



Les études de scénarios prospectifs d'EDF

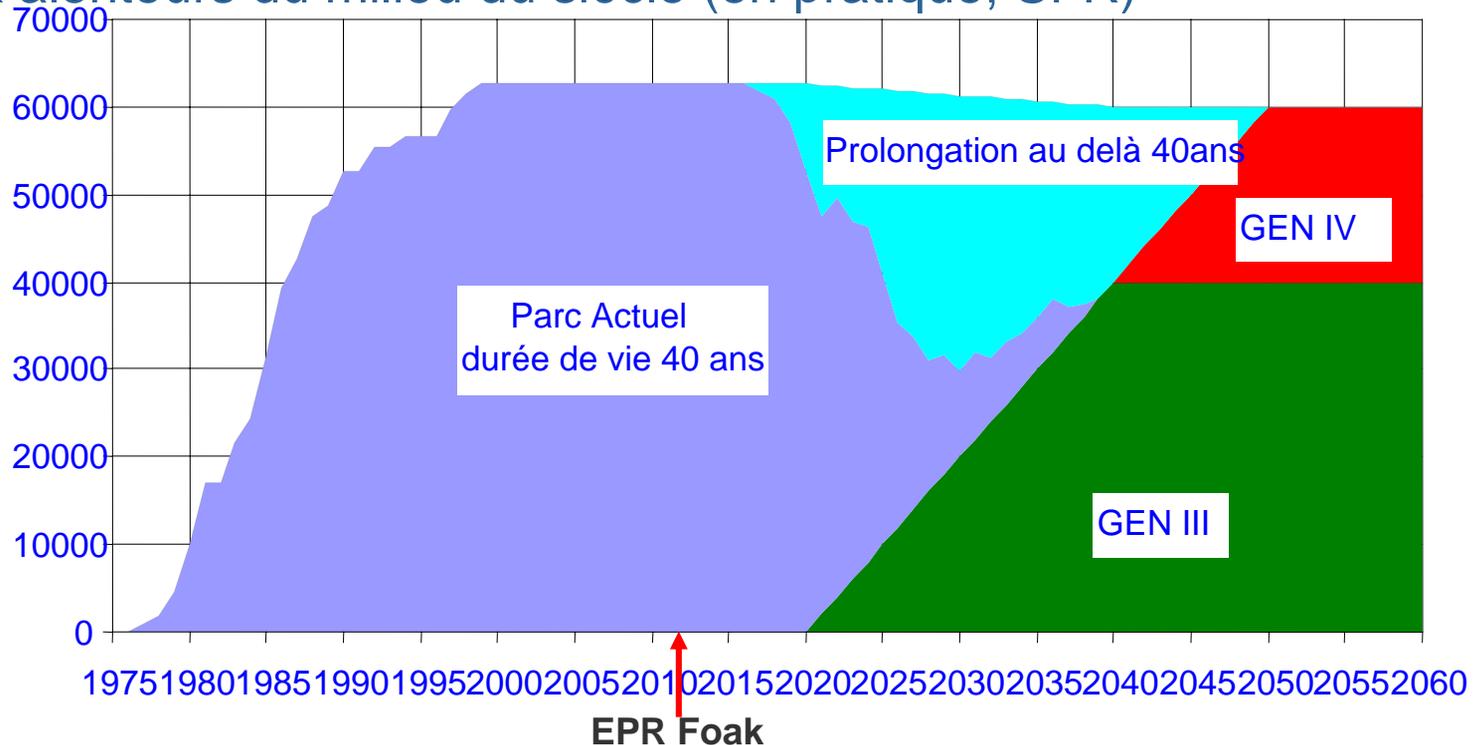
Claude GARZENNE

Joël LE MER

Hadrien LEROYER

Contexte et objectifs : la stratégie d'EDF pour la gestion moyen-long terme du parc nucléaire

1. Extension de la durée de fonctionnement du parc actuel
2. Renouvellement par des réacteurs à eau de 3ème génération
3. Être prêt à déployer, si nécessaire, des systèmes de 4ème génération aux alentours du milieu du siècle (en pratique, SFR)



Durée de vie moyenne du parc : environ 50 ans

Filière SFR : les études menées à EDF



Trois macro-objectifs d'ici 2012

1. Préciser le cahier des charges EDF pour les SFR qui pourraient être déployés à l'horizon 2040 et évaluer les designs proposées par les partenaires CEA et AREVA
 - Sûreté, compétitivité, exploitabilité (inspection en service, réparations..), matériaux...
2. évaluer les options proposées pour le prototype 2020 ASTRID
 - Réacteur démonstrateur industriel versus réacteur de recherche
3. évaluer les perspectives industrielles de la transmutation des actinides mineurs dans les SFR (loi du 28 juin 2006)
 - Études de scénarios technico-économiques, dans le cadre du Groupe de Travail CEA-AREVA-EDF dédié : le GT TES

LES SCÉNARIOS DU GT TES : LA DÉMARCHE EDF

- **Simulation des scénarios avec notre code TIRELIRE-STRATEGIE**
 - ↳ **bilan matière dans tous les postes du cycle, CSDV & CSDC produits, termes sources**
 - ↳ **Calcul de l'emprise du stockage (SYRTHES V4)**
 - ↳ **Impacts cycle (thermique, radio-protection) → faisabilité & éléments de dimensionnement**
 - ↳ **Remontage économique (outil et base de données DCN)**
- **Approche conforme à notre vision industrielle :**
 - **Dans les hypothèses : temps minimum de refroidissement du combustible standard (5ans), du combustible chargé en AM...**
 - **Étude de variantes : limitation du nombre de RNR chargé avec des CCAm , démarrage de la transmutation hétérogène retardé en 2080...**
- ➔ **Apporter des éléments techniques pour éclairer et conforter la vision stratégique à long terme d'EDF, vis-à-vis de l'échéance 2012**

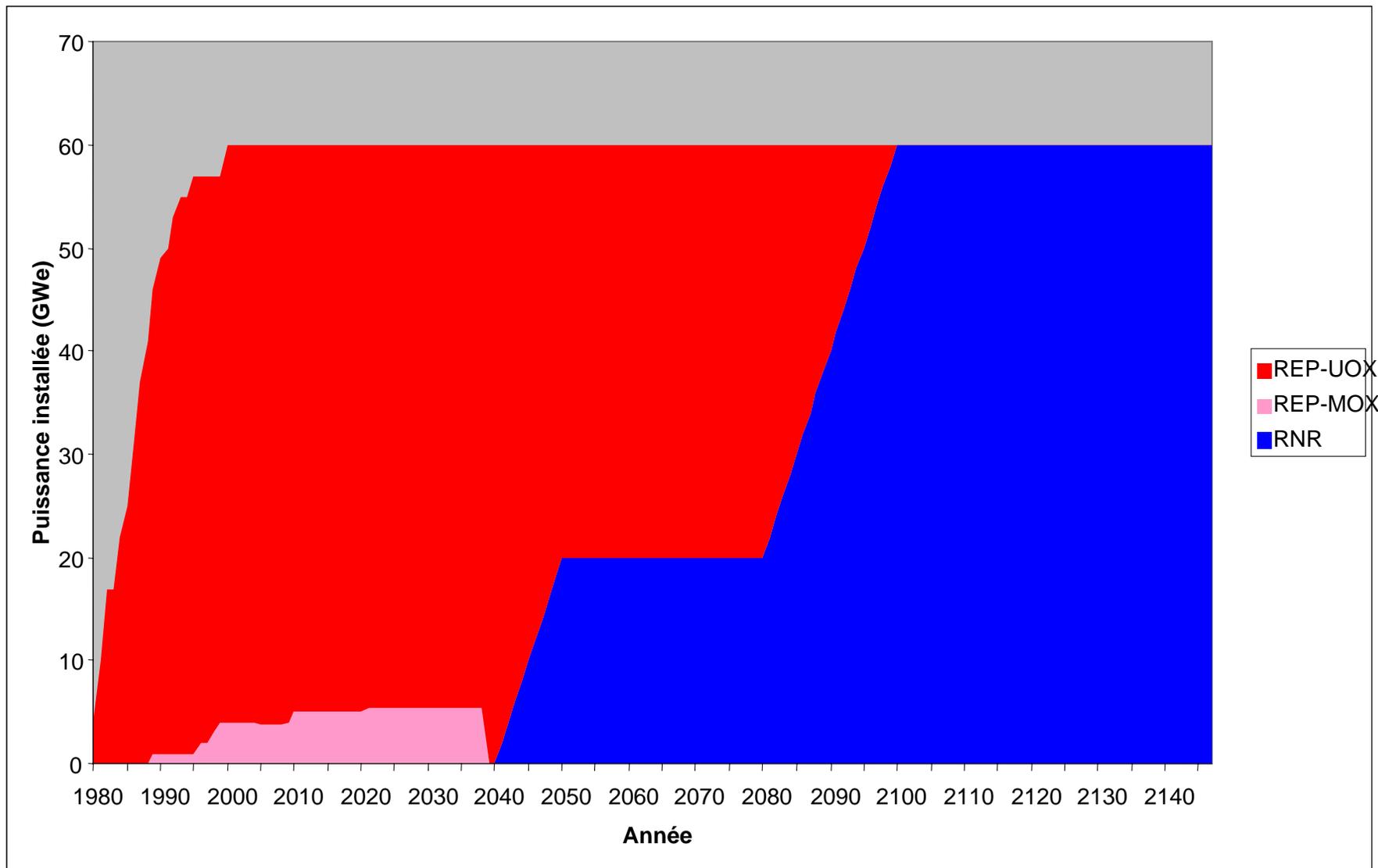
La position EDF sur la gestion des actinides mineurs

- ❑ **Solution de référence : le stockage (conclusion études Loi Bataille)**
 - Incontournable (PF, pertes au retraitement), seule solution apte à gérer tous les déchets HAVL
 - Efficace : dose à l'exutoire < RFS, même pour scénarios altérés, confine parfaitement les actinides qui ne migrent pas dans l'argile
- ❑ **Rôle de la transmutation : faciliter la démonstration et l'optimisation du stockage**
 - Impact sur l'inventaire radio-toxique via la réduction des AM, mais sans effet sur la dose à l'exutoire, pilotée par les PFVL & PAVL : **la radio-toxicité des déchets n'est pas un critère retenu par EDF**, sauf si l'ASN (et le GP Déchets) le demandent
 - Impact sur la thermique, et donc l'emprise des déchets HAVL

