

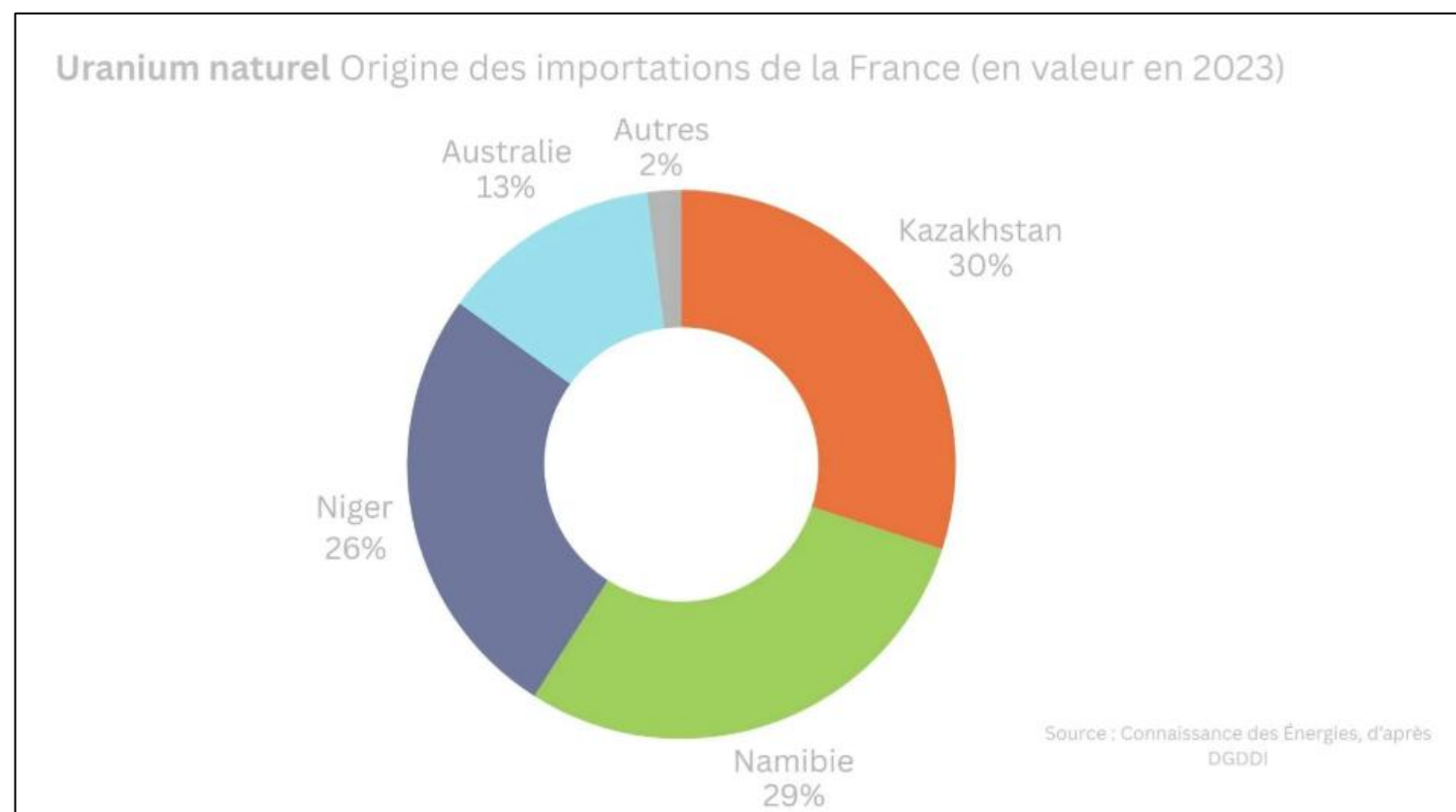
I – Introduction

Face aux tensions géopolitiques fragilisant l'approvisionnement en uranium, notamment en Afrique et en Asie centrale, et aux limites à long terme des gisements économiquement exploitables, la France est confrontée à un enjeu majeur de **sécurisation de son avenir énergétique**. Ces contraintes interrogent la soutenabilité du cycle uranium actuel et la dépendance aux importations. Dans ce contexte, le thorium, présent sur le territoire français sous forme de stocks issus d'activités minières passées, apparaît comme une **ressource alternative potentielle**. Son utilisation est envisagée dans le cadre de filières nucléaires avancées visant à diversifier les sources de combustible et à renforcer la souveraineté énergétique. Associé aux réacteurs à sels fondus, concepts de IV^e génération actuellement en développement, le cycle thorium est étudié pour ses **avantages théoriques** en matière de sûreté intrinsèque, de valorisation du combustible et de réduction de la radiotoxicité à long terme des déchets, par rapport au cycle uranium conventionnel.

