



# TRANSMUTEX

## Le projet START

Donovan Maire, CTO

# La Startup Transmutex

## Transmutex SA

- 45 employés
- Physiciens, Chimistes, ingénieurs, ...
- 19 Nationalités
- Financement privée
- HQ à Genève
- CEO: Franklin Servan-Schreiber



# Les Motivations

Le projet START

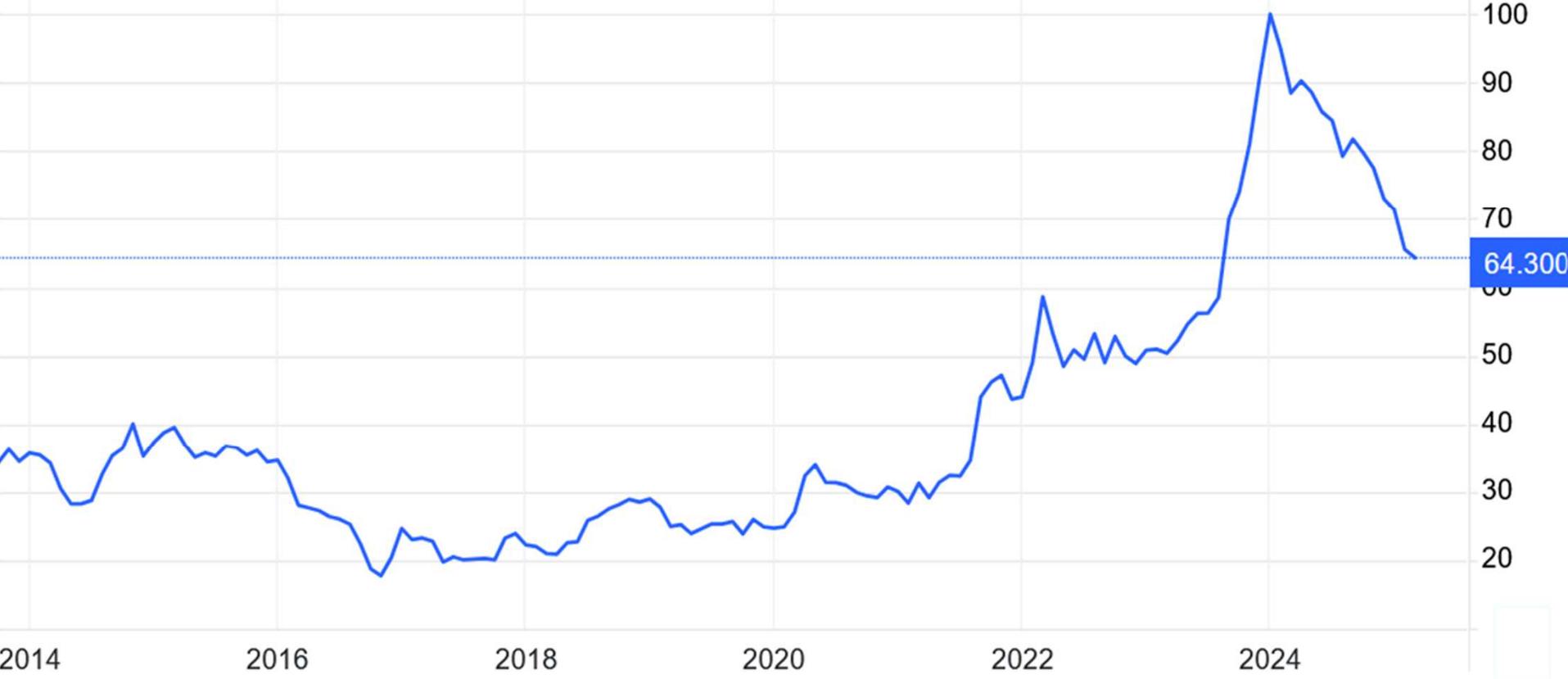
# Déclaration du Triplement du Nucléaire à la COP28



Arménie, Bulgarie, Canada, Croatie, République tchèque, Finlande, France, Ghana, Hongrie, Jamaïque, Japon, Corée, Moldavie, Mongolie, Maroc, Pays-Bas, Pologne, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Ukraine, Emirats Arabes Unis, Etats-Unis, Royaume-Uni.

# 3x plus de Nucléaire = demande d'uranium plus élevée

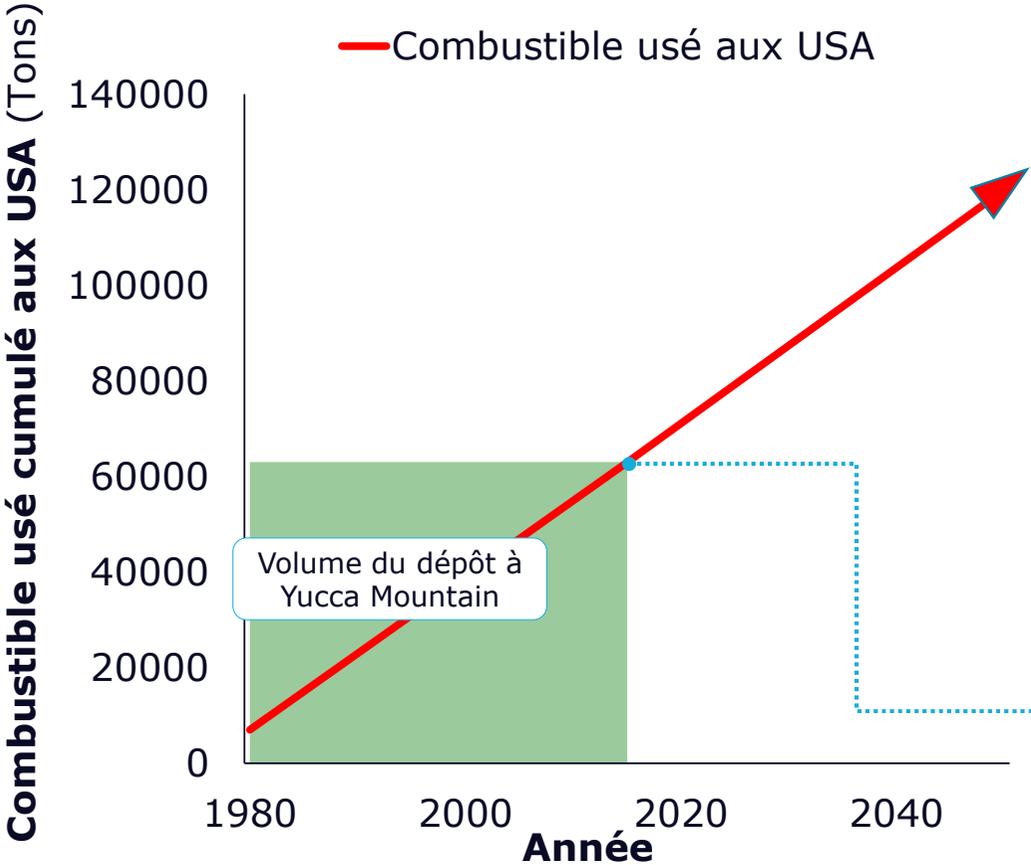
Prix Uranium (USD par Lbs)



## Kazatomprom (Largest Producer) Warns World May Not Have Enough Uranium After 2030

[<https://www.nucnet.org/news/largest-producer-warns-world-may-not-have-enough-uranium-after-2030-3-1-2024>]

# 3x plus de Nucléaire = 1 projet Yucca Mountain toutes les décennies aux USA



**96 Milliard\$**  
Coût du projet de dépôt à Yucca Mountain (2008)

En 2015, l'accumulation des déchets aux USA aurait déjà atteint la capacité du dépôt (1,800 terrain de football, 600m de profondeur).