La position EDF sur la gestion des actinides mineurs

- **Neptunium** : pas d'intérêt (demi vie > 2 millions d'année)
- **Curium** :
 - Très problématique en cycle (chaleur, radioprotection), notamment pour l'amont (fabrication du combustible)
 - Bien géré par le stockage
 - ➔ Peu d'intérêt en dehors d'une stratégie de réduction maximale de la radio-toxicité des déchets, non soutenue par EDF car sans effet sur la dose à l'exutoire.
- **Américium** :
 - Problématique en cycle (radioprotection) mais sensiblement moins que Cm
 - Domine la thermique des verres sur le long terme
 - ➔ Intérêt vis-à-vis de la minimisation de l'emprise du stockage

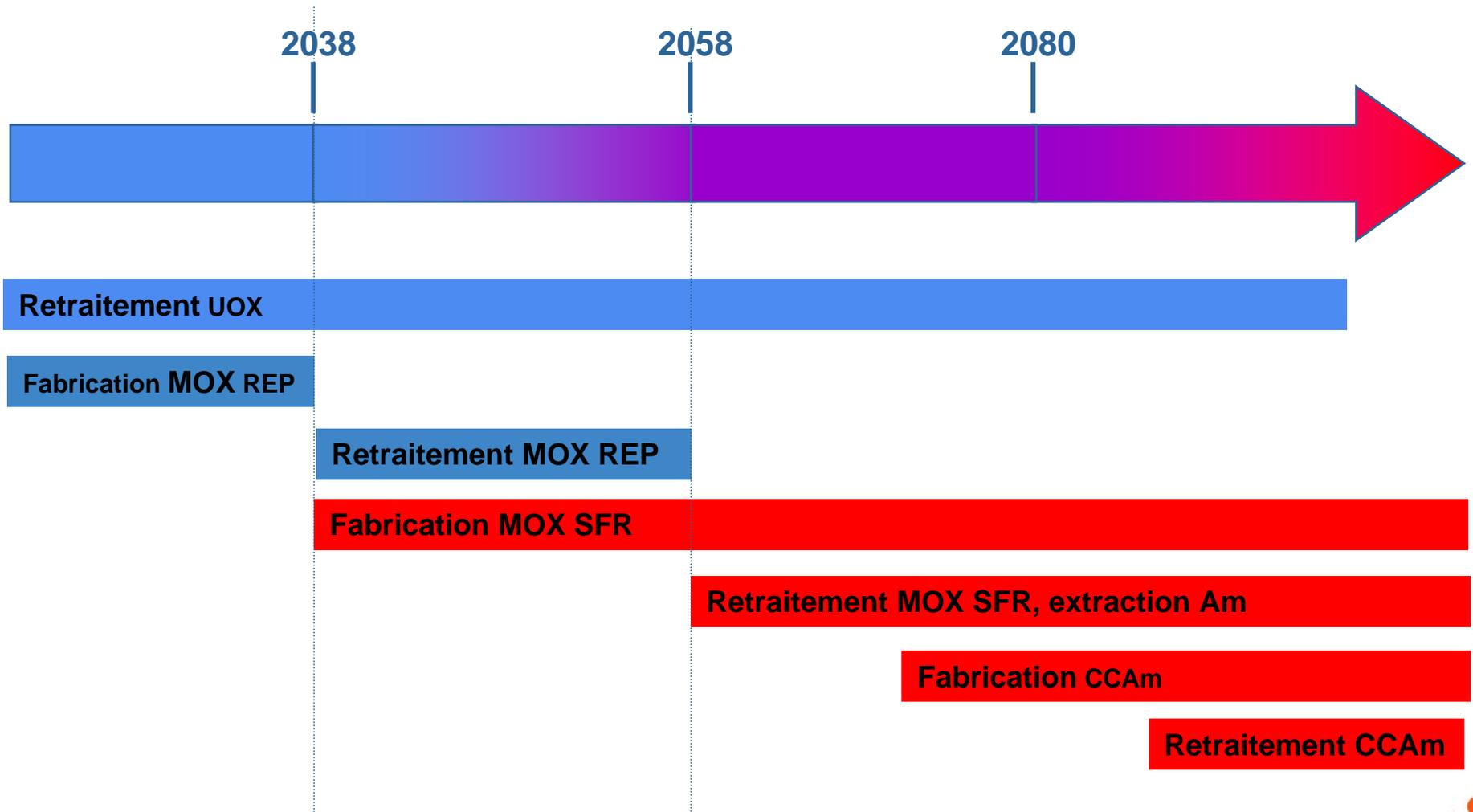
SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE POUR LES ÉTUDES DU GT TES





- ❑ **Recyclage du plutonium seul** : scénario de référence S_ref
- ❑ **Transmutation homogène de l'américium** S_hom
- ❑ **Transmutation hétérogène de l'américium** chargés dans des couvertures radiales (CCAm) sur support d'oxyde d'uranium :
 - scénario S_het : tout l'Am est transmuté à partir de 2040
 - scénarios S_het_50% : seule la moitié des SFR est chargée avec des CCAm à partir de 2040
 - scénarios S_het_2080 : scénario « progressif », la transmutation de l'américium est repoussée en 2080. **Tout l'Am issu des SFR est transmuté.**

SCÉNARIO Progressif



LES SCÉNARIOS DU GT TES : LES HYPOTHÈSES SUR LE CŒUR DU SFR ET SON COMBUSTIBLE

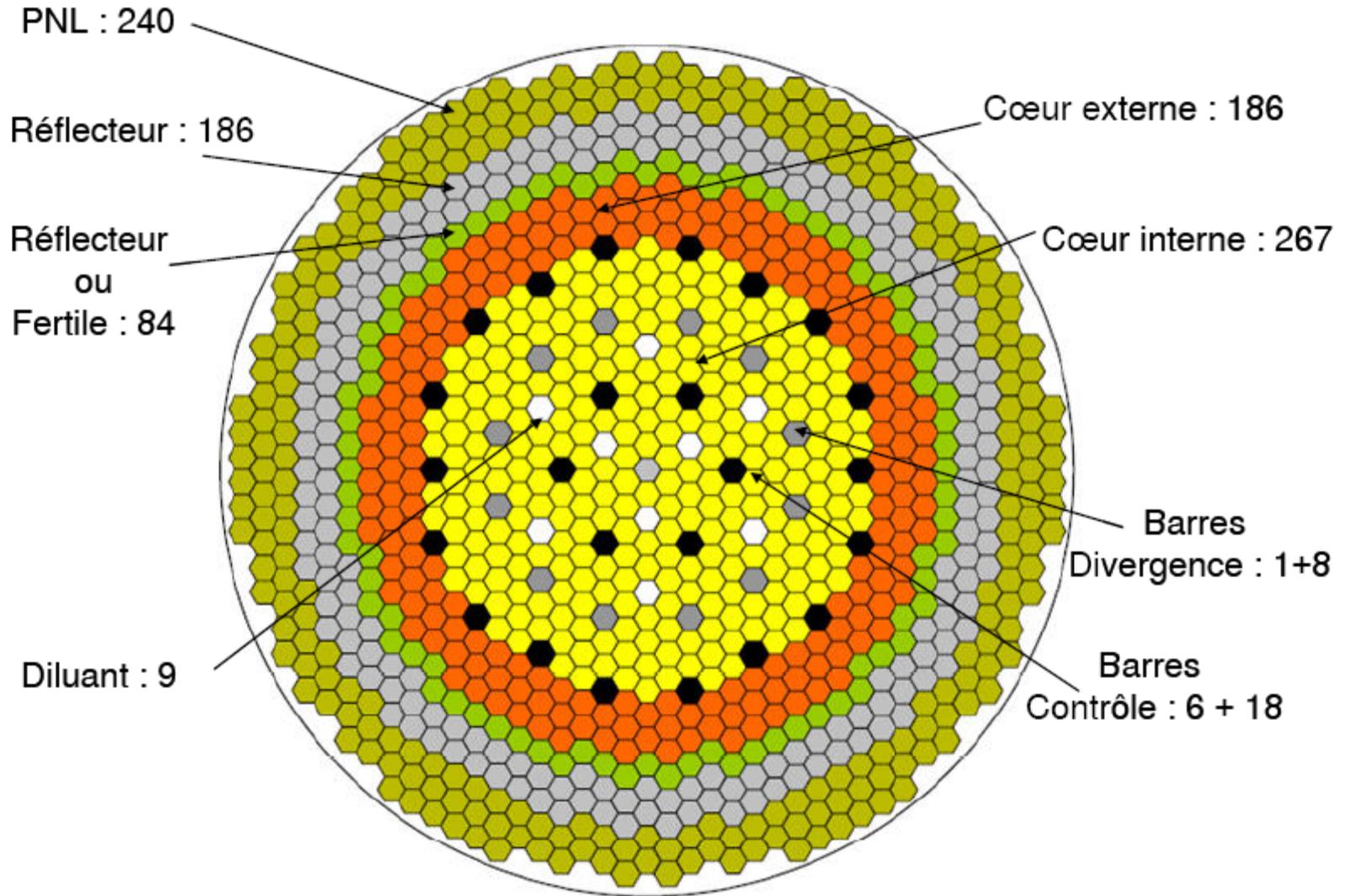
□ Cœur : Image fixée par le CEA en avril 2008 = SFR-V2B

- Cœur fissile légèrement sur-générateur ($GRI=0,03$)
- Puissance thermique : 3600 MWth, Puissance électrique 1450 MWe, rendement : 40,3 %
- Masse de combustible : 74 tonnes de métaux lourds initiaux (tMLi)
- Longueur de cycle : 410 JEPP, le combustible reste en cœur 5 cycles soit 2050 JEPP
- Irradiation de sortie : 100 GWj/t

□ Couvertures

- Couvertures fertiles : pas d'image neutronique fixée aujourd'hui, premiers éléments :
 - GRE de 0,11 avec couverture axiale inférieure
 - GRE de 0,07 avec couverture radiale
- Couvertures chargées en américium (CCAm) :
 - Couvertures radiales ; irradiation de 4100 JEPP avec retournement à 2050 JEPP
 - Elles sont chargées à 20% en Am, sur support d'oxyde d'uranium

