter les phénomènes en jeu dans la corrosion des aciers austénitiques (acier A) et martensitiques (acier M). En fonction de la concentration en oxygène dissous dans le plomb, deux phénomènes peuvent apparaître. [3], [4], [5]

##### La dissolution des aciers dans le plomb :

La corrosion agit par dissolution (fig.5) lorsque la concentration en oxygène dissous dans le plomb est inférieure à  $\sim 10^{-5}$  ppm (500 °C).

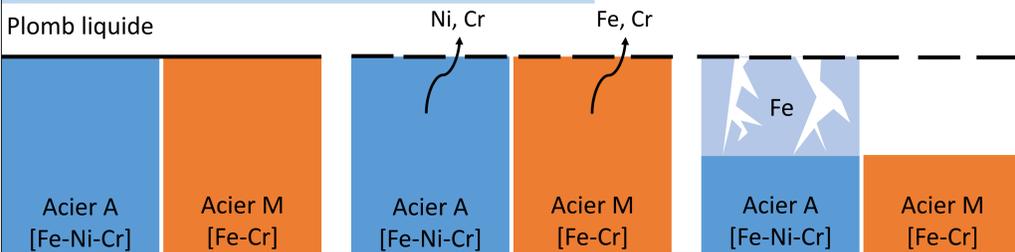
Les aciers M subissent une dissolution homogène :

- Tous les constituants sont dissous
- Dissolution  $\sim 100 \mu\text{m}/\text{an}$  à 500 °C

les aciers A subissent une dissolution préférentielle :

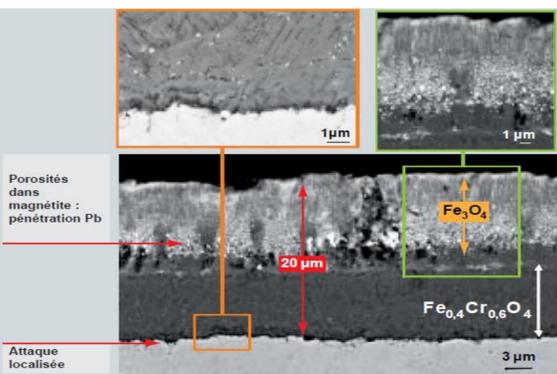
- le nickel est fortement dissous
- Dissolution  $\sim 500 \mu\text{m}/\text{an}$  à 500 °C

Fig.5 : dissolution des aciers austénitiques et martensitiques par le plomb liquide



##### L'oxydation des aciers dans le plomb :

Le domaine de corrosion qui domine est l'oxydation, lorsque la concentration en oxygène dissous dans le plomb est supérieure à  $\sim 10^{-5}$  ppm (500 °C).



Formation d'une double couche d'oxyde :

- Couche interne de spinelle et couche externe de magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- Oxydation plus rapide pour les aciers M (en 100 jours :  $16 \mu\text{m}$  contre  $1 \mu\text{m}$ )

Si elle est maîtrisée, la couche d'oxyde peut constituer une barrière efficace à la dissolution des aciers A et M

Fig.6 : observation microscopique d'un acier oxydé par du plomb liquide [3]

#### Protection des aciers contre la corrosion

Les solutions les plus envisagées pour se prémunir de la corrosion est l'application de couches protectrices, soit in situ via le contrôle de l'oxydation, soit dès la conception par l'application d'un revêtement protecteur sur les aciers concernés.[3], [4], [6]

##### Couche d'oxyde protectrice :

En produisant une fine couche d'oxyde, l'oxydation va pouvoir faire barrière à la dissolution. La mesure et le contrôle précis du taux d'oxygène dissous entre  $10^{-2}$  et  $5 \cdot 10^{-4}$  ppm est donc essentiel :

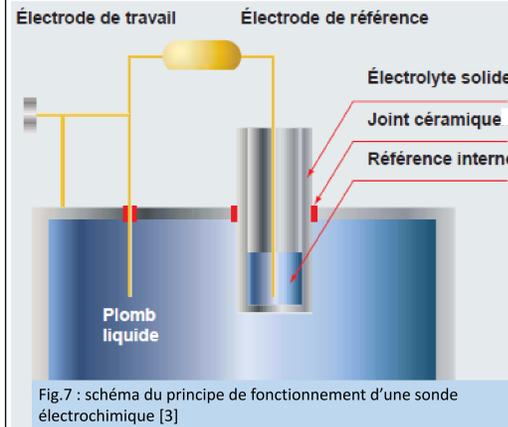


Fig.7 : schéma du principe de fonctionnement d'une sonde électrochimique [3]

