

## I – Introduction

- Radioisotope de l'hydrogène composé de 2 protons supplémentaires ;
- Demi-vie de 12,3 ans ;
- Emetteur  $\beta^-$  de faible énergie (18,6 keV) ;
- Utilisé dans les **armes nucléaires**, les **installations de fusion nucléaire** et dans la **recherche** ;
- Stocks naturels très limités, la production anthropique est donc **nécessaire** <sup>1</sup>.

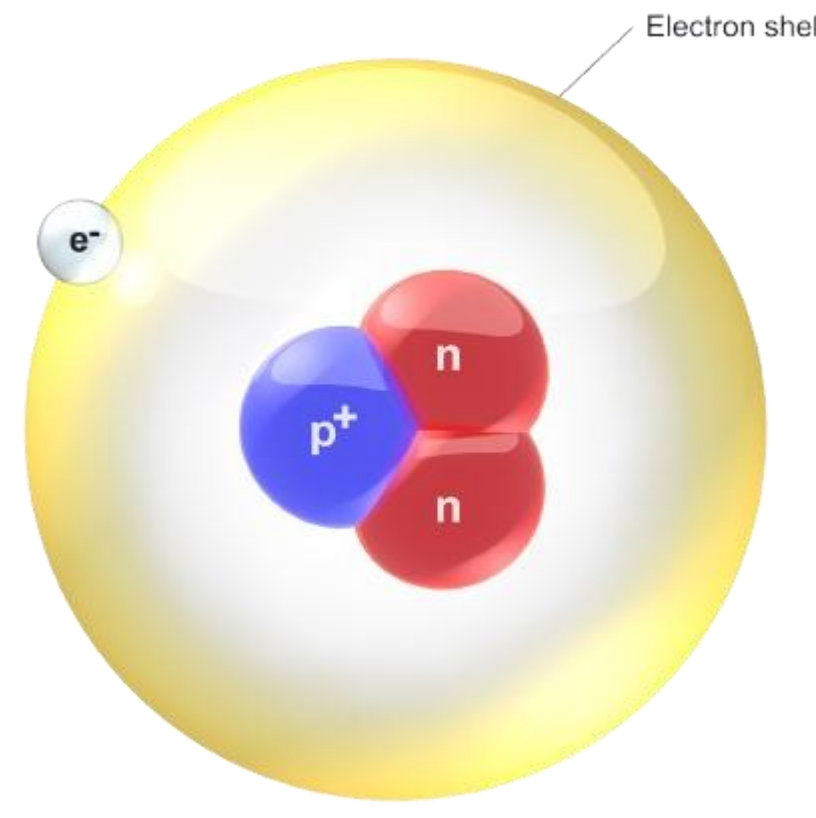


Fig. 1 : Structure atomique du tritium

- Ses faibles taille et masse rendent son confinement très complexe dans le cadre de stockage, car il **diffuse** facilement à travers les molécules constituant les parois du contenant ;
- On étudie donc la possibilité **d'immobiliser** les atomes de tritium dans une **matrice d'uranium appauvri** afin de pouvoir le stocker de façon **réversible** grâce à leur affinité chimique mutuelle.

A titre informatif, il existe pour l'instant **seulement 3 à 4 kg** de tritium sur Terre.

## II – Techniques de séparation isotopique

On veut **séparer** les atomes de tritium des autres atomes d'hydrogène, et on utilise pour ça différentes techniques comme :

- Des matériaux **poreux** ayant des propriétés permettant de **filtrer** les isotopes (zéolites, MOFs [fig. 2], COFs, graphène) <sup>2</sup> ;
- Des techniques de distillation cryogéniques permettant de jouer avec les **températures d'ébullitions** très légèrement différentes ;
- Des catalyseurs en cascade **brisant** les molécules de liquide ou de vapeur pour isoler les atomes de tritium avant distillation cryogénique, utilisé par les réacteurs **CANDU** <sup>3</sup>.