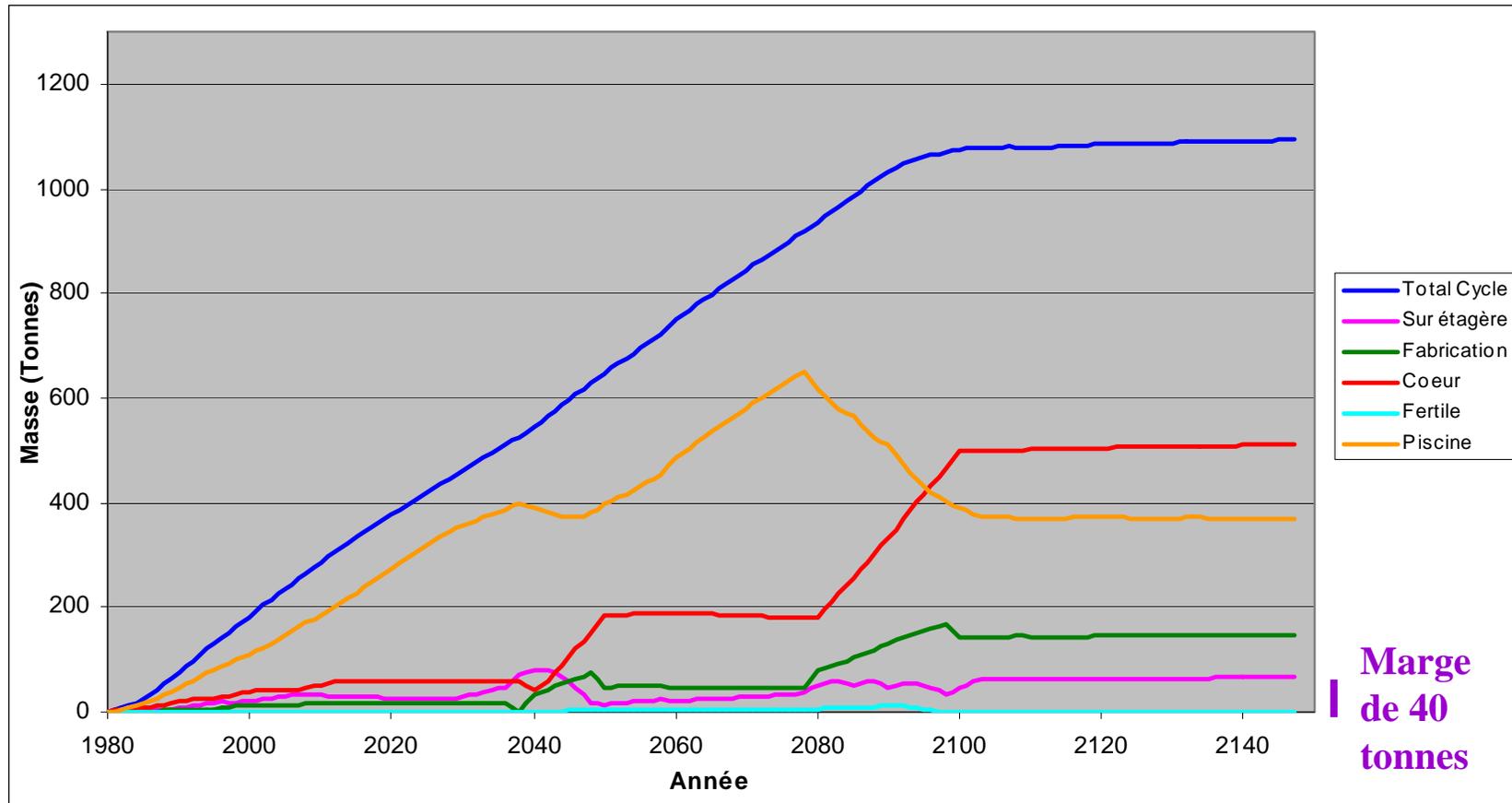
LE DESIGN DU COEUR SFR-V2B



LES SCÉNARIOS DU GT TES : LES CONTRAINTES SUR LE CYCLE DU COMBUSTIBLE

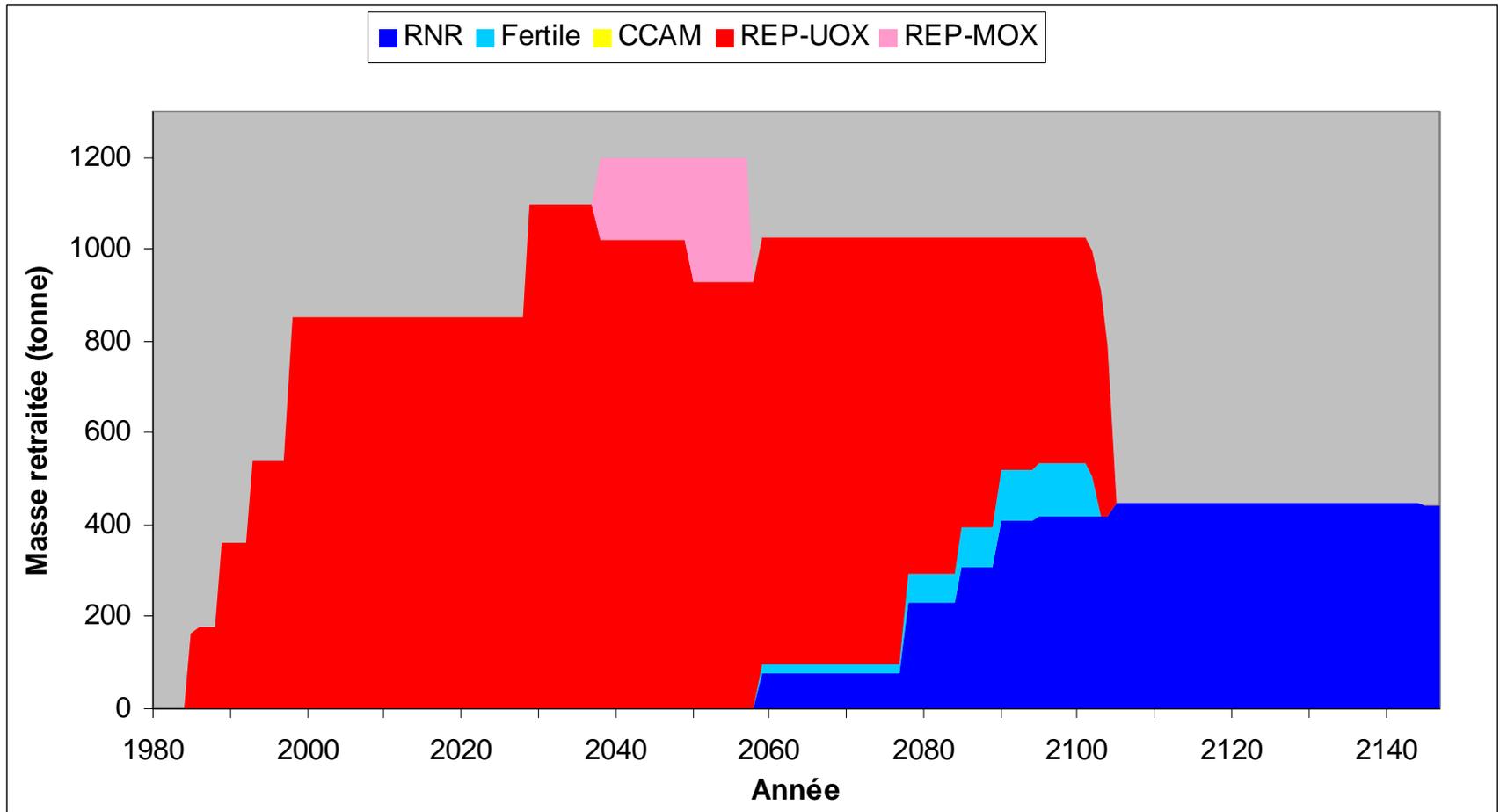
- **Temps de refroidissement minimum du combustible avant retraitement : 5 ans**
- **Temps de refroidissement minimum des CCAm : Puissance résiduelle < 7,5 kW**
- **Temps de vieillissement du combustible fabriqué avant chargement de 2 ans**
- **Limitation à 1200 tonnes de combustible retraité par année**
- **Masses retraitées constantes sur de longues périodes (30 à 40 ans)**
- **Masses en piscine limitée à 19000 tonnes**
- **Rapport Pu/U+Pu < 2% dans l'usine actuelle avant 2050**
- **Pu séparé sur étagère entre 60 et 90 tonnes**
- **Am séparé sur étagère pour l'instant, pas de limite**

LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4 INVENTAIRE EN PLUTONIUM



- 1050 tonnes de Pu à l'équilibre (teneur : 16.5%)
- Nécessité d'utiliser des couvertures fertiles axiales pour déployer les 60 GWé de SFR

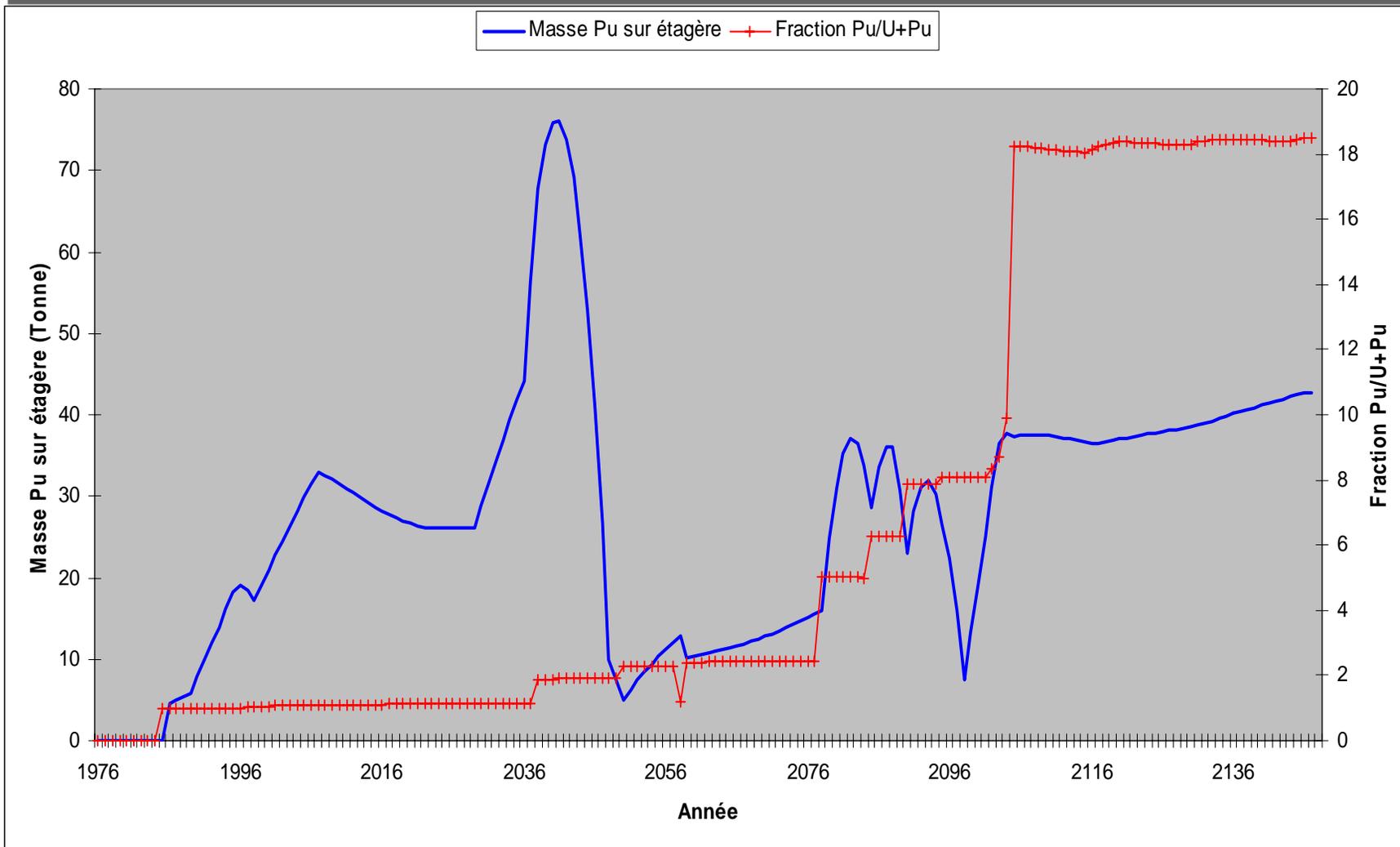
LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4 MASSES RETRAITÉES ANNUELLEMENT