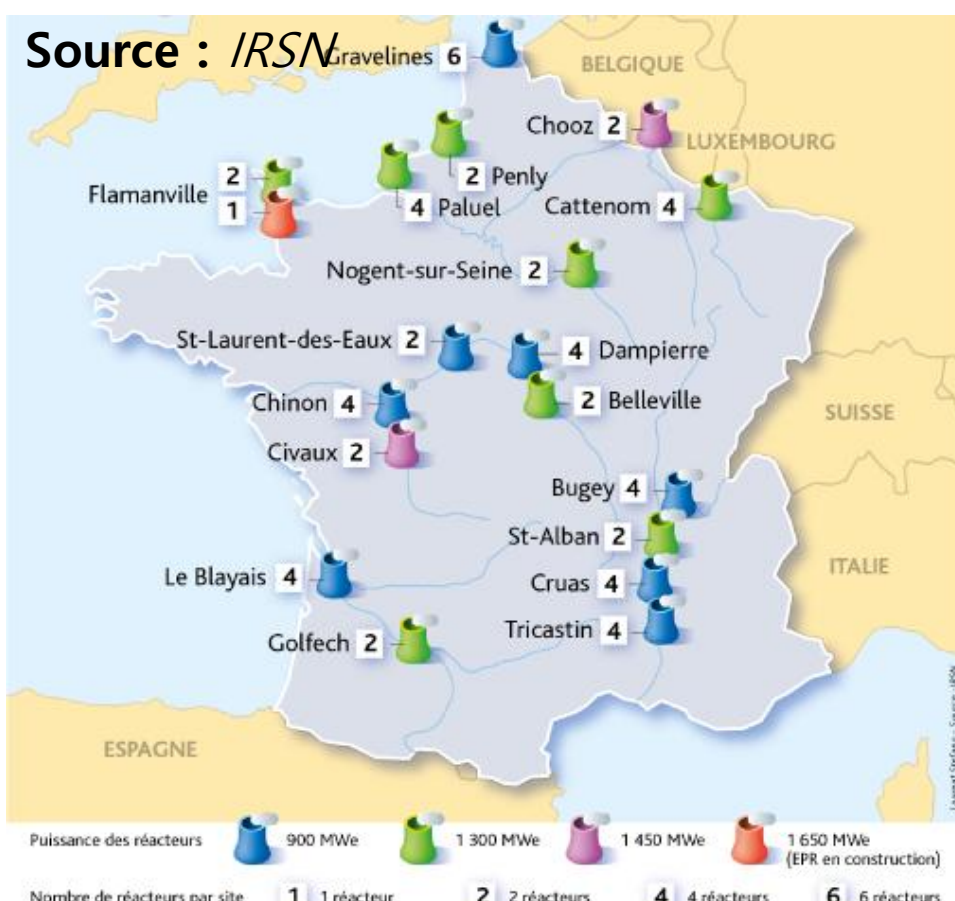
II – De la contrainte de l'Uranium au potentiel du Thorium

Problème : Besoins de la France en uranium

La France a actuellement besoin de l'ordre de **6 000 à 8 000 tonnes d'uranium** naturel par an pour fabriquer le combustible alimentant son parc de 57 réacteurs nucléaires. Ce qui pose un problème de souveraineté.



