



Grenoble INP - Phelma, UGA
3 Parvis Louis Néel
38016 Grenoble Cedex 1



LPSC Grenoble
53 Avenue des Martyrs
38026 Grenoble Cedex 1

Alexandre ROTH

2A GEN – 2023-2024

alexandre.roth@phelma.grenoble-inp.fr

Étude de la capacité d'incinération d'une flotte de réacteurs à sels fondus

du 13/05/2024 au 16/08/2024

Sous la supervision de :

Louiliam CLOT, clot@lpsc.in2p3.fr

Elsa MERLE, merle@lpsc.in2p3.fr

Axel LAUREAU, axel.laureau@cnrs.fr

Confidentialité : non

Remerciements

Je tiens à remercier mon tuteur de stage Louiliam pour l'encadrement de ce stage. Merci de m'avoir accompagné dans la construction de la présentation ISAC, de ce rapport et des tâches que j'ai pu effectuer lors de ce stage. Merci de m'avoir permis d'assister à différentes réunions du projet ISAC et MIMOSA.

Adrien, Anna, Aurélien, Axel, Elsa, Hugo, Louiliam, Max, Thomas, merci pour les pauses-café, les encas, les discussions et les débats/tierlists parfois caucasses.

Merci à Elsa de m'avoir permis de réaliser ce stage, de découvrir le monde de la recherche et l'univers des réacteurs à sels fondus. Merci de m'avoir donné l'opportunité de présenter mes résultats lors de la réunion ISAC.

Merci à Thomas de nous avoir permis, avec Aurélien, de visiter les locaux et de rencontrer les équipes de Framatome Lyon au sein d'une journée très enrichissante.

Merci à Daniel et Michel pour les quelques discussions et conseils.

Merci à toute l'équipe MSFR pour ce stage !

Présentation du LPSC

Le Laboratoire de Physique Subatomique & Cosmologie (LPSC) est une unité mixte de recherche fondée en 1967 et est actuellement dirigé par Laurent Derome. Le LPSC est réparti sur deux sites : le site principal à Grenoble et la plateforme nationale souterraine à Modane. Le laboratoire est rattaché à plusieurs tutelles :

- l’Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du CNRS
- l’Université Grenoble Alpes (UGA)
- l’Institut Polytechnique de Grenoble (Grenoble INP)

Les activités du laboratoire sont centrées autour de 4 axes de recherches :

- Particules et noyaux
- Astroparticules, cosmologie et neutrinos
- Énergie et santé
- Accélérateurs, sources d’ions et plasma

L’équipe MSFR

Parmi les équipes de recherche travaillant sur l’axe énergie et santé, on retrouve les équipes : physique des réacteurs, applications médicales et MSFR. Ce stage a été réalisé au sein de cette dernière équipe MSFR. Elle est composée de deux membres permanents (Elsa Merle et Axel Laureau), de cinq doctorants (Max Begue, Louiliam Clot, Jad Halwani, Anna Maître et Thomas Sornay), ainsi que Michel Allibert et Daniel Heuer, respectivement collaborateur bénévole/expert et directeur de recherche émérite.

L’équipe MSFR travaille sur différents projets et concepts liés aux réacteurs à sels fondus (RSF), des réacteurs nucléaires de fission où le combustible est liquide et circulant et joue aussi le rôle de caloporteur. L’équipe développe le concept de Molten Salt Fast Reactor (MSFR) de référence. Le MSFR a été retenu parmi 6 autres concepts au forum international génération IV (GIF) en 2008. Ce concept est basé sur un spectre neutronique rapide et, s’appuie sur le cycle Th/U et un combustible de sel fluoré [1]. Par ailleurs, elle travaille sur le projet français ISAC et le projet européen MIMOSA.

Table des matières

Table des matières	i
Glossaire	iv
Liste des tableaux	v
Table des figures	v
1 Introduction	1
1.1 Contexte	1
1.2 Fonctionnement du parc nucléaire français	2
1.2.1 Le parc nucléaire français actuel	2
1.2.2 Le cycle du combustible en France	2
1.2.3 Les actinides mineurs	4
1.3 Les réacteurs à sels fondus	4
1.3.1 Intérêts des réacteurs à sels fondus	4
1.3.2 Les réacteurs régénérateurs	5
1.3.3 Les réacteurs incinérateurs/convertisseurs	5
1.4 Objectifs du stage	6
2 Scénarios et outils	6
2.1 Définition d'un scénario	6
2.2 Code ISF/SDF (Innovative Scenarios for the Future / Scénarios Du Futur)	6
2.2.1 Présentation du code ISF	6
2.2.2 Initialisation d'un scénario	6
2.2.3 Fonctionnement du code ISF	7
2.3 Calculs d'évolution	8
2.3.1 Code d'évolution neutronique REM	8
2.3.2 Code d'évolution neutronique SMURE	9
2.4 Scripts Python	10
3 Scénario ISAC	10
3.1 Études de scénarios de déploiement dans le cadre du projet national ISAC	10
3.2 Concept ARAMIS-A	10
3.3 Hypothèses du scénario ISAC	13
3.3.1 Scénario de déploiement	13
3.3.2 Hypothèses sur les enrichissements	13
3.3.3 Hypothèses sur le cycle du combustible	14
3.3.4 Hypothèses sur le parc avant 2038	14
3.3.5 Hypothèses sur le parc après 2038	16

3.4	Scénario sans ARAMIS-A	17
3.4.1	Déploiement du parc REL+RNR	18
3.4.2	Inventaires de matières	18
3.5	Scénario avec ARAMIS-A	20
3.5.1	Déploiement des RSF	20
3.5.2	Inventaires en matières	21
3.6	Comparaison des deux scénarios	22
4	Scénarios annexes	23
4.1	Scénarios envisagés	23
4.2	Scénario négaWatt	24
4.3	Scénarios TerraWater	24
4.4	Scénario avec des RAPTOR	25
4.4.1	Présentation du RAPTOR	25
4.4.2	Résultats du scénario avec RAPTOR	26
5	Conclusions et perspectives	26
5.1	Conclusions	26
5.1.1	Conclusion sur les types d'incinérateurs	26
5.1.2	Conclusion sur les outils	27
5.2	Perspectives	27
5.2.1	Simplification et amélioration du code ISF	27
5.2.2	Les futures études seront plus rapides	27
5.2.3	Les incinérateurs, la solution à la problématique des déchets nucléaires ?	27
Annexes		a
A	Figures des scénarios ISAC	a
B	Figures des scénarios TerraWater	b
B.1	Parc REL+RSF	b
B.2	Parc REL+RNR+RSF	c
C	Figure du scénario RAPTOR	e
D	Diagrammes DOT	g
E	Compétences	j
E.1	Compétence 1 – Concevoir ou réaliser des solutions techniques, théoriques ou expérimentales, permettant de répondre à un cahier des charges	j
E.1.1	Auto-évaluation	j
E.1.2	Niveau 1	j
E.1.3	Niveau 2	j
E.2	Compétence 2 – Mettre en œuvre une démarche de recherche fondamentale ou appliquée à des fins d'innovation	k
E.2.1	Auto-évaluation	k
E.2.2	Niveau 1	k
E.3	Compétence 3 – Coopérer dans une équipe ou en mode projet	l
E.3.1	Auto-évaluation	l
E.3.2	Niveau 1	l
E.3.3	Niveau 2	l

E.4	Compétence 5 – Piloter les transitions technologiques, environnemen- tales, sociétales	m
E.4.1	Analyse de l’impact environnemental et sociétal de votre projet . .	m
E.4.2	Proposer des solutions d’ingénierie durable	n
E.4.3	Auto-évaluation	o
Bibliographie		p

Glossaire

^{app}U Uranium appauvri.

^{nat}U Uranium naturel.

AIEA Agence Internationale de l'Énergie Atomique.

AM Actinides Mineurs.

ANDRA Agence National pour la gestion des Déchets RAdioactifs.

ARAMIS Advanced Reactor for Actinides Management in Salt.

CSD-V Colis Standard de Déchets Vitrifés.

CU Combustible Usé.

EPR Evolutionary Power Reactor.

ISAC Innovative System for Actinides Conversion.

ISF Innovative Scenarios for the Future.

LPSC Laboratoire de Physique Subatomique & Cosmologie.

LWR Light Water Reactor.

MCNP Monte-Carlo *N*-Particles transport code.

MIMOSA Multi-recycling strategies of LWR SNF focusing on MOlten SAlT technology.

MOX Mélange d'OXYdes.

MSFR Molten Salt Fast Reactor.

PF Produits de Fission.

PUREX Plutonium Uranium Refining by EXtraction.

RAPTOR Réacteur Alimenté en Plutonium et en Transuraniens pour Orano.

REL Réacteurs à Eau Légères.

REM Réaliser une Évolution avec MCNP.

REP Réacteur à Eau Pressurisée.

RNR-Na Réacteur à Neutrons Rapides – caloporteur sodium.

RSF Réacteur à Sels Fondus.

SMURE Serpent-MCNP Utility for Reactor Evolution.

SNF Spent Nuclear Fuel.

UER Unité d'Enrichissement ou de Retraitement.

UNE Uranium Naturel Enrichi.

UOX OXYdes d'Uranium.

URE Uranium de Retraitement Enrichi.

URT Uranium de ReTraitement.

Liste des tableaux

1.1	Caractéristique du parc nucléaire français actuel [6]	2
1.2	Teneur des principaux éléments d'un combustible UOX enrichi à 3,7 % utilisé à 45 GW.j/t [9]	4
3.1	Caractéristiques d'ARAMIS-A V-1	11
3.2	Alimentations/extractions sur 60 années d'ARAMIS-A V-1	12
3.3	Enrichissement massique en ^{235}U et teneur en Pu	13
3.4	Caractéristiques des réacteurs REP/EPR jusqu'en 2038	15
3.5	Caractéristiques des réacteurs à partir de 2038	16
3.6	Teneur des principaux éléments d'un combustible utilisé MOX de REP refroidis 5 ans	17
3.7	Scénario ISAC REL+RNR – Inventaire en matières radioactives	20
3.8	Comparaison des inventaires en 2150 des deux scénarios ISAC	23
4.1	Scénario TerraWater – Inventaire en matières radioactives en 2150	25
4.2	Caractéristiques du RAPTOR AM-Pu	25
4.3	Alimentations/extractions sur 120 années du RAPTOR AM-Pu	26
4.4	Scénario RAPTOR – Inventaire en matières radioactives en 2150	26

Table des figures

1.1	Cycle du combustible en France [8]	3
1.2	Vue schématique du fonctionnement d'un RSF [14]	5
2.1	Pictogrammes des objets dans ISF [15]	7
2.2	Principe de fonctionnement de l'algorithme ISF à chaque pas [15]	8
2.3	Simplification du fonctionnement des évomats et des réserves [15]	8
2.4	Calcul du k_{seuil} d'un MOX d'EPR pour un enrichissement en ^{235}U de 0,25 % et une teneur en Pu de 8,65 %	9
3.1	Schéma du fonctionnement simplifié d'ARAMIS-A dans ISF	11
3.2	Alimentations et extractions d'ARAMIS-A V-1	12
3.3	Bilan entrées/sorties d'ARAMIS-A V-1	12
3.4	Évolution de la puissance installée par génération de réacteur [27]	13
3.5	Fonctionnement schématique du parc avant 2038	15

3.6	Fonctionnement schématique du parc après 2038	17
3.7	Scénario ISAC – Déploiement du parc REL+RNR	18
3.8	Scénario ISAC REL+RNR – Consommation en ^{nat} U	18
3.9	Scénario ISAC REL+RNR – Réserves en combustible utilisé MOX (à gauche) et URT (à droite)	19
3.10	Scénario ISAC REL+RNR – Réserves en plutonium (la figure de droite est un zoom de la figure de gauche)	19
3.11	Scénario ISAC REL+RNR – Réserves en AM (à gauche) et Am (à droite, zoom de la figure de gauche)	20
3.12	Scénario ISAC – Déploiement du parc REL+RNR+RSF	21
3.13	Scénario ISAC REL+RNR+RSF – Réserves en combustible utilisé MOX (à gauche) et URT (à droite)	21
3.14	Scénario ISAC REL+RNR+RSF – Réserves en plutonium (la figure de gauche est un zoom de la figure de droite)	22
3.15	Scénario ISAC REL+RNR+RSF – Réserves en AM (à gauche) et Am (à droite, zoom de la figure de gauche)	22
4.1	Puissance installée des scénarios ISAC, négaWatt et TerraWater	24
4.2	Scénario négaWatt	24
A.1	Scénario ISAC – Réserves du parc REL+RNR	a
A.2	Scénario ISAC – Réserves du parc REL+RNR+RSF	a
B.1	Scénario TerraWater REL+RSF – Puissance installée	b
B.2	Scénario TerraWater REL+RSF – Nombre d’unités installées	b
B.3	Scénario TerraWater REL+RSF – Réserves	c
B.4	Scénario TerraWater REL+RNR+RSF – Puissance installée	c
B.5	Scénario TerraWater REL+RNR+RSF – Nombres d’unités installées	d
B.6	Scénario TerraWater REL+RNR+RSF – Réserves	d
C.1	Scénario RAPTOR – Puissance installée	e
C.2	Scénario RAPTOR – Nombre d’unités installées	e
C.3	Scénario RAPTOR – Réserves	f
D.1	Scénario ISAC – Diagramme DOT du parc REL+RNR	g
D.2	Scénario ISAC – Diagramme DOT du parc REL+RNR+RSF	h
D.3	Scénario négaWatt – Diagramme DOT du parc REL	i
E.1	Auto-évaluation de la compétence 1	j
E.2	Auto-évaluation de la compétence 2	k
E.3	Auto-évaluation de la compétence 3	l
E.4	Auto-évaluation de la compétence 5	o

1 Introduction

1.1 Contexte

Avec une électrification des usages et une demande énergétique en électricité toujours plus haute, la production d'électricité constitue un véritable défi. Les solutions de production à envisager se doivent d'être bas-carbone afin de satisfaire une neutralité carbone espérée à l'horizon 2050 en France et de faire face aux problèmes écologiques et environnementaux actuels [2].