- **Maximum : 1200 tonnes pendant la période de retraitement des MOX REP**
- **Longues périodes de retraitement ~constantes en capacité requise**
- **Stabilisation à 445 tonnes à l'équilibre**

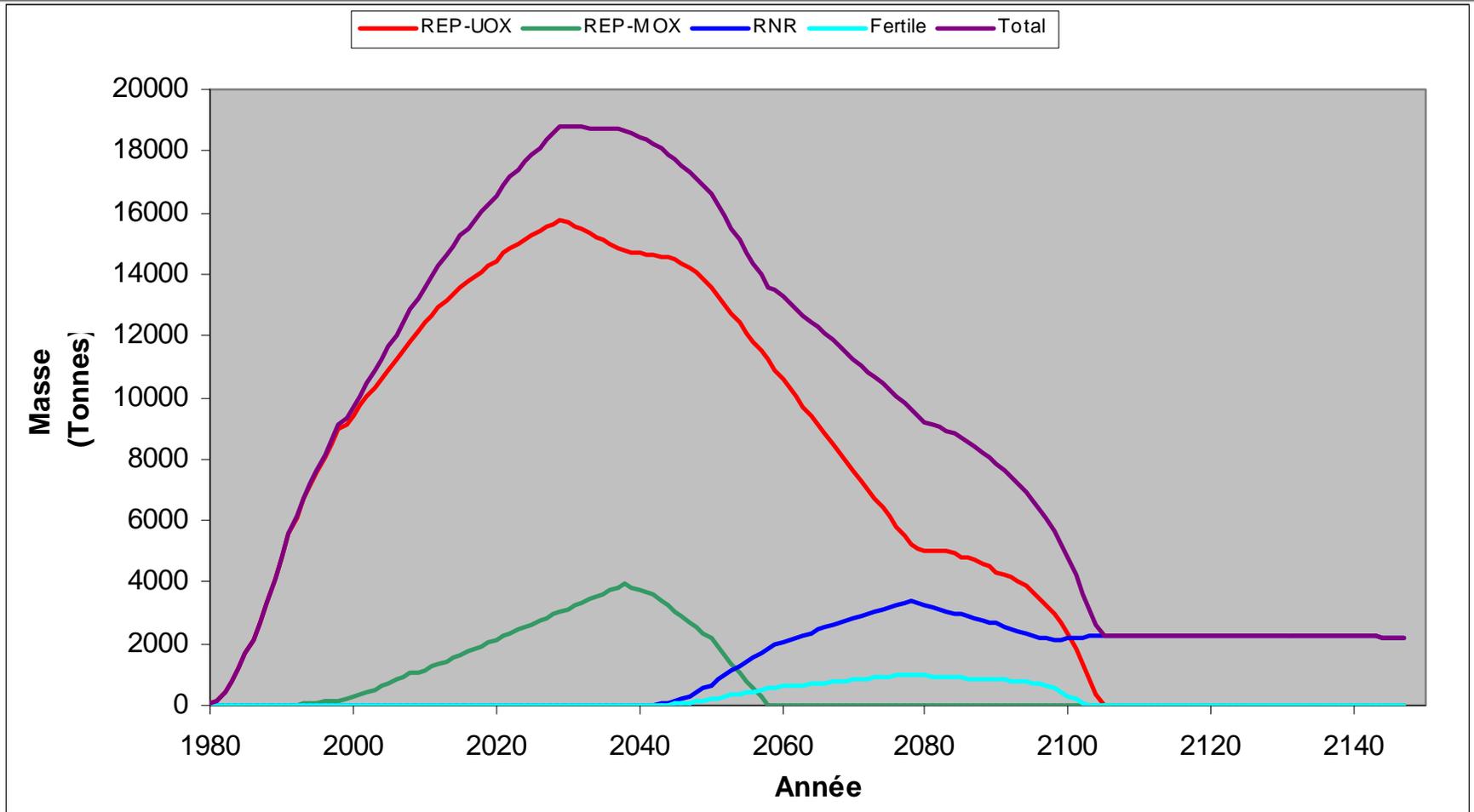
LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4

PU SUR ÉTAGÈRE - RAPPORT PU/U+PU AU RETRAITEMENT



➔ **Respect des contraintes imposées**

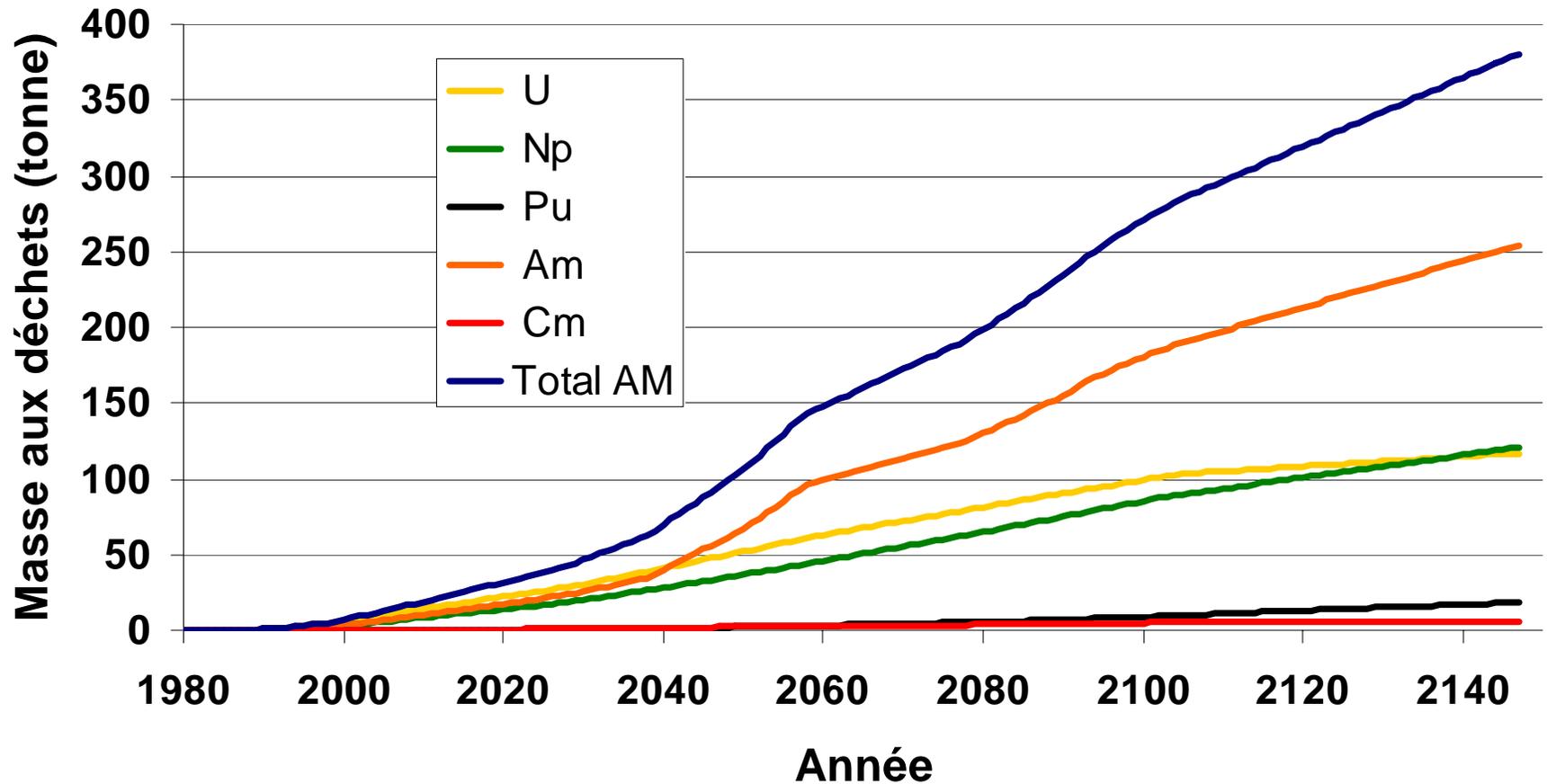
LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4 MASSE DE COMBUSTIBLE EN PISCINE