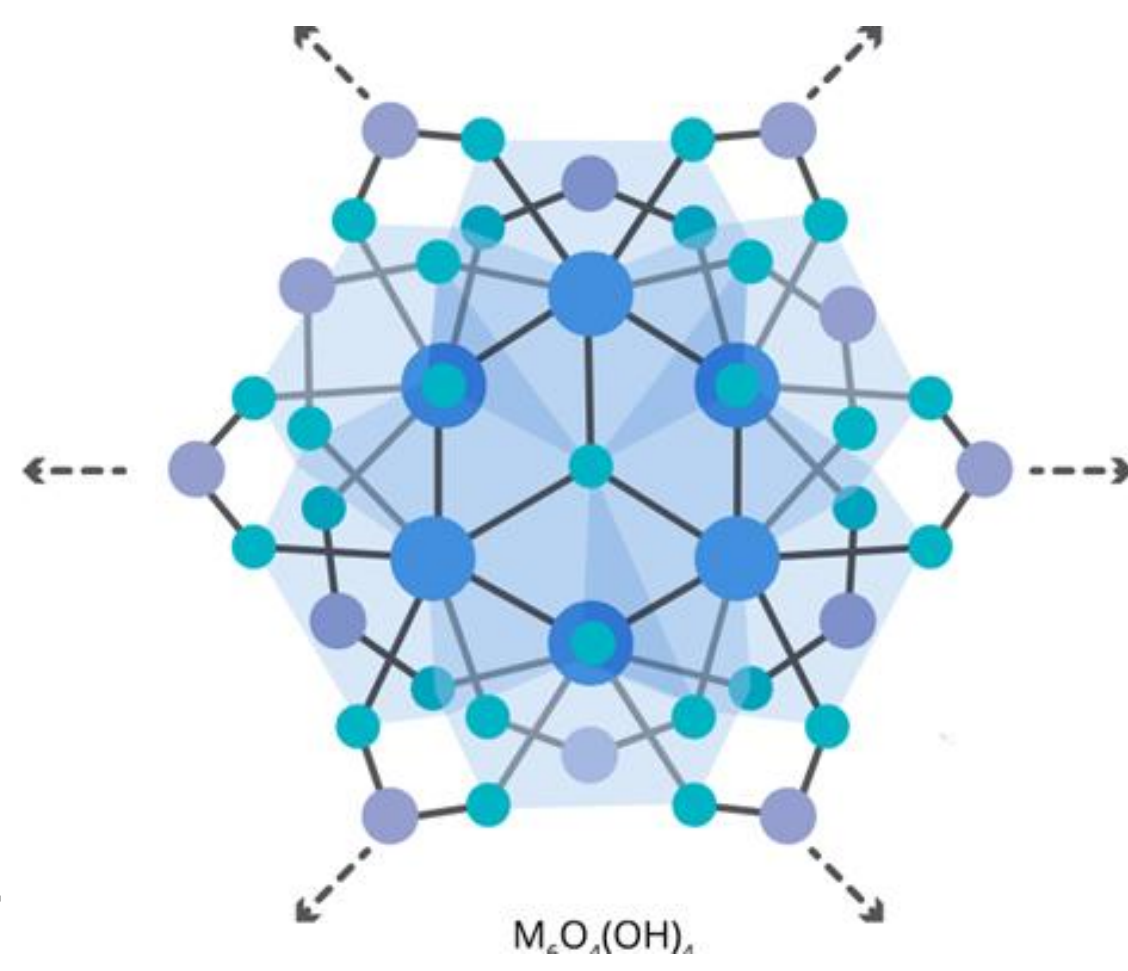


Fig. 2 : Réseau Métal Organique (MOF)

## IV – Réversibilité du procédé

Pour extraire le tritium précédemment intégré à la matrice, il suffit de répéter le procédé de façon inverse.

- La chauffe doit se faire progressivement, **cette fois en dépassant 300°C** jusqu'à atteindre ~600°C ;
- Le tritium est libéré sous forme gazeuse, et le mélange tritium / gaz composant l'atmosphère inerte devra être **purifié** pour ne garder que le tritium.