Sources: DOE Report to Congress, 2003 - p.I-3, GAO, "Spent Nuclear Fuel", report to Congress, 2012, p. 19 DOE, Analysis of Total System Life Cycle Cost, 2008, p.2

# Optimiser le Stockage Géologique aux USA

Impact de la transmutation pour les déchets à vie longue du cycle uranium

**5x to 225x**  
**Réduction du**  
**Volume de Stockage\***

**1,000,000 to 500 yrs**  
**Réduction de la**  
**Durée de Radiotoxicité\***

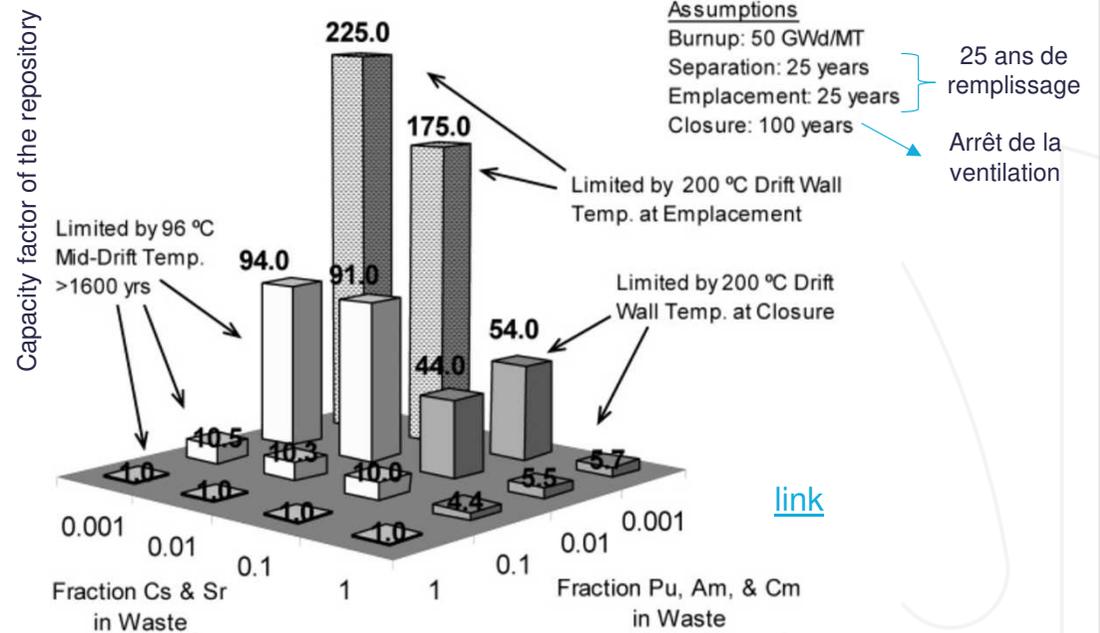
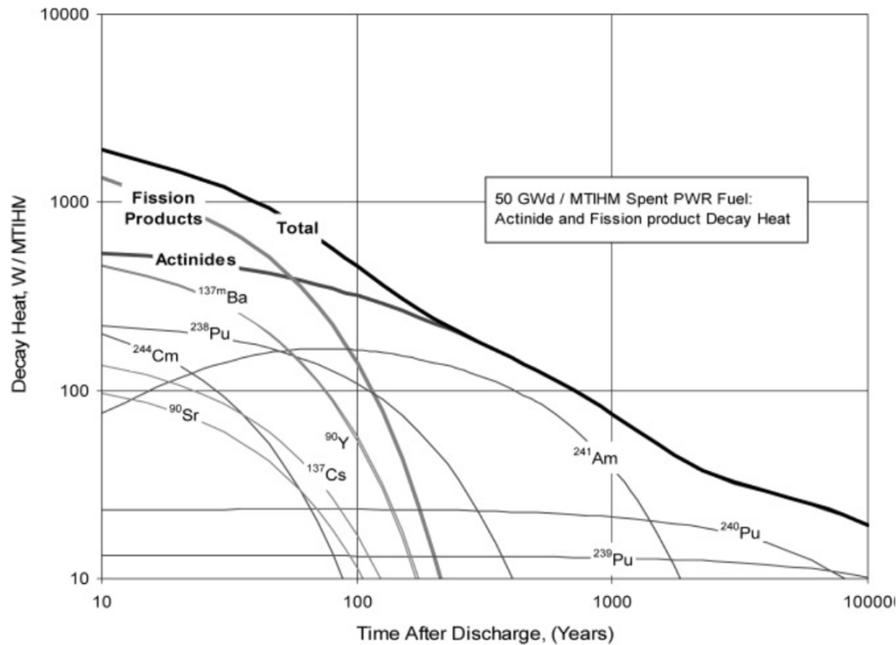
Separations and Transmutation Criteria to  
Improve Utilization of a Geologic Repository



"In summary, it has been shown that removal of **plutonium** and **americium** alone from spent PWR fuel has the potential for either increasing the drift loading or reducing the size of a repository of a given capacity at Yucca Mountain by a factor of **4.3 to 5.4**. [...] Further separation of **curium** would provide for even greater reductions, up to **a factor of 225 compared with direct disposal.**"

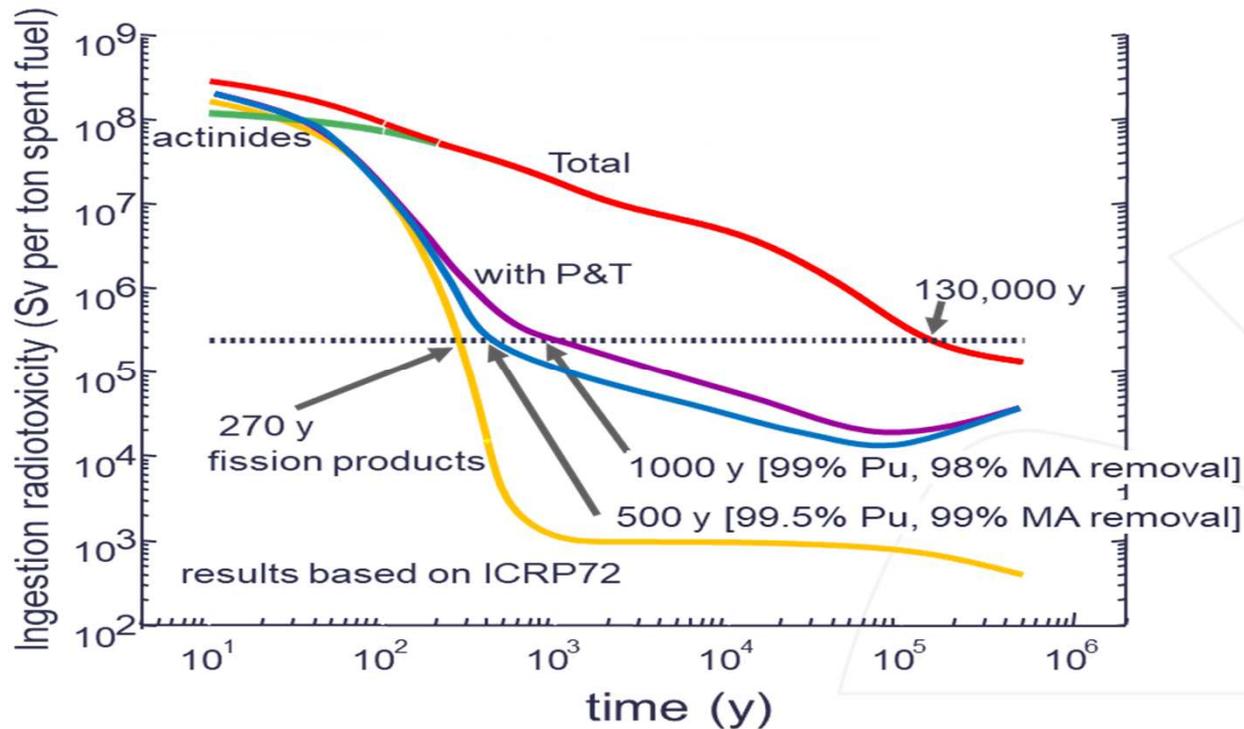
\* Depends on official used-fuel management policy

# Réduction de la Chaleur Résiduelle



Augmentation jusqu'à x225 de la capacité de stockage du dépôt géologique en profondeur

# Réduction de la Durée de Radiotoxicité



Réduction d'un facteur 1000 de la durée (< 1000 ans)