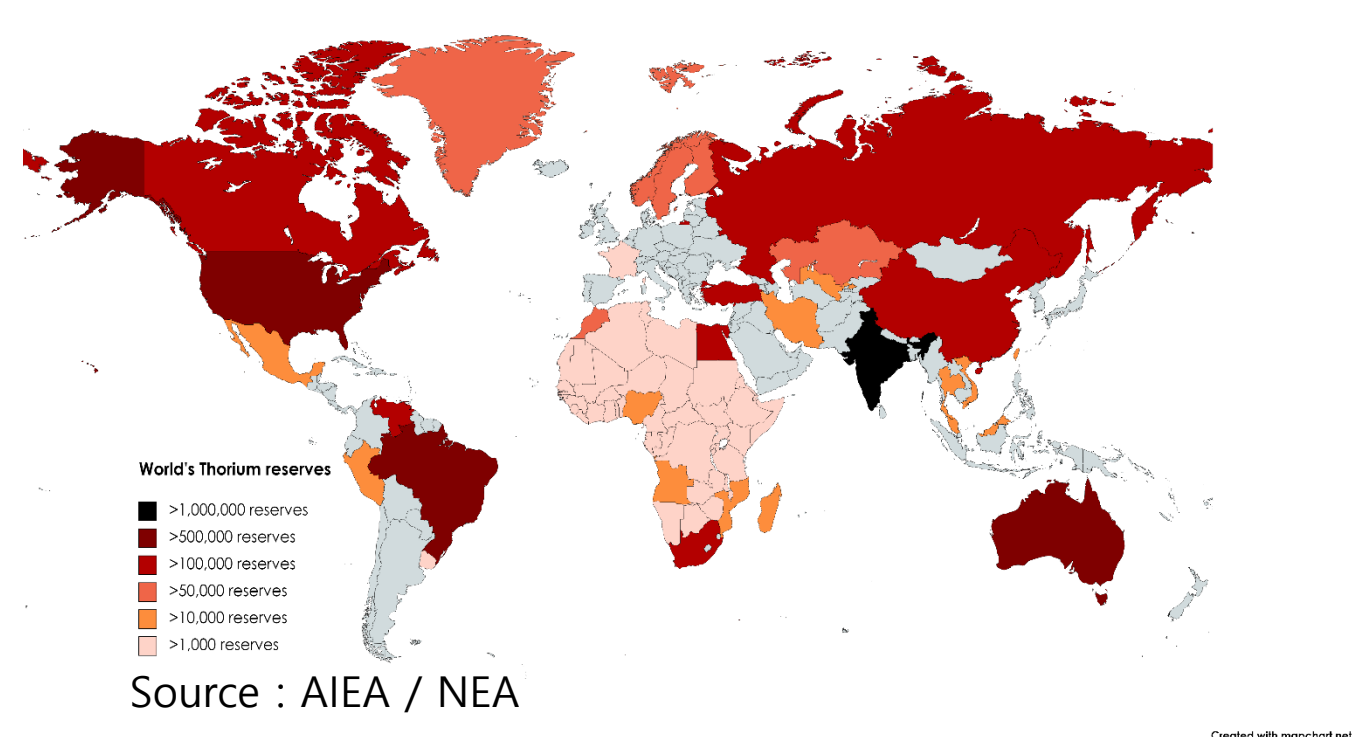
Source : Connaissance des Energies, Origine des importations d'Uranium en France



