

Le Thorium Molten Salt Reactor (TMSR) sans modérateur en cœur

- Régénérateur en cycle Thorium
- Incinérateur de transuraniens

D. Heuer, L. Mathieu, E. Merle-Lucotte,
M. Allibert, V. Ghetta, C. Le Brun

*Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble
(CNRS-IN2P3/ INPG-ENSPG/UJF)*

Avec le soutien de PACEN (Programme sur l'Aval du Cycle Electro-Nucléaire du CNRS)
En collaboration avec EdF

Historique des Réacteurs à Sels Fondus

Oak-Ridge National Laboratory (ORNL) au Tennessee

- L'Aircraft Reactor Experiment (ARE)
 - Il s'agissait de concevoir un réacteur embarqué dans un avion !
 - Il a fonctionné une centaine d'heures à 2,5 MWth en 1954
- Le Molten Salt Reactor Experiment (MSRE)
 - Démonstrateur de RSF
 - Il a fonctionné 5 ans à 8 MWth
 - De 1965 à 1968 à l'Uranium enrichi à 30%
 - De 1968 à 1969 au Plutonium
 - En 1969 à l'Uranium 233
- Le Molten Salt Breeder Reactor (MSBR)
 - Projet de réacteur industriel en cycle Thorium de 2500 MWth
 - Recherche d'une surgénération maximum
 - Arrêt du projet en 1976

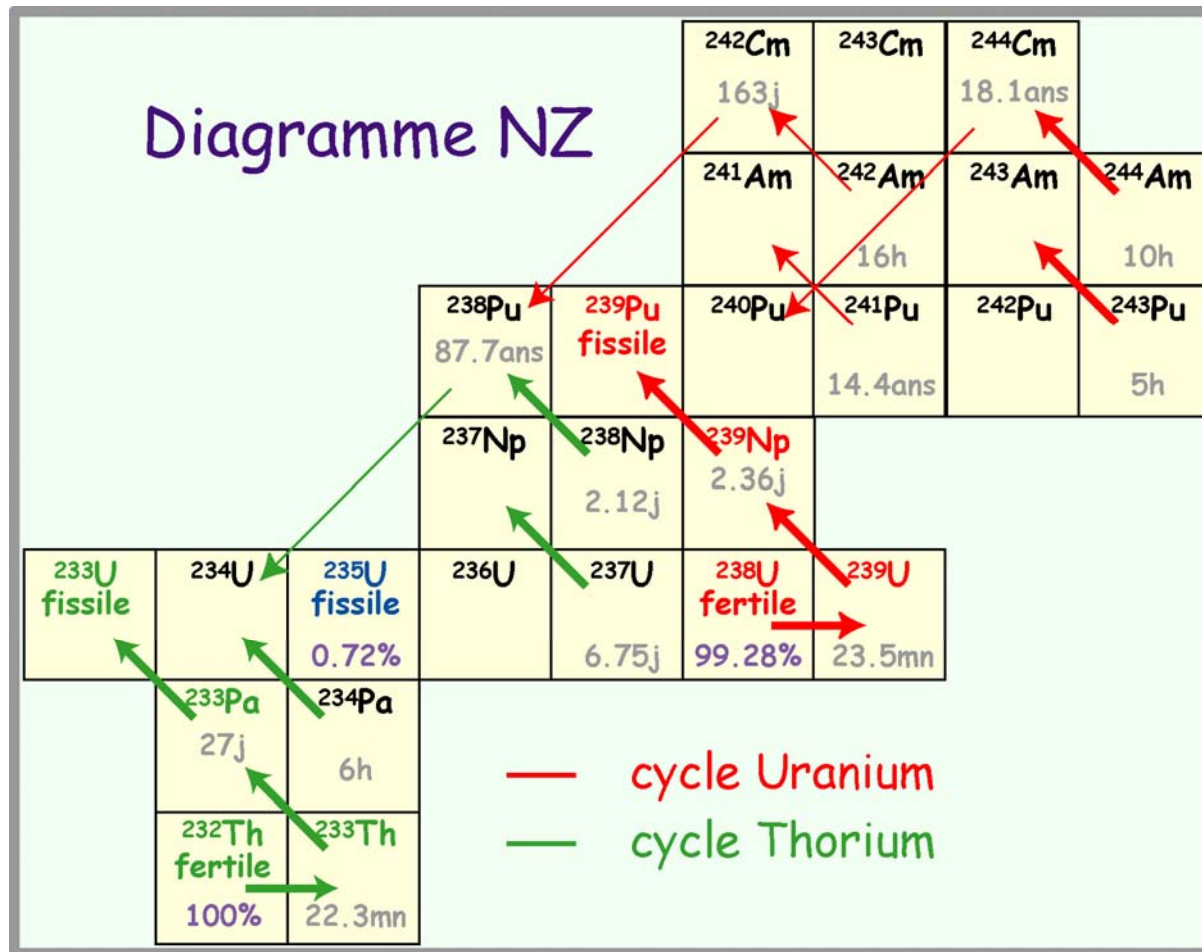
Renouveau des Réacteurs à Sels Fondus

- Thorims-NES5 puis FUJI-AMSB au Japon à partir des années 80
 - Réacteur de très faible puissance spécifique alimenté en ^{233}U produit dans des réacteurs sous-critiques.
- Reprise des études du MSBR par CEA et EDF à partir des années 90
- Projet TIER-1 de C. Bowman dans les années 90
 - Incinérateur de Plutonium en combustible liquide dans des réacteurs sous-critiques.
- Projet TASSE (CEA) dans les années 90
 - Incinérateur de Plutonium en combustible liquide dans des réacteurs sous-critiques.
- Projet AMSTER (EDF) dans les années 90
 - Incinérateur de Plutonium puis réacteur producteur d'énergie en cycle Thorium.
- REBUS (EDF), MOSART (Kurchakov Institute), SPHINX (République Tchèque), ...
- Réseau MOST 2001-2004
 - Réseau européen ayant fait le point sur les études, les expériences et l'état des connaissances concernant les réacteurs à sels fondus.

Le CNRS et les réacteurs à sels fondus

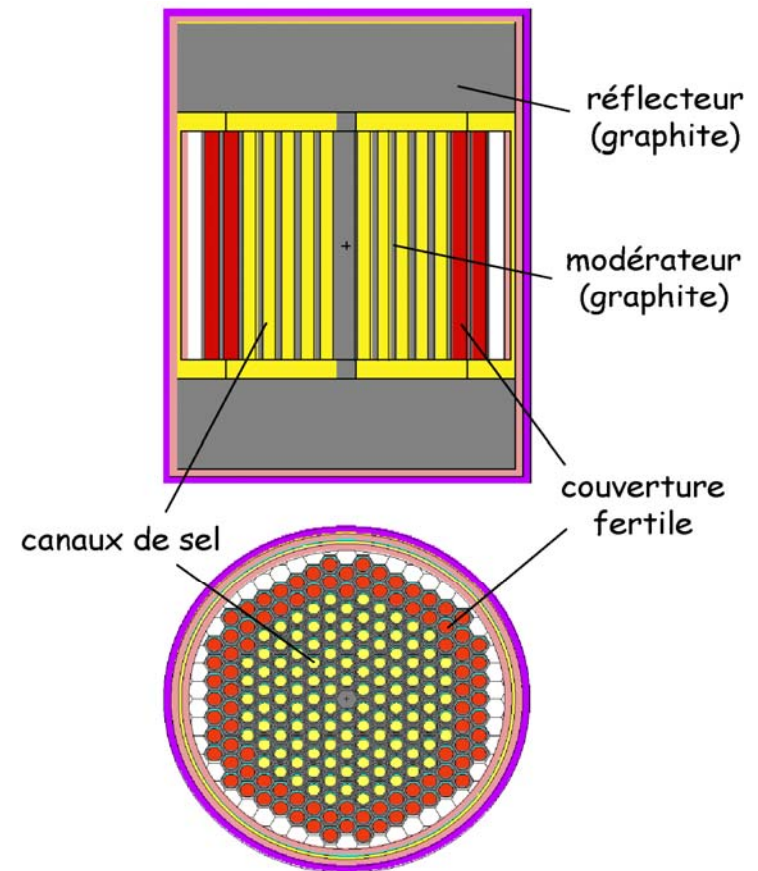
- Participation au projet TIER I de C. Bowman (1998)
- Réévaluation du MSBR de 1999 à 2002
 - Utilisation de codes « Monté Carlo » pour la neutronique (MCNP)
 - Couplage à un code d'évolution des matériaux (REM)
- Le TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) depuis 2002
 - Réacteur producteur d'énergie en cycle Thorium
 - Le but est de résoudre les problèmes inhérents au MSBR
 - Coefficient de température global nul, voire positif
 - Coefficient de vide positif
 - Retraitement peu réaliste
 - Présence de graphite en cœur
 - durée de vie limitée
 - difficultés de retraitement ou de stockage
 - risques d'incendie