18500 tonnes de combustible en piscine au maximum atteint vers 2030

➔ Respect des contraintes imposées

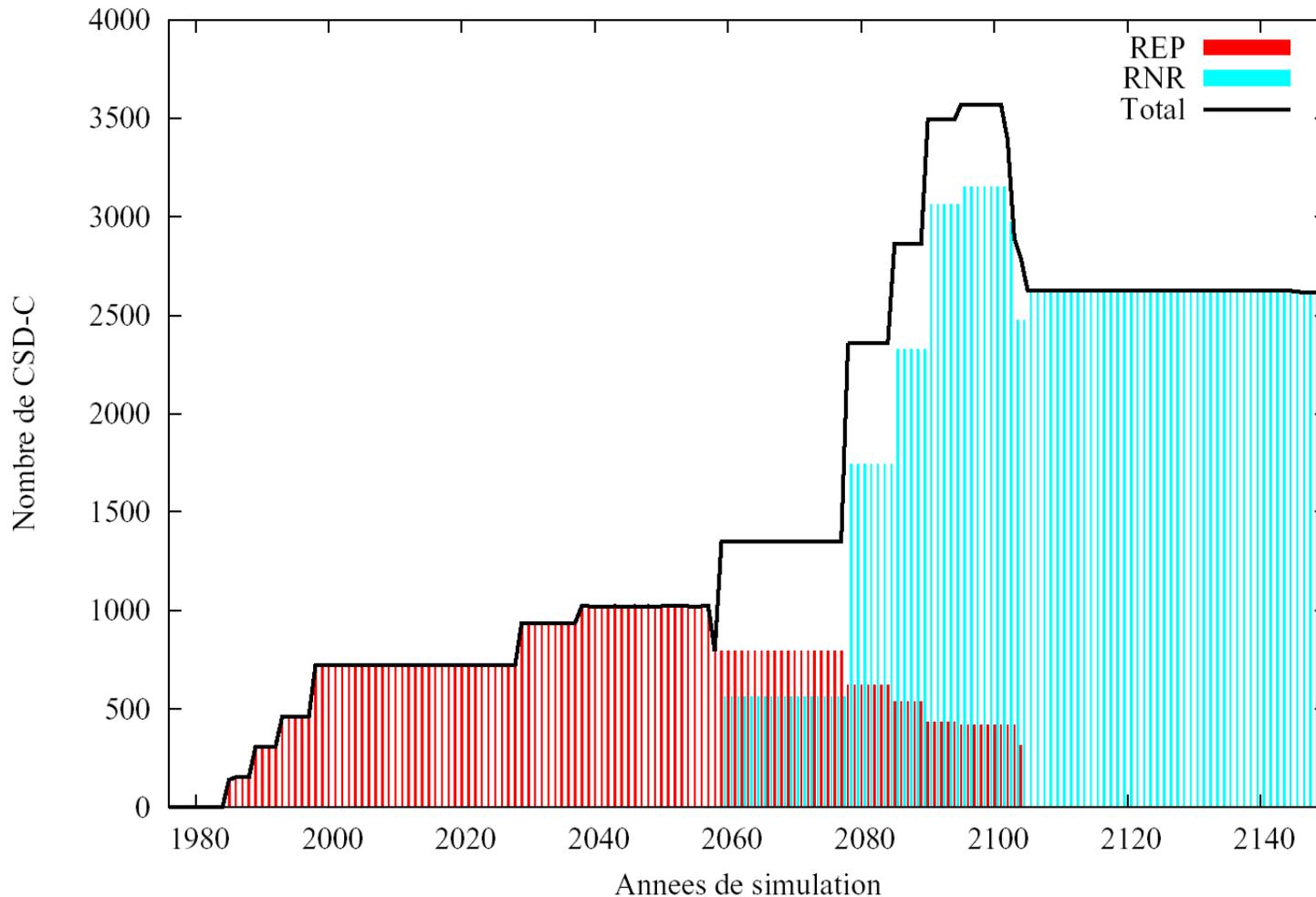
LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4 MASSE D'ACTINIDES AU STOCKAGE



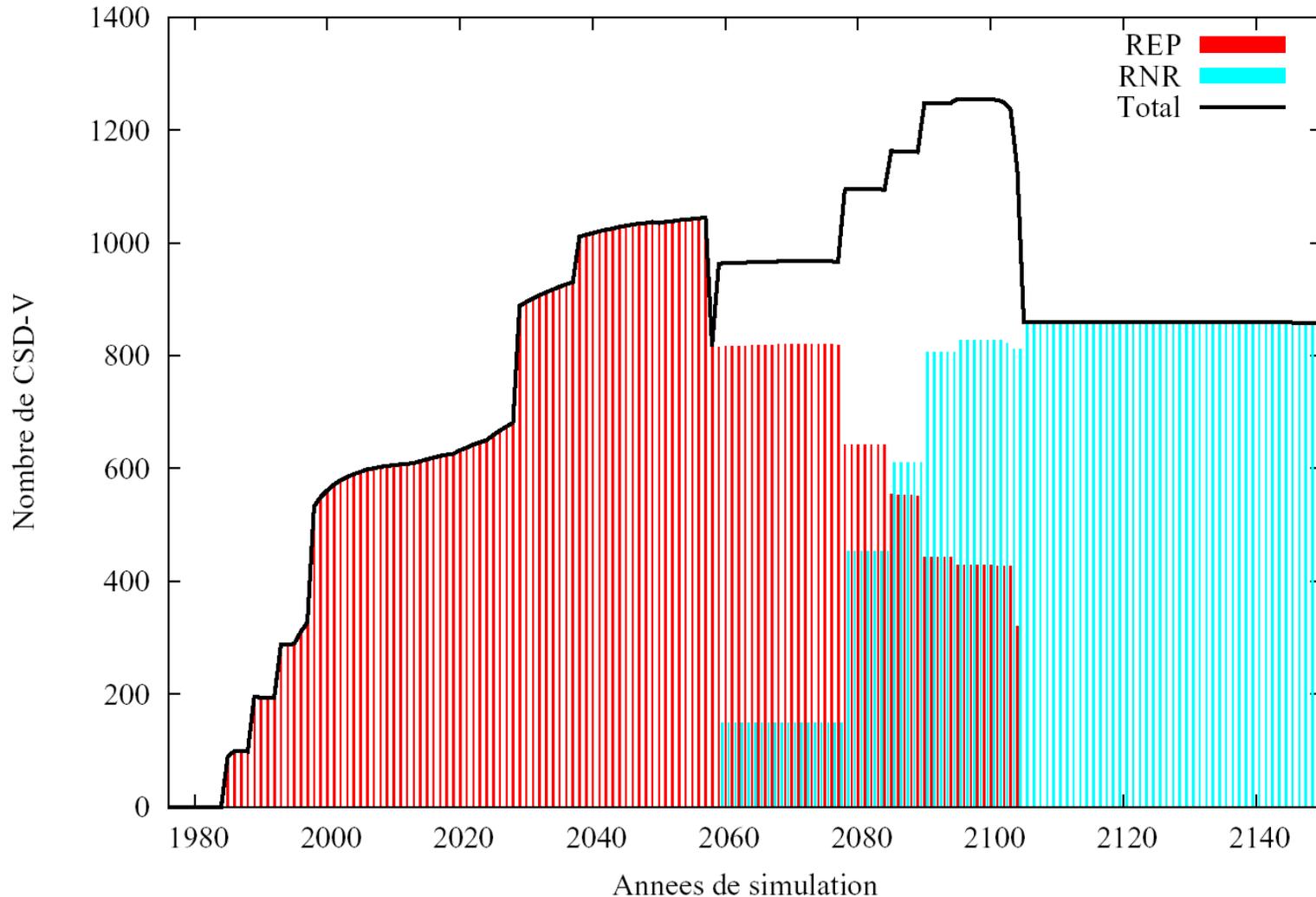
LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4 PRODUCTION DES CSDC

Filière REP : ratio de **0.85 CSD-C/tMLi** (REX de La Hague)