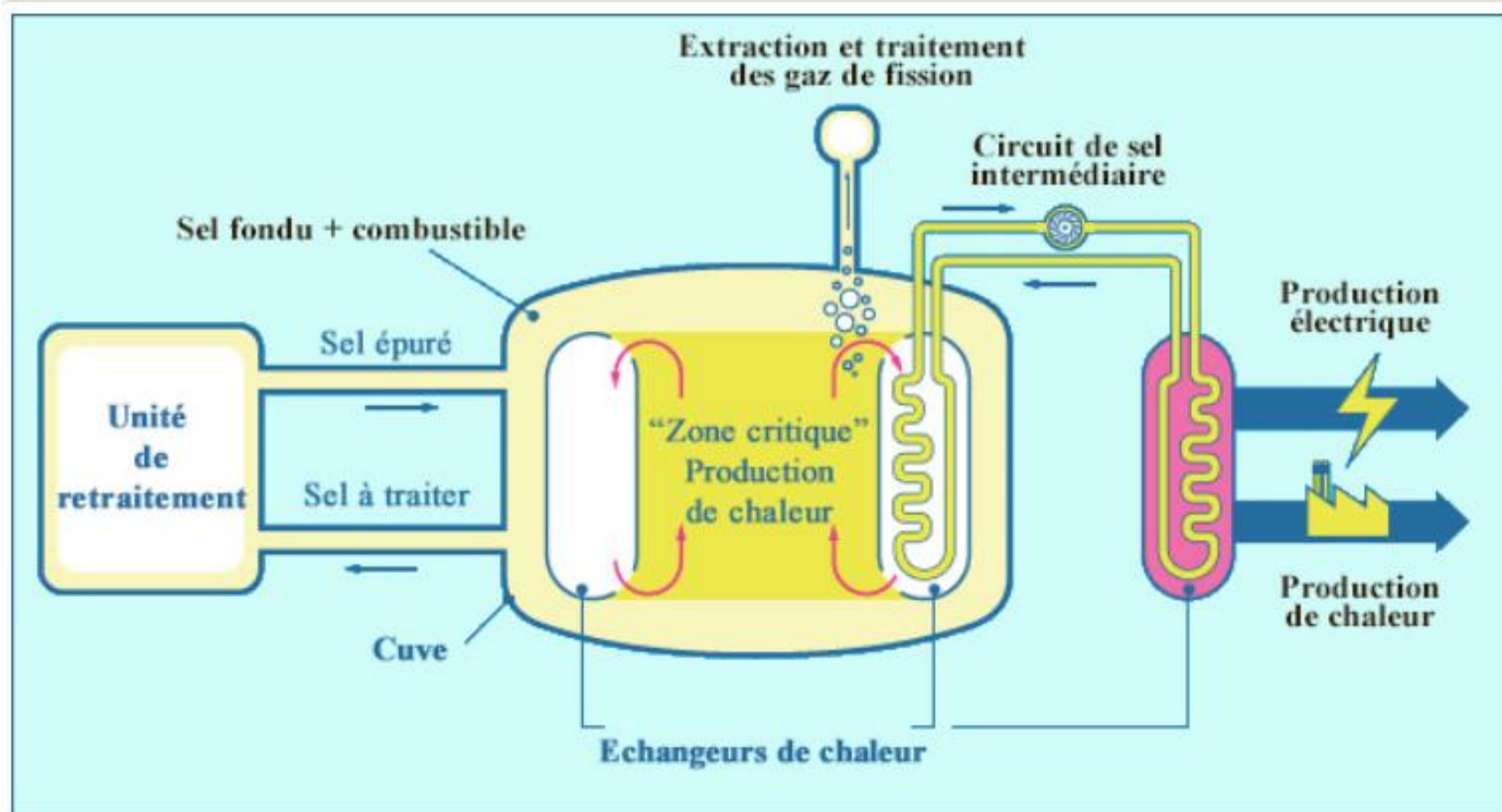
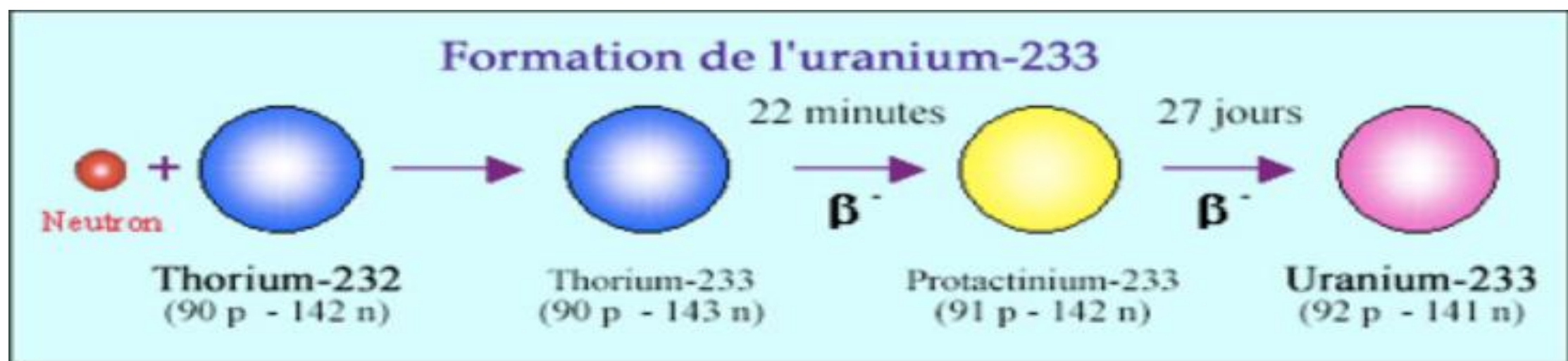
Solution ?
Le Thorium

Famille	Actinides
Abondances	3 à 4 fois plus importantes que l'uranium
Emission principale	Alpha de 4,01 MeV (Th-232)
Période	1,4 x 10 ¹⁰ ans (Th-232)
Activité spécifique	4060 Bq/g (Th-232)