Le gradient, la plage de température et le temps total de chauffe ont un impact sur **l'efficacité** du procédé, en effet, celle-ci peut être amoindrie en cas de gradient trop grand, une température finale trop basse ou un temps de chauffe trop réduit (ces trois facteurs étant intrinsèquement liés).

Encore une fois, l'uranium a également une meilleure capacité de désorption, comme on peut le voir sur les figures ci-dessous comparant les temps de désorption d'hydrogène par de l'uranium et du ZrCo <sup>6</sup>.

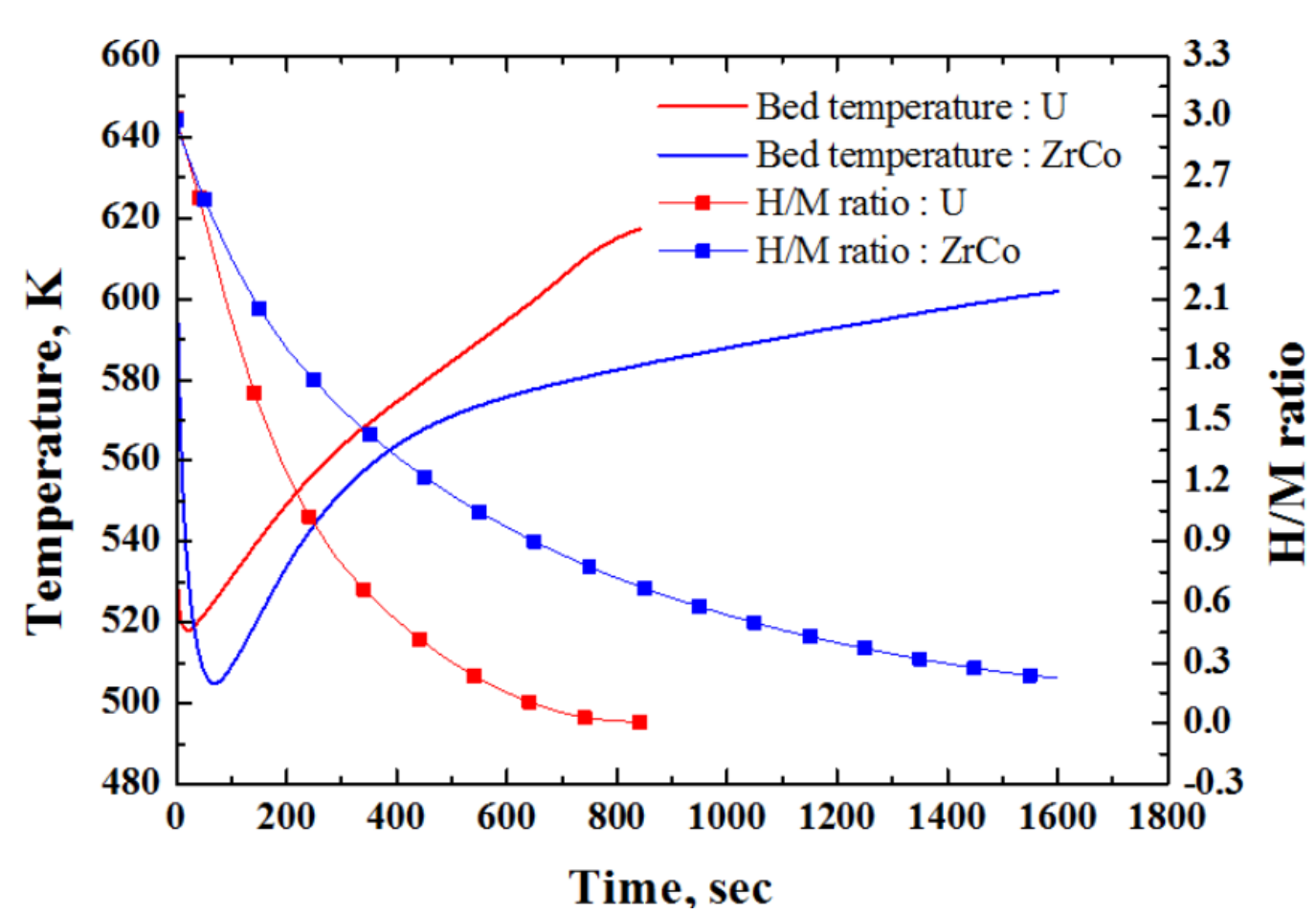
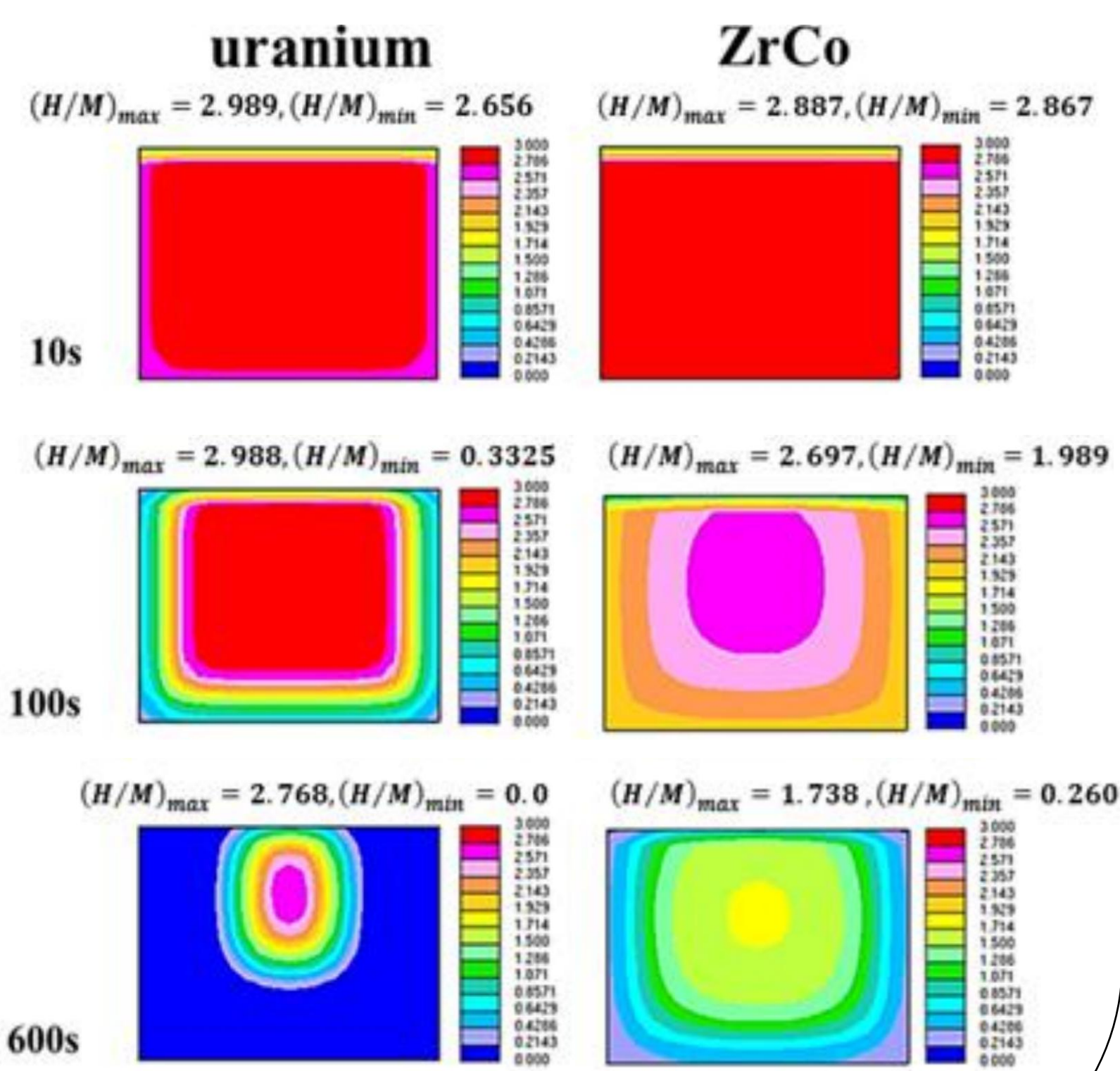