Rappel sur les cycles Thorium et Uranium

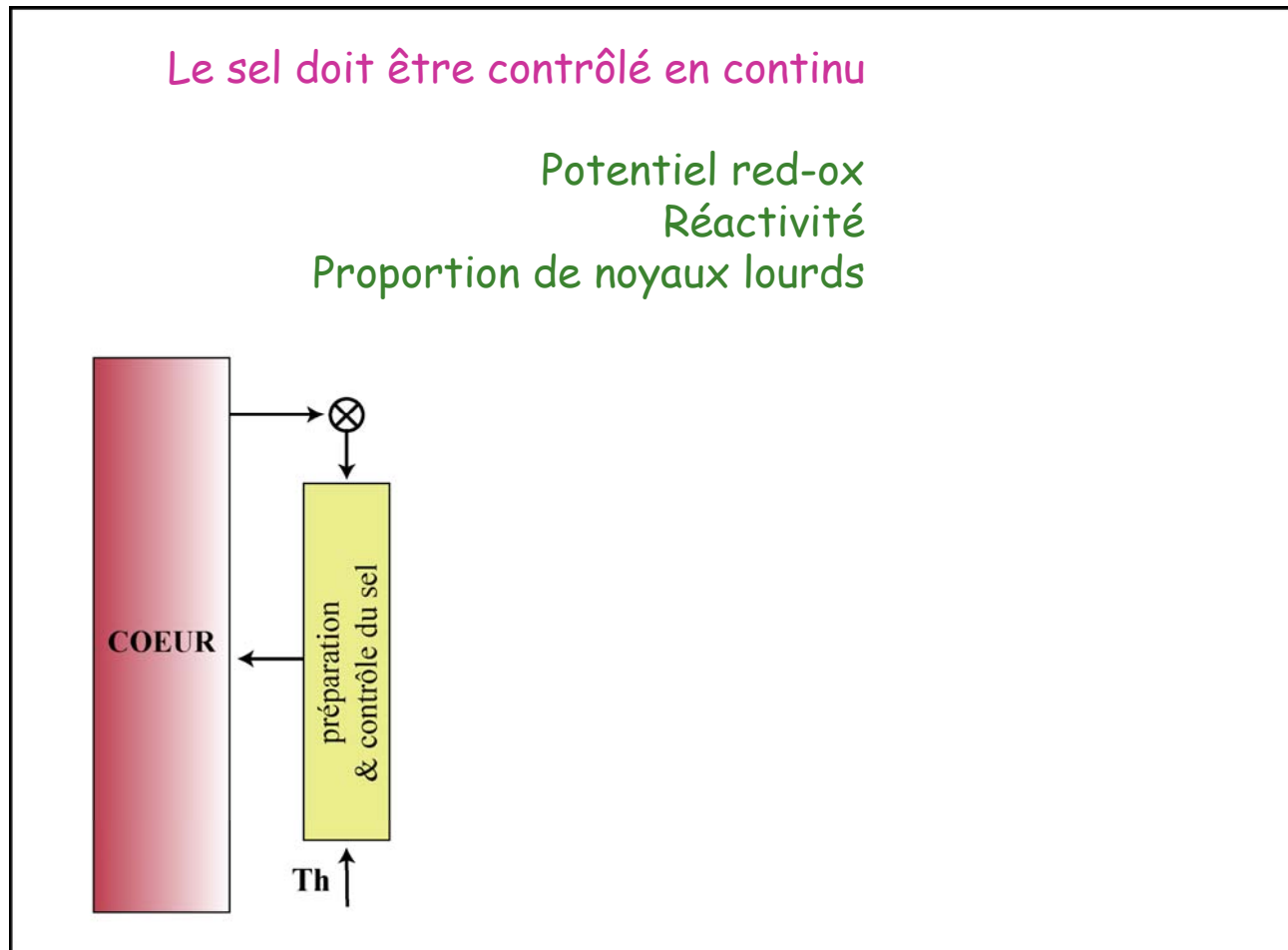


La géométrie du TMSR de référence (Thorium Molten Salt Reactor)

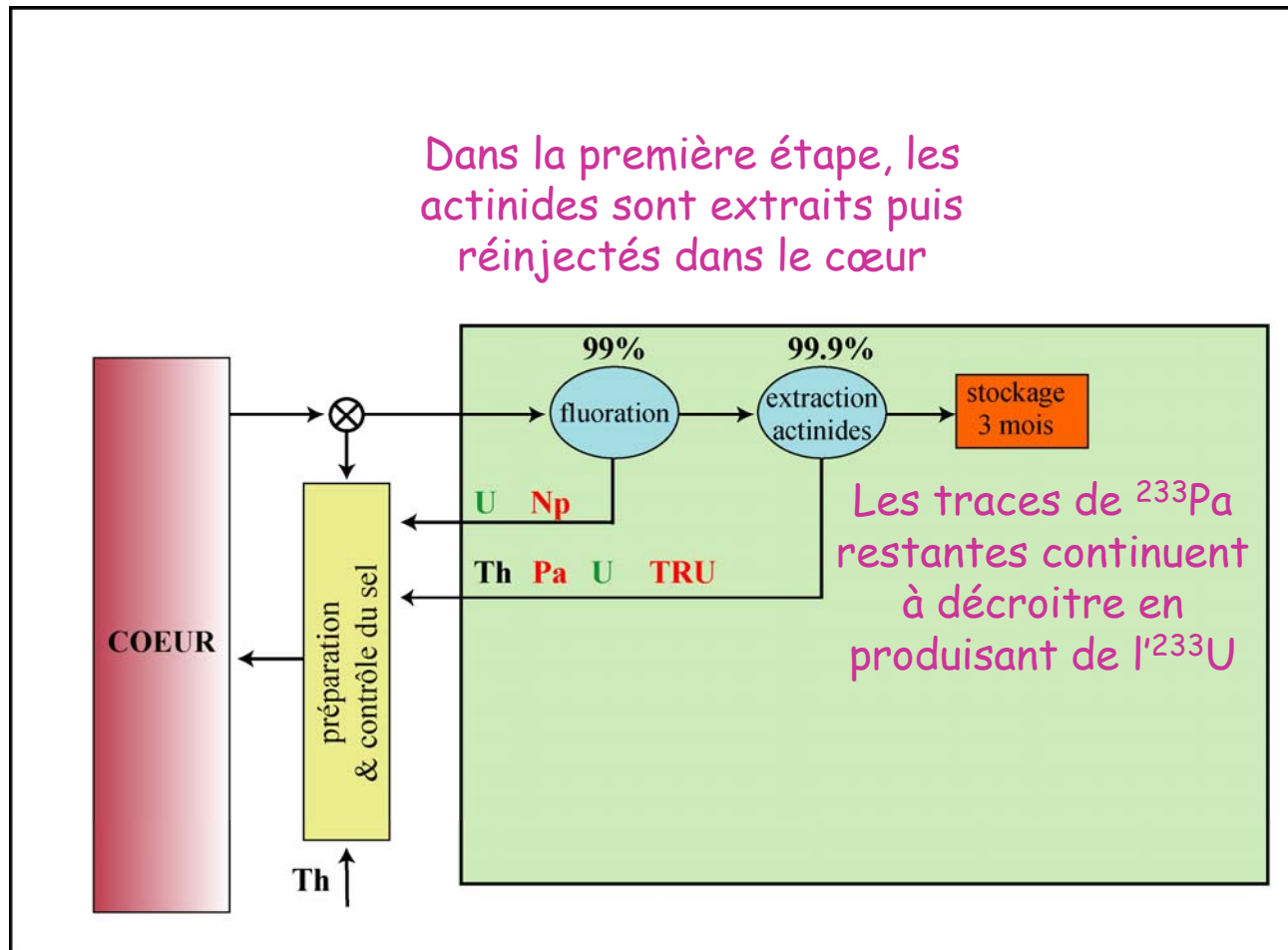
- Sel initial: 78%LiF, 21,1%ThF₄, 0,9%UF₄
Proportions molaires
- Température de fonctionnement: 630°C
- Inventaire initial d'²³³U: 1900 kg
- Volume de sel: 20 m³
- Puissance: 2,5 GW_{th} (1 GW_{él})
- Rayon intérieur du cœur: 1,6 m
- Hauteur du cœur: 3,3 m
- Côté des hexagones: 15 cm
- Rayon des canaux du cœur: 8,5 cm
- Rayon des canaux de la couverture: 10 cm