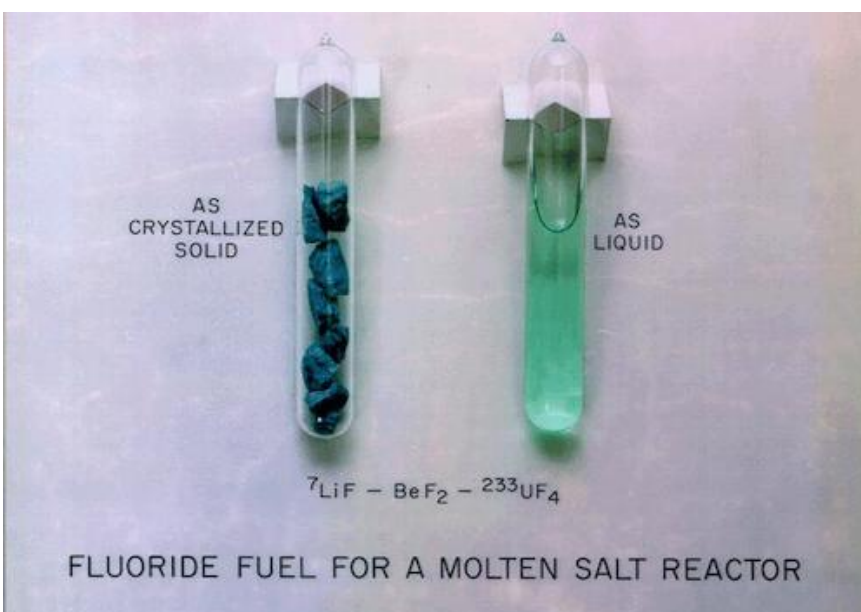
Source : LNHB / CEA (Base Lara)



III – Utilisation du thorium dans un RSF



Les Réacteurs à Sels Fondus (RSF) sont des réacteurs de 4^e génération à combustible liquide, pouvant fonctionner en spectre thermique ou à neutrons rapides selon les concepts. Ils constituent une solution polyvalente pour la production d'électricité, de chaleur industrielle, ainsi que pour la transmutation des actinides issus du parc nucléaire actuel.



Exemple de liquide (à adapter selon neutron rapide ou thermique)

- 77,5 % de Fluorure de Lithium (7LiF) : utilisé comme solvant (sel porteur).
- 20,0 % de Fluorure de Thorium (ThF₄) : la matière fertile.
- 2,5 % de Fluorure d'Uranium (233 UF₄) : la matière fissile.

Le sel fondu assure à la fois les fonctions de combustible et de fluide caloporteur. La chaleur est produite directement au sein du fluide dans le cœur du réacteur, puis transportée par le sel vers les échangeurs de chaleur avant de retourner dans la cuve.

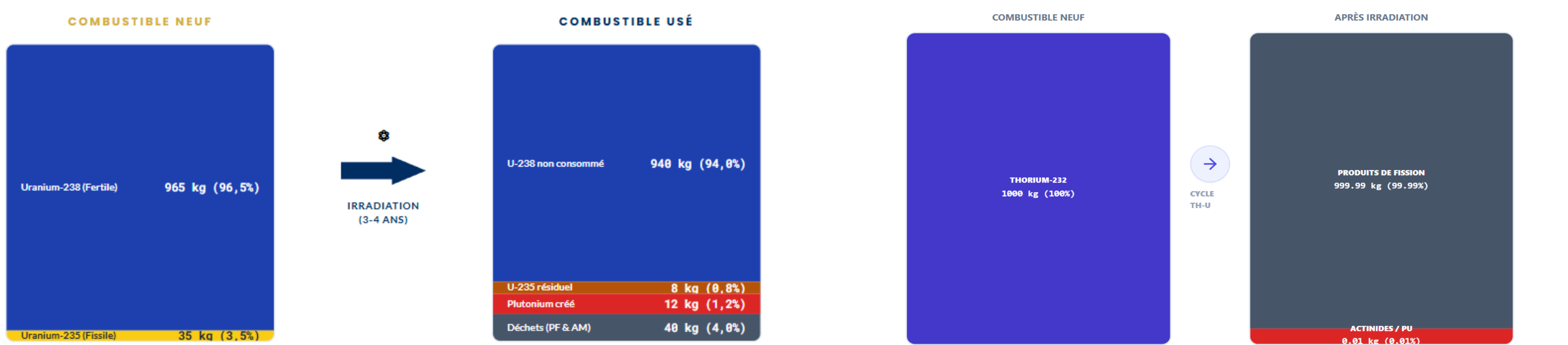
Les isotopes fissiles (uranium-233) et fertiles (thorium-232) sont dissous dans un sel de fluorure fondu circulant à haute température (environ 650 à 750 °C). Cette phase liquide induit une dilatation naturelle du combustible en cas d'élévation de température, contribuant à une sûreté intrinsèque par un coefficient de réactivité fortement négatif.

Le retraitement du combustible est intégré au fonctionnement du réacteur grâce à une épuration en ligne, permettant l'élimination continue des produits de fission (gaz et métaux) qui dégradent la réactivité. Cette caractéristique confère une grande flexibilité sur la composition du combustible, avec une charge fissile initiale en U-233, U-235, ou l'utilisation d'éléments transuraniens issus du retraitement des combustibles usés des REP.