Fig. 4 & 5 : Evolution de la quantité d'hydrogène piégé dans l'uranium et le ZrCo selon temps et température



## III – Le choix de l'uranium pour le stockage

Récemment (2015), il a été développé des « lits » d'uranium appauvri, capables **d'intégrer chimiquement** du tritium au sein de leur volume. C'est ce métal qui présente les caractéristiques les plus prometteuses :

- Il a une très bonne **affinité chimique** avec les isotopes de l'hydrogène, ce qui permet une **grande stabilité** une fois liés ;
- Chaque atome d'uranium peut se lier à **3 atomes de tritium**, pour former un hydrure **UT<sub>3</sub>**. C'est plus que la plupart des métaux lourds ;
- C'est un métal dense, on peut donc stocker une **plus grande quantité** de tritium pour un **volume plus réduit** ;
- Les stocks d'uranium appauvri ne manquent pas et ont peu d'utilisations pour l'instant.

D'autres matériaux peuvent être utilisés comme le zirconium, le titane ou des alliages, mais leurs performances ne sont pas aussi hautes que l'uranium <sup>4</sup>.

Pour faire en sorte que le tritium s'intègre correctement dans le lit d'uranium :

- On place le lit sous atmosphère inerte dans une enceinte étanche ;
- On injecte du gaz tritié, la concentration en tritium doit être **maximale** ;
- La température **ne doit pas** excéder 300°C mais être suffisamment élevée pour favoriser la diffusion du gaz ;
- L'hydrure se stabilise pour former un solide dans lequel le tritium est immobilisé car **lié chimiquement** au métal.

Théoriquement, il est possible de stocker 700 g de tritium par litres d'U238, contre 550 g/L pour le titane et 450 g/L pour le zirconium.