Filière RNR : ratio de **5.89 CSD-C/tMLi**



LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4 PRODUCTION DES CSDV

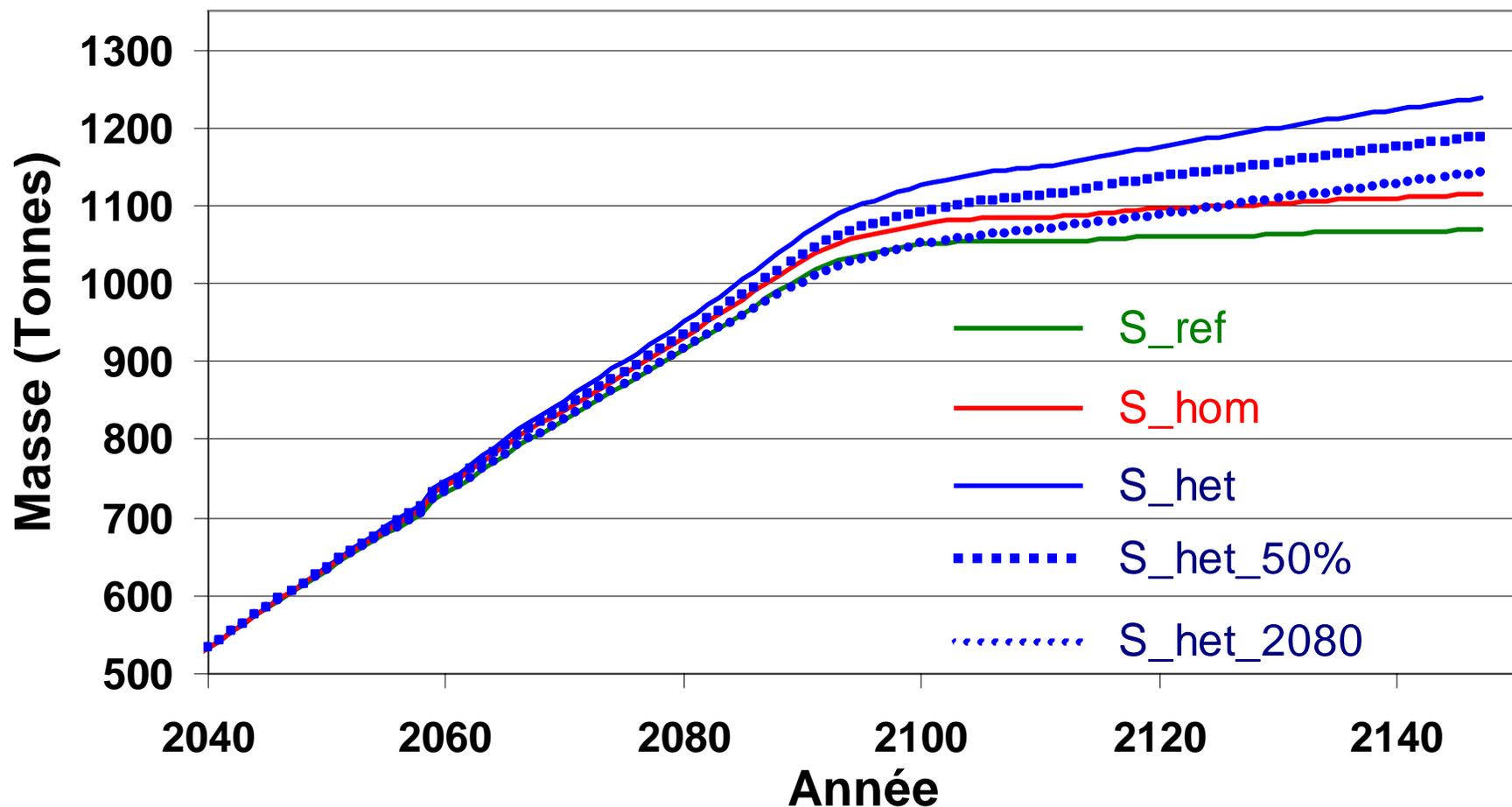


LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4

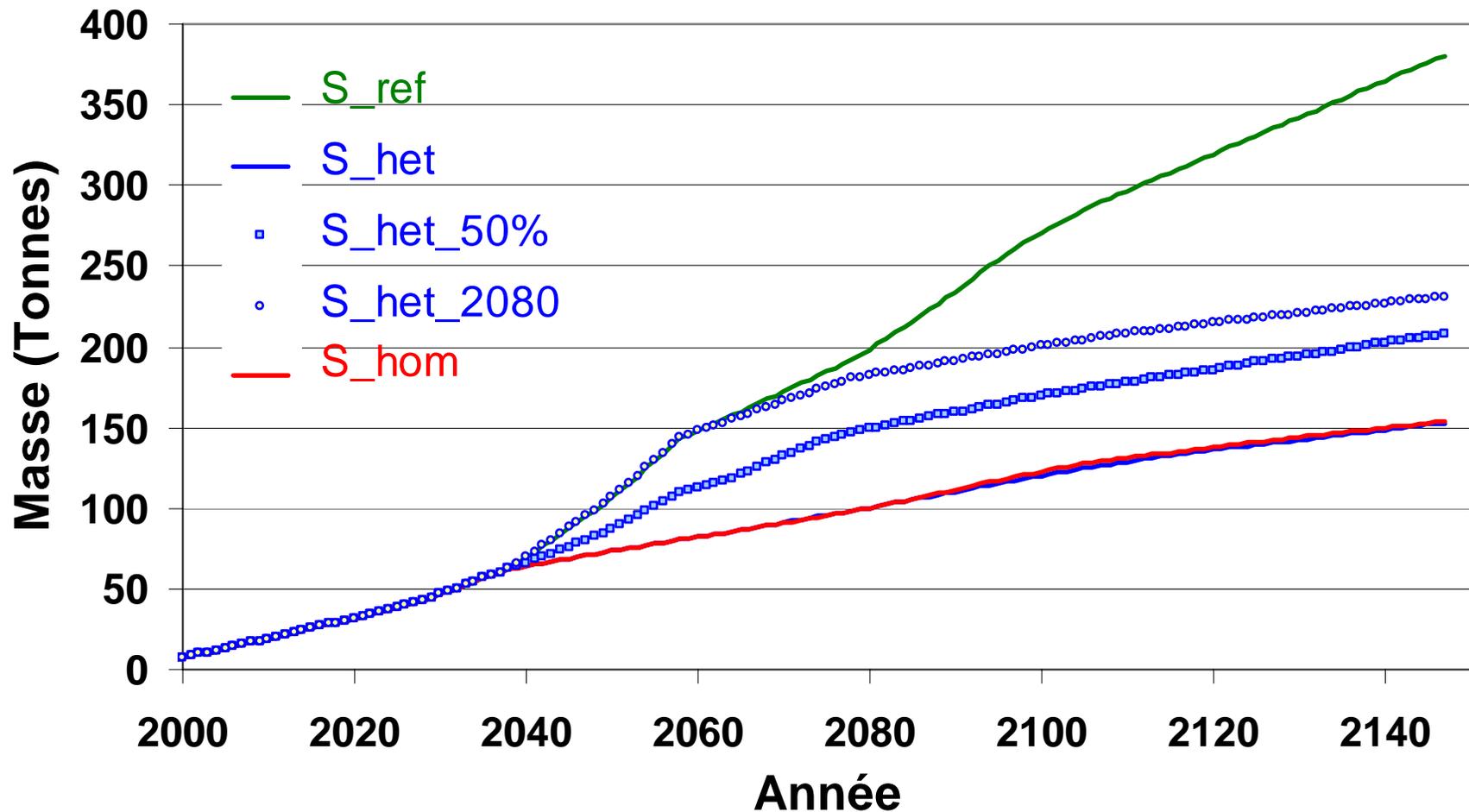
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

- ❑ **Inventaire plutonium nécessaire : ~ 1025 tonnes, très élevé**
- ➔ **Nécessité de couvertures fertiles** : les couvertures axiales inférieures suffisent (2700 tonnes pendant la transition parc REP – parc SFR)
- ❑ **Usines du cycle** : Teneur Pu MOX ~16%, masse de Pu sur étagère < 80 tonnes, masse annuelle de combustible retraité < 1200 tonnes, Pu/U+Pu <2,5% jusqu'en 2075, début du recyclage des MOX SFR vers 2060
- ➔ **Évolution dans une certaine continuité avec le parc actuel du point de vue des usines du cycle**
- ❑ **Déchets produits** :
 - ~400 tonnes d'actinides mineurs cumulés mis au déchet en 2150 (Scénario de cycle ouvert : ~430 t d'AM + ~1500 t de plutonium)
 - Les SFR produisent **3 fois plus de CSDC** par TWhé que les REP
 - et ~2 CSDV/ TWhé contre 1,9 CSDV/ TWhé pour les REP, **mais pas la même thermique** : l'emprise au stockage d'un CSDV SFR est déjà **20% plus élevée** que celle d'un CSDV REP après 60 ans d'entreposage

Inventaire de Pu en cycle pour tous les scénarios

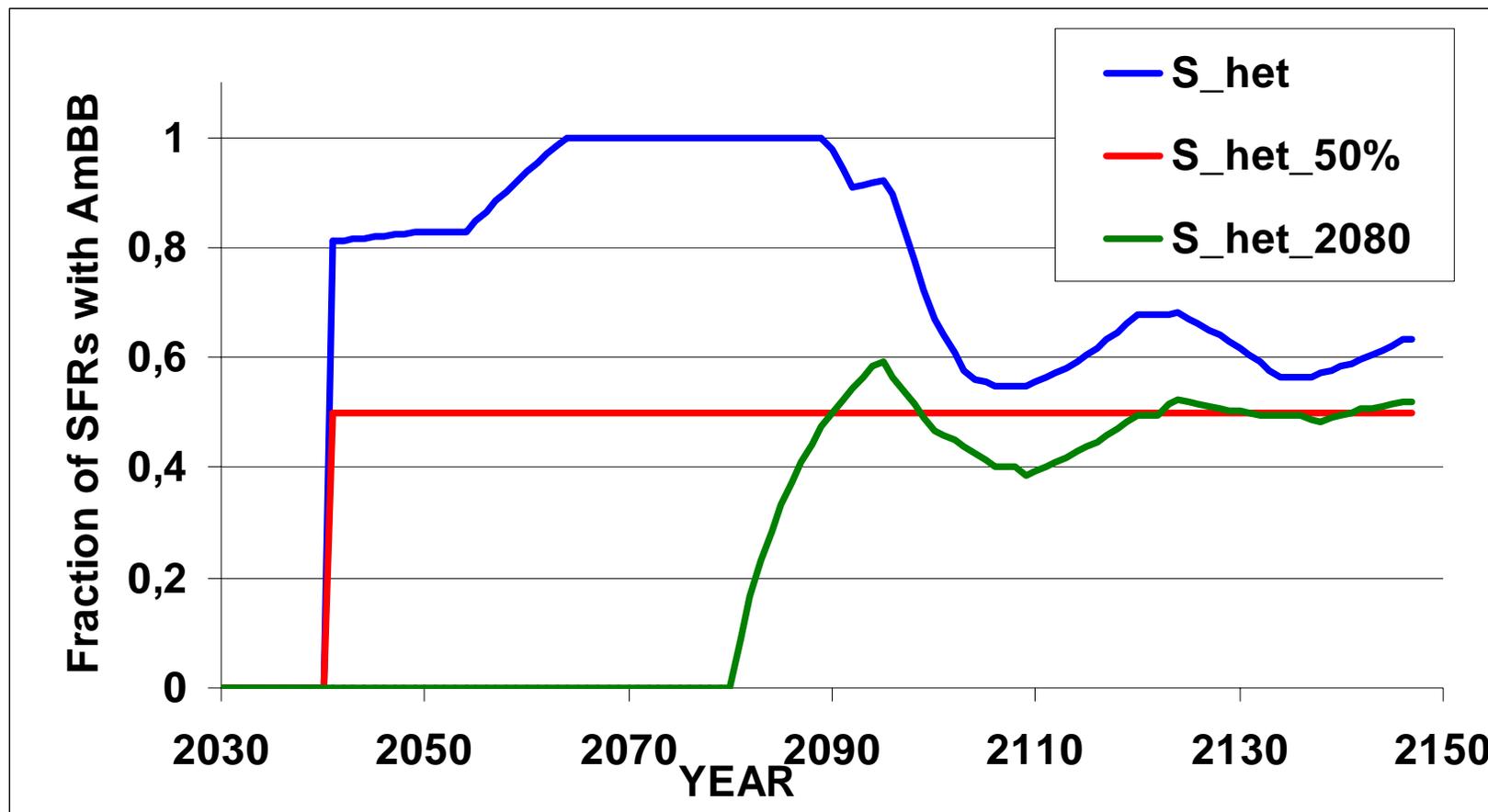


MASSE D'ACTINIDES MINEURS AU STOCKAGE POUR TOUS LES SCENARIOS



RECYCLAGE HÉTÉROGÈNE DES AM (SCÉNARIO F1) PART DU PARC SFR ÉQUIPÉ AVEC DES CCAM

Part du parc RNR équipé en CCAM (scénario de transmutation hétérogène)



- F1_Am : entre 10 et 20 tonnes d'Am sur étagère pendant 35 ans
- F1_Am_50% : 47 tonnes d'Am mis au déchet entre 2040 et 2080
- F1_Am_2080 : 80 tonnes d'Am mis au déchet entre 2040 et 2080

SCÉNARIOS DE RECYCLAGE de l'Am

Inventaire TRU au déchet et total (2150)

Scénario		S_ref	S_het	S_het_50%	S_het_2080	S_hom
TRU (t)	waste	410	180	235	255	185
<i>Réduction</i>	<i>waste</i>	<i>1</i>	<i>2.3</i>	<i>1.7</i>	<i>1.6</i>	<i>2.2</i>
TRU (t)	total	1500	1355*	1400*	1440*	1310*
<i>Réduction</i>	<i>total</i>	<i>1</i>	<i>1.11</i>	<i>1.07</i>	<i>1.04</i>	<i>1.15</i>