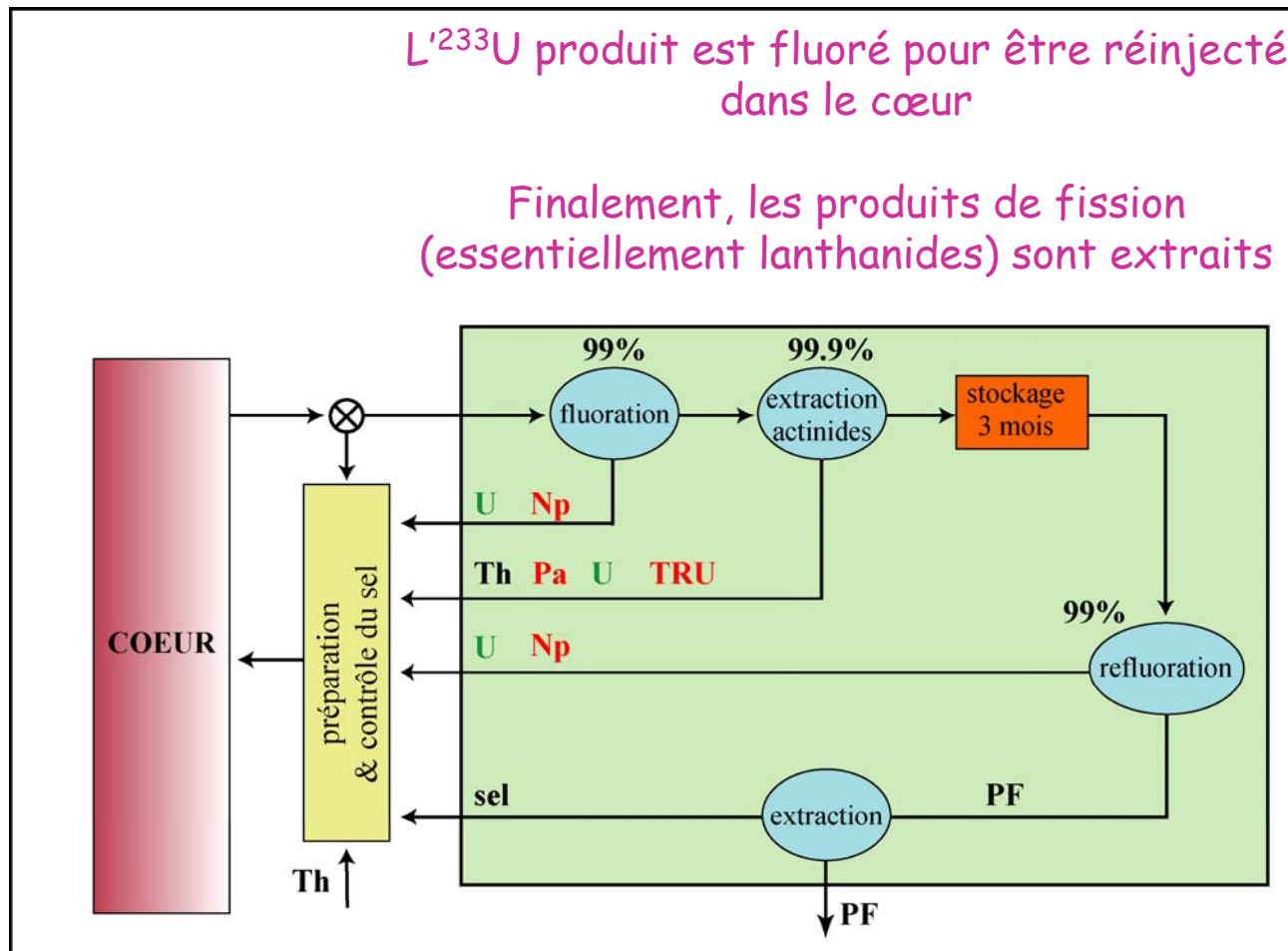
Le retraitement du TMSR de référence



Le retraitement du TMSR de référence

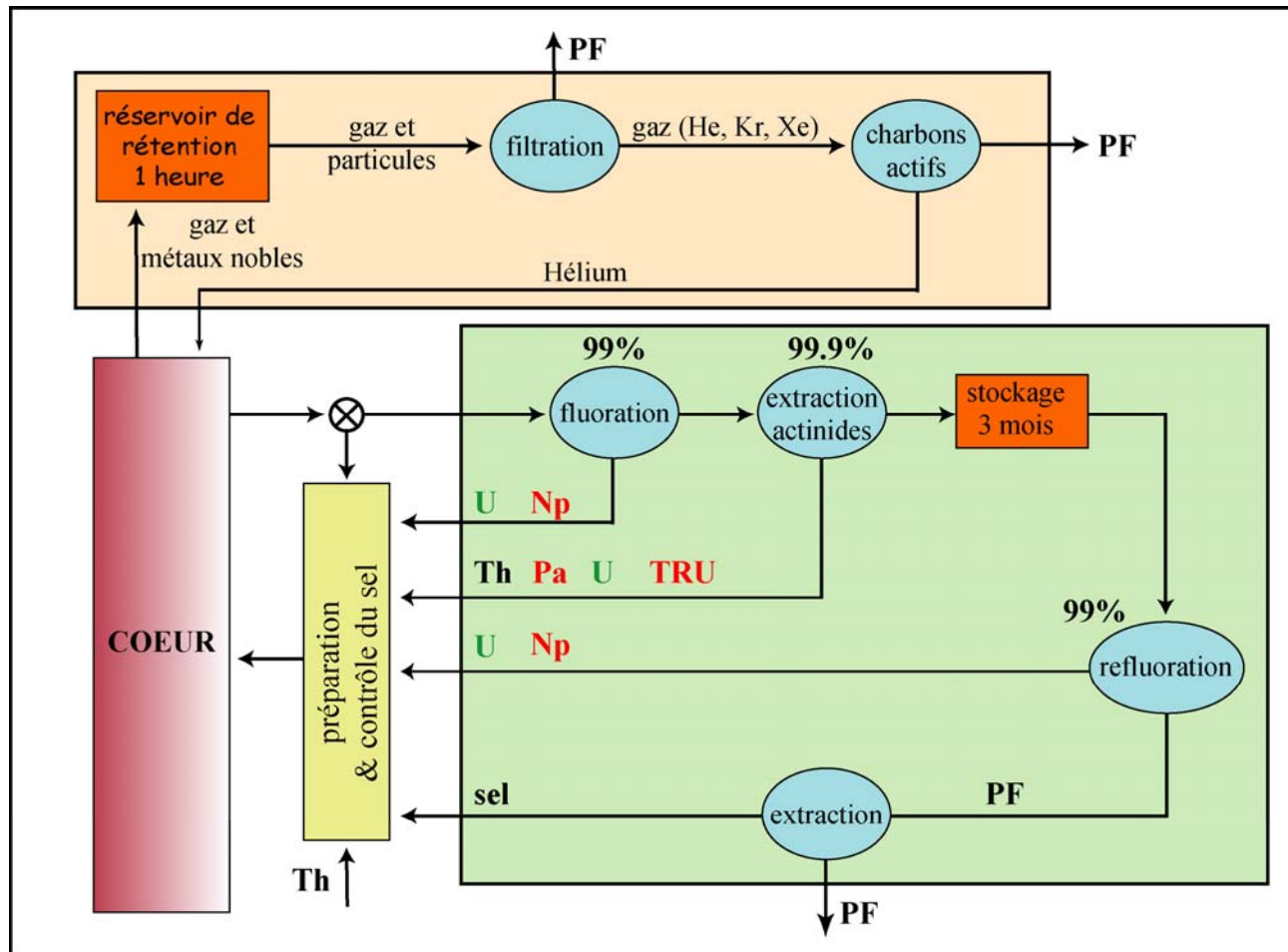


Le retraitement du TMSR de référence



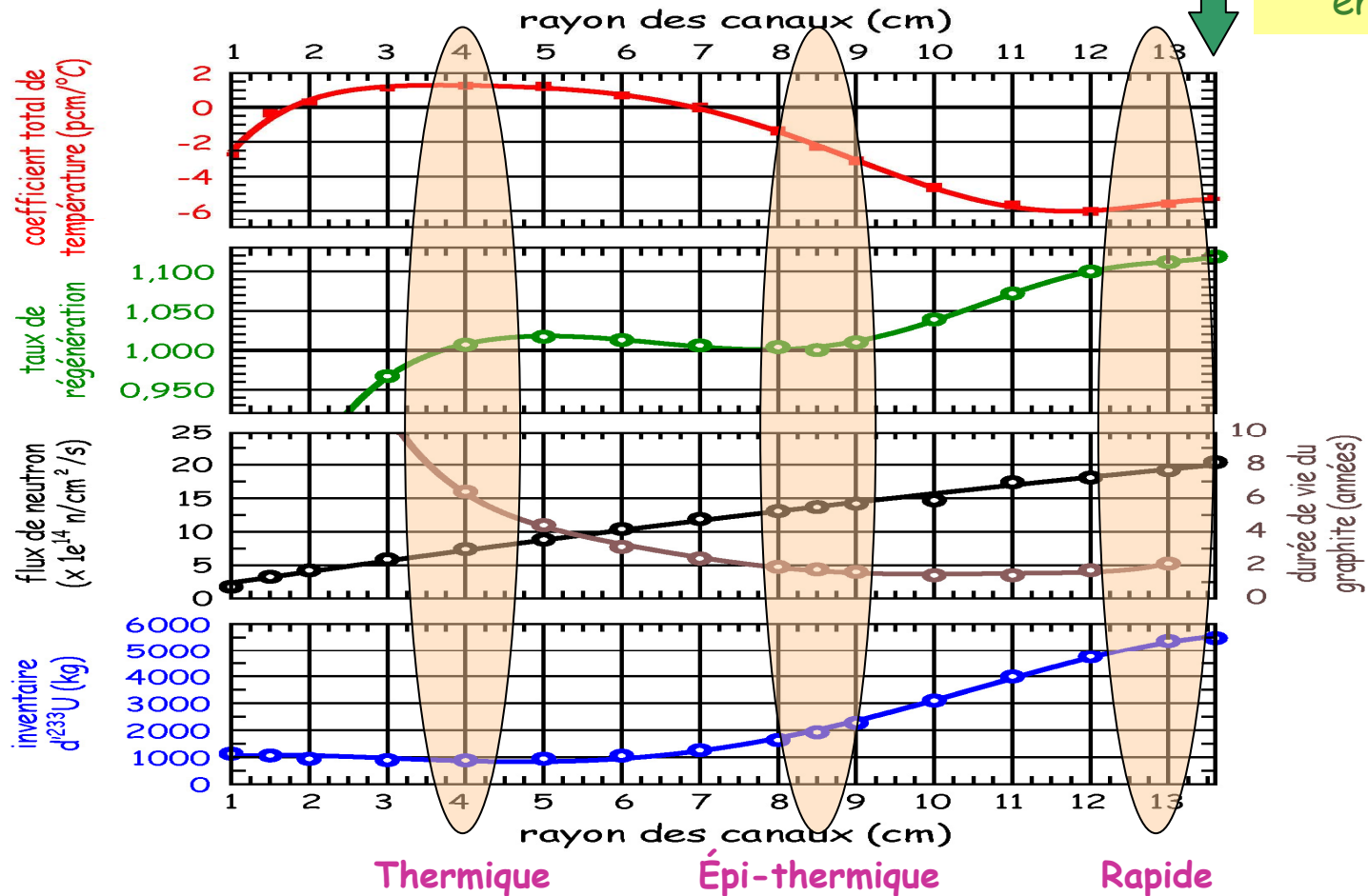
Le retraitement du TMSR de référence

Par ailleurs, un balayage par des bulles d'Hélium permet l'extraction des gaz et métaux nobles non solubles dans le sel