IV – Comparatif des réacteurs au thorium VS REP

REP

Thorium

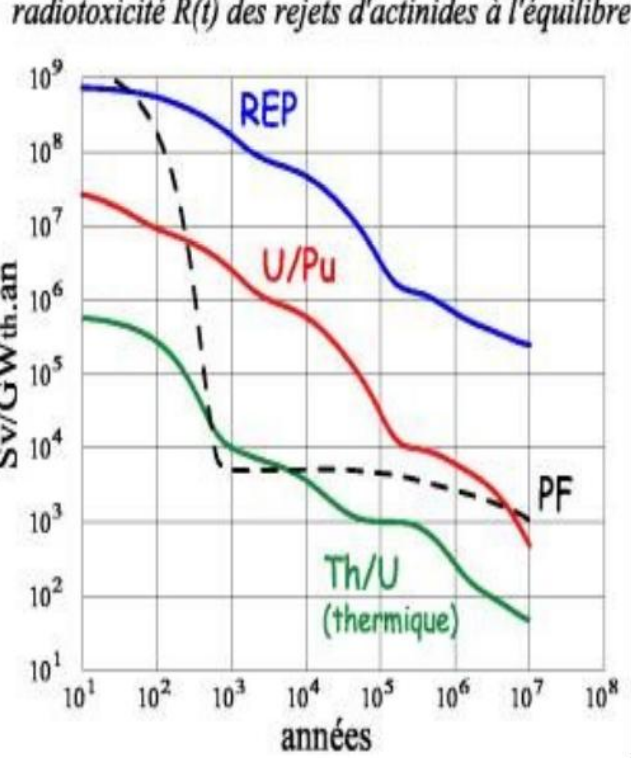


Sûreté Nucléaire et Radioprotection

Critère	Cycle Uranium (REP)	Cycle Thorium	Justification Technique
1. Pression	155 bars	1 bar	Supprime le risque d'explosion de vapeur et de rupture de cuve.
2. Stabilité	Pilotage actif	Auto-stabilisation	Surchauffe → Dilatation du sel → Espacement des noyaux → Arrêt physique.
3. Arrêt	Systèmes actifs	Vidange passive	Panne électrique → Fonte du bouchon gelé → Vidange gravitaire (réservoirs subcritiques).
4. Radioprotection	Flux modéré / Accès humain	Gamma 2,6 MeV / Robotisation	Le Thallium-208 impose des blindages massifs et une maintenance 100% télémanipulée.

Source : Synthèse à partir de données CEA, CNRS (LPSC) et littérature GEN-IV sur les réacteurs à sels fondus et REP.