## Mission

# Reinventing Nuclear Energy

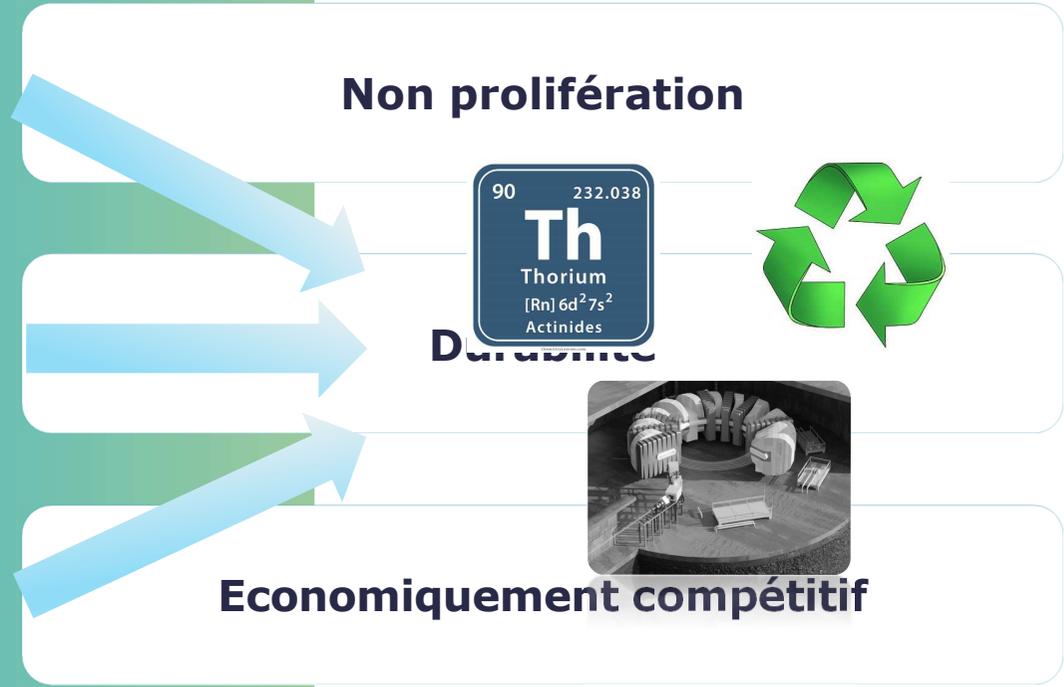
**Non prolifération**

**Durabilité**

**Economiquement compétitif**

# Mission

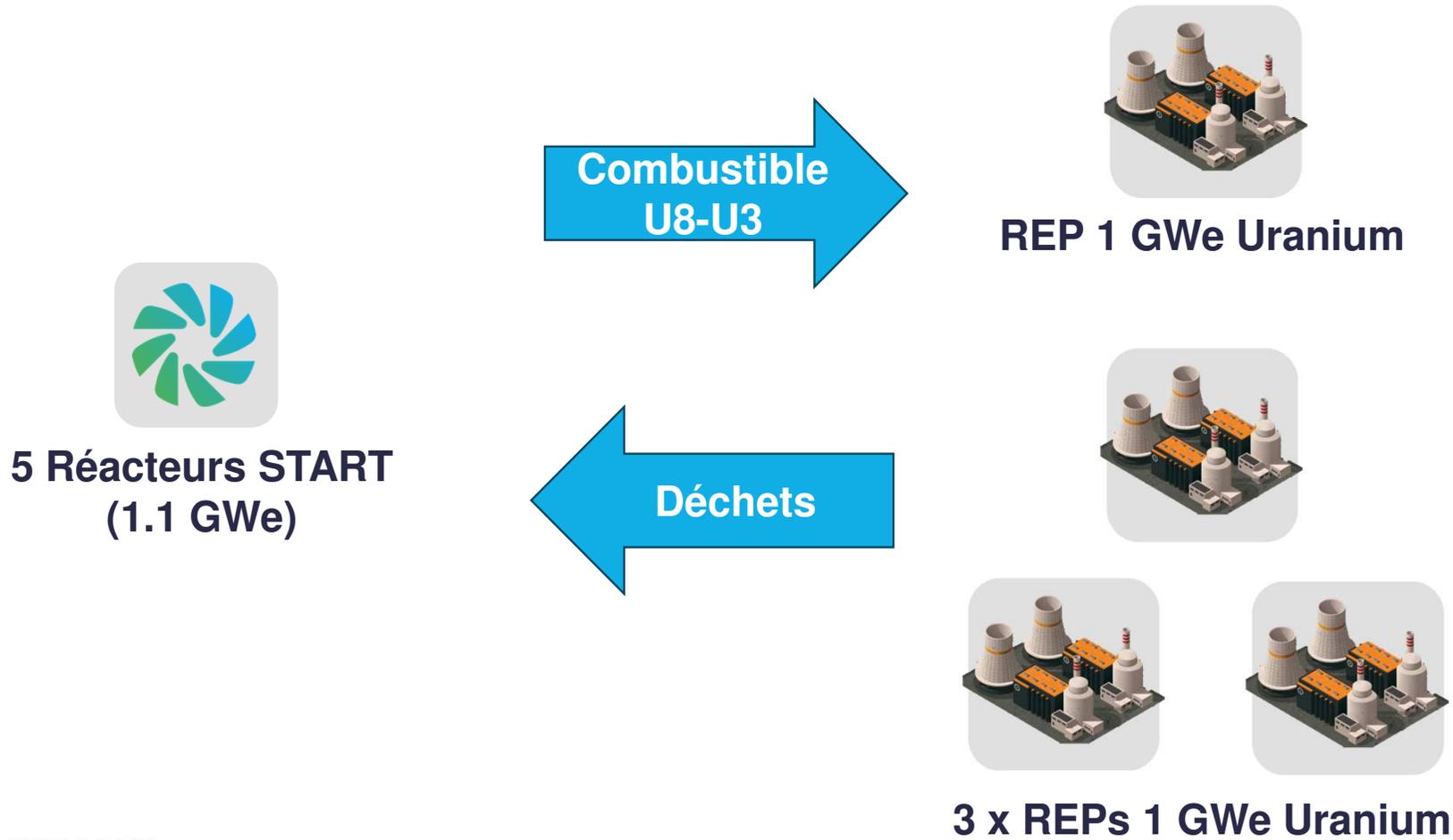
## Reinventing Nuclear Energy



# Un Cycle Vertueux

Le projet START

# Fermeture du Cycle Avec START



UN CYCLE VERTUEUX

# AIEA Safeguard by Design (SbD)

Programme  
d'appui d'États  
Membres



©BazarOuchy.com



# Etude d'impact en Suisse et Allemagne

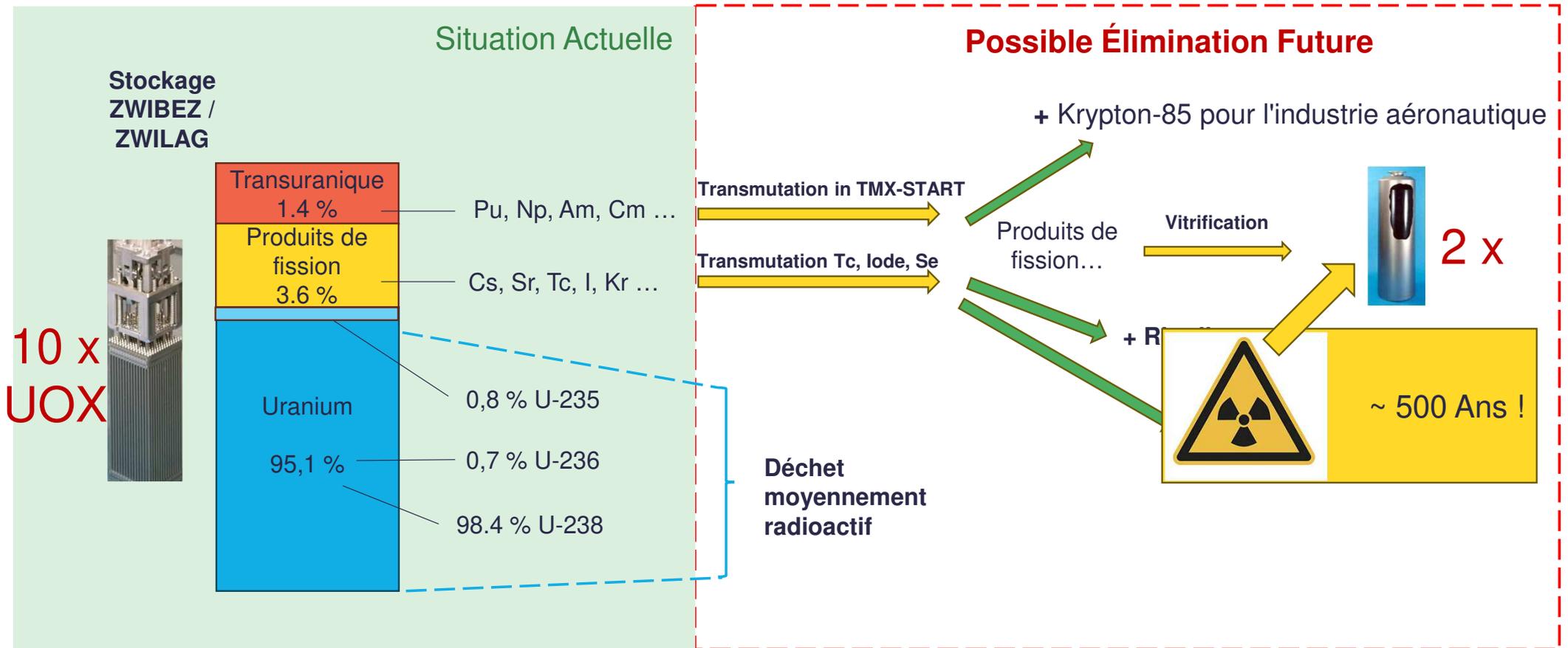
- A partir de données de la **NAGRA** – Etude de Transmutex pour tous les réacteurs en Suisse