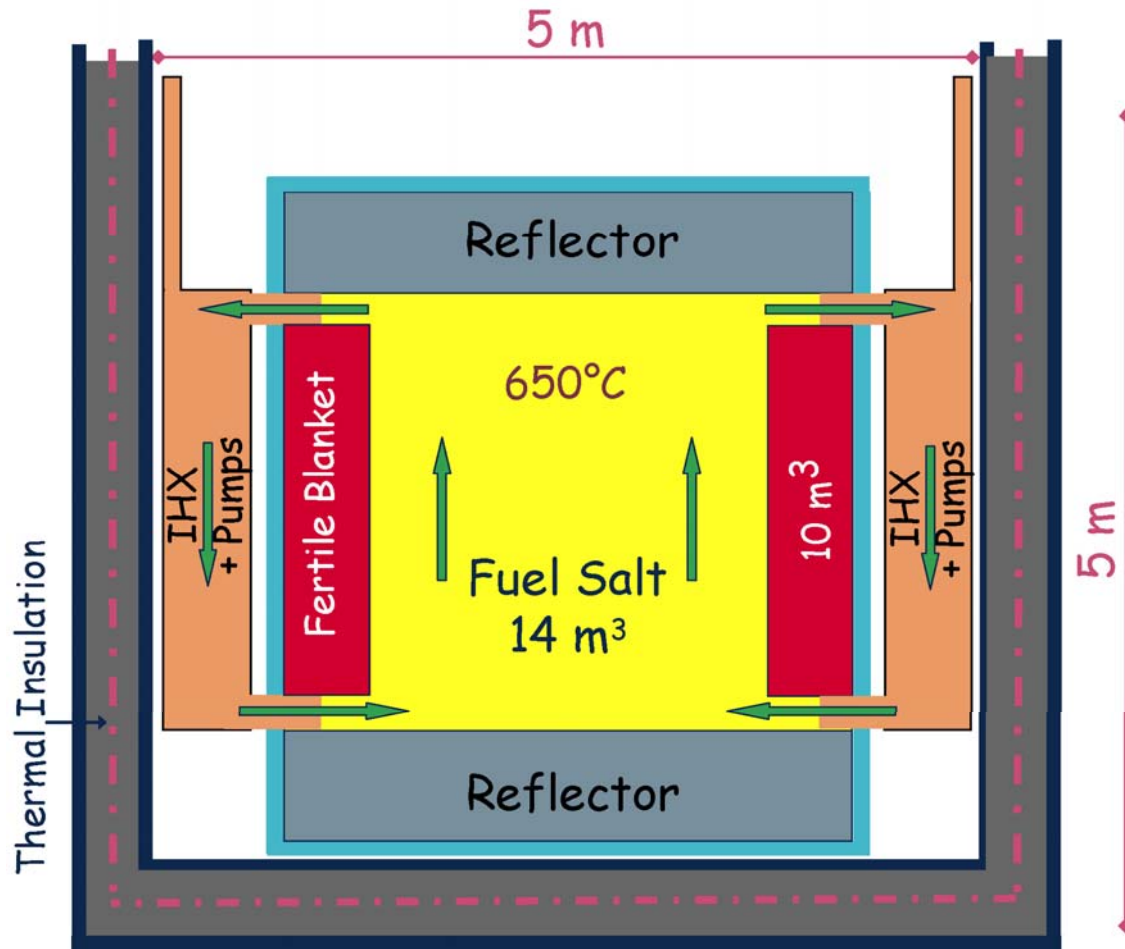


Etude en fonction du rapport de modération

TMSR sans
modérateur
en cœur



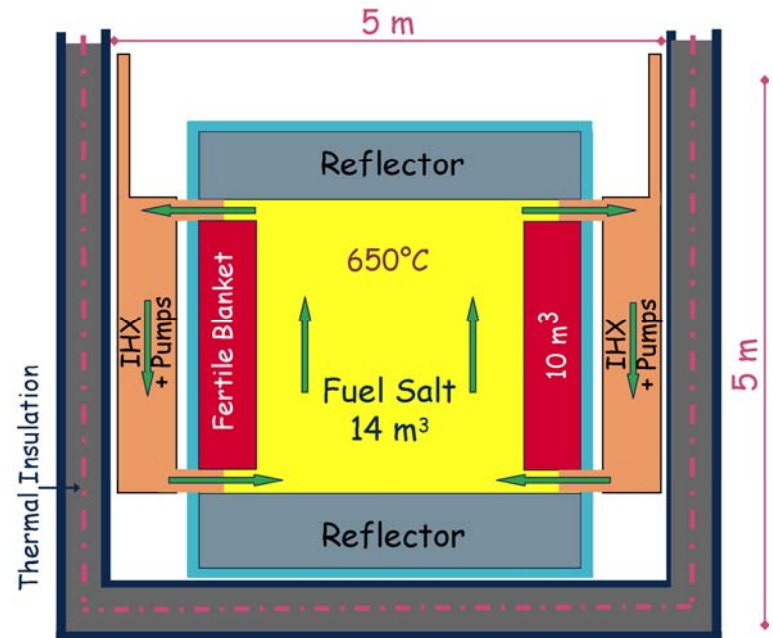
Le TMSR sans modérateur en coeur



Le TMSR sans modérateur en cœur

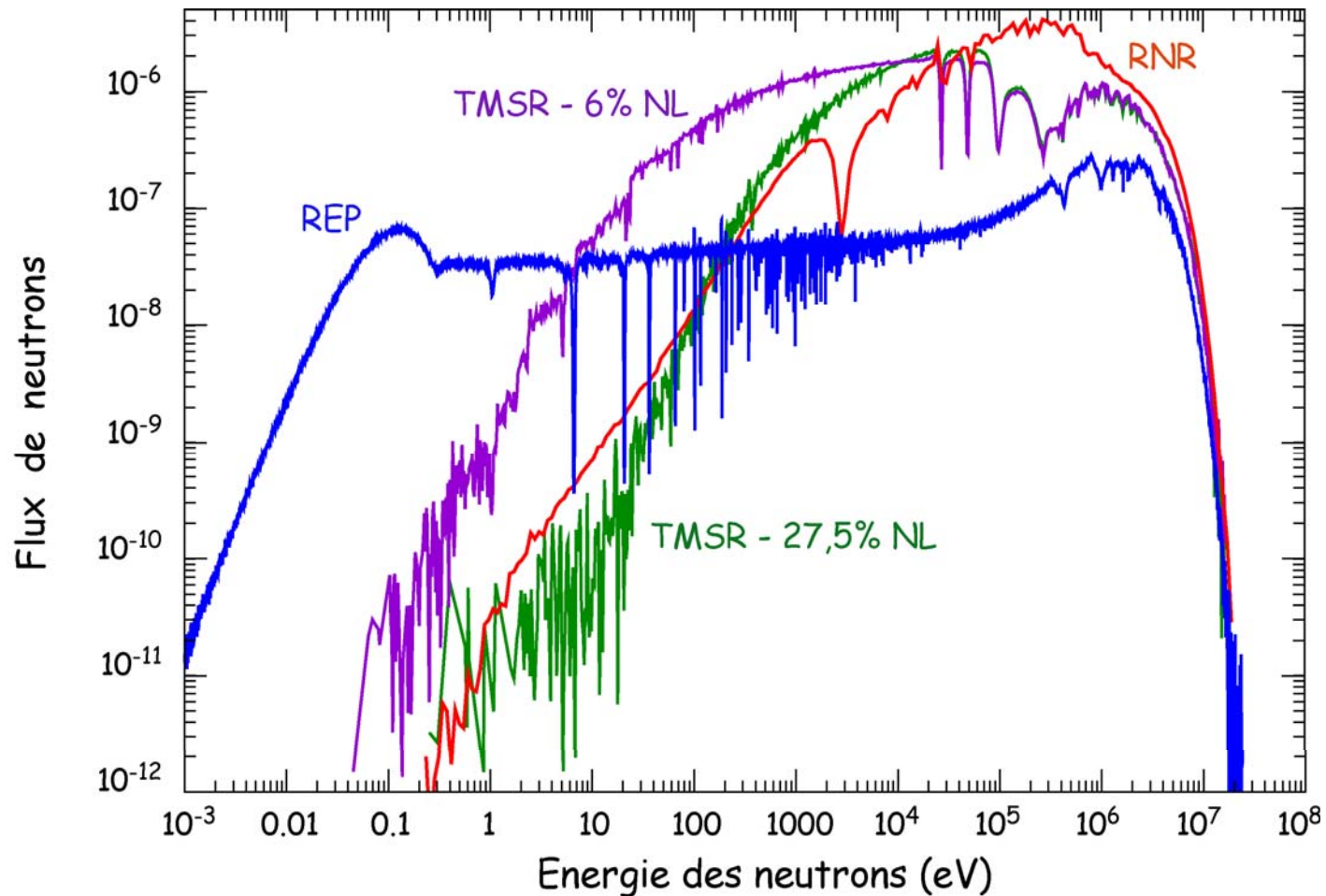
Variation de x (proportion molaire de noyaux lourds) = Variation du rapport de modération
 $x = [6\% - 27.5\%]$

- Combustible: $80\% \text{LiF}$, $x\%(\text{HN})\text{F}_4$, $(20-x)\% \text{BeF}_2$
[pour $x \geq 20\%$: $(100-x)\% \text{LiF}$, $x\%(\text{HN})\text{F}_4$]
- Inventaire initial ^{233}U : 2500 à 6500 kg
- Volume de sel combustible : 20 m^3
- Température de fonctionnement : 630°C
- Puissance : $2.5 \text{ GW}_{\text{th}}$ ($1 \text{ GW}_{\text{él}}$)
- Rayon interne du cœur : 1.25 m
- Hauteur du cœur : 2.6 m
- Sel de la couverture fertile : $72\% \text{LiF}$ - $28\% \text{ThF}_4$