La France produit environ 70 % de son électricité à partir de la filière nucléaire à partir du concept de réacteurs à eau pressurisée (REP), qui représente 80 % des réacteurs nucléaires dans le monde. L'uranium, naturellement présent sur terre, est indispensable au fonctionnement des réacteurs nucléaires actuels. Le minerai d'uranium naturel (^{nat}U) contient 0,72 % d' ^{235}U et 99,28 % d' ^{238}U . Le fonctionnement de ces réacteurs est basé sur une réaction en chaîne entretenue par la fission de l' ^{235}U et du ^{239}Pu qui représentent respectivement 60 % et 40 % de l'énergie produite. Dans un REP, l'uranium est enrichi à hauteur de 3-5 % en ^{235}U et 95-98 % en ^{238}U . Le ^{239}Pu est produit en réacteur par capture neutronique sur l' ^{238}U .

Les réserves identifiées et récupérables d'uranium (<USD 260 /kgU) étaient évaluées à 8 Mt en 2021 par l'AIEA [3]. Sachant que le parc mondial consommait 60 kt/an d'uranium en 2020, cela offrirait environ 130 années de ressources, en suivant le rythme actuel [3]. De plus, peu de prospections sont effectuées pour identifier de nouveaux gisements d'uranium, contrairement au pétrole par exemple, en raison des faibles quantités par réacteur requises au fonctionnement de ces derniers. La compétitivité de cette filière n'est pour le moment pas remise en question, le prix de l'extraction de l'uranium n'impactant que très peu le prix du kWh.

Les réacteurs nucléaires sont répartis en quatre générations. La génération I regroupe l'ensemble des réacteurs expérimentaux et des premiers réacteurs commerciaux qui ont été lancés entre 1950 et 1970. La génération II, plus compétitive, lui a succédé au début des années 1970. La majorité des réacteurs actuellement en exploitation dans le monde appartiennent à la génération II. En France, c'est le concept de REP qui a émergé. La génération III est basée sur les concepts de la génération II en augmentant significativement la sûreté et la durée de vie des réacteurs. Elle devrait permettre de renouveler le parc de génération II. Cette génération bénéficie du retour d'expérience des précédents réacteurs et intègre les enseignements des catastrophes nucléaires.

Les réacteurs de générations II et III semblent être de très bons candidats à court et moyen terme. Cependant, un déploiement massif n'apparaît pas comme une solution à long terme. En effet, un déploiement de la filière poserait plusieurs problèmes, notamment liés à l'épuisement des ressources naturelles d'uranium et à la gestion des déchets.

Pour résoudre les problématiques liées aux réacteurs de générations II et III, de nombreux concepts de réacteurs de générations IV sont envisagés. Ces réacteurs auront pour objectifs d'optimiser l'utilisation des ressources naturelles, de minimiser les déchets nucléaires, d'améliorer la sûreté, d'être plus compétitifs et de limiter la prolifération. Une des applications intéressantes de ces réacteurs est la possibilité de transmuter le plutonium et les actinides mineurs (AM). Ces actinides mineurs sont considérés actuellement comme des déchets et sont vitrifiés (processus irréversible) avec les produits de fission, pour être

stockés à long terme. Cette application est envisagée dans la filière des réacteurs à sels fondus (RSF). L'équipe MSFR du LPSC travaille notamment sur le projet français ISAC [4] et le projet européen MIMOSA [5] qui s'intéressent à ces problématiques.

1.2 Fonctionnement du parc nucléaire français

1.2.1 Le parc nucléaire français actuel

Le parc nucléaire français est composé actuellement de 56 réacteurs à eau pressurisée de génération II et d'un EPR de génération III qui a été mis en service en septembre 2024. Ces 57 réacteurs sont répartis en plusieurs paliers qui sont explicités dans le tableau 1.1.

Palier	CP0	CPY	P4	P'4	N4	EPR
Puissance (GW_e)	900	900	1300	1300	1450	1650
Nombre	4	28	8	12	4	1

TABEAU 1.1 – Caractéristique du parc nucléaire français actuel [6]

À noter que le parc REP est passé de 58 réacteurs à 56 réacteurs en 2020 suite à la fermeture des deux réacteurs CP0 de Fessenheim. Les 57 réacteurs en exploitation sont répartis sur 18 sites.

1.2.2 Le cycle du combustible en France

Le cycle du combustible nucléaire est "l'ensemble des opérations nécessaires pour approvisionner en combustible les réacteurs nucléaires" [7]. Le cycle complet s'ordonne à travers différentes étapes dont on pourra citer les plus importantes [7, 8] :

- l'extraction du minerai
- le traitement et la concentration du minerai
- la conversion
- l'enrichissement
- la fabrication du combustible
- l'utilisation du combustible en réacteur
- le retraitement du combustible usé (CU)

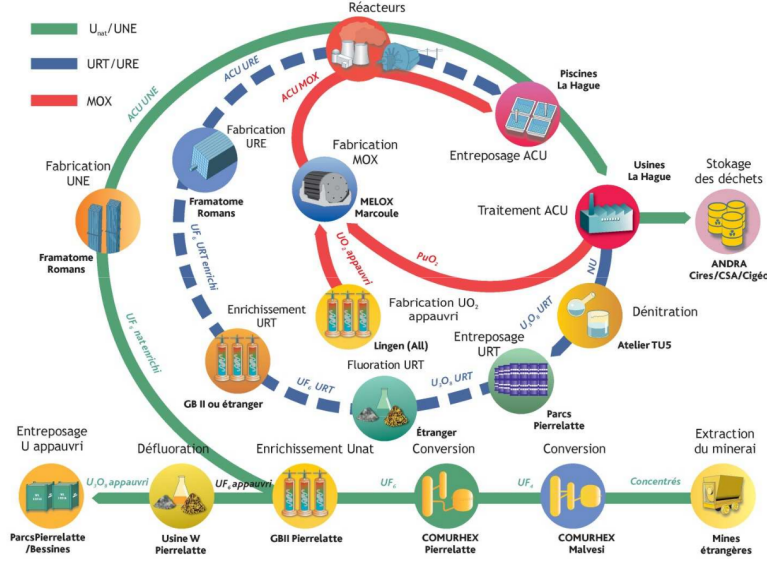


FIGURE 1.1 – Cycle du combustible en France [8]

Le cycle peut être qualifié "d'ouvert", de "semi-fermé" ou de "fermé" [9]. À l'inverse des États-Unis ou encore du Canada qui fonctionnent en cycle ouvert (utilisation unique du combustible), la France a fait le choix de fonctionner en cycle semi-fermé, aussi appelé monorecyclage du plutonium. L'oxyde d'uranium (UOX) est le combustible utilisé majoritairement dans le parc actuel. Il est composé d'uranium naturel enrichi (UNE) dont l'enrichissement en ^{235}U se situe entre 3 % et 5 % dans les REP. Une fois passé en réacteur, le combustible utilisé est retraité afin de séparer les matières valorisables. Le procédé PUREX permet de séparer le plutonium, l'uranium et, les actinides mineurs et les produits de fission (PF) des combustibles utilisés UOX. Le plutonium récupéré est réutilisé une unique fois (monorecyclage) pour fabriquer avec de l'uranium appauvri ($^{\text{app}}\text{U}$), le mélange d'oxydes (MOX). Ce combustible peut être utilisé dans 22 des réacteurs français [8]. Dans ces réacteurs, la part du combustible MOX au chargement est de 30 % et il est complété par de l'UOX. Concernant l'uranium de retraitement (URT), il peut être réenrichi et rechargé dans les réacteurs sous forme d'uranium de retraitement enrichi (URE) (actuellement deux réacteurs utilisent ce type de combustible). Les produits de fission et les actinides mineurs ne sont actuellement pas valorisables dans le cycle du combustible en France. Ils constituent les déchets ultimes, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent plus être traités et qu'ils ne sont pas valorisables. Ces déchets sont confinés dans une matrice de verre coulée dans des conteneurs en inox appelés CSD-V et actuellement entreposés à la Hague en prévision d'un stockage en couches géologiques profondes (projet Cigeo) [10].

La notion de Burn up (BU) est utilisée pour décrire le degré d'irradiation et l'énergie fournie par le combustible. Le Burn up (en $\text{GW}\cdot\text{t}$) peut être défini par :

$$BU = \frac{P_{th} \times JEPP}{tMLI \times \text{gestion}} \quad (1.1)$$

Avec :

- P_{th} : puissance thermique générée par le réacteur (en GW_{th}).
- $JEPP$ (Journées Équivalentes Pleine Puissance) : nombre de jours pendant lesquels le réacteur peut fonctionner à pleine puissance.

- *gestion* : représente la fraction du cœur qui est remplacée à chaque rechargement de combustible (souvent 1/4 ou 1/3).
- *tMLI* (tonnes de métal lourd initial) : quantité de combustible (en tonne) chargé dans le réacteur en début de cycle.

Élément	Teneur (%)
URT	95
PF	4
Pu	1
AM	0,1

TABLEAU 1.2 – Teneur des principaux éléments d’un combustible UOX enrichi à 3,7 % usé à 45 GW.j/t [9]

1.2.3 Les actinides mineurs

Les actinides représentent les noyaux lourds dont le numéro atomique est compris entre 89 et 103. L’uranium ($Z=92$) est l’élément le plus lourd présent naturellement. L’uranium et le plutonium sont appelés actinides majeurs. Les actinides mineurs sont produits par des captures neutroniques radiatives (n,γ) successives à partir de l’uranium dans les réacteurs nucléaires. Ils représentent environ 2,7 t/an de déchets à l’échelle du parc nucléaire français [9]. On distingue trois familles prédominantes : ^{237}Np , $^{241/243}\text{Am}$ et $^{243/244/245}\text{Cm}$ [11]. Ces radionucléides ont pour caractéristique d’être très radiotoxiques et d’avoir une durée de vie longue.

1.3 Les réacteurs à sels fondus

1.3.1 Intérêts des réacteurs à sels fondus

Les RSF sont une famille de réacteurs de génération IV. Ces réacteurs utilisent un combustible liquide sous forme de sel fondu (fluorure ou chlorure) contenant la matière combustible. Dans la plupart des concepts de RSF, ce sel combustible circule et joue également le rôle de caloporteur, comme dans les RSF considérés lors de ce stage. Ce combustible est doté d’un grand potentiel d’un point de vue de la sûreté, mais aussi en raison des possibilités de pilotabilité qu’il offre [12]. La chaleur produite par les réactions dans le combustible est directement déposée dans le caloporteur, à l’inverse des REP où la chaleur est transmise par l’intermédiaire d’une gaine en zirconium. D’un point de vue de la sûreté, une rapidité dans les contre-réactions thermiques est permise vis-à-vis de la caractéristique énoncée précédemment. Ces réactions auto-stabilisent le réacteur et ont lieu beaucoup plus rapidement et donc efficacement que dans un REP. L’état du combustible – sous forme liquide – offre la possibilité d’une part d’ajout du combustible ou de ponction de celui-ci sans nécessiter un arrêt du réacteur et, d’autre part, il permet la vidange du cœur en quelques minutes dans le cas de situation accidentelle. L’une des caractéristiques intéressantes des RSF est l’utilisation des actinides mineurs comme combustible. Les perspectives de retraitement de ces actinides seront discutées dans la sous-section 1.3.3 dédiée aux incinérateurs.

Les RSF sont composés de trois circuits principaux : le circuit combustible, le circuit intermédiaire et le circuit de conversion. La chaleur produite dans le circuit combustible

est transférée par des échangeurs de chaleur au circuit intermédiaire. Cette énergie est transmise au circuit de conversion qui produit de l'électricité *via* des turbines [13].

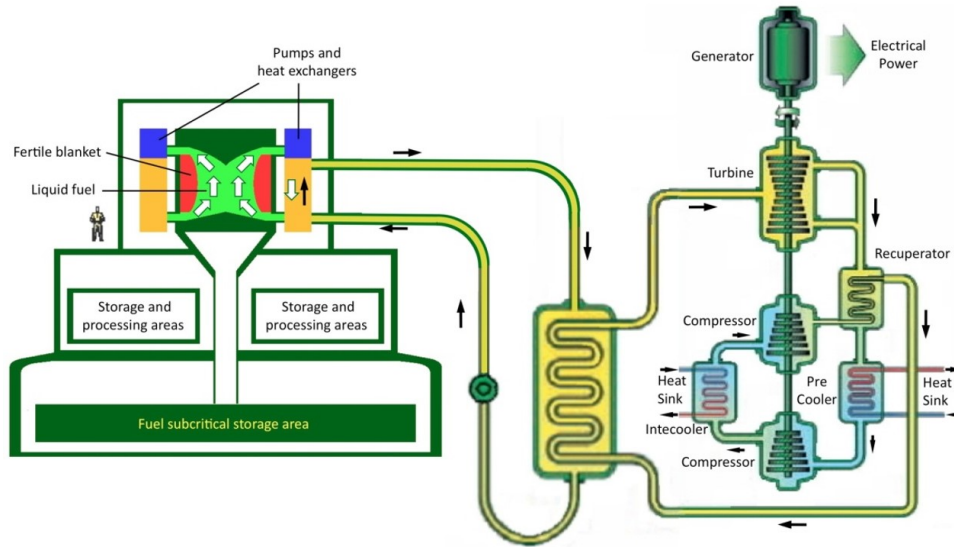
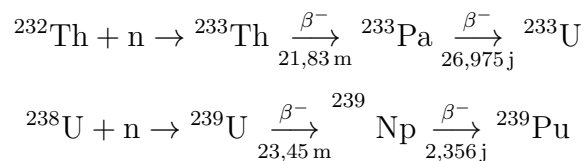


FIGURE 1.2 – Vue schématique du fonctionnement d'un RSF [14]

1.3.2 Les réacteurs régénérateurs

On distingue actuellement deux concepts de RSF destinés à des utilisations différentes : les régénérateurs et les incinérateurs. Le concept des régénérateurs repose sur l'utilisation des deux isotopes présents en abondance dans la nature : le ^{232}Th et l' ^{238}U . L'objectif des régénérateurs est de reproduire leur propre combustible à partir de ces deux isotopes dit fertiles, ce qui permet d'alimenter ces réacteurs directement avec les stocks de ^{238}U (99,3% de l' $^{\text{nat}}\text{U}$) et de ^{232}Th (2-3 fois plus abondant que l'uranium) disponibles sur terre au lieu de seulement l' ^{235}U . Ces deux éléments fertiles permettent, *via* capture neutronique puis par désintégration β^- , de créer des éléments fissiles (^{233}U et ^{239}Pu) comme présenté dans les deux cycles ci-dessous, respectivement appelés Th/U et U/Pu [15].



Les sels fluorures sont plutôt adaptés au cycle Th/U tandis que les sels chlorures le sont plutôt pour le cycle U/Pu [13]. Dans le cas où le réacteur consomme autant de combustible qu'il en génère, il est qualifié d'isogénérateur et dans le cas où il génère plus de combustible qu'il n'en consomme, il est qualifié de surgénérateur. Ce concept est particulièrement intéressant, car la totalité de l'uranium ou du thorium alimenté participe à la production d'énergie.

1.3.3 Les réacteurs incinérateurs/convertisseurs

Le deuxième concept de RSF est celui d'incinérateurs, aussi appelés convertisseurs. Ils pourraient être une solution pour réduire la radiotoxicité des déchets nucléaires. Ces réacteurs de génération IV à neutrons rapides offrent la possibilité, grâce à leur spectre, de

transmuter les actinides mineurs et le plutonium, c'est-à-dire de transformer ces éléments en autres radionucléides dont la durée de vie est plus courte. L'inventaire en actinides mineurs serait diminué, allégeant ainsi la pression sur les sites de stockage [10].

1.4 Objectifs du stage

L'objectif de ce stage est d'étudier des scénarios de déploiement de RSF au sein du parc nucléaire français à l'aide du code Innovative Scenarios for the Future (ISF). Cela a nécessité dans un premier temps de reconstituer le déploiement historique des REP français avant de pouvoir intégrer des réacteurs de générations IV aux scénarios. Plus particulièrement, il sera question de considérer des RSF incinérateurs d'actinides mineurs afin de convertir les stocks de ces actinides produits par les réacteurs de génération II, III et IV et considérés comme des déchets actuellement.

2 Scénarios et outils

2.1 Définition d'un scénario

Afin de simuler le potentiel déploiement de différentes filières de réacteurs électrogènes au sein du parc nucléaire français, il est nécessaire d'établir des scénarios. Les scénarios qui seront réalisés devront simuler l'évolution d'un parc électronucléaire en respectant des contraintes pré-établies, des contraintes d'évolution et en cherchant à satisfaire un objectif.

2.2 Code ISF/SDF (Innovative Scenarios for the Future / Scénarios Du Futur)

2.2.1 Présentation du code ISF

Le code ISF développé par Daniel Heuer dans l'environnement DALI – une boîte à outils en langage C – au LPSC depuis 20 ans permet de modéliser des parcs électronucléaires et de réaliser des scénarios de déploiement de réacteurs [16]. L'un des intérêts majeurs du code est la possibilité d'intégrer des RSF aux scénarios et sa rapidité d'exécution liée au fait qu'il n'intègre pas de calculs d'évolutions. Ces calculs d'évolutions doivent être réalisés en amont afin de définir les entrées du code.

2.2.2 Initialisation d'un scénario

Le code ISF met en relation des objets qui permettent de modéliser un cycle du combustible d'un parc nucléaire [17]. Ci-dessous, une liste des différents objets du code ISF :

- **Matériaux** : un matériau est défini par un nom et un vecteur isotopique.
- **Réserves** : une réserve représente le stock d'un matériau. Ce stock est mis à jour à chaque pas de temps en fonction des quantités de matériaux utilisées ou transformées dans les réacteurs et les unités.

- **Evomats** : un évomat définit l'évolution d'un matériau. Il sert à représenter une quantité de matériau alimentée ou extraite d'un réacteur (en t/an). Un évomat fait un lien entre une réserve d'un matériau et un réacteur.
- **Réacteurs** : un réacteur est défini par ses caractéristiques et, ses entrées et ses sorties (des évomats).
- **Unité d'Enrichissement ou de Retraitement (UER)** : une UER est un réacteur de puissance nulle.
- **Parcs** : un parc met en relation le tout.
- **Objectifs** : un objectif définit la demande électrique (en GW_e ou TWh) que le parc cherche à satisfaire.

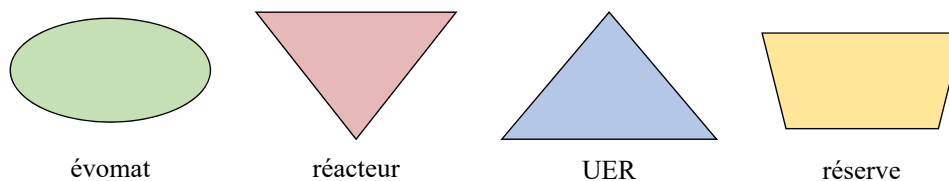


FIGURE 2.1 – Pictogrammes des objets dans ISF [15]

Ces objets peuvent être définis dans des fichiers au format `.dat`. Ils sont ensuite inclus dans le fichier d'entrée **Scenario.dat** nécessaire à l'exécution du code ISF.

2.2.3 Fonctionnement du code ISF

Le code ISF est un algorithme à pas de temps qui sera d'une année dans toute la suite du rapport. À chaque pas de temps, le code cherche à construire un parc électronucléaire qui satisfasse les objectifs de demande électrique. L'algorithme se base sur une série de tests afin de vérifier si l'on peut démarrer des réacteurs appartenant à des filières. Ces filières sont ordonnées par priorité de démarrage. Ainsi, on essaie de démarrer des réacteurs d'une filière n et on vérifie si on a le droit de démarrer un réacteur de cette filière. Ces restrictions peuvent être : des dates de mise en service, un nombre maximum de réacteurs ou un nombre maximum de réacteurs par an. Si ces restrictions sont vérifiées, on regarde si l'on possède le stock de matériaux nécessaire pour alimenter des réacteurs de cette filière sur toutes leurs durées de vie. Si ce stock est disponible, on démarre des réacteurs de la filière n , sinon on démarre des UER. Si les UER ont permis de fabriquer assez de ressources pour démarrer des réacteurs de la filière n , on démarre des réacteurs de la filière n . Sinon, on passe à la filière $n - 1$ et on réapplique le même protocole à cette filière. À chaque fois qu'un réacteur est démarré, on vérifie si la demande électrique est atteinte et le cas échéant, on passe au pas de temps suivant. Il se peut qu'on tente de démarrer les n filières successivement sans réussir à satisfaire la demande électrique. La sortie du code pour chaque année est alors une réussite ou un échec. À noter qu'un échec sur une année ne stoppe pas l'algorithme, le code passe simplement au pas de temps suivant.

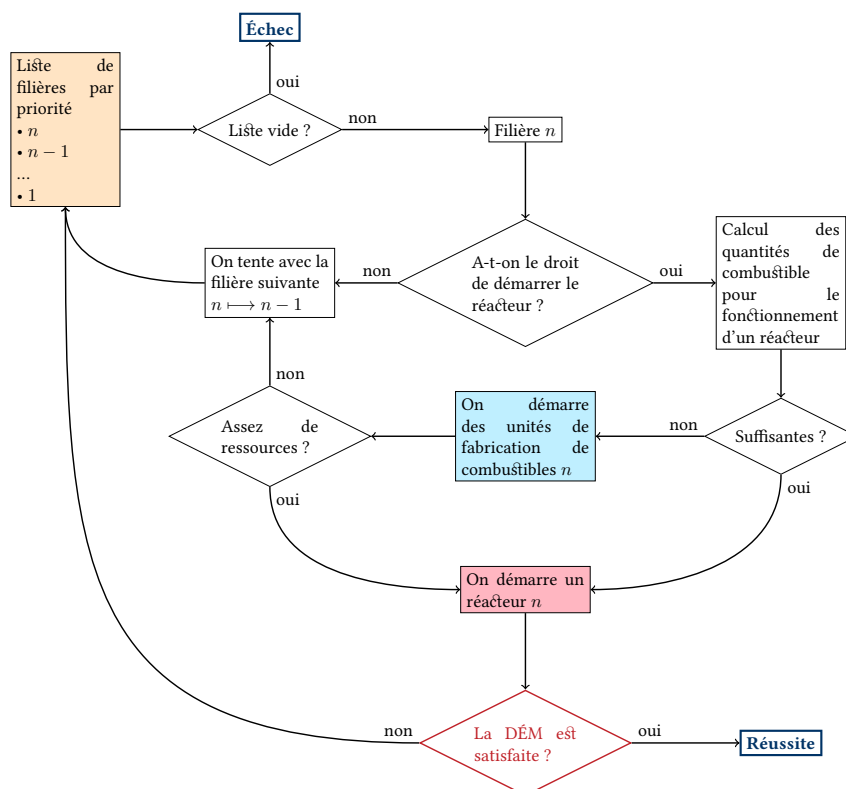


FIGURE 2.2 – Principe de fonctionnement de l’algorithme ISF à chaque pas [15]

Le code ISF permet de recueillir différentes données en sortie telles que la puissance installée, les réserves de matériaux, ou encore le nombre d’unités installées en fonction du pas de temps choisi par l’utilisateur. Une vue schématique du parc mis en place au format .dot est aussi générée (cf. annexe D).

Les figures qui seront présentées dans ce rapport utiliserons la simplification de la figure 2.3 pour plus de lisibilité.

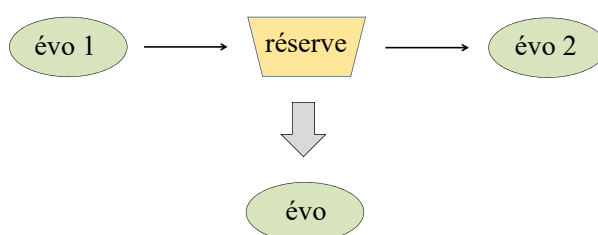


FIGURE 2.3 – Simplification du fonctionnement des évomats et des réserves [15]

2.3 Calculs d’évolution

2.3.1 Code d’évolution neutronique REM

Le code REM est utilisé afin de calculer les évolutions des RSF [18, 19, 20, 21]. Il a été développé au LPSC par Daniel Heuer et plusieurs doctorants. Dans le cadre du stage, les calculs REM ont été réalisés en amont des scénarios et permettent de construire les fichiers d’entrées des RSF dans ISF. Un module de relecture permet d’extraire des simulations

les données des isotopes qui nous intéressent. Néanmoins, il n'y a pas de couplage entre REM et ISF. Cela nécessite une adaptation (par exemple *via* un script Python) entre ces deux codes afin de transformer les fichiers de sorties de REM en fichiers d'entrées du code ISF.

2.3.2 Code d'évolution neutronique SMURE

Le code SMURE réalise des calculs d'évolution à partir du code neutronique stochastique SERPENT [22]. Les évolutions des REP et des EPR utilisées dans ce rapport ont été calculées à partir de SMURE.

Afin de découvrir et de prendre en main ce code, des calculs ont été réalisés sur des EPR UOX et MOX. L'objectif a notamment été de comprendre comment était fabriqué un combustible MOX possédant un burn up maximum (BU_{max}) et comment la teneur en plutonium (TPu) et l'enrichissement de l'^{app}U étaient choisis. Pour cela, on détermine, à partir du coefficient de multiplication de SMURE d'un crayon de MOX k_{smure} , une nouvelle valeur k_{frac} [23]. Ce k_{frac} permet de prendre en compte la gestion par tiers ($N = 3$) du cœur d'EPR et correspond à une moyenne glissante par tiers de k_{smure} .

$$k_{frac}(bu) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} k_{smure}(bu + i \frac{BU_{max}}{N}) \quad (2.1)$$

Si $bu^{(i)} = bu + i \frac{BU_{max}}{N} > BU_{max}$ alors $bu^{(i)} = bu + i \frac{BU_{max}}{N} - BU_{max}$.

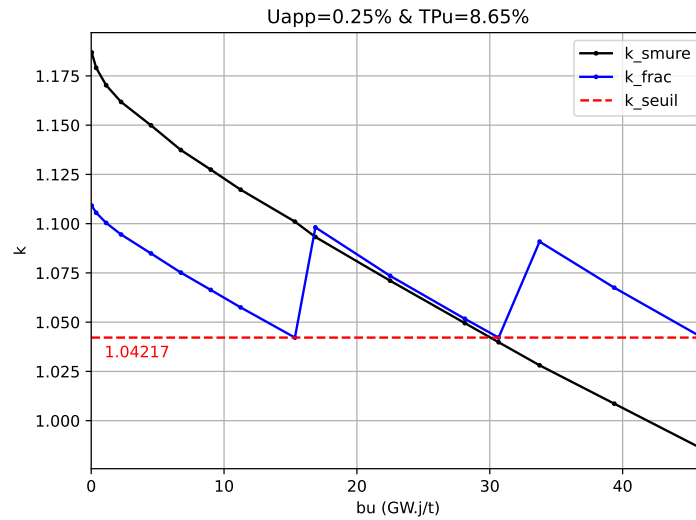


FIGURE 2.4 – Calcul du k_{seuil} d'un MOX d'EPR pour un enrichissement en ^{app}U de 0,25 % et une teneur en Pu de 8,65 %

Ce calcul permet de déterminer le k_{seuil} correspondant à la valeur minimale du k_{frac} qui apparaît N fois lors de ce calcul. Ce k_{seuil} doit être au-dessus d'environ 1,03 pour que le combustible MOX étudié soit capable d'atteindre le BU cible [24]. À noter que l'enrichissement et la teneur de la figure précédente ont été choisis pour vérifier les données utilisées dans le scénario ISAC.

2.4 Scripts Python

Au cours de ce stage, des scripts dans le langage Python ont été développés afin de faire du post traitement de données ou afin d'adapter des fichiers de sorties du code REM aux entrées du code ISF. Voici une liste exhaustive des scripts python créés :

- **alimentation.py** : génère les fichiers d'alimentations des RSF pour ISF à partir des fichiers de sorties de REM.
- **extraction.py** : génère les fichiers d'extractions des RSF pour ISF à partir des fichiers de sorties de REM.
- **kseuilSmure.py** : détermine le k_{seuil} à partir d'un fichier de sortie de SMURE.
- **RecupDonneesISAC.py** : récupère les données de sorties du code ISF du scénario ISAC dans un fichier .csv.
- **TracerAlimExtrac.py** : trace les figures 3.2 et 3.3.
- **TracerDemande.py** : trace la figure 4.1.

3 Scénario ISAC

3.1 Études de scénarios de déploiement dans le cadre du projet national ISAC

Plusieurs partenaires industriels et académiques français (le CEA, le CNRS, EDF, Framatome et Orano) ont lancé en 2022 le projet ISAC dans le cadre du plan de relance France 2030 [25]. Ce projet est centré autour du réacteur incinérateur d'actinides ARAMIS-A. Le projet ISAC bénéficie des études R&D du concept ARAMIS-P (P pour plutonium), étudié par Orano et le CEA à des fins de conversion du plutonium. Plus principalement, les objectifs du projet sont de consolider les processus de conception de ce type de réacteur sur les propriétés des sels, la corrosion des matériaux et les procédés de recyclage des actinides mineurs.

Les scénarios réalisés dans le cadre de ce stage pourront permettre notamment de comparer les codes de scénarios des partenaires impliqués dans le projet.

3.2 Concept ARAMIS-A

ARAMIS-A est un réacteur à sels fondus incinérateur d'actinides. Il est doté d'un spectre neutronique rapide. ARAMIS-A a pour objectif d'incinérer de l'américium, voire des actinides mineurs à partir d'un sel combustible chlorure $\text{NaCl}-\text{MgCl}_2-(\text{Am},\text{Pu})\text{Cl}_3$. Il est étudié dans le cadre du projet ISAC. Plusieurs concepts et géométries sont actuellement à l'étude et ont déjà donné différentes versions d'ARAMIS-A. Pour les scénarios suivants impliquant ARAMIS-A, la version V-1 du projet a été utilisée (cf. tableau 3.1).

Caractéristiques	ARAMIS-A V-1
Puissance thermique	300 MW _{th}
Puissance nominale	120 MW _e
Facteur de charge	100 %
Nombre maximum	18
Mise en service	2040
Rythme de déploiement	2/an
Durée de vie	60 ans

TABLEAU 3.1 – Caractéristiques d’ARAMIS-A V-1

Le fonctionnement simplifié d’ARAMIS-A dans le code ISF est représenté dans la figure 3.1. Cette figure permet d’identifier les entrées et les sorties, ainsi que les sources d’approvisionnements d’ARAMIS-A.

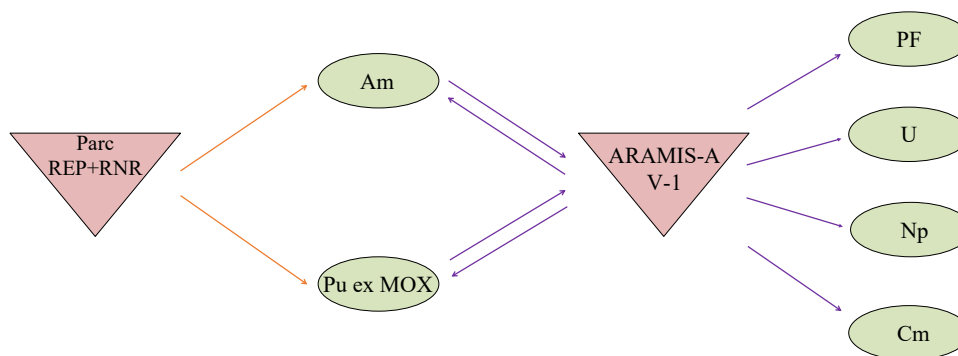


FIGURE 3.1 – Schéma du fonctionnement simplifié d’ARAMIS-A dans ISF

L’uranium produit par ARAMIS-A (cf. tableau 3.2) est majoritairement de l’ ^{234}U (environ 90 %) provenant de la désintégration α du ^{238}Pu .

Les alimentations d’ARAMIS-A ne sont pas constantes et changent à chaque pas de temps (ici une année). Ces évolutions ont été calculées à partir du code d’évolution REM. Les évolutions sont converties au format adéquat aux entrées du code ISF via les deux scripts alimentation.py et extraction.py. Trois phases sont à distinguer : le chargement, l’alimentation/extraction en continu et le déchargement. Ces trois phases sont bien identifiables sur la figure 3.3. Les valeurs indiquées sur les figures 3.2 et 3.3 correspondent respectivement aux alimentations ou aux extractions sur la première ou dernière année.

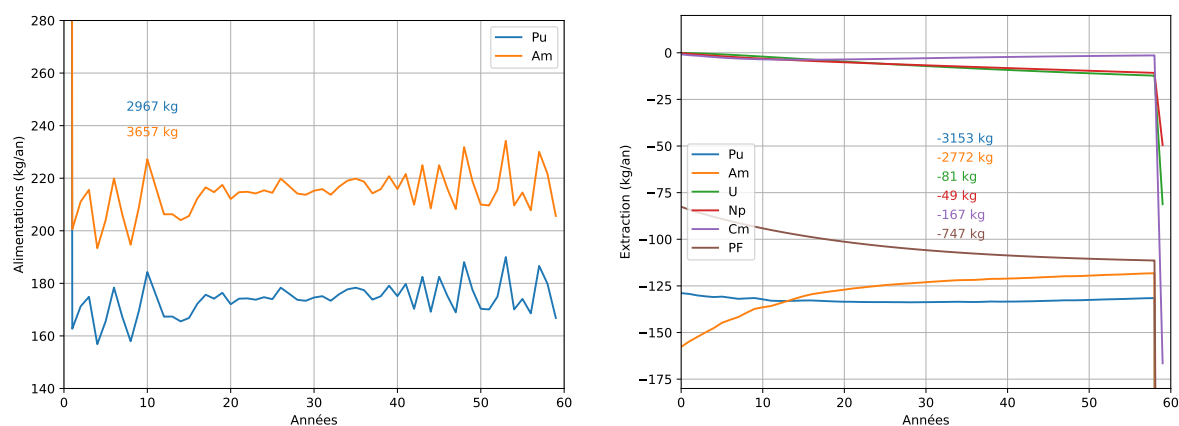


FIGURE 3.2 – Alimentations et extractions d'ARAMIS-A V-1

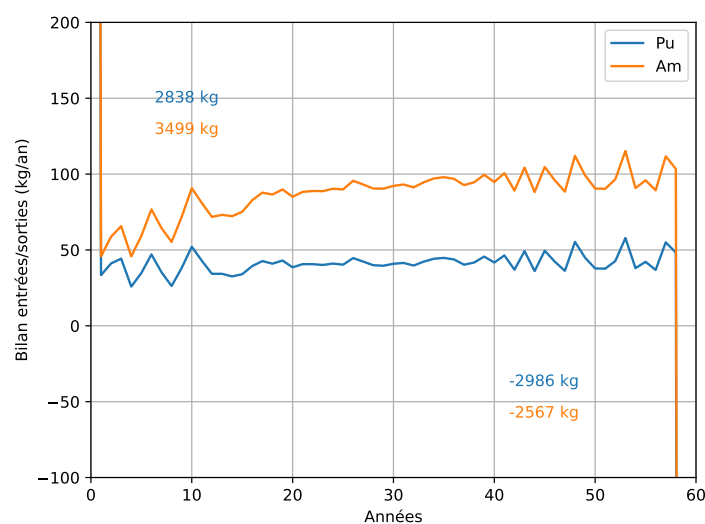


FIGURE 3.3 – Bilan entrées/sorties d'ARAMIS-A V-1

L'alimentation d'ARAMIS-A est d'environ 55 % d'Am et 45 % de Pu. Ce pourcentage élevé d'Am est en accord avec l'objectif de stabilisation des stocks d'Am du parc grâce à ARAMIS-A.

Élément	Alimentation	Extraction
Am (t)	16,298	10,300
Pu (t)	13,223	10,980
PF (t)	-	6,808
U (kg)	-	467
Np (kg)	-	420
Cm (kg)	-	320

TABLEAU 3.2 – Alimentations/extractions sur 60 années d'ARAMIS-A V-1

3.3 Hypothèses du scénario ISAC

L'objectif de cette partie est de présenter les hypothèses ayant été faites afin de produire les scénarios de déploiement étudiés dans le cadre du projet ISAC à l'aide du code ISF.

3.3.1 Scénario de déploiement

Le scénario de déploiement utilisé pour le projet ISAC comprend plusieurs phases :

- 2020-2050 : mise à l'arrêt du parc historique
- 2020-2040 : mise en service du parc de génération III (40 GW_e)
- 2040-2050 : mise en service du parc de génération IV, première phase (20 GW_e)
- 2080-2100 : mise en service du parc de génération IV, deuxième phase (40 GW_e)

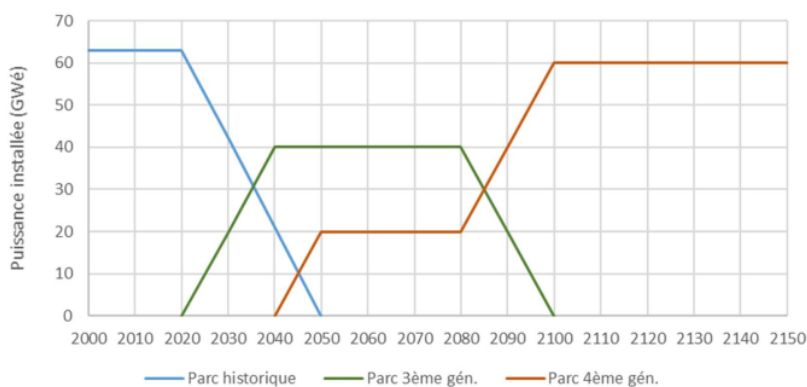


FIGURE 3.4 – Évolution de la puissance installée par génération de réacteur [27]

3.3.2 Hypothèses sur les enrichissements

Le premier paramètre qu'il est nécessaire de fixer concerne l'enrichissement des combustibles. Ces enrichissements permettent de déterminer les quantités d'^{nat}U nécessaires pour produire une certaine quantité d'UNE. Pour cela, il suffit d'établir deux équations de conservation (de l'uranium 235 et de l'uranium 238), avec x_{nat} , x_{enr} et x_{app} représentant l'enrichissement massique en ²³⁵U. Cette donnée est nécessaire pour déterminer les entrées/sorties des UER.

$$\begin{cases} {}^{nat}\text{U} \times x_{nat} = {}^{enr}\text{U} \times x_{enr} + {}^{app}\text{U} \times x_{app} \\ {}^{nat}\text{U} = {}^{enr}\text{U} + {}^{app}\text{U} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} {}^{nat}\text{U} = {}^{enr}\text{U} \times \frac{x_{enr} - x_{app}}{x_{nat} - x_{app}} \\ {}^{app}\text{U} = {}^{nat}\text{U} - {}^{enr}\text{U} \end{cases} \quad (3.1)$$

Matériau	Enrichissement/Teneur
^{nat} U (% ²³⁵ U)	0,72 %
UNE (% ²³⁵ U)	4,5 %
^{app} U (% ²³⁵ U)	0,25 %
MOX (% Pu)	8,65 %

TABEAU 3.3 – Enrichissement massique en ²³⁵U et teneur en Pu

3.3.3 Hypothèses sur le cycle du combustible

1. La gestion MOX sur les REP/EPR est utilisée jusqu'en 2038.
2. La production de MOX est limitée à environ 100 t/an jusqu'en 2038.
3. Le stock de combustible utilisé MOX à la fin de l'année 2004 est de 700 t.
4. La séparation poussée des actinides mineurs en neptunium, américium, curium commence en 2038. Avant cette date, les actinides mineurs sont vitrifiés.
5. Le combustible utilisé UOX des REP/EPR et le combustible utilisé MOX des RNR-Na sont séparés directement à la sortie des réacteurs.
6. L' ^{nat}U ne sera pas considéré comme un facteur limitant. Néanmoins, on pourra relever la quantité d' ^{nat}U consommée *a posteriori*.
7. Si le stock de plutonium ex MOX est vide, on se réserve la possibilité de piocher dans les réserves de plutonium ex UOX.

Le point n°3 fait référence à l'inventaire réalisé par l'ANDRA paru en 2006 [28]. C'est ce paramètre qui nous permettra de déterminer la date de début de la gestion MOX afin de s'approcher au plus près des 700 t de combustible utilisé MOX fin 2004.

3.3.4 Hypothèses sur le parc avant 2038

Afin de réaliser le scénario avec les trajectoires du 3.3.1, il est nécessaire de reproduire le parc historique dans ISF. Cela requiert de définir une courbe de demande passée et future. La puissance installée du parc nucléaire français entre 1970 et 2024 a été récupérée sur le site PRIS de l'AIEA [29]. Concernant la demande future, elle est considérée constante dans ce scénario. Il a été décidé de rassembler le parc REP/EPR en 5 catégories de réacteurs :

- CP UOX (CP0+CPY UOX+CPY URE)
- CPY MOX (MOXé à 30 %)
- PN4 (P4+P'4+N4)
- EPR UOX
- EPR MOX (MOXé à 30 %)

Ne disposant pas du vecteur isotopique de l'URE, les CPY URE ont été considérés comme des CPY UOX.

À l'inverse des RSF, l'alimentation des REP/EPR est constante durant toute la durée de l'évolution. Le combustible utilisé MOX des EPR MOX est déchargé avec un retard de cinq ans. Ce fonctionnement n'est pas applicable aux CPY MOX à cause d'une robustesse du code ISF. Les caractéristiques de ces nouveaux réacteurs ont été pondérées en fonction de leurs nombres dans le tableau 3.4. Toutes les alimentations et productions des REP/EPR ont été calculées à partir du code SMURE en dehors du stage et ont été fournies. Les données ont été arrondies au kg pour plus de lisibilité.

	CP UOX	CPY MOX ¹	PN4	EPR UOX	EPR MOX
Caractéristiques :					
Puissance nominale (GW _e)	903	906	1340	1550	1550
Facteur de charge	77,92 %	77,92 %	77,92 %	81,76 %	81,76 %
Nombre maximum	14	20	24	16	11
Mise en service	1978-1985	1980-1988	1985-2002	2020-2040	2020-2038
Rythme de déploiement ²	2/an	3/an	2/an	2/an	1/an
Durée de vie	50 ans	50 ans	50 ans	60 ans	60 ans
Alimentation :					
UNE (t/an)	14,367	10,052	20,052	24,213	16,946
^{app} U (t/an)	-	4,702	-	-	8,247
Pu ex-UOX (kg/an)	-	448	-	-	803
Production :					
URT (t/an)	13,370	9,354	18,660	22,533	15,773
PF (kg/an)	909	636	1470	1366	956
Pu ex-UOX (kg/an)	162	113	226	273	191
AM (kg/an)	20	14	28	34	24
CU MOX (t/an)	-	5,96 ³ / 5,15 ⁴	-	-	9,227

¹ Avant 1999, les CPY MOX adoptent le fonctionnement des CP UOX.

² Rampes de lancements constantes sur la durée de mise en service.

³ De 1999 à 2009

⁴ À partir de 2009

TABEAU 3.4 – Caractéristiques des réacteurs REP/EPR jusqu'en 2038

Le fonctionnement du parc avant 2038 est décrit dans la figure 3.5 avec le formalisme du code ISF simplifié conformément aux figures 2.1 et 2.2. Les REP/EPR ayant le même fonctionnement – seules les quantités diffèrent – ils ont été confondus en une seule classe de réacteurs.

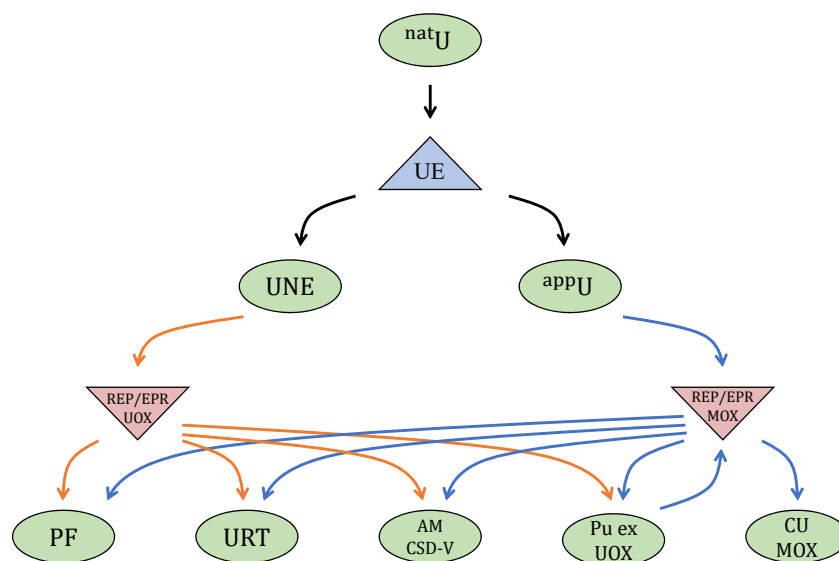


FIGURE 3.5 – Fonctionnement schématique du parc avant 2038

3.3.5 Hypothèses sur le parc après 2038

Le fonctionnement du parc diffère à partir de 2038. Premièrement, la séparation poussée des actinides mineurs est mise en place et ils ne sont plus vitrifiés à partir de 2038. Deuxièmement, la première phase de lancement des réacteurs de génération IV commence à partir de 2040. Les réacteurs de génération IV considérés dans ce scénario seront des RNR-Na V2B et des ARAMIS-A [26, 27]. Un RNR-Na est un réacteur à spectre rapide utilisant du sodium liquide pour le refroidissement. Ce type de réacteur ouvre des perspectives intéressantes vis-à-vis de la fermeture du cycle du combustible. Le modèle considéré (V2B) utilise un combustible MOX et est légèrement surgénérateur en plutonium (cf. tableau 3.5). Le choix des filières de réacteur à considérer a été fait par le partenaire chargé de cette tâche du projet (le CEA). On nommera V2B les RNR-Na V2B dans la suite du rapport. Les données des V2B sont internes aux projets ISAC. Les deux versions de V2B possèdent les mêmes caractéristiques, mais ont des alimentations/extractions différentes. Les éléments de l'onglet production des V2B sont déchargés avec un retard de cinq ans afin de prendre en compte le refroidissement des combustibles. Les caractéristiques de ces réacteurs sont énoncées dans le tableau 3.5.

	PN4	EPR UOX/ EPR MOX ¹	RNR-Na V2B transitoire	RNR-Na V2B équilibre
Caractéristiques :				
Puissance nominale (GW _e)	1340	1550	1450	1450
Facteur de charge	77,92 %	81,76 %	81,76 %	81,76 %
Nombre maximum	24	16+11	17 ²	-
Mise en service	1985-2002	2020-2040	2040-2050	2080
Rythme de déploiement	2/an	2/an + 0/an	2/an	3/an
Durée de vie	50 ans	60 ans	60 ans	60 ans
Alimentation :				
UNE (t/an)	20,052	24,213	-	-
^a PPU (t/an)	-	-	9,001	-
URT (t/an)	-	-	-	9,109
Pu ex-UOX (t/an)	-	-	1,757	-
Pu ex-MOX (t/an)	-	-	-	1,670
Am (kg/an)	-	-	14	-
Production :				
URT (t/an)	18,660	22,533	-	7,935
uranium ex MOX (t/an)	-	-	7,857	-
PF (t/an)	1,131	1,366	1,075	1,078
Pu ex-UOX (kg/an)	226	273	1767	-
Pu ex-MOX (t/an)	-	-	-	1,721
Am (kg/an)	7	8	68	38
Np (kg/an)	18	21	4	5
Cm (kg/an)	4	5	6	2

¹ Les EPR MOX adoptent le fonctionnement des EPR UOX à partir de 2038

TABLEAU 3.5 – Caractéristiques des réacteurs à partir de 2038

À partir de 2038, le combustible utilisé MOX produit par le parc REP/EPR est traité dans une unité de retraitement (UR) qui lui est dédié. Ce combustible est séparé selon les

teneurs du tableau 3.6.

Élément	Proportion (%)
U	86,642
PF	7,437
Pu	5,220
Am	0,428
Cm	0,205
Np	0,025

TABLEAU 3.6 – Teneur des principaux éléments d’un combustible utilisé MOX de REP refroidis 5 ans

Le fonctionnement du parc après 2038 est décrit dans la figure 3.6. Les REP/EPR MOX ne sont pas représentés en raison de l’arrêt de la gestion MOX à partir de 2038. Ceux-ci fonctionnent comme les REP/EPR UOX.

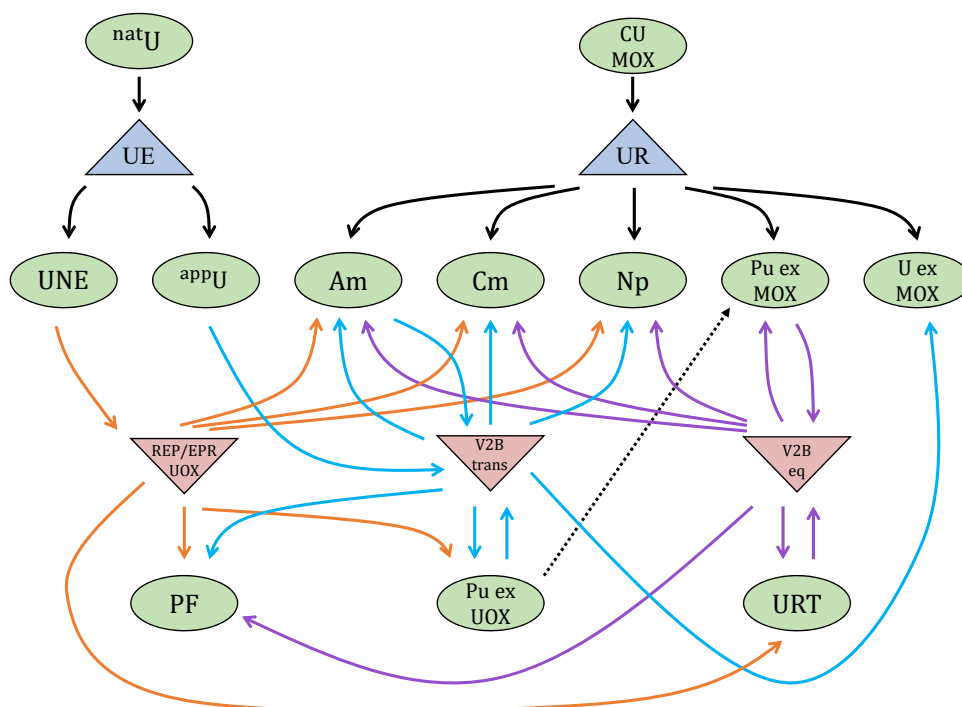


FIGURE 3.6 – Fonctionnement schématique du parc après 2038

Les couleurs des flèches ont pour seul objectif d’être propres à un type de réacteur. Une flèche pointant vers un réacteur indique une entrée, tandis qu’une flèche sortante indique une sortie. La flèche noire en pointillé indique la possibilité de transférer du plutonium ex MOX dans la réserve de plutonium ex UOX si ce dernier stock est vide.

3.4 Scénario sans ARAMIS-A

L’objectif de cette partie est de construire le parc sans RSF (on le nommera parc REL+RNR). Ce scénario servira de base de comparaison pour le scénario avec des incinérateurs d’actinides.

3.4.1 Déploiement du parc REL+RNR

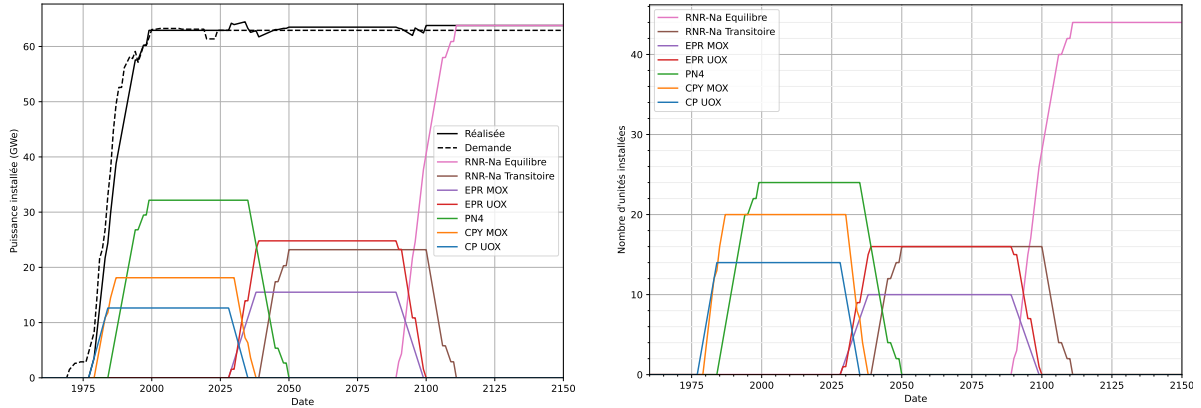


FIGURE 3.7 – Scénario ISAC – Déploiement du parc REL+RNR

On note ici une particularité du code ISF lié au déploiement des réacteurs. Même si la demande électrique subit une baisse, par exemple en 2020, aucun réacteur n'est arrêté. Ainsi, les EPR ne sont lancés qu'à partir de la fermeture des premiers CP0 aux alentours de 2028. Ceci ne permet donc pas d'entamer le lancement de la génération III en 2020 conformément à la figure 3.4. Cela a notamment pour conséquence l'obligation d'augmenter le rythme de déploiement afin de satisfaire continuellement la demande électrique sur les périodes de transition entre filières de réacteurs.

3.4.2 Inventaires de matières

La consommation annuelle d' ^{nat}U est marquée par deux pics de production. Le premier est lié au lancement du parc historique et le second au lancement de la filière EPR. Ces pics sont une conséquence du fonctionnement du code ISF qui requiert la quantité de combustible nécessaire au fonctionnement d'un réacteur durant toute sa durée de fonctionnement avant de le lancer.

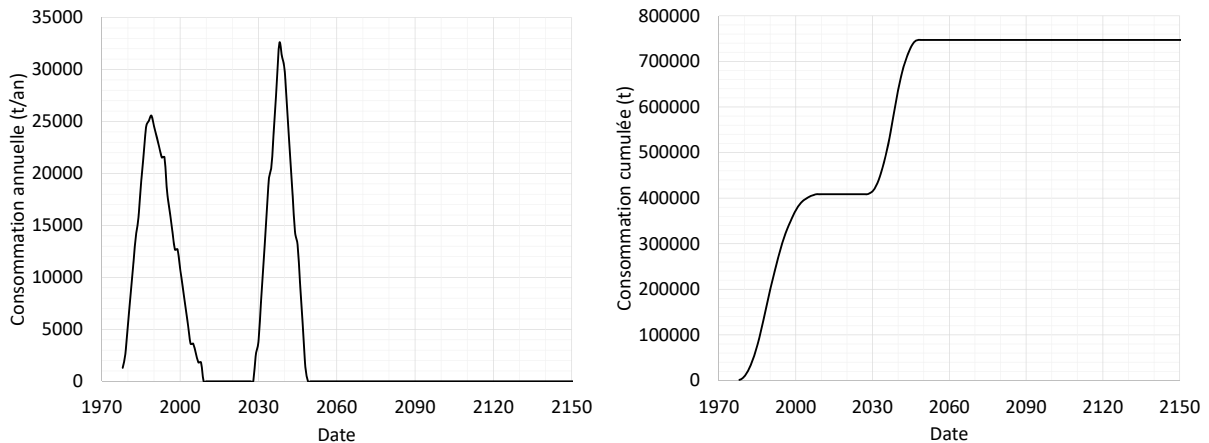


FIGURE 3.8 – Scénario ISAC REL+RNR – Consommation en ^{nat}U

La filière V2B équilibre permet de consommer tout le combustible utilisé MOX afin d'avoir accès au plutonium ex MOX. Le combustible utilisé MOX est très légèrement consommé en

2040 pour accéder à de l'américium nécessaire au démarrage des V2B transitoire. L'URT atteint un pic en 2090 avant d'être, lui aussi, consommé par les V2B équilibre.

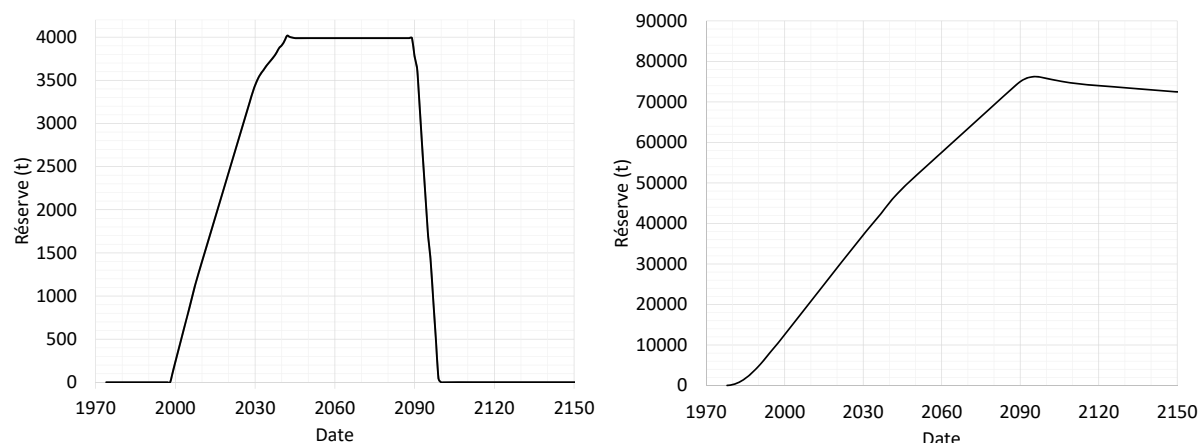


FIGURE 3.9 – Scénario ISAC REL+RNR – Réserves en combustible utilisé MOX (à gauche) et URT (à droite)

Les deux phases deancements des V2B permettent de réduire momentanément les réserves de plutonium ex UOX avant que ces réacteurs surgénère du plutonium. La séparation du combustible utilisé MOX cause un pic dans la fabrication du plutonium ex MOX en 2090. Celui-ci est ensuite consommé par les V2B équilibres puis surgénéré. La quantité de plutonium ex MOX reste minoritaire vis-à-vis de la quantité totale de plutonium tout au long du scénario.

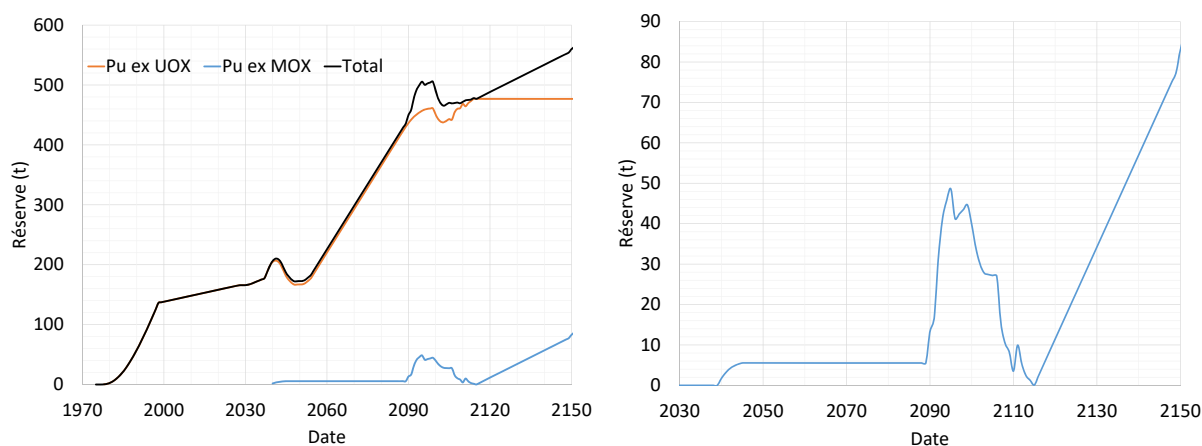


FIGURE 3.10 – Scénario ISAC REL+RNR – Réserves en plutonium (la figure de droite est un zoom de la figure de gauche)

Concernant les actinides mineurs, c'est l'américium qui est majoritaire. Les actinides mineurs ont deux modes de production. Ou bien, ils sont extraits du combustible utilisé MOX qui a été produit jusqu'en 2038. Ou bien, ils proviennent directement du parc à partir de 2038. Le remplacement du parc EPR par des V2B entraîne une hausse de production d'américium comme en témoigne la rupture de pente en 2090 sur la figure ci-dessous. Ceci est dû aux productions détaillées dans le tableau 3.5. Les V2B ont donc pour inconvénient de produire des quantités importantes d'américium.

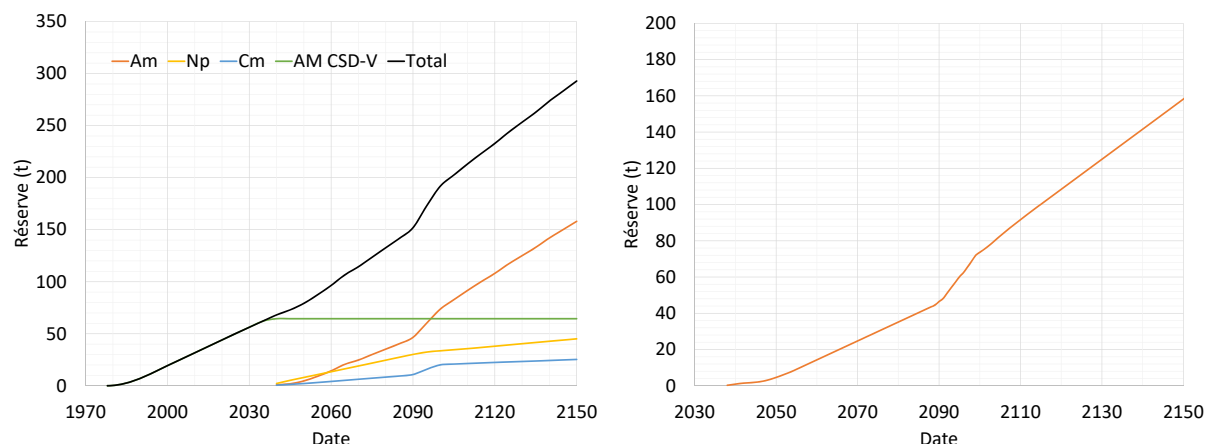


FIGURE 3.11 – Scénario ISAC REL+RNR – Réserves en AM (à gauche) et Am (à droite, zoom de la figure de gauche)

Un inventaire des matières en 2040 (lancement de la génération IV) et en 2150 (fin du scénario) a été réalisé. Les réserves en 2040 permettent d’observer les réacteurs susceptibles d’être lancés à cette date. Les réserves en 2150 permettront d’estimer la capacité d’incinération des actinides mineurs par ARAMIS-A.

Stocks	2040	2150
^{nat} U consommé	- 637 kt	- 747 kt
appU	563 kt	652 kt
URT	46 kt	72 kt
CU MOX	3,9 kt	665 kg
PF	2,8 kt	8,4 kt
Pu ex UOX	205 t	477 t
Pu ex MOX	2 t	83 t
AM CSD-V	64 t	64 t
Am	0,9 t	158,2 t
Np	2,2 t	45,1 t
Cm	0,5 t	25,3 t

TABLEAU 3.7 – Scénario ISAC REL+RNR – Inventaire en matières radioactives

3.5 Scénario avec ARAMIS-A

Cette partie a pour objectif d’ajouter au scénario REL+RNR précédent la possibilité de lancer des ARAMIS-A. Ce parc sera appelé REL+RNR+RSF.

3.5.1 Déploiement des RSF

Les premiers ARAMIS-A sont déployés à partir de 2040. On remarque deux paliers deancements, le premier avec un nombre total de 4 RSF et le deuxième permettant d’atteindre 15 RSF. Les RSF étant électrogènes, leurs déploiements réduisent légèrement la puissance installée des V2B.

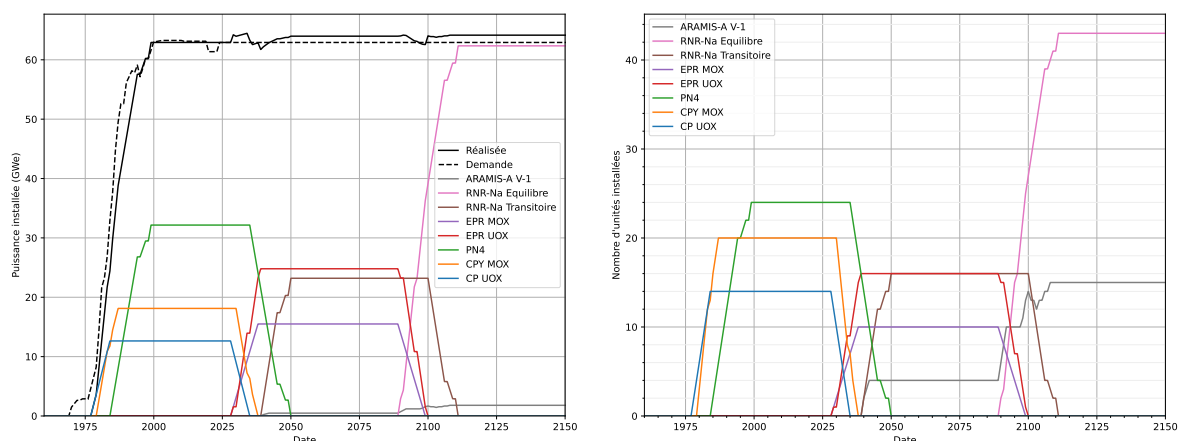


FIGURE 3.12 – Scénario ISAC – Déploiement du parc REL+RNR+RSF

3.5.2 Inventaires en matières

Contrairement au scénario précédent, le combustible utilisé MOX est consommé entièrement dès 2040 afin d'extraire l'américium et de lancer des ARAMIS-A. L'URT suit lui la même tendance que dans le scénario précédent.

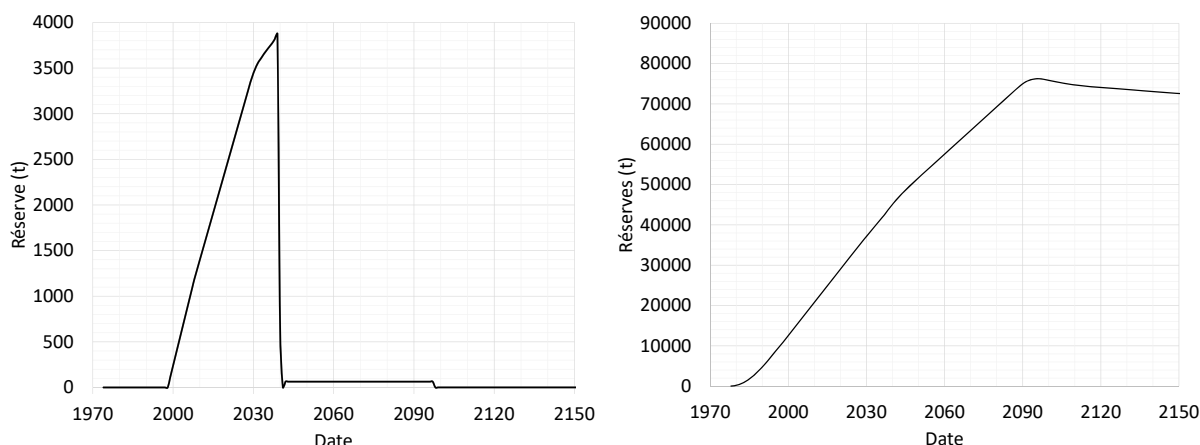


FIGURE 3.13 – Scénario ISAC REL+RNR+RSF – Réserves en combustible utilisé MOX (à gauche) et URT (à droite)

Le plutonium ex MOX est produit dès 2040. Il sert à alimenter les ARAMIS-A et les V2B équilibre. Il est nécessaire de rappeler que dans le cas où la quantité de plutonium ex MOX n'est pas suffisante pour lancer des réacteurs, les réacteurs peuvent utiliser le plutonium ex UOX disponible. Cela explique les variations négatives des réserves de plutonium ex UOX. Le stock de plutonium ex MOX sera lui totalement consommé au lancement des V2B équilibre.

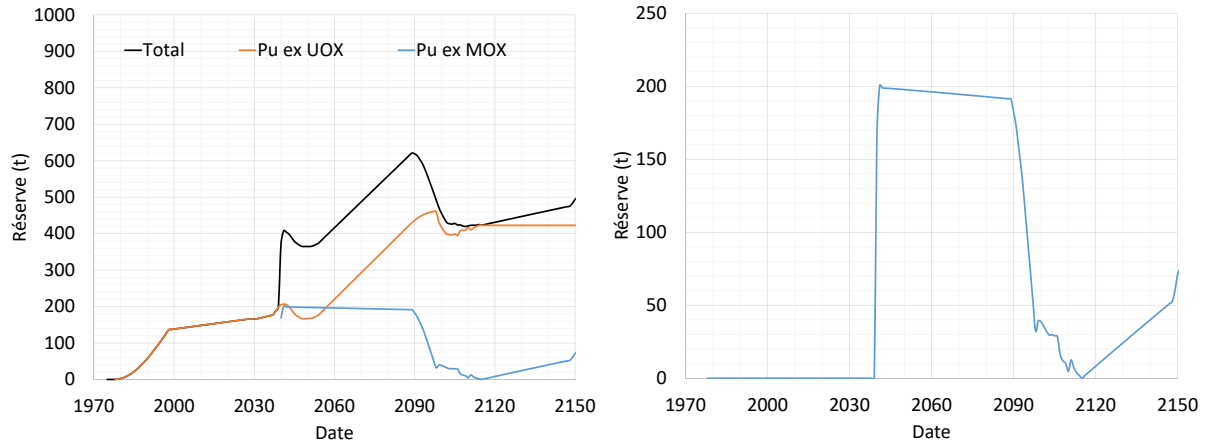


FIGURE 3.14 – Scénario ISAC REL+RNR+RSF – Réserves en plutonium (la figure de gauche est un zoom de la figure de droite)

Les plus grosses différences sont observées dans la figure ci-dessous. La réserve d'américium atteint au maximum 31 t en 2089. Par la suite, cette réserve est totalement incinérée par les ARAMIS-A. C'est l'américium qui est limitant pour lancer plus d'ARAMIS-A. Au vu du fonctionnement du code ISF, l'américium doit atteindre une quantité (16,298 t) permettant de lancer un nouveau ARAMIS-A sur toute sa durée de vie. En prolongeant le scénario, on observerait donc des oscillations de la réserve d'américium. Il est aussi possible que la demande énergétique vienne bloquer le lancement d'ARAMIS-A. Par exemple, la réserve d'américium s'accumule entre 2060 et 2090 alors que la quantité minimale requise pour lancer de nouveaux réacteurs est atteinte. Le code ISF attend alors que les EPR commencent à être mis à l'arrêt pour lancer de nouveaux ARAMIS-A.

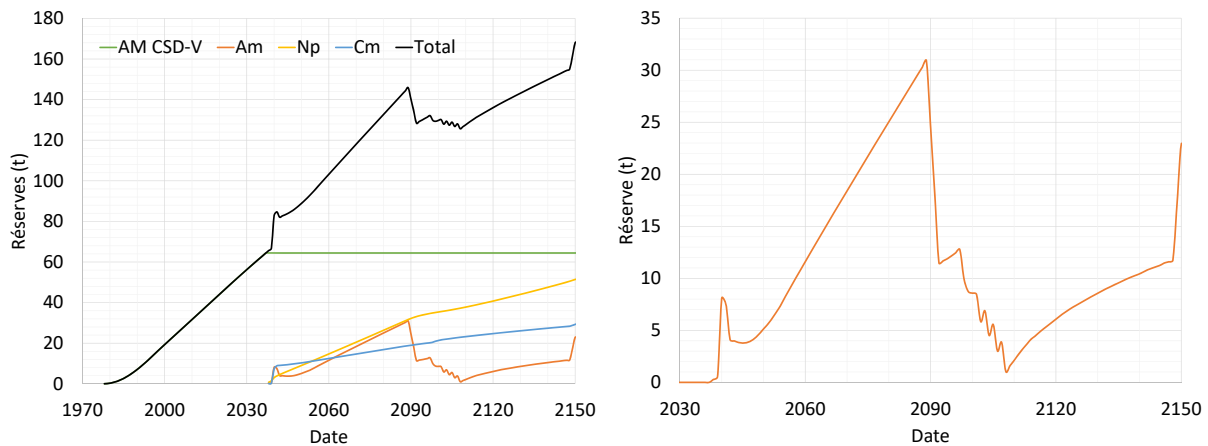


FIGURE 3.15 – Scénario ISAC REL+RNR+RSF – Réserves en AM (à gauche) et Am (à droite, zoom de la figure de gauche)

3.6 Comparaison des deux scénarios

Le déploiement du parc historique et des EPR est identique aux deux scénarios. Ainsi, les quantités d' ^{nat}U consommées, d' ^{app}U produites et d'actinides mineurs vitrifiés sont identiques sur les deux scénarios. Légèrement plus d'URT est produit, car on démarre moins de V2B équilibre dans le deuxième scénario. Le combustible utilisé MOX est totalement consommé dans les deux scénarios, mais à des fins différentes. Dans le premier

cas, on retraite le combustible utilisé MOX pour avoir accès à de l'américium pour démarrer les V2B transitoire en 2040 puis dans un second temps, on retraite le combustible utilisé MOX pour avoir accès au plutonium ex MOX pour démarrer la deuxième génération de V2B équilibre vers 2090. Dans le deuxième scénario, on retraite tout le combustible utilisé MOX dès 2040 afin d'accéder au maximum d'américium disponible pour lancer le plus d'ARAMIS-A possible. Les réserves en plutonium et américium sont logiquement réduites suite à l'ajout des incinérateurs. La quantité de neptunium et de curium augmente, car pour une même puissance installée, ARAMIS-A produit plus de neptunium et de curium qu'un V2B.

Stocks	REL+RNR	REL+RNR+RSF	Écart relatif ¹
^{nat} U consommé	-747 kt	-747 kt	-
^{app} U	652 kt	652 kt	-
URT	72,5 kt	72,6 kt	+ 0,13 %
CU MOX	665 kg	665 kg	-
Pu ex UOX	477 t	423 t	- 11,32 %
Pu ex MOX	83 t	71 t	- 14,46 %
PF	8,3 kt	8,3 kt	-
AM CSD-V	64 t	64 t	-
Am	158 t	23 t	- 85,44 %
Np	45 t	51 t	+ 13,33 %
Cm	25 t	29 t	+ 16 %

¹ Calculé relativement au scénario REL+RNR.

TABEAU 3.8 – Comparaison des inventaires en 2150 des deux scénarios ISAC

4 Scénarios annexes

4.1 Scénarios envisagés

Des scénarios annexes, d'intérêt pour l'équipe mais sans lien avec le chapitre précédent ni le projet ISAC, ont été effectués. Le site Metawatt permet de parcourir des scénarios qui ont été émis par différentes organisations [30]. Trois scénarios ont été retenus, l'un inspiré du scénario ISAC, l'un du scénario négaWatt 2022 [31] et le dernier du scénario TerraWater de l'association les Voix du Nucléaire [32]. Ces trois scénarios offrent des possibilités assez variées quant aux trajectoires futures de la filière électronucléaire française. Toutefois, le déploiement du parc historique sera commun à tous les scénarios.

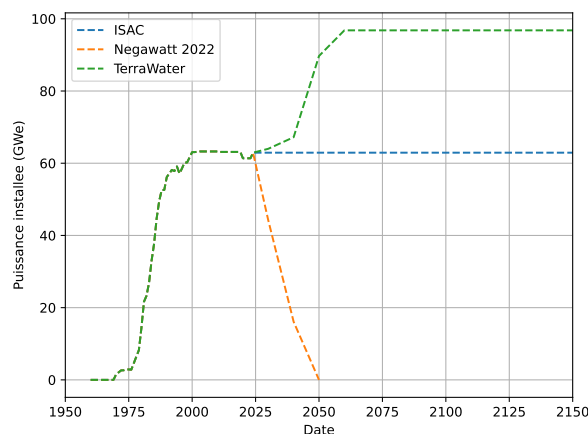


FIGURE 4.1 – Puissance installée des scénarios ISAC, négaWatt et TerraWater

4.2 Scénario négaWatt

Le scénario négaWatt ne mise pas sur une relance du nucléaire et limite la durée de vie des réacteurs du parc historique à 50 ans au maximum. Aucun nouveau réacteur n'est construit et le dernier réacteur est fermé à l'horizon 2050. Ce scénario a été reproduit à partir du code ISF. La possibilité de déployer des EPR a été laissée possible afin de vérifier la cohérence du scénario quant au fait de ne pas lancer de nouveaux réacteurs.

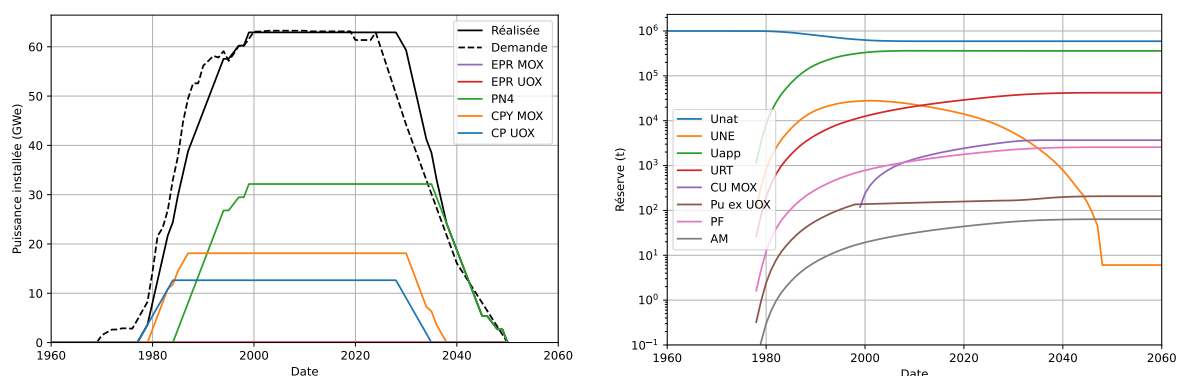


FIGURE 4.2 – Scénario négaWatt

On observe sur la figure 4.2 qu'aucun nouveau réacteur n'est construit et le dernier réacteur est arrêté fin 2050. Le code ISF vient donc valider la trajectoire du parc électro-nucléaire envisagée par le collectif négaWatt.

4.3 Scénarios TerraWater

Deux scénarios TerraWater ont été réalisés. L'un avec uniquement des EPR et des ARAMIS-A et l'autre avec des EPR, des V2B équilibre et des ARAMIS-A. Les figures relatives à ces scénarios sont présentes dans l'annexe B.

Concernant le premier scénario avec un parc REP/EPR auquel s'ajoutent des ARAMIS-A à partir de 2040, la quantité d' $d^{nat}U$ nécessaire est environ triplée par rapport aux autres scénarios de ce rapport. Le rythme de déploiement des EPR UOX est poussé à 3 par an

pour suivre la demande. La réserve de combustible usé MOX est épuisée afin de séparer le maximum d'actinides. Le plutonium ex MOX obtenu par séparation du combustible usé MOX permet de lancer des ARAMIS-A (6 au maximum) et d'épuiser les réserves d'américium. L'américium est limitant dans ce scénario (au vu du lancement des ARAMIS-A) car les EPR en produisent moins qu'un RNR-Na (cf. tableau 3.5). Ce scénario pose cependant deux problèmes majeurs liés à la prolifération avec une quantité finale de plutonium conséquente (supérieure à 2 kt) et une demande en ^{nat}U très forte.

Ceci amène à considérer des réacteurs de génération IV dans un deuxième scénario. Ici, ce seront des V2B équilibre qui ne nécessitent pas d'américium pour démarrer, contrairement à sa version "transitoire". Cela permet de limiter la demande d' ^{nat}U et la production d' ^{app}U du précédent scénario. L'américium et le plutonium ex MOX permettent de lancer au maximum 22 ARAMIS-A. Ce stock d'américium est stabilisé à 29 t.

Les inventaires finaux de ces deux scénarios sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Stocks	REL+RSF	REL+RNR+RSF
^{nat}U consommé	- 2065 kt	- 759 kt
^{app}U	1832 kt	671 kt
URT	197 kt	69 kt
CU MOX	616 kg	616 kg
PF	12,3 kt	10,8 kt
Pu ex UOX	2 kt	329 t
Pu ex MOX	190 t	104 t
AM CSD-V	65 t	65 t
Am	13 t	29 t
Np	145 t	68 t
Cm	41 t	32 t

TABLEAU 4.1 – Scénario TerraWater – Inventaire en matières radioactives en 2150

4.4 Scénario avec des RAPTO_r

4.4.1 Présentation du RAPTO_r

Le concept de RAPTO_r est un petit réacteur de 300 MW_{th} qui s'inscrit dans la catégorie des RSF incinérateurs. Il utilise des sels chlorures (NaCl–MgCl₂–(Pu,AM)Cl₃). Un RAPTO_r a pour objectif de consommer le plutonium et les actinides mineurs qui seraient incorporés dans le sel [9].

Caractéristiques	RAPTO _r AM-Pu
Puissance thermique	300 MW _{th}
Puissance nominale	120 MW _e
Facteur de charge	100 %
Mise en service	2040
Rythme de déploiement	2/an
Durée de vie	120 ans

TABLEAU 4.2 – Caractéristiques du RAPTO_r AM-Pu

La stratégie de cet incinérateur est différente d'ARAMIS-A. On considère que l'américium et le plutonium sont directement séparés et réinjectés dans le RAPTOR. Ainsi, les actinides n'apparaissent pas dans les extractions. L'alimentation est respectivement de 7 % et 88 % d'américium et de Pu. La part d'américium est bien inférieure aux 55 % d'ARAMIS-A.

Élément	Alimentation	Extraction
Pu (t)	15,912	-
Am (t)	1,296	-
Cm (kg)	246	-
Np (kg)	55	-
PF (t)	-	14,049

TABLEAU 4.3 – Alimentations/extractions sur 120 années du RAPTOR AM-Pu

4.4.2 Résultats du scénario avec RAPTOR

Le scénario avec des RAPTOR a été lancé avec les mêmes hypothèses que le scénario ISAC. La différence majeure avec le scénario ISAC se trouve dans le nombre d'unités installées. Avec ces RAPTOR qui nécessitent moins d'américium, le parc RSF atteint 58 unités. Dans un premier temps (2040-2050), ce sont les quantités d'américium qui vont venir limiter le déploiement des RSF, puis dans un second temps (2090-2110), c'est la demande qui va bloquer la mise en service des RSF.

Matériaux	Stocks
^{nat} U consommé	- 747 kt
appU	652 kt
URT	73 kt
CU MOX	665 kg
PF	8,3 kt
Pu ex UOX	472 t
Pu ex MOX	5 t
AM CSD-V	64 t
Am	103 t
Np	42 t
Cm	16 t

TABLEAU 4.4 – Scénario RAPTOR – Inventaire en matières radioactives en 2150

Les figures associées à ce scénario sont disponibles dans l'annexe [C](#).

5 Conclusions et perspectives

5.1 Conclusions

5.1.1 Conclusion sur les types d'incinérateurs

L'objectif de ce stage était de réaliser des scénarios de déploiement de RSF au sein du parc électronucléaire français grâce au code ISF. Cela a pu être réalisé avec différentes

trajectoires du parc, mais aussi avec différents incinérateurs. Les scénarios de ce rapport se sont concentrés sur des ARAMIS-A et des RAPTOR. L'utilisation de l'un au profit de l'autre dépendrait de l'objectif recherché et des moyens associés. Les RAPTOR peuvent être déployés de manière beaucoup plus conséquente en termes d'unité et possèdent un vecteur isotopique d'entrée différent d'ARAMIS-A. Les ARAMIS-A permettent eux d'incinérer de l'américium et sont plus limités en nombre par les quantités d'américium qui deviennent limitantes.

5.1.2 Conclusion sur les outils

Le code ISF est très utile dans la construction de scénarios du fait de sa simplicité et de sa rapidité d'exécution. Quelques zones d'ombre et complexité d'utilisation ont pu être identifiées afin de mieux comprendre comment intégrer des RSF. Dans des études complexes, ce code permet de construire rapidement un scénario sans nécessiter des calculs d'évolutions très coûteux en ressources. Néanmoins, ce code présente des limites bien identifiées qui seront évoquées dans le paragraphe suivant lié aux perspectives. De plus, il est nécessaire de préciser que ce code prend en compte uniquement la consommation de matériaux liée au combustible et n'intègre pas les matériaux nécessaires à la construction complète d'une centrale.

5.2 Perspectives

5.2.1 Simplification et amélioration du code ISF

Le code ISF bien que simple d'utilisation, présente quelques points d'amélioration. La première piste serait de simplifier la création d'un scénario. Actuellement, un scénario nécessite de créer de nombreux fichiers d'entrée remplis manuellement. Plus le scénario est compliqué, plus le nombre d'erreurs augmente et le temps associé pour les corriger aussi. Simplifier cet aspect pourrait augmenter significativement l'intérêt de ce code qui se démarque d'autres codes nécessitant des calculs d'évolution. L'autre point d'amélioration concernerait la simplification des transferts de résultats entre ISF et REM. Une première esquisse a été développée *via* des scripts Python pendant ce stage, mais une automatisation serait possible et bénéfique. Pour finir, plus de flexibilité sur les entrées et les sorties permettrait de complexifier les scénarios. On pourrait imaginer pouvoir différencier les alimentations des réacteurs au sein d'une même filière.

5.2.2 Les futures études seront plus rapides

La compréhension du code ISF vis-à-vis des RSF a été améliorée. Il sera maintenant plus rapide de construire des scénarios avec des RSF. Les concepts de RSF étant assez nombreux, il sera possible de réaliser des études de comparaison entre de nombreux concepts de manière efficace.

5.2.3 Les incinérateurs, la solution à la problématique des déchets nucléaires ?

Les recherches, bien qu'encore en phase de conception, ouvrent des perspectives prometteuses pour la gestion des déchets nucléaires. Dans le cas où le concept aboutirait, les études de ce rapport montrent que leur implémentation dans le parc semble possible du point de vue des matériaux associés au combustible. Ces incinérateurs permettraient

de résoudre une partie de la problématique des déchets nucléaires liés à la gestion des actinides mineurs et à la prolifération du plutonium.

A Figures des scénarios ISAC