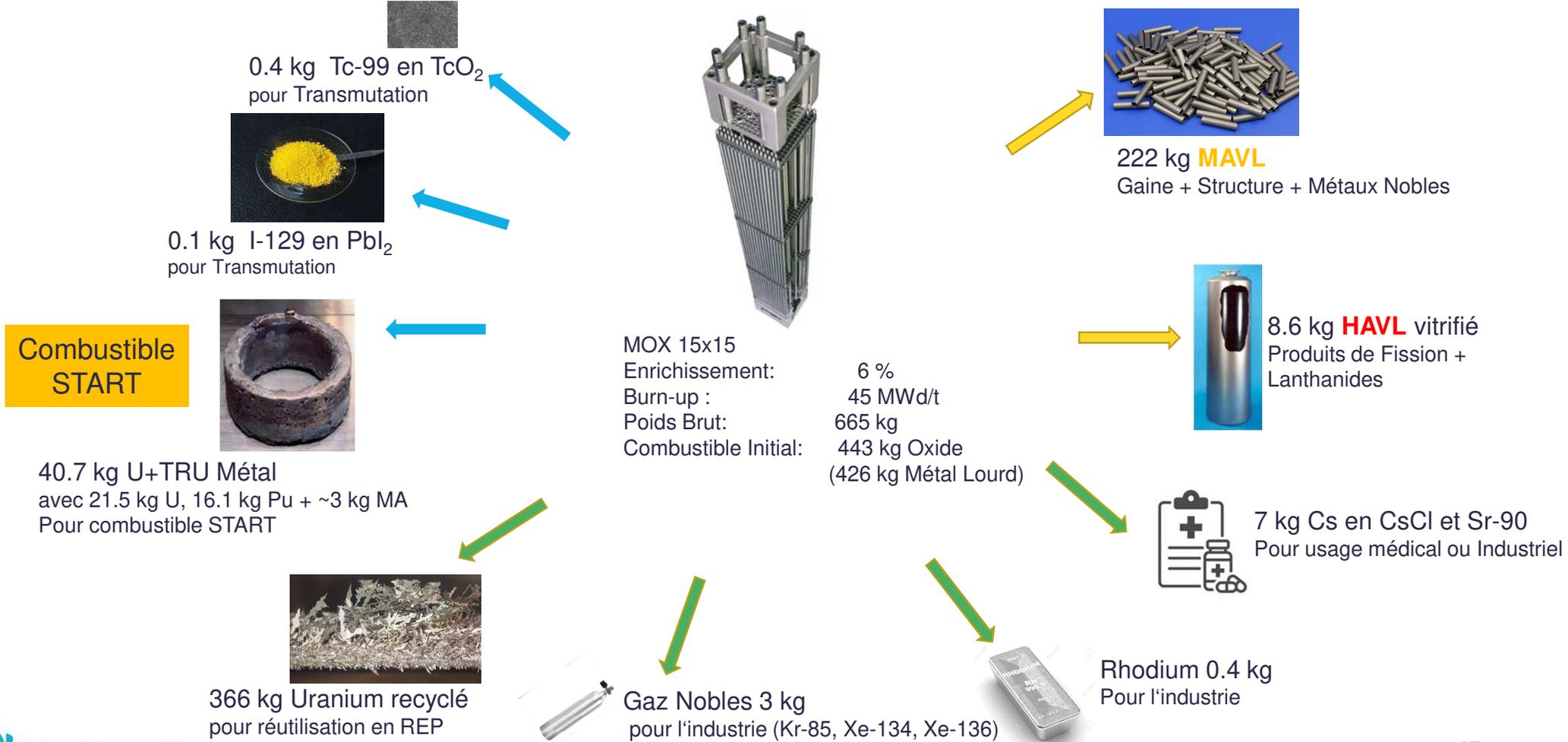
- A partir de données d'un REP "KONVOI" – Etude de Transmutex pour l'Allemagne



# Transmutation d'un élément de Combustible de Beznau

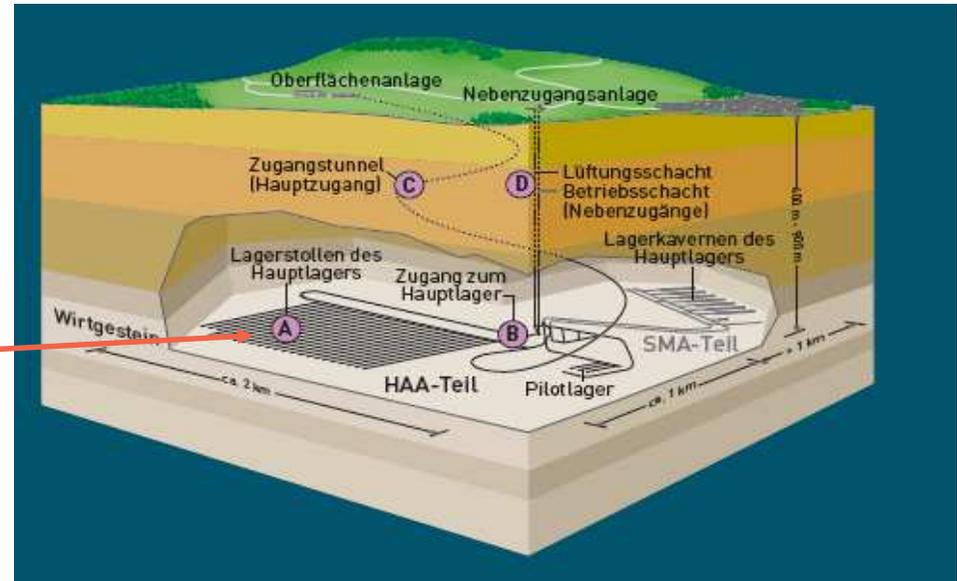
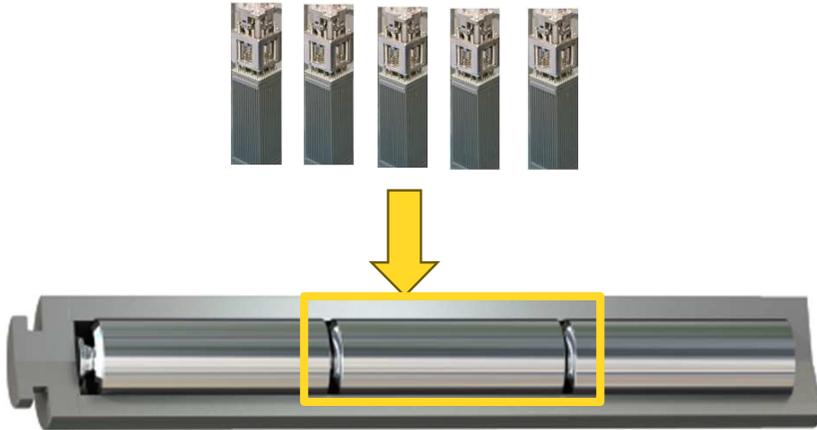


# Recyclage d'un combustible REP



# Étude pour la Suisse

Le procédé de vitrification des déchets radioactifs vitrifiés sélectionné par Transmutex est déjà qualifié.