* Après soustraction du Pu sur-généré

SCÉNARIOS DE RECYCLAGE de l'Am

IMPACT SUR L'EMPRISE DU STOCKAGE

Scenario	S_ref	S_het	S_het_50%	S_het_2080	S_hom
Vitrified HLW package (total number)	141000	141000	141000	142000	140000
Vitrified HLW package disposal area (normalized area S_ref=1)	1	0.55	0.66	0.71	0.57
Total repository area (HLW+MLW+ underground common installations)	1	0.69	0.76	0.80	0.7

Nombre de CSD-V presque constant (140 000), fixé par PF

Hypothèse de 60 ans d'entreposage :

- Transmutation de tout l'Am : réduction de 30% de l'emprise
- Transmutation restreinte à 50% des SFR : réduction de 25%
- Transmutation de l'Am issu des SFR : réduction de 20%

SCÉNARIOS DE RECYCLAGE de l'Am

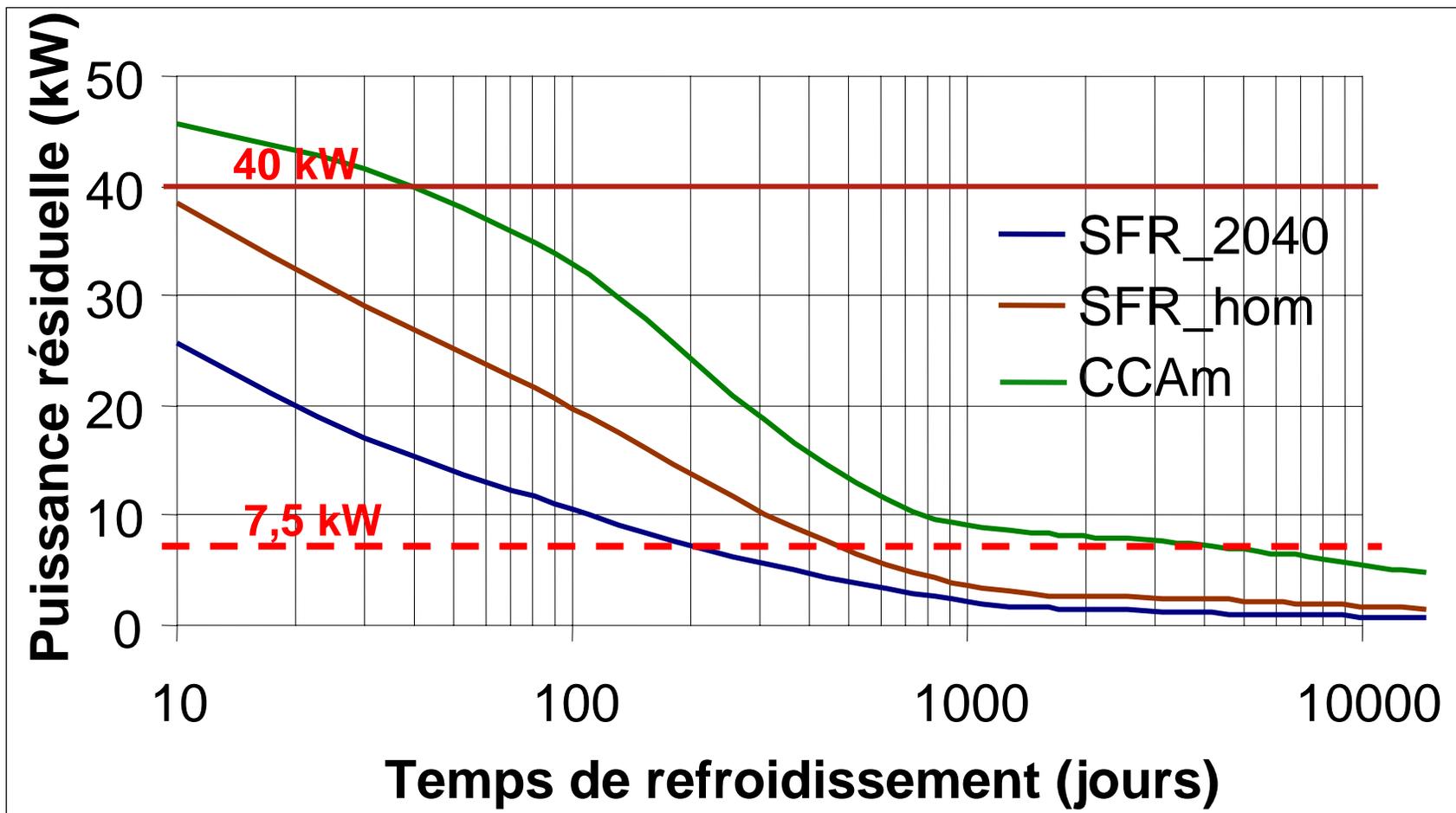
Puissance et DDD des CCAm neuves

Concentration en Am fixée à 20 % est très importante avec des impacts forts sur la thermique et la radioprotection :

	SFR (2040)	SFR_hom (2040)	CCAm
Power (kW/assembly)	0.7	1.13	2.7
Contact dose (mSv/h) plan médian	14.8	19.3	70
Dose at 1 m (mSv/h) plan médian	0.5	0.80	2.9

SCÉNARIOS DE RECYCLAGE de l'Am

Puissance DES CCAm usés



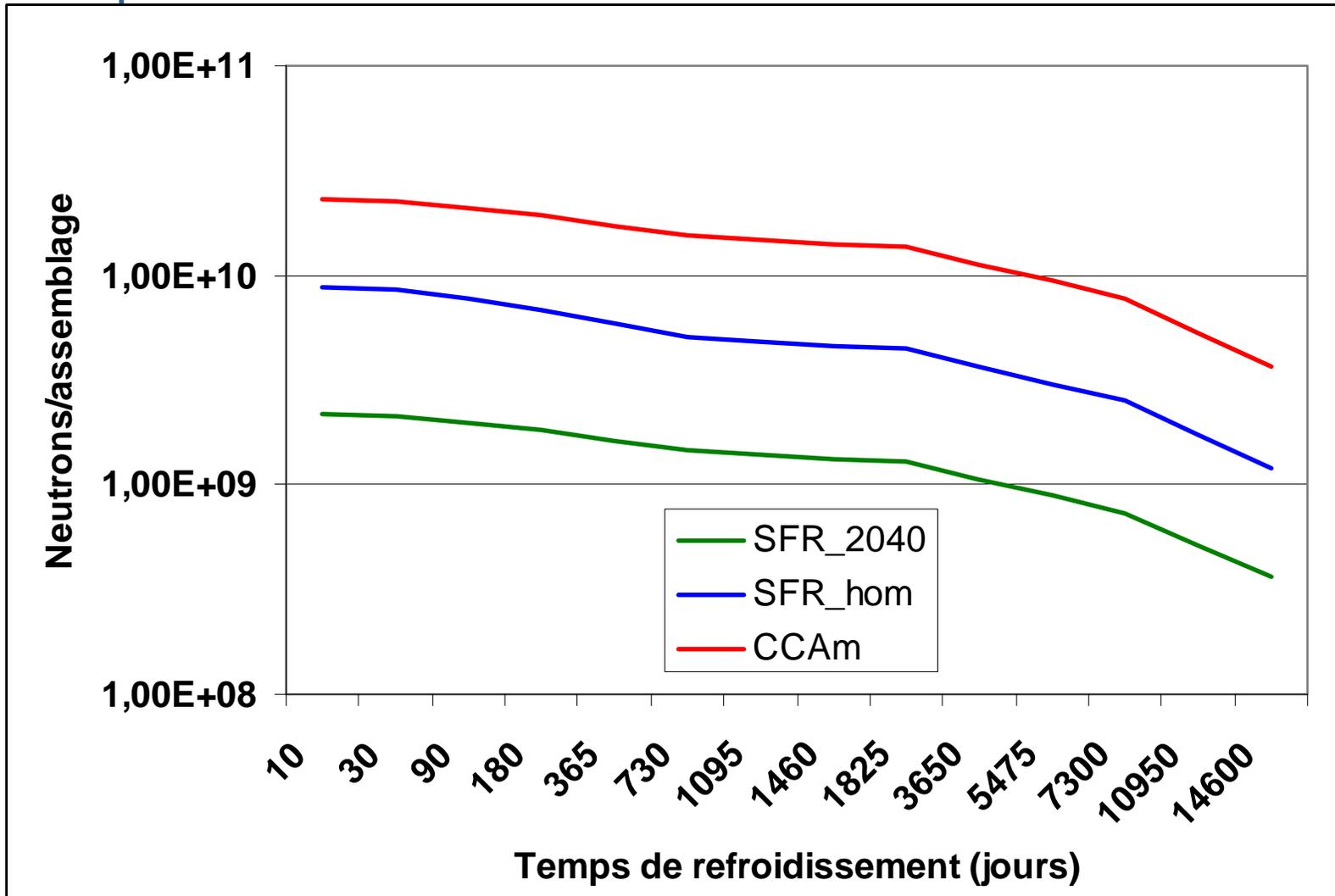
Transport des CCAm usés :deux problématiques

- Puissance limite pour le lavage (7,5kW?)
- Puissance limite pour le transport jusqu'à l'usine de traitement

SCÉNARIOS DE RECYCLAGE de l'Am

Source neutronique DES CCAm usés

Build-up du curium au cours de l'irradiation



CONCLUSION (1)



❑ **Le scénario de référence avec recyclage du Pu seul montre la possibilité d'aller vers un parc de SFR dans une certaine continuité des installations du cycle**

❑ **la gestion des déchets HAVL :**

- Le stockage géologique est la solution de référence, et devrait être opérationnel vers 2025;
- La réduction de la radio-toxicité des déchets n'est pas un critère pour EDF, sauf demande contraire de l'Autorité de Sûreté (et de son TSO le GP déchets)
- En conséquence, nos études se concentrent sur la transmutation de l'Am, en vue d'évaluer son apport potentiel à la réduction de l'emprise du stockage.

❑ **la transmutation de l'américium : préférence pour la voie hétérogène**

- Diminution d'un ordre de grandeur du flux annuel d'assemblages chargés en Am ;
- Séparation des flux combustible 'électrogène' et combustible de 'transmutation';
- Flexibilité de mise en œuvre, possibilité de limiter la proportion de réacteurs impliqués dans la transmutation.