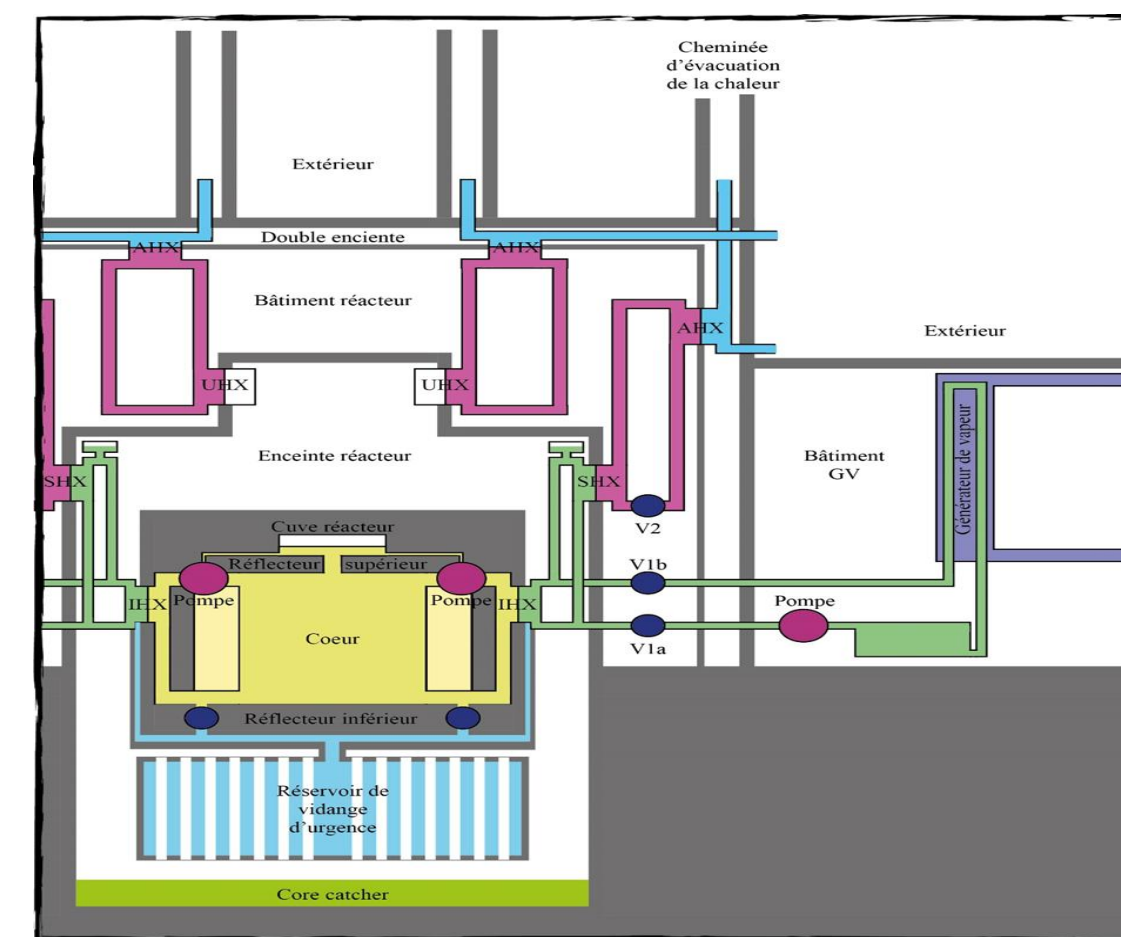
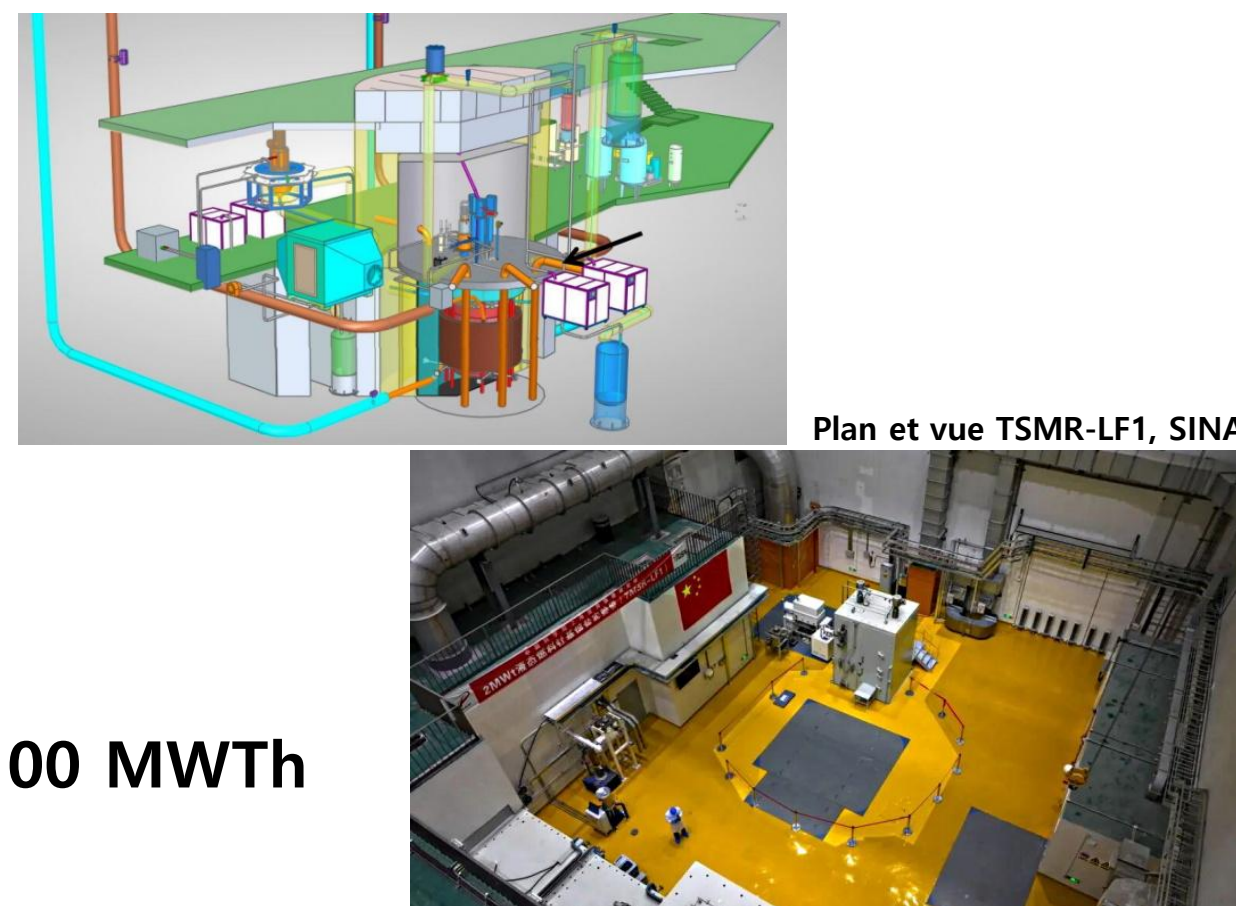
Source : Radioactivité, Radiotoxicité des rejets d'actinides à l'équilibre