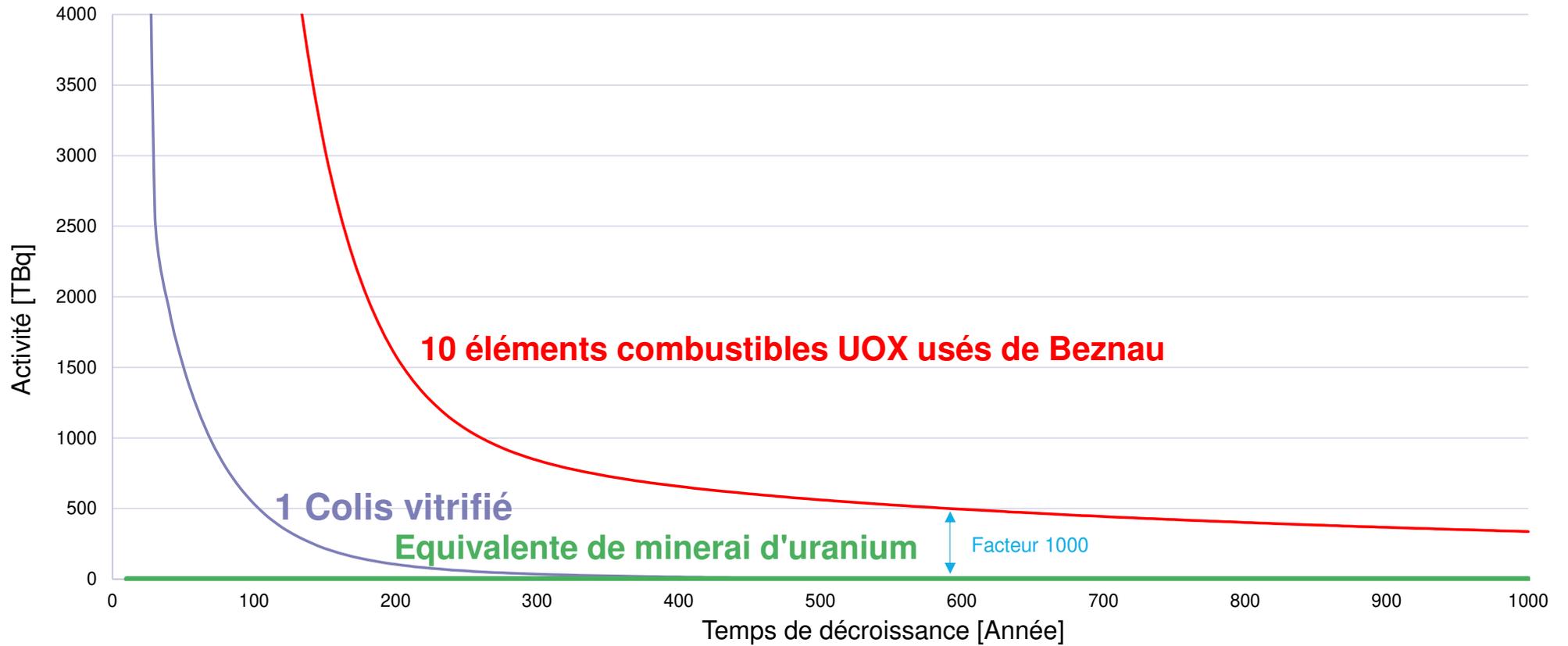


## ~ Facteur 6.2 de Réduction du volume des assemblages usés de Suisse

Résultats d'une étude réalisée en 2024 avec des données de la Nagra :

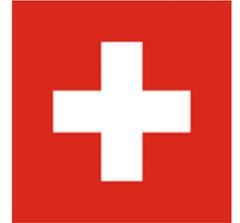
- Réduction du volume de 1930 conteneurs de stockage définitif HAVL à 313 conteneurs HAVL = 16,2 %.
- 370 MOSAIK II pour les éléments de structure MAVL
- Durée de vie des HAVL : 810 ans

# Évolution de la Radioactivité



Décroissance calculée par Transmutex

# Solution possible en Suisse



- **6 réacteurs de transmutation** de 220 MWe chacun
- 1 usine de recyclage, production de **804 kg d'U-233 / an** → Rechargement annuel de KKG assuré
- Volume actuel des HAVL réduit de **83.8 %** en volume (facteur 6,2)
- Temps de décroissance des HAVL env. **810 ans** (= exigences réduites pour le stockage en profondeur)

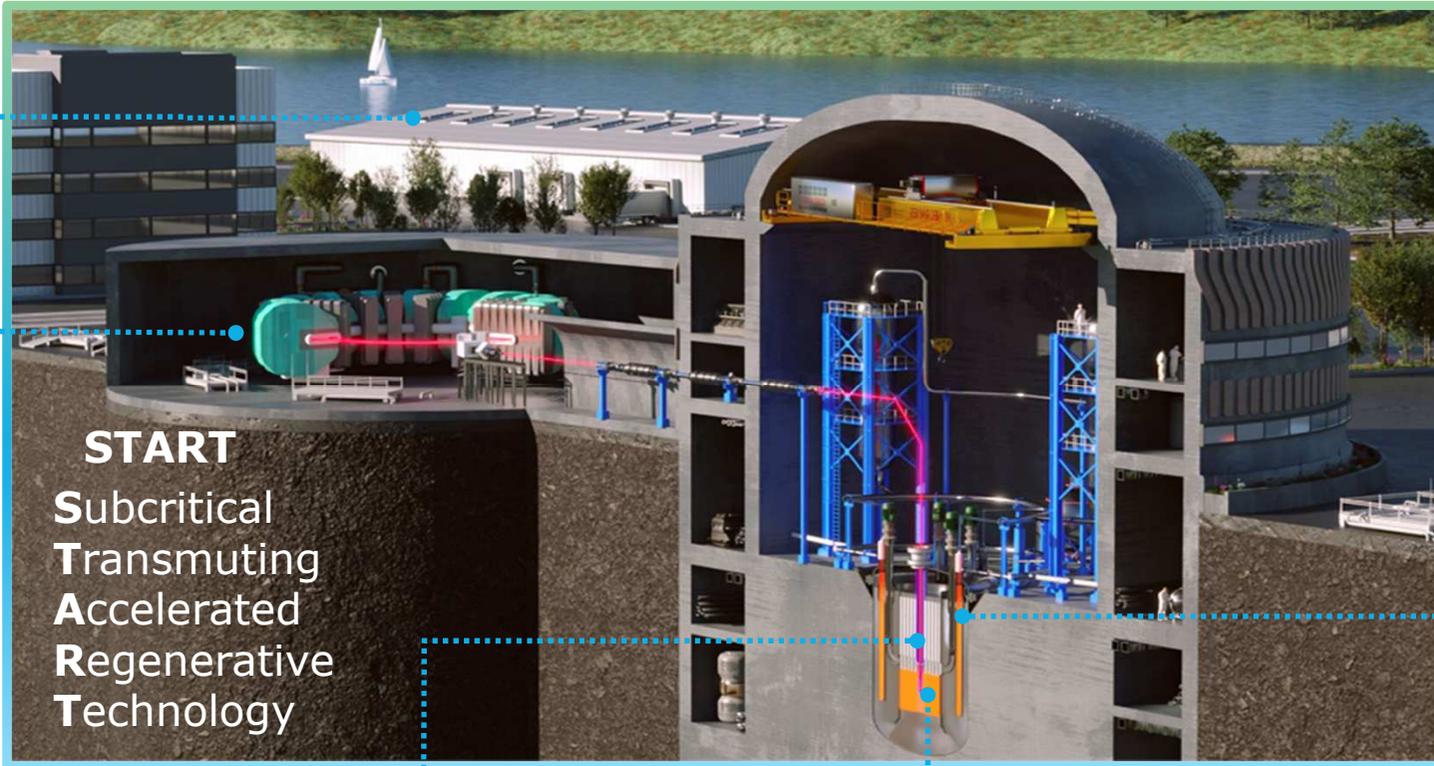
# La Centrale START

Le projet START

# START – Production d'énergie et de nouveau combustible à partir de déchets et résistant à la prolifération

## Installations Combustible

Combustibles "chauds"  
Efficacité 99.9+ %



**START**  
Subcritical  
Transmuting  
Accelerated  
Regenerative  
Technology

### Cyclotron

800 MeV – 5 mA

### Cible de Spallation

Cible refroidie au Plomb  
Liquide de 4 MW

### Combustible Thorium + TRU

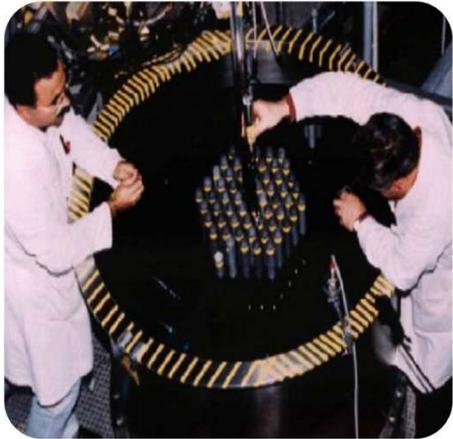
Combustible métal

### Réacteur de Transmutation Refroidi au Plomb

Flux de Neutrons Rapides, Haute  
Température  
600 MW<sub>th</sub>

# Les Bases Scientifiques

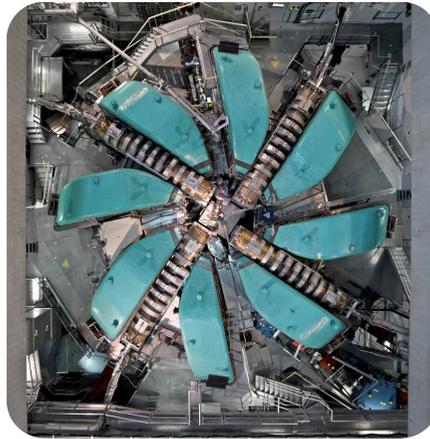
ADS  
PREUVE DE CONCEPT



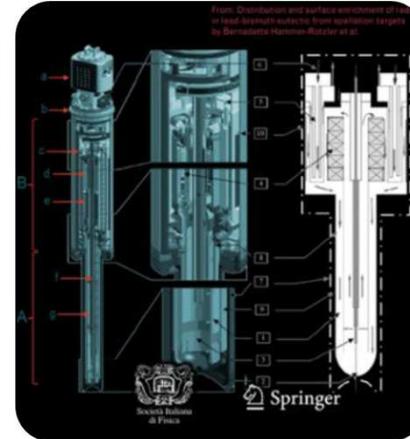
TRANSMUTATION DES  
DÉCHETS À VIE LONGUE