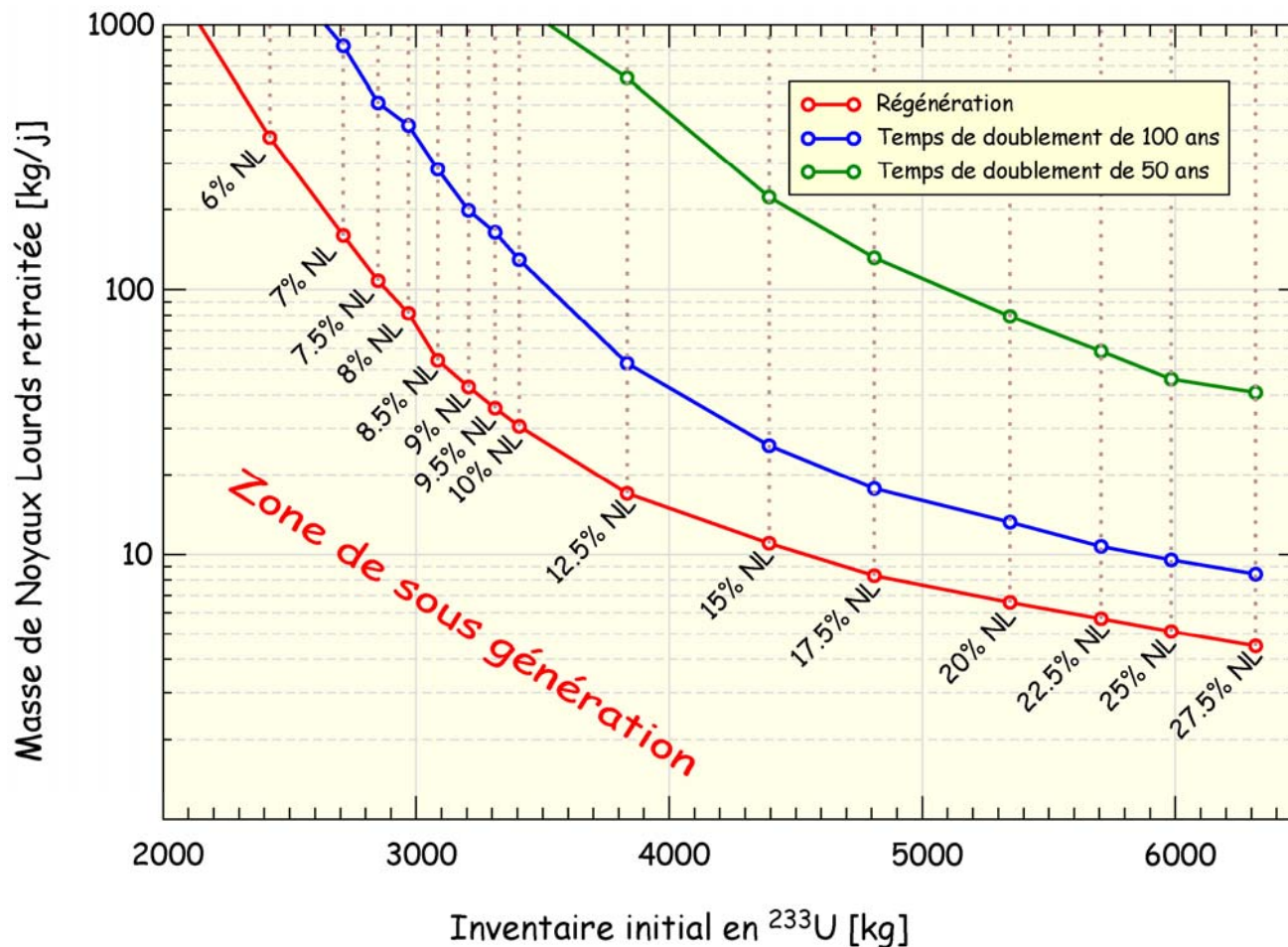


Paramètres : retraitement, matière fissile initiale (^{233}U , Pu), inventaire fissile, gestion des déchets, capacités de déploiement...

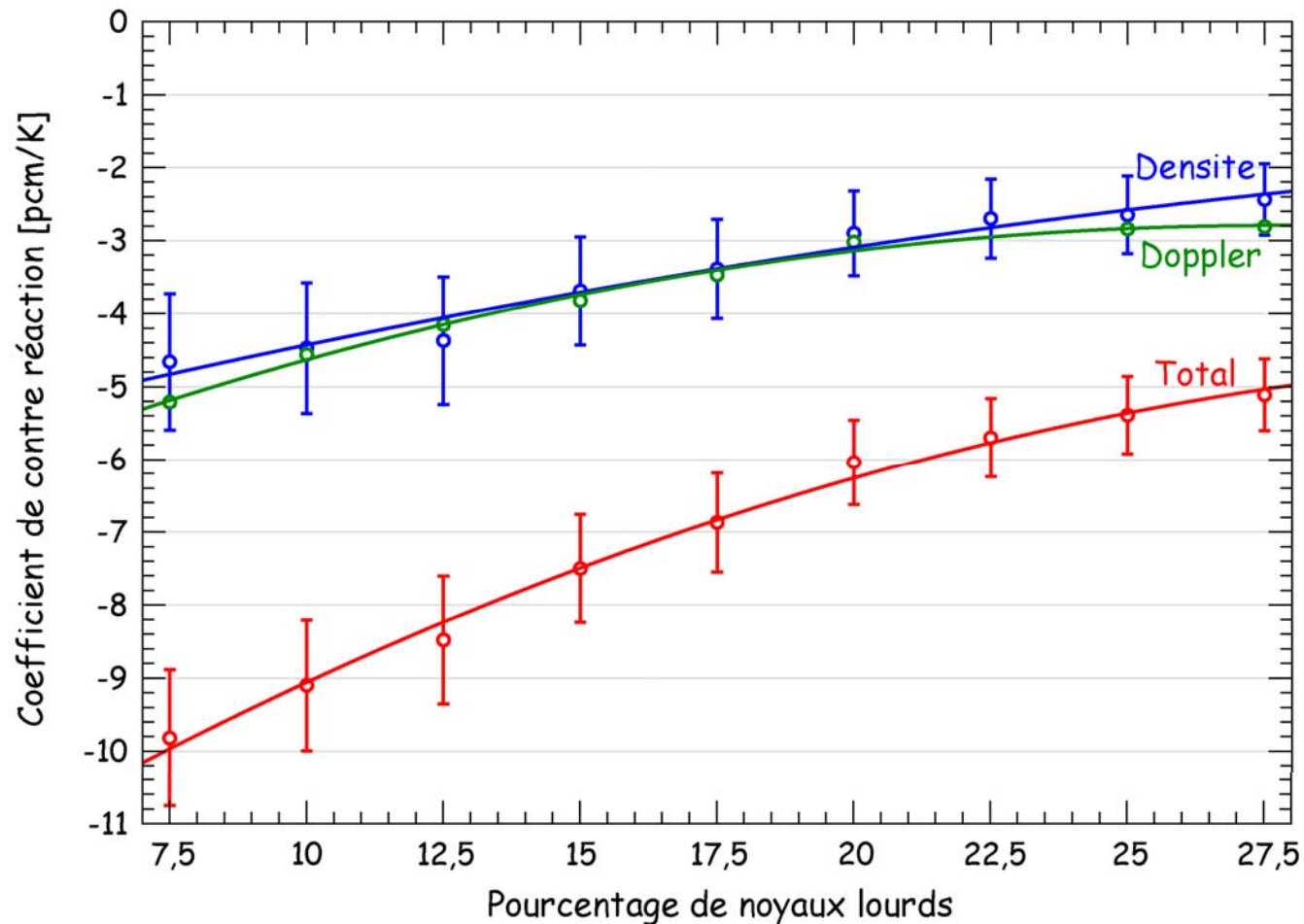
Le TMSR sans modérateur en cœur: Comparaison des spectres neutroniques accessibles



Etude en fonction de la proportion molaire de noyaux lourds dans le sel du cœur pour un TMSR sans modérateur en cœur



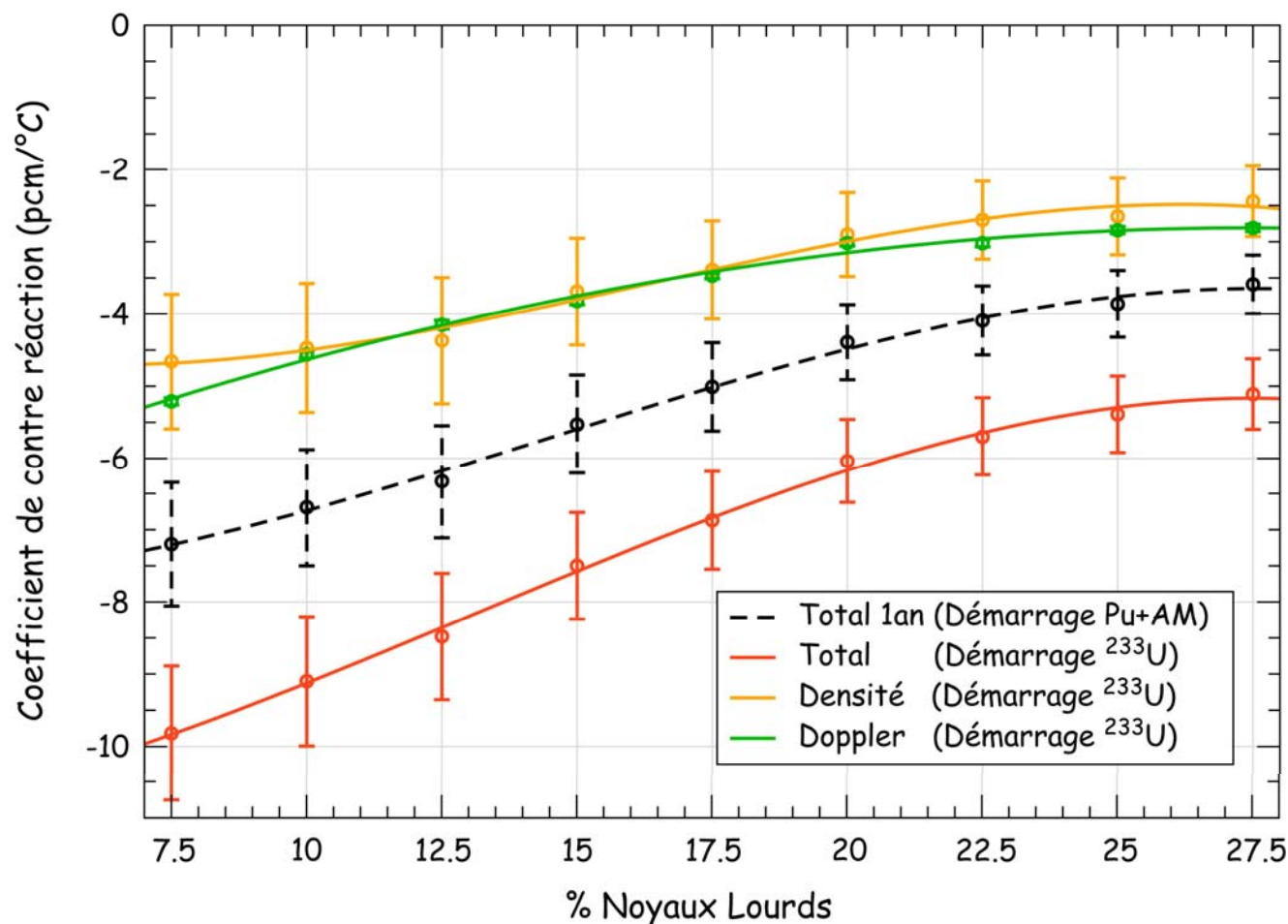
Le TMSR sans modérateur en cœur : Sûreté déterministe