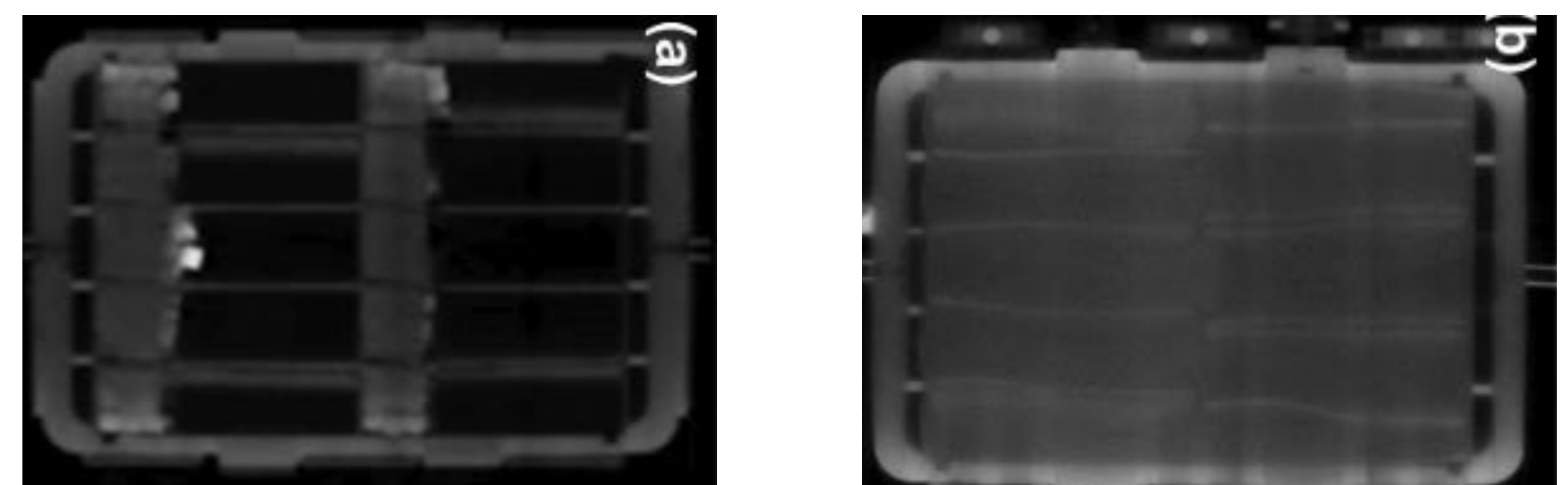


Fig. 3 : Lit d'uranium STACI, 5,2kg, pré (a) et post (b) tritiation (3,4g/cm<sup>3</sup>) <sup>5</sup>

## V – Problématiques et limites

Pour l'heure, nous faisons face à des problématiques concernant la séparation isotopique du tritium et son stockage en matrice uranium. Les techniques de séparation isotopiques actuelles sont difficilement applicables à **grande échelle** pour l'industrie et sont pour la plupart très **énergivores**. Le stockage du tritium en lits d'U238 quant à lui :

- Crée un composé **pyrophorique**, c'est-à-dire que l'hydrure UT<sub>3</sub> s'enflamme spontanément au contact de l'air ambiant en rependant des **aérosols d'uranium** dans l'atmosphère ;
- Le stockage réversible ne peut pas être utilisé infiniment, les lits d'uranium se **déforment mécaniquement** à la suite des contraintes subies, ils deviennent **fragiles, poreux** et **cassants** avec le temps ;
- La décroissance du tritium forme des **bulles d'hélium 3** dans l'uranium, entraînant des **surpressions locales** et des **microfissures** <sup>4</sup>.

## Conclusion

Jusqu'à la fin du XXème siècle, les quantités relativement modestes de tritium produites suffisaient aux besoins existants, et son stockage ne constituait qu'un enjeu limité. Avec l'essor des installations expérimentales de fusion, en particulier ITER et DEMO, le tritium devient un cycle industriel à part entière : de sa production à sa purification, de son stockage à sa réextraction, jusqu'à son utilisation en réacteur. Des travaux de recherche sont menés depuis plusieurs années sur ces différentes étapes, et des avancées significatives ont été réalisées ; à petite échelle, l'ensemble de ces opérations est aujourd'hui maîtrisé. En revanche, le passage à l'échelle industrielle reste contraint par le manque d'infrastructures adaptées aux quantités de tritium à produire et à stocker. Plusieurs technologies prometteuses ont été évoquées, mais elles s'accompagnent de contraintes techniques, économiques et réglementaires importantes, impliquant parfois des investissements lourds. Dans ce contexte, le stockage du tritium en lits d'uranium appauvri offrirait une voie de valorisation partielle de cette ressource, dont environ 320 000 tonnes sont actuellement entreposées en France, même si cette solution demeure limitée.

## Bibliographie

- [1] Fiche radionucléides, *Tritium*, IRSN (2024).
- [2] A. Wood, *What are Metal Organic Frameworks (MOFs)?* (2025).
- [3] A. Busigin et al., *Optimization of Darlington Tritium Removal Facility Performance: Effects of Key Process Variables* (1987).
- [4] H. Godfrey et al., *Knowledge Status on Uranium Hydride* (2020).
- [5] V. Hypes-Mayfield et al., *Uranium Bed Design Parameters for Tritium Plants Supporting Fusion Reactors* (2021).
- [6] S. Kyung et al., *Numerical Comparison of Hydrogen Desorption Behaviors of Metal Hydride Beds Based on Uranium and on Zirconium-Cobalt* (2015).