CYCLOTRON DE HAUTE  
PUISSANCE  
(50+ ANS)



CIBLE DE SPALLATION DE  
HAUTE PUISSANCE  
(4+ MOIS)



RÉACTEUR À  
CALOPORTEUR PLOMB  
(80,000 H)



# Le Cyclotron de Haute Puissance

Le Projet START

LE CYCLOTRON DE HAUTE PUISSANCE

# Accélérateur basé sur le PSI

Cyclotron HIPA au PSI (590 MeV – 2.4 mA):

- Haute efficacité en énergie (~18% vs. LinAc < 9%)
- Compact
- 50+ ans de fonctionnement

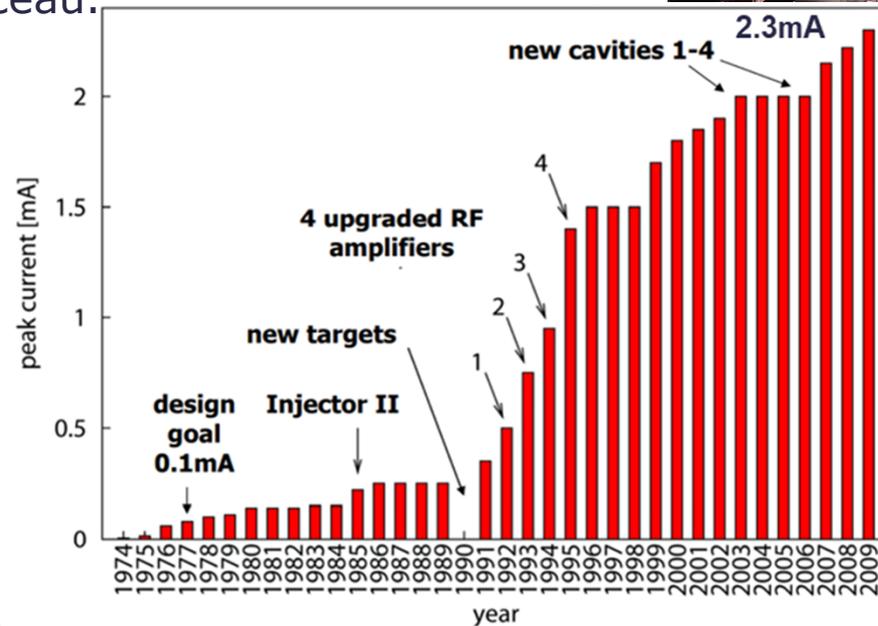
Cyclotron  
le plus  
puissant  
du monde



PAUL SCHERRER INSTITUT  
**PSI**

Limites de HIPA: RF and pertes de faisceau.

ACCELERATOR	
Type	Cyclotron
Energy	0.8 GeV
Current	5 mA
Power	4 MW
Operation mode	CW



Evolution du courant du cyclotron à 590MeV (HIPA)

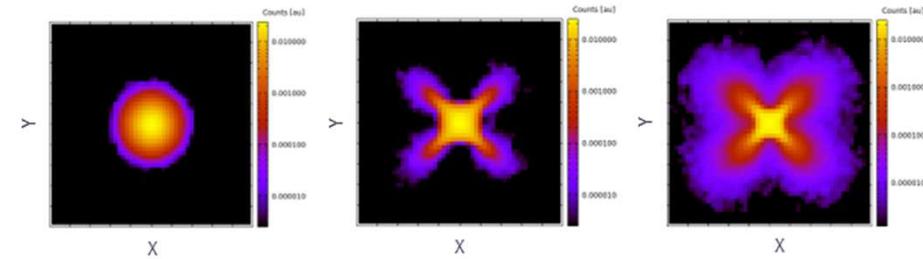
# Etat du Design de l'Accélérateur

## ☐ Définition du concept

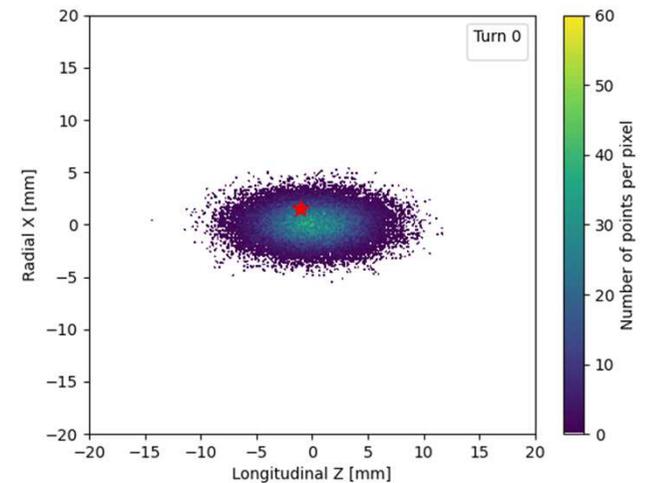
- ✓ Adaptation des éléments du PSI
- ✓ Finalisation des études de dynamique du faisceau, radioprotection and mécaniques
- ✓ Développement de l'installation de l'accélérateur et du modèle de fiabilité associé

## ☐ Démarrage de la phase d'ingénierie

- Planification d'expériences pour soutenir la conception
  - Test de la source d'ions et du premier étage d'accélération
  - Test de la fiabilité des composants



*Profils Potentiels du Faisceau sur la Cible*



*Vue de Dessus du Faisceau de Protons Simulé*

# La Cible de Haute Puissance

Le Projet START

# Pourquoi une Cible à l'Etat Liquide ?

## Avantages

- ❑ Transfert de chaleur important (centaines kW/L)
- ❑ Compacité
- ❑ Simplification de la conception (caloporteur primaire)

## Désavantages

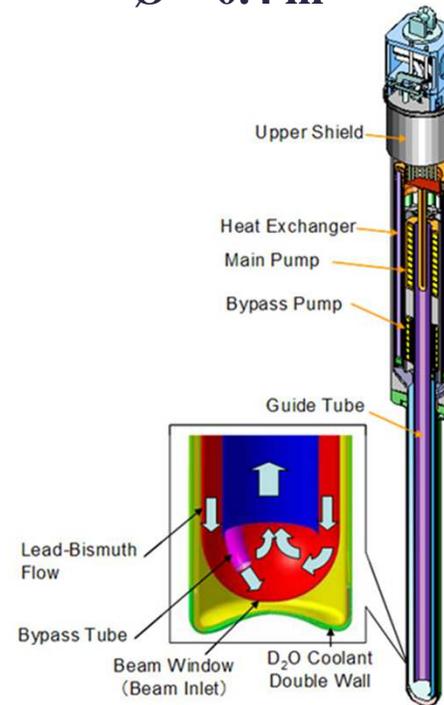
- ❑ Corrosion, érosion et fragilisation par métal liquide