Démarrage de la filière Th-²³³U avec les transuraniens issus des REP

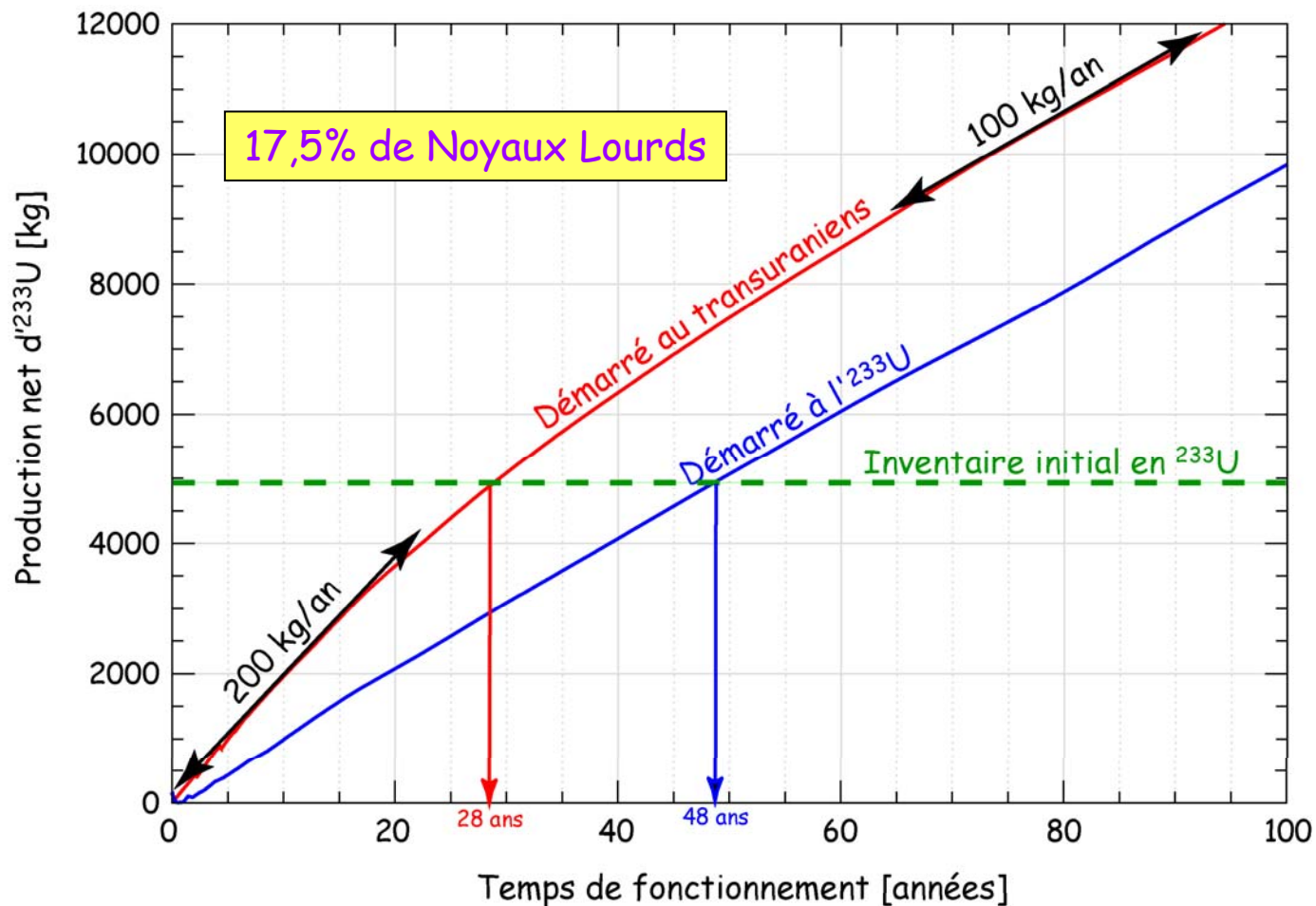
- Réacteurs identique au précédent mais démarrés en Pu-Np-Am-Cm (TRU)
 - Issu de REP avec un taux de combustion de 60 GWj/T
- Type TMSR
- Caractéristiques générales
 - Volume total 20 m³ dont 14 m³ en cœur
 - Température de fonctionnement 630 °C
 - Puissance 2,5 GWth (1 GWél)
 - Présence d'une couverture Thorium en FLi28 (28% molaire de Th)
 - Réacteur surgénérateur
 - Consomme 1 tonne de Thorium par an
 - Garde les propriétés de sûreté déterministe
 - Surgénère beaucoup plus les 20 premières années

Le TMSR sans modérateur démarré aux transuraniens des REP actuels Sûreté toujours déterministe



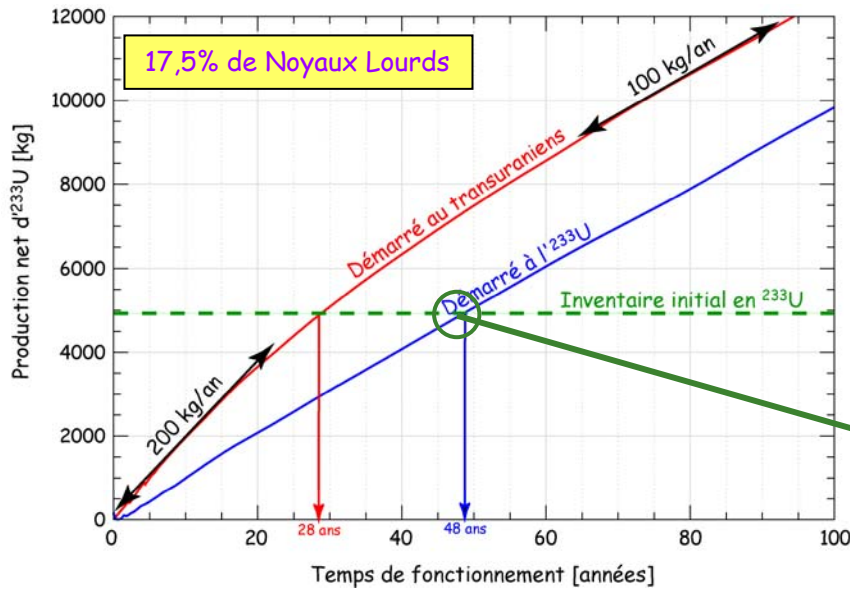
Le TMSR sans modérateur en cœur démarré aux transuraniens des REP actuels :