CONCLUSION (2)

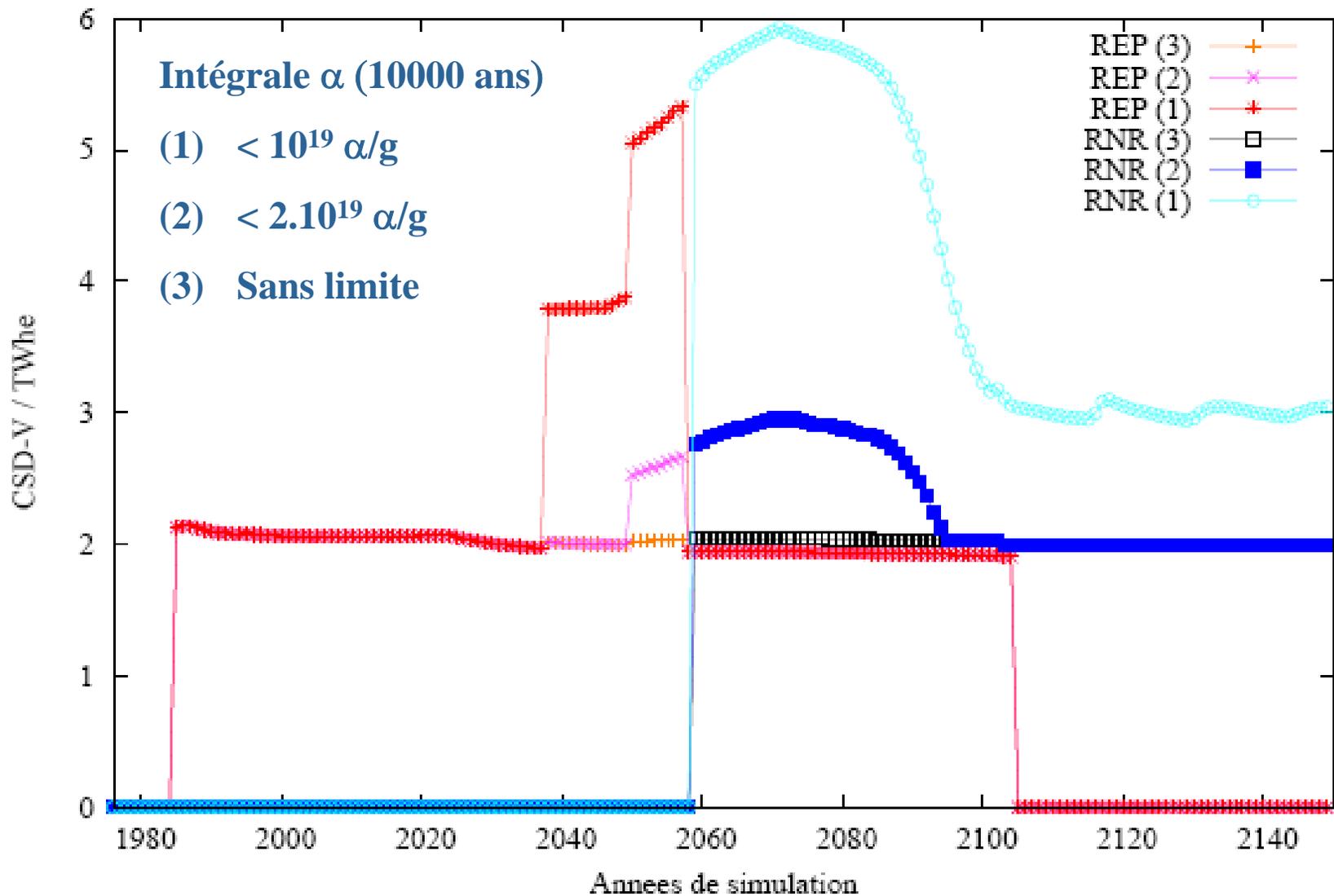
□ Deux Options intéressantes :

- Recyclage de l'américium en couvertures dans seulement 50% des SFR à partir de 2040 : 25% de réduction de l'emprise du stockage.
- Recyclage de tout l'américium dans des CCAm à partir de 2080
 - 55% de SFR chargés avec des CCAm, 20% de réduction de l'emprise du stockage
 - Scénario plus 'progressif', repoussant aux années 2070-2080 la séparation poussée et la fabrication des CCAm
 - Cohérence avec critère GEN IV : les SFR brûlent leur propre américium

□ A compléter et consolider pour le dossier 2012 :

- o Évaluer l'impact de l'allongement de la durée de l'entreposage (>100 ans);
- o Évaluer la faisabilité industrielle et l'impact cycle des CCAm (fabrication, comportement en réacteur, transport des CCAm usées...);
- o Faire le bilan coût/bénéfice de la transmutation de l'américium sur la base d'une analyse multicritère (économie, risques industriels, doses public et travailleurs, etc...)

LE SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE F4 RATIO DE PRODUCTION DES CSDV



SCÉNARIOS DE RECYCLAGE DES AM INVENTAIRES PU/AM EN 2150

Scenario		S_ref	S_het	S_het_50%	S_het_2080	S_hom
Am content	équilibre	-	CCAm 20% Am	CCAm 20% Am	CCAm 20% Am	0,8% Am
	maximum					2,8% Am in 2040
Pu (tons)	Cycle	1070	1240	1200	1150	1120
	Waste	20	25	25	23	30
AM (tons)	Cycle	18	105	95	95	55
	Waste	390	155	210	232	155

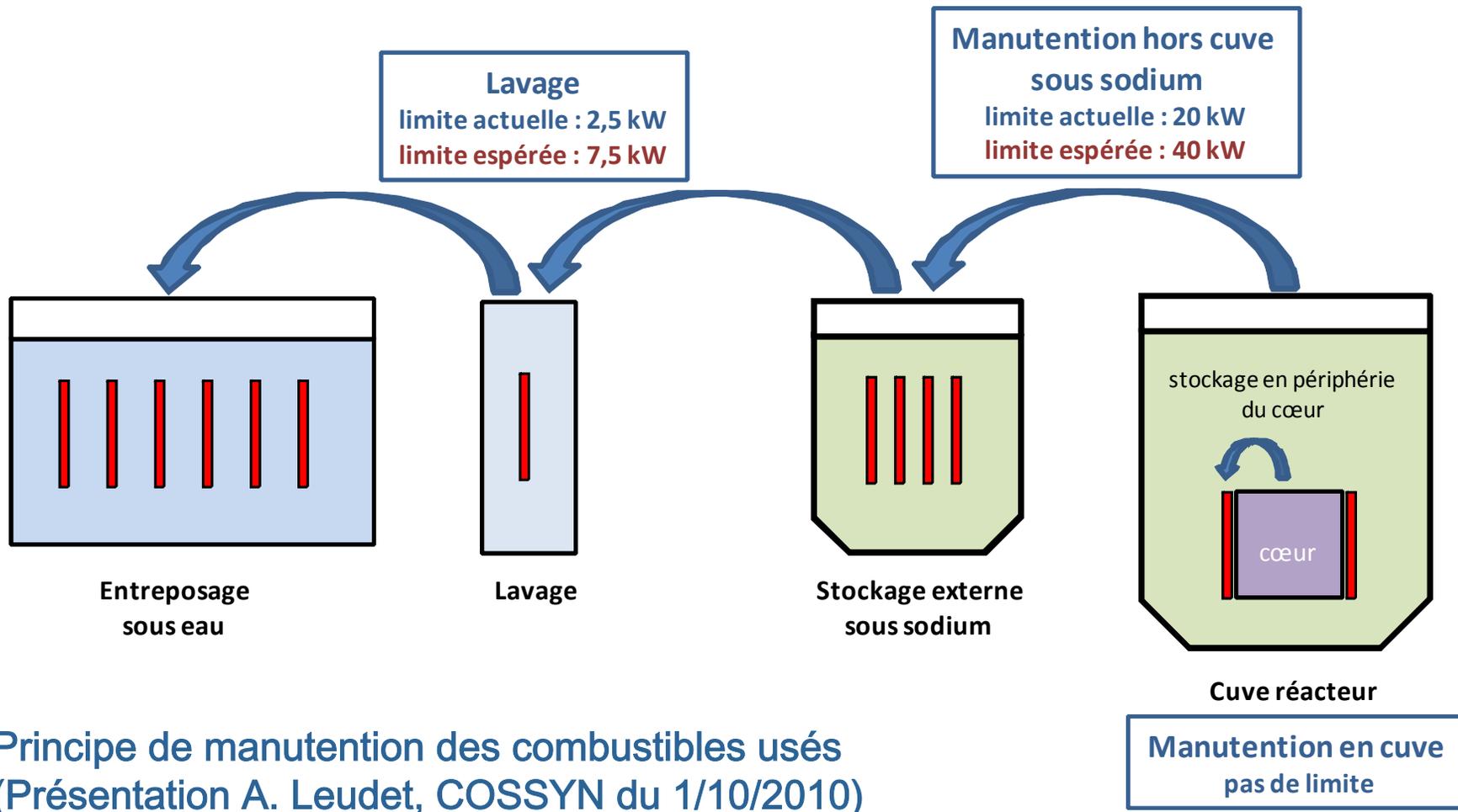
SCÉNARIOS DE RECYCLAGE DE L'AMÉRICIUM

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

- ❑ Réduction du cumul de la masse d'AM mise au déchet : ~180 t en 2150 → facteur 2 par rapport au scénario F4 sans transmutation
- ❑ Masse d'AM dans le cycle : 54 t en homogène, 105 t en hétérogène
- ❑ La masse totale d'AM (cycle + déchet) est au mieux réduite d'un facteur 2 en 2150 (210 t pour la voie homogène)
- ❑ SFR chargés de CCAm : 100% durant la transition, 55% à l'équilibre
- ❑ Réduction de l'emprise des CSDV en 2150 : ~ 45% (proche des scénarios de transmutation de tous les AM)) → réduction de 30% de l'emprise du stockage
- ❑ Variante hétérogène F1_Am_50% : 50% de SFR chargés avec des CCAm, augmente le talon, réduction d'un tiers de l'emprise des CSDV, de 25% de l'emprise du stockage
- ❑ Variante hétérogène F1_Am_2080 : tout l'Am issu du combustible SFR utilisé est recyclé dans 55% de SFR à l'équilibre, réduction d'un quart de l'emprise des CSDV, de 20% de l'emprise du stockage

SCÉNARIOS DE RECYCLAGE de l'Am

Impact sur le réacteur : manutention des assemblages



Principe de manutention des combustibles usés
(Présentation A. Leudet, COSSYN du 1/10/2010)