## Expérience préalable avec le projet MEGAPIE

- ❑ Cible 1MW-LBE a fonctionné avec succès pendant 4 mois

MEGAPIE  
Ø ~ 0.4 m

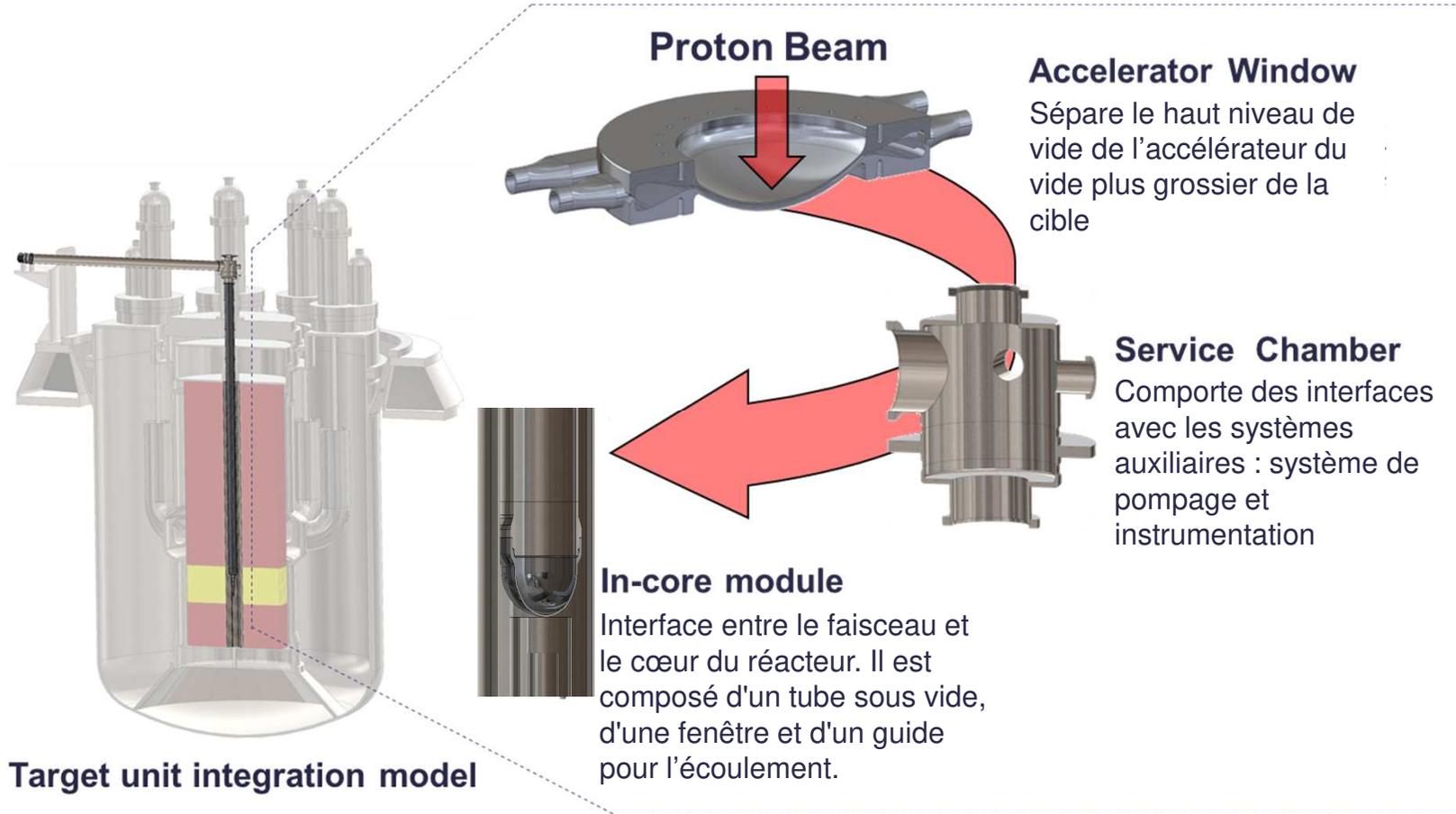
ESS  
Ø ~ 2.5 m



**Les métaux liquides lourds sont les caloporteurs de référence pour les cibles Multi-MW des ADS.**

# Vue d'Ensemble de la Cible

ACCELERATOR	
Type	Cyclotron
Energy	0.8 GeV
Current	5 mA
Power	4 MW
Oper. mode	CW
SPALLATION TARGET	
Material	Pb
Type	Loopless
Configuration	Window
SUB-CRITICAL REACTOR	
Power	600 MW <sub>th</sub>
k <sub>eff</sub>	0.98
Coolant	Pb



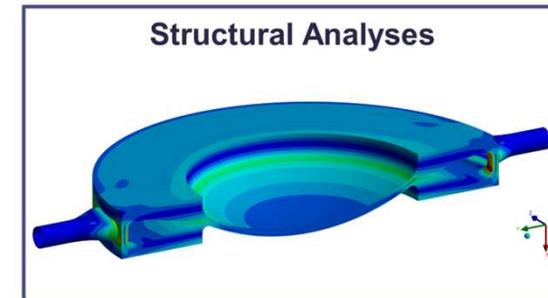
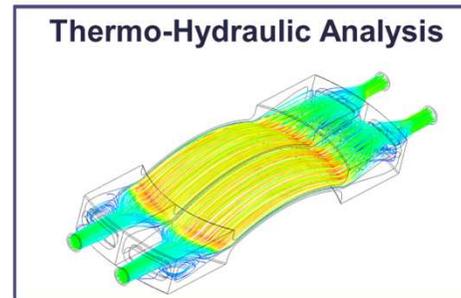
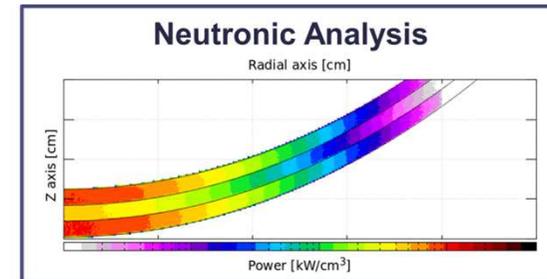
# État de la Conception de la Cible

## □ Définition du concept

- Études physiques, thermo-hydrauliques et thermomécaniques achevées
- Développement de l'intégration des systèmes et des interfaces avec le réacteur
- Développement des scénarios incidentels

## □ Démarrage de la phase d'ingénierie

- Planification d'expériences pour soutenir la conception technique
  - Caractérisation des matériaux dans des conditions d'irradiation
  - Essais de matériaux et de composants dans un environnement Plomb



# Le Transmuteur

Le projet START

# Pourquoi un Caloporteur Plomb?

## Avantages

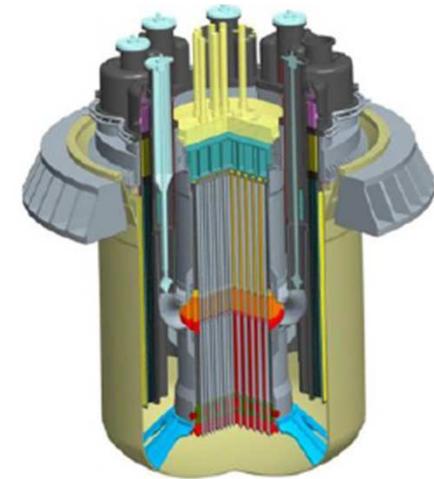
- Fonctionnement à la pression atmosphérique
- Transparent aux neutrons
- Capacité thermique élevée
- Point d'ébullition à 1750 °C
- Chimiquement inerte
- Taux de transmutation TRU le plus élevé (spectre le plus dur)

## Désavantages

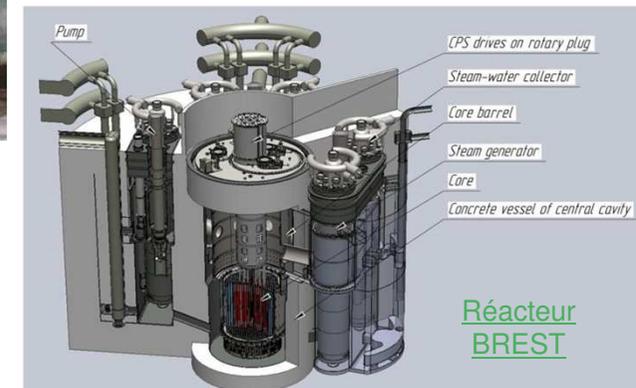
- Compatibilité des matériaux déterminée par les réacteurs refroidis au sodium
- Point de solidification à 327 °C
- Opacité