Production d' ^{233}U et déploiement

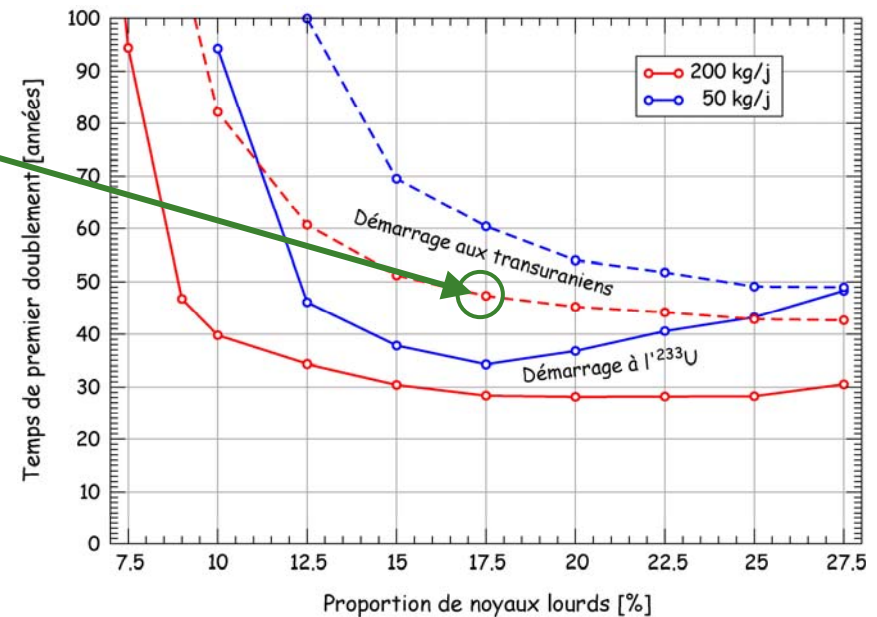


Le TMSR sans modérateur en cœur démarré aux transuraniens des REP actuels

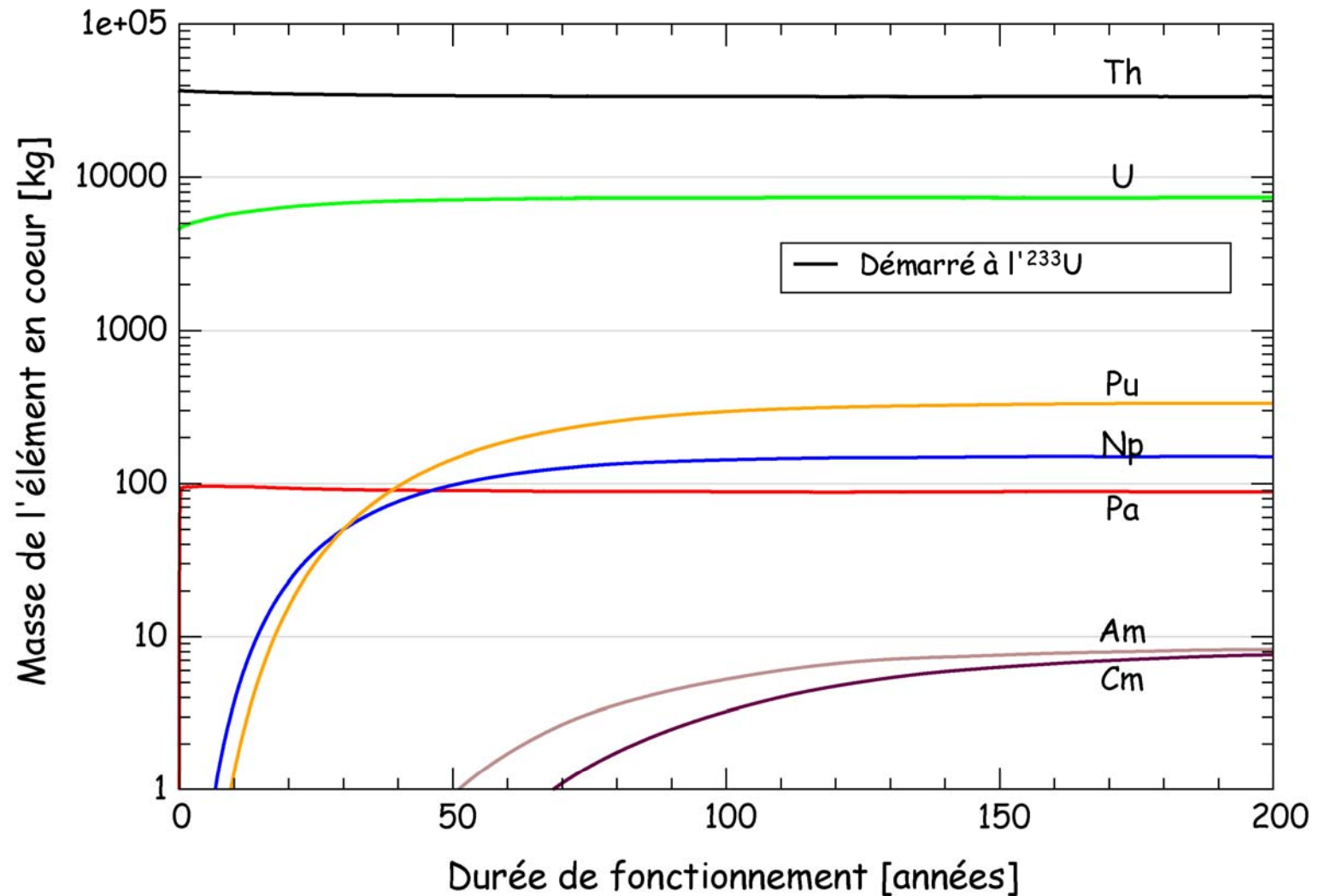
Production d' ^{233}U et déploiement



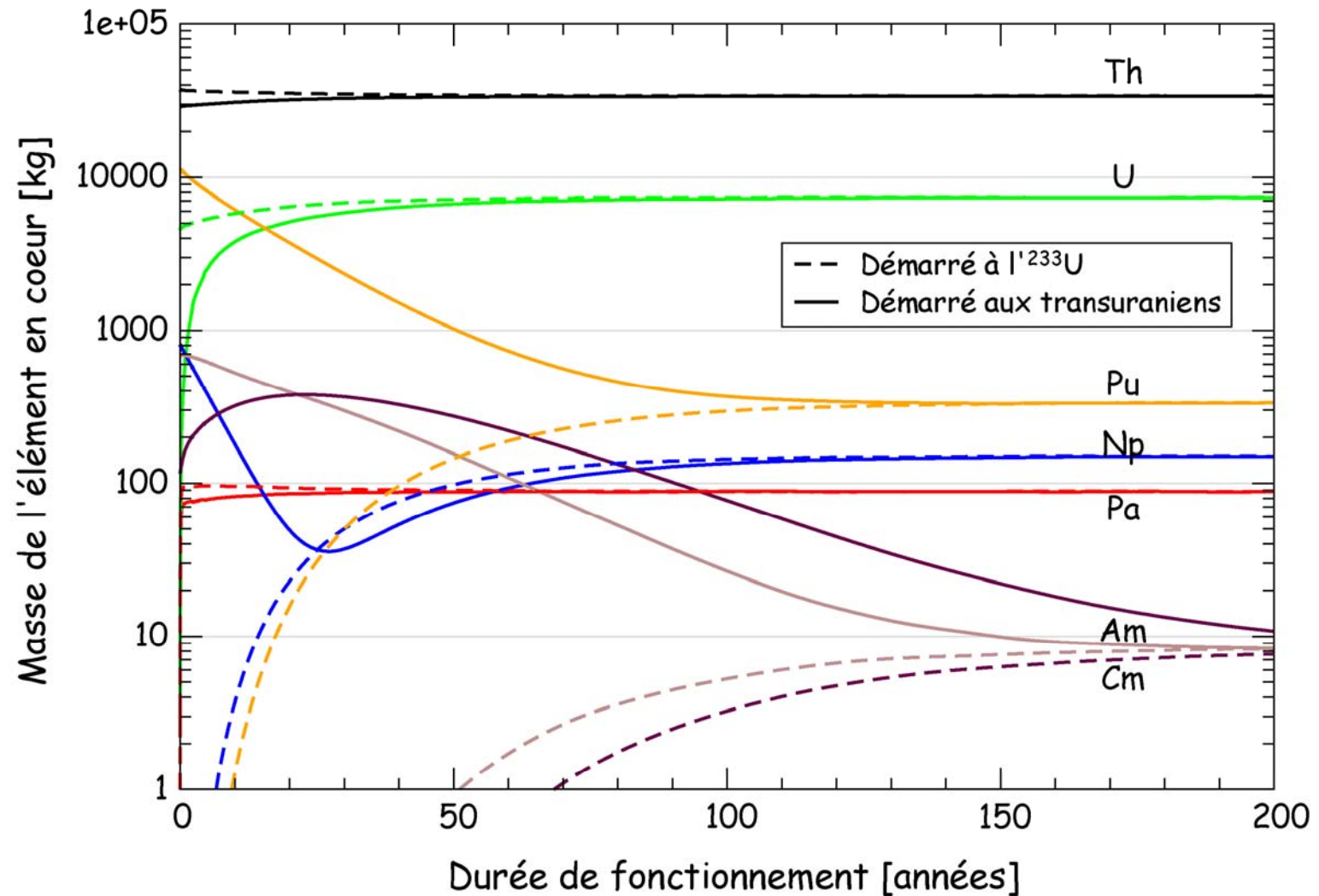
Temps de doublement du réacteur
=
Durée de fonctionnement nécessaire
pour produire un inventaire fissile initial



Le TMSR sans modérateur en cœur : Evolution des inventaires de noyaux lourds pour un démarrage à l' ^{233}U