V - Projets internationaux de réacteurs au thorium

Le projet chinois : TMSR-LF1

- Réacteur 4^e génération à sels fondus
- 2 MWth, prototype expérimental
- Début de divergence : octobre 2023
- Cycle thorium → U-233
- Sel combustible : fluorures LiF-BeF₂
 - ThF₄ / UF₄
- Déchets : radiotoxicité long terme ≈ PF
- Projet de nouveau réacteur en 2035 = 100 MWth
- Le projet Européen : MSFR



Réacteur 4^e génération à sels fondus, spectre rapide

- Développé dans le cadre GEN-IV / Europe (CNRS, CEA, partenaires UE)
- Puissance visée : ~3 GWth (≈ 1–1,5 GWe)
- Combustible liquide : fluorures LiF-(Th,U)F₄
- Cycle thorium → U-233 (possible multi-recyclage complet)
- Neutrons rapides → incinération des actinides mineurs
- Déchets : dominés par produits de fission, radiotoxicité ~10³ ans (ordre de grandeur)

Conclusion

La rarefaction progressive des ressources en uranium et les enjeux de souveraineté énergétique interrogent la durabilité du cycle nucléaire actuel. Dans ce contexte, le thorium apparaît comme une **ressource abondante** offrant un **potentiel** intéressant pour diversifier l'approvisionnement et améliorer l'utilisation du combustible. Associé aux réacteurs à sels fondus de IV^e génération, le cycle thorium présente des **avantages théoriques** en matière de sûreté intrinsèque, de réduction de la radiotoxicité à long terme et de fermeture du cycle du combustible, notamment par la valorisation des actinides et la limitation des déchets HAVL destinés au stockage géologique profond (**Cigéo**). Toutefois, ces bénéfices restent **conditionnés à la maturité technologique** de ces systèmes, qui demeurent à ce jour à l'état de concepts, de projets ou de démonstrateurs, sans retour d'expérience industriel. Le thorium ne constitue donc pas une solution immédiate, mais **une piste crédible de long terme**, s'inscrivant dans une réflexion globale sur l'évolution du nucléaire et la souveraineté énergétique future.

Bibliographie

CEA, Essentiel sur une filière nucléaire au thorium, <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/essentiel-sur-une-filiere-nucleaire-au-thorium.aspx>

Fission Liquide, La réserve française de thorium, <https://fissionliquide.fr/2013/06/08/la-reserve-francaise-de-thorium>

MESTRAL, J.-C. (2011). *L'atome vert : le thorium, un nucléaire pour le développement durable*. Lausanne : Éditions Favre.

MERLE-LUCROTTE, E. (2008). *Le cycle Thorium et les réacteurs à sels fondus*. Grenoble : Institut Polytechnique de Grenoble.

CNRS / LPSC. (2021). *Molten Salt Fast Reactor: The European project for Generation IV*. Grenoble : Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie.

ANDRA. (2023). *Inventaire national des matières et déchets radioactifs*. [En ligne] disponible sur : inventaire.andra.fr.

Radioactivité, Réacteurs à sels fondus, https://www.laradioactive.com/site/pages/Section_Efficace.htm (consulté le 13/01/2026)

OECD NEA, *Trends in the Sustainability of Fuel Cycles: A Focus on Thorium Fuel Cycles*, 2019. <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/6981-trends-sustainability-fuel-cycle-fr.pdf>

Sortir du Nucléaire, *Le réacteur au thorium : une nouvelle impasse*, <https://www.sortirdu-nucleaire.org/Le-reacteur-au-thorium-une-nouvelle-impasse>

CNRS / LPSC – Schéma de principe du réacteur à sels fondus rapide (MSFR), d'après les travaux du projet Generation IV (CNRS / CEA).

ORNL, *Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) – Fluoride fuel composition*, 1960s.

Connaissance des Énergies, Origine des importations d'uranium de la France (2023), d'après DGDDI.