Réacteur des sous-marins classe Alfa



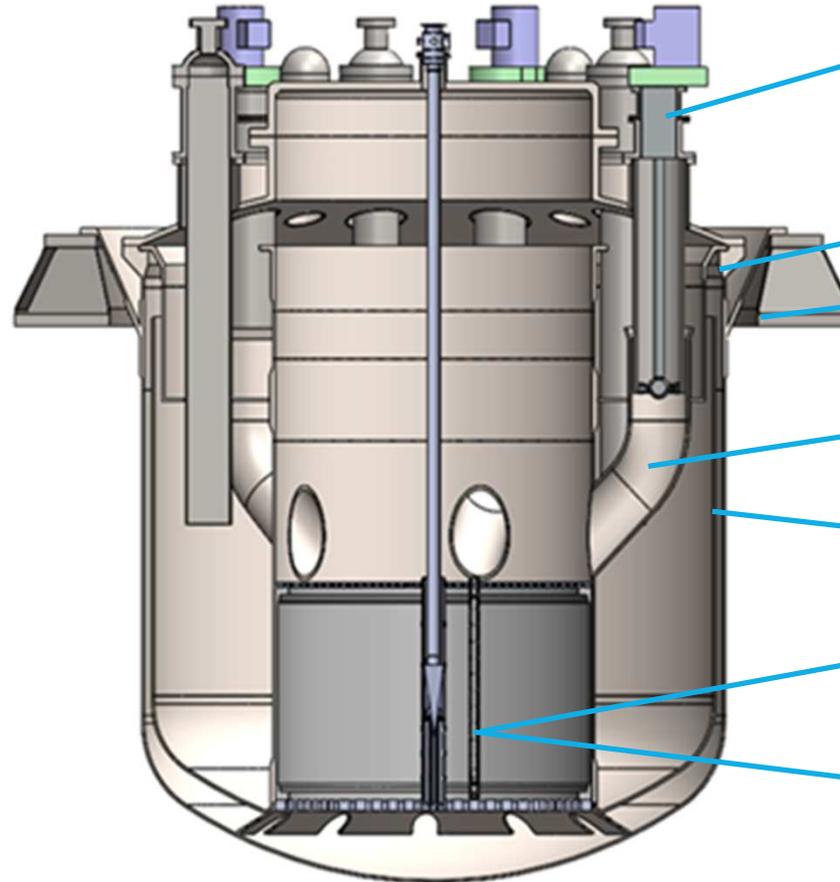
Réacteur ALFRED



Réacteur BREST

# Vue d'Ensemble du Transmuteur

ACCELERATOR	
Type	Cyclotron
Energy	0.8 GeV
Current	5 mA
Power	4 MW
Oper. mode	CW
SPALLATION TARGET	
Material	Pb
Type	Loopless
Configuration	Window
SUB-CRITICAL REACTOR	
Power	600 MW <sub>th</sub>
k <sub>eff</sub>	< 0.98
Coolant	Pb



Extraction de 600 MW<sub>th</sub> avec 2 systèmes redondants pour l'évacuation passive de la chaleur de désintégration

Primaire "pool-type"  
Enceinte additionnelle pour une sûreté renforcée

Circulation naturelle et refroidissement passif en cas d'arrêt de l'exploitation

Pas de stratification thermique

Combustible Thorium : transmutation de 30 kg<sub>TRU</sub> / TWh

Combustible Métallique: pas de modération des neutrons, haute conductivité thermique, haut point de fusion

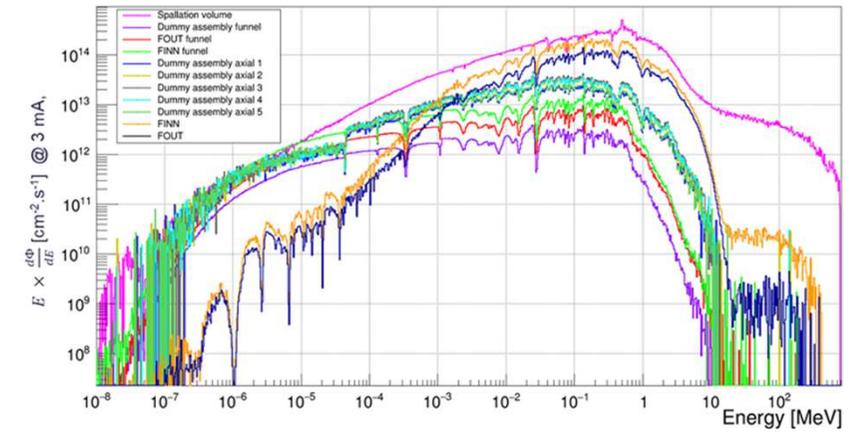
# État de la Conception du Transmuteur

## □ Définition du concept

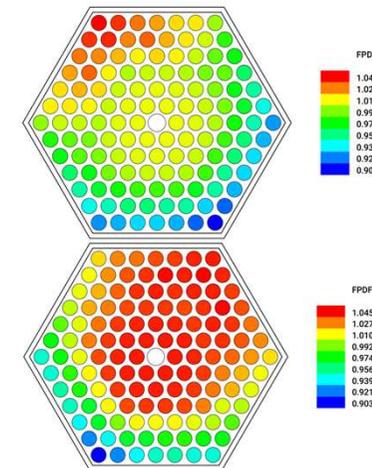
- Conceptualisation des principaux composants, de l'intégration du système et des interfaces
- Finalisation des études neutroniques (conception du cœur), thermo-hydrauliques et thermomécaniques
- Développement des scénarios incidentels et accidentels

## □ Démarrage de la phase d'ingénierie

- Planification d'expériences pour soutenir la conception technique
  - Caractérisation des matériaux dans des conditions d'irradiation
  - Essais de matériaux et de composants dans un environnement Pb



*Exemple de spectre neutronique dans le cœur sous-critique*



*Distribution de puissance par crayon dans les assemblages de combustible START*

# Retraitement du combustible

Le projet START

# Pourquoi le Pyroprocessing?

## Avantages

- Moins proliférant
- Pas de problèmes de criticité (lots)
- Pas d'effluents radioactifs (recyclage du sel)
- Production d'une forme métallique
- Rendement d'extraction élevé (>99,9 %)

## Désavantages

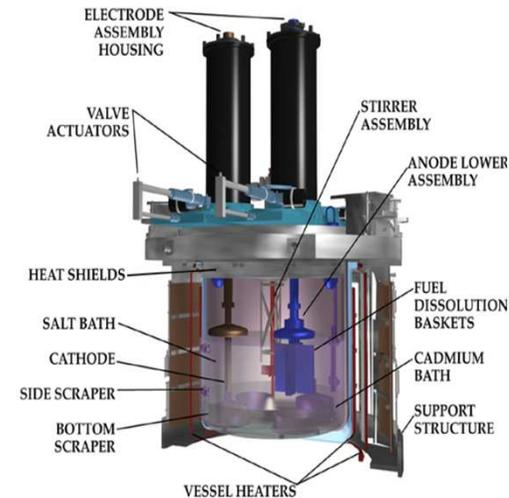
- Maturité plus faible à l'échelle industrielle

## Prior experience at Argonne West

- Retraitement du combustible usé à l'uranium métallique du réacteur EBR-II



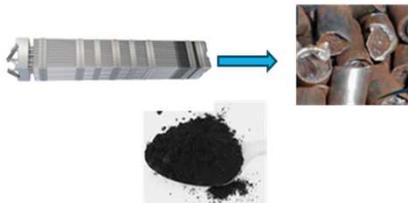
Uranium collecté lors d'essais du pyroprocessing.



Electro-raffineur Mark-IV de l'installation de conditionnement de combustible de l'INL ([lien](#)).



# Vue d'Ensemble du Procédé de Retraitement

START Fuel		Process Step	Process	Material Separated
Max U+TRU	30%	<b>1. Disassembling / Cutting</b>  <b>Decladding</b>		He, Kr, Iodine, C-14, Tritium, ...
Density	~9.7 g.cm <sup>-3</sup>			Cladding and structural elements as middle active waste
Pins per FA	126	<b>2. Voloxidation</b> High temperature, oxidizing		Cs, Tc, Se, I, Ru, Rh
Pellet per FA	70			
FA mass	75 kg <sub>HM</sub>	<b>3. Electro-Reduction</b> 650°C, LiCl/Li <sub>2</sub> O molten salt mixture		Sr
peak BU	100 MWd/ton			
Total height	4 m	<b>4. Electro-Refining</b> 500°C, LiCl / KCl eutectic molten salt		Reprocessed Uranium or Thorium
Width	16.3 cm			
Reprocessing		<b>5. Electro-Winning</b> 450°C, liquid Cadmium and molten salt		Some Uranium, Pu, Am, Np, ...
Max. batches	6			
Total capacity	~100 tons/y	<b>6. Vitrification</b> 650°C, borosilicate glass		Remaining Fission Products as high active glass mold
Operation	remote			
Efficiency	99.9%			



**TRANSMUTEX**

**Merci de votre attention**