##### Moyen de mesure :

- Sonde électrochimique (fig. 7)
- Mesure du potentiel d'oxydoréduction
- L'équation de Nernst permet de déterminer le taux d'oxygène dissous

##### Moyen de contrôle :

- Contrôle via un mélange  $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$  gazeux
- Contrôle du taux d'oxygène dissous via les pressions partielles (loi de Henry)

##### Revêtement de surface :

En appliquant des revêtement à la surface des aciers, ceux-ci vont pouvoir être bien plus résistants à la corrosion. De façon générale, le principe est d'incorporer de l'aluminium :

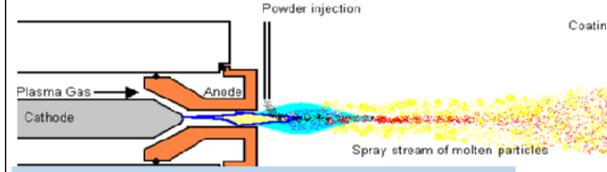


Fig.8 : principe du procédé Low Pressure Plasma Spraying (LPPS)

- Traitement par un faisceau d'électrons pulsés (GESA)
- fonte du revêtement et de l'acier sur  $\sim 20 \mu\text{m}$  (fig.9)
- Fixation et homogénéisation du revêtement

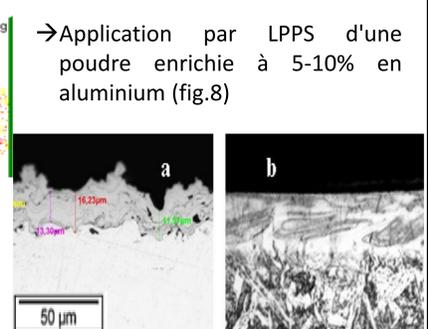


Fig.9 : vue microscopique d'un acier après procédé LPPS (9-a) et après procédé GESA (Gepulste Elektronen Strahl Anlage) (9-b) [6]

#### Conclusion

Nous avons pu voir que des pistes très sérieuses existent pour se protéger de cette corrosion. Aussi, des solutions viables semblent atteignables pour la conception d'un RNR-Pb, mais cela impose la poursuite de recherches, notamment en ce qui concerne la mesure et le contrôle de la concentration en oxygène dissous dans le plomb, et la qualification des aciers de construction.

Néanmoins, il existe plusieurs projets en cours, notamment en Russie, où Rosatom dirige le projet BREST-OD-300 qui a obtenu service fédéral de surveillance environnementale, industrielle et nucléaire (l'autorité de sûreté nucléaire Russe) une autorisation de construction. D'autres projets pour le développement des RNR-PB existent, en Europe avec le projet ELFR (European lead fast reactor), ou aux Etats unis avec le projet SSTAR (small secure transportable autonomous reactor).

#### Bibliographie

- [1] Generation 4 international forum, 2020. GIF 2020 Annual Report.
- [2] CEA, 2014. Les réacteurs nucléaires à caloporteur sodium (monographie). Direction de l'énergie nucléaire, commissariat à l'énergie atomique.
- [3] CEA, 2008. La corrosion et l'altération des matériaux du nucléaire (monographie). Direction de l'énergie nucléaire, commissariat à l'énergie atomique.
- [4] Balbaud-Celerier, F., Martinelli, L., 2013. Phénomènes de corrosion dans les métaux liquides. Génie nucléaire. <https://doi.org/10.51257/a-v1-cor640>
- [5] Zhang, J., 2009. A review of steel corrosion by liquid lead and lead-bismuth. Corrosion Science 51, 1207-1227. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.013>
- [6] Weisenburger, A., Müller, G., Heinzl, A., Jianu, A., Muscher, H., Kieser, M., 2011. Corrosion, Al containing corrosion barriers and mechanical properties of steels foreseen as structural materials in liquid lead alloy cooled nuclear systems. Nuclear Engineering and Design 241, 1329-1334. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.08.005>