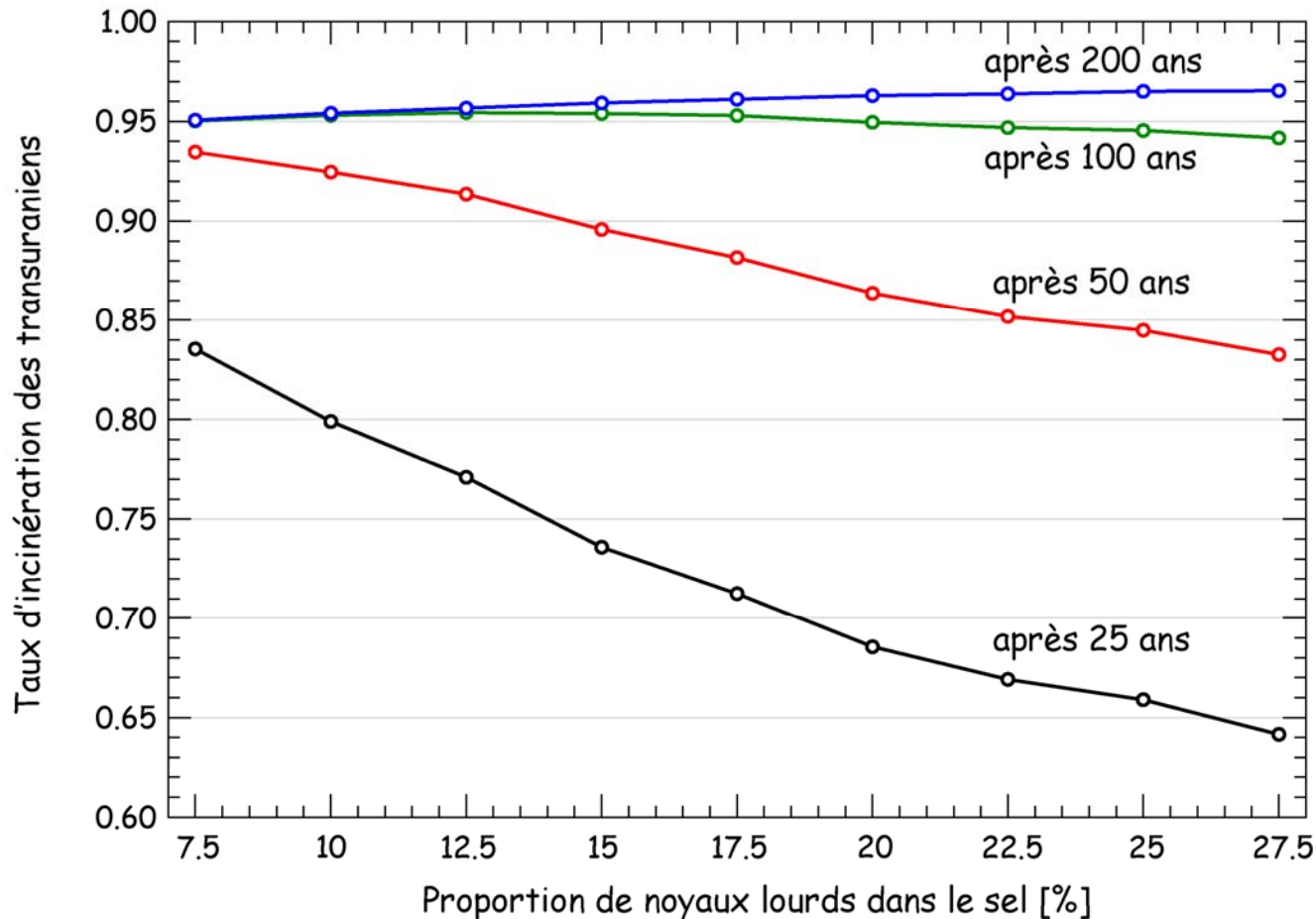


Le TMSR sans modérateur en cœur : Evolution des inventaires de noyaux lourds selon le type de démarrage



Le TMSR sans modérateur en cœur démarré aux transuraniens

Efficacité de l'incinération

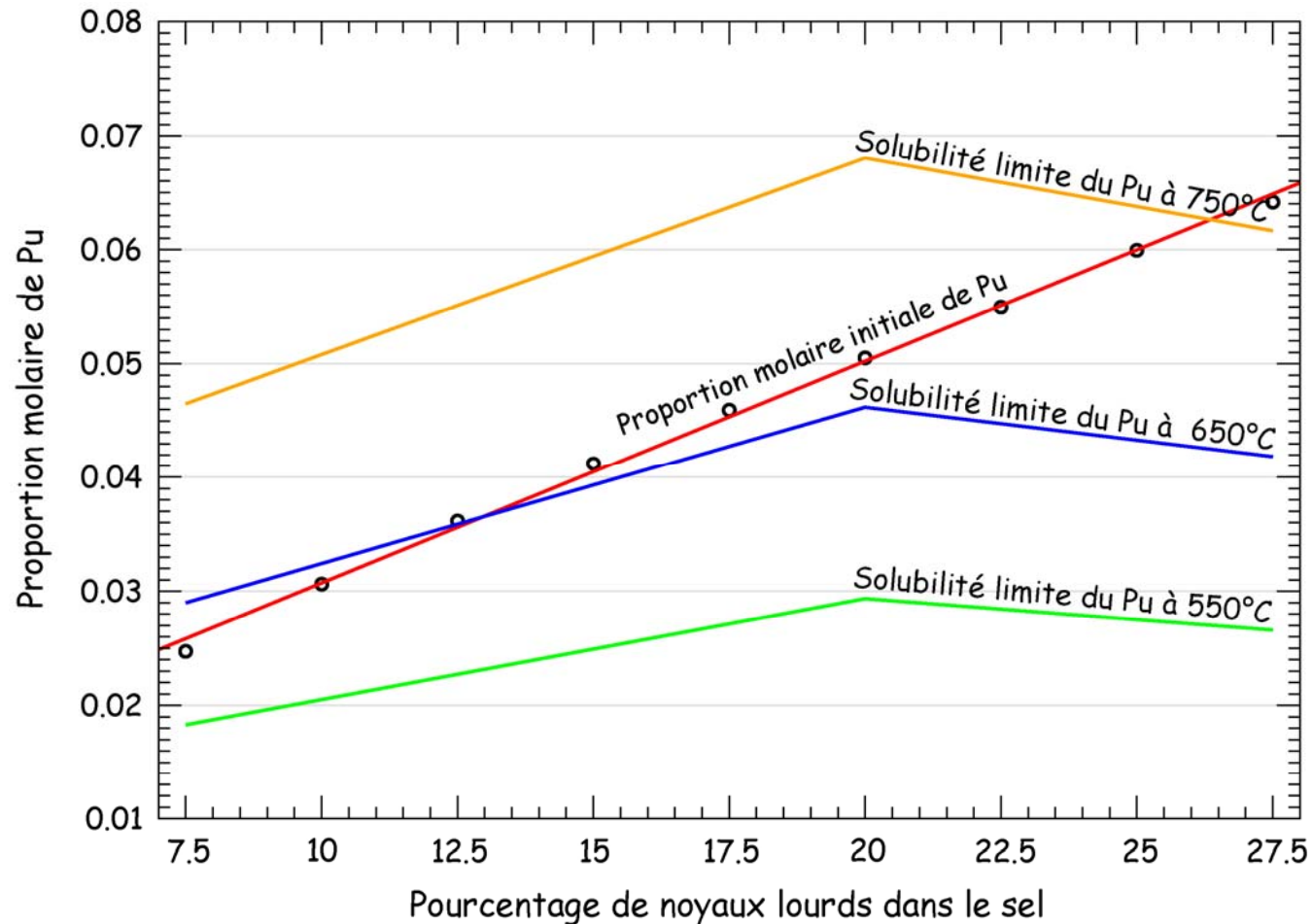


85%
d'incinération
obtenu
en 25 ans
(7.5% de NL)
à 55 ans
(27.5% de NL)



**Incinérateur
d'actinides
efficace**

Le TMSR sans modérateur en cœur: Solubilité du Plutonium



Bilan et perspectives...

- Les RSF offrent un vaste champs d'investigation
 - Choix du spectre neutronique
 - Choix du point de fonctionnement
 - Retraitement allégé ou performant selon les possibilités offertes par la pyrochimie
 - Déploiement plus ou moins rapide selon la proportion de noyaux lourds
 - Possibilité de fermer le cycle des REP
 - Possibilité de fonctionner à très haute température (1000 °C)
- Des recherches sont menées au CNRS sur plusieurs axes dans le cadre d'un PCR (Programme Commun de Recherche) concernant les départements de Physique, Chimie et Sciences de l'Ingénieur
 - Neutronique
 - Comportement du cœur
 - Devenir des radio-éléments selon le type de retraitement
 - Mesure et validation de sections efficaces
 - Chimie
 - Calculs ab initio des caractéristiques physico-chimiques des sels
 - Mesures expérimentales, microscopiques et macroscopiques, de ces caractéristiques
 - Modèles permettant d'accéder aux diagrammes de phases complexes du sel
 - Extraction pyrochimique des lanthanides
 - Evaluation de l'efficacité de l'extraction des métaux nobles et gaz rares
 - Sciences de l'ingénieur
 - Définition d'une boucle « sel fondu » en convection forcée
 - Valider le contrôle du sel et les appareillages associés

Avantages et inconvénients des RSF en cycle Thorium

■ Du point de vue de la sûreté

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> □ Pas de risque de fusion du cœur ni de compaction □ Pas de pression interne □ Coefficients de température et de vide fortement négatifs <ul style="list-style-type: none"> ■ Excellent niveau de sûreté déterministe □ Pas de réserve de réactivité <ul style="list-style-type: none"> ■ Excursion de criticité peu probable | <ul style="list-style-type: none"> □ Circulation du combustible dans les échangeurs □ Analyse de sûreté à repenser totalement □ Protocole de démarrage et d'arrêt à définir |
|--|--|

■ Du point de vue du fonctionnement

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> □ Contrôle continu du combustible <ul style="list-style-type: none"> ■ Pas d'arrêt pour rechargement □ Possibilité de vidange rapide du cœur (quelques minutes) <ul style="list-style-type: none"> ■ Mise en sûreté rapide du combustible □ Pas de refabrication du combustible <ul style="list-style-type: none"> ■ Simplification des opérations de retraitement | <ul style="list-style-type: none"> □ Possibilité d'évolution indésirable du combustible □ Limitation de la puissance thermique par le volume d'échange □ Une unité de retraitement par réacteur ou groupe de réacteurs |
|--|---|

■ Du point de vue des déchets

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> □ Auto incinération des transuraniens □ Sélectivité des produits de fission | <ul style="list-style-type: none"> □ Extraction délicate des lanthanides <ul style="list-style-type: none"> ■ Possibilité de rejet de Th et de ^{231}Pa |
|--|--|

■ Du point de vue de la prolifération

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> □ Traçabilité de l'Uranium grâce à l'^{232}U | <ul style="list-style-type: none"> □ Protection contre le γ de 2,7 MeV |
|--|---|

■ Du point de vue du parc

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> □ Possibilité de démarrer avec les TRU des REP <ul style="list-style-type: none"> ■ Fermeture du cycle des REP □ Inventaire en transuraniens limité <ul style="list-style-type: none"> ■ Possibilité d'incinération finale des actinides □ Possibilité de fonctionner à très haute température <ul style="list-style-type: none"> ■ 1000°C sans pression ni matériaux de structure sous haut flux | <ul style="list-style-type: none"> □ Stockage et transport de l'Uranium pour le démarrage de nouveaux réacteurs |
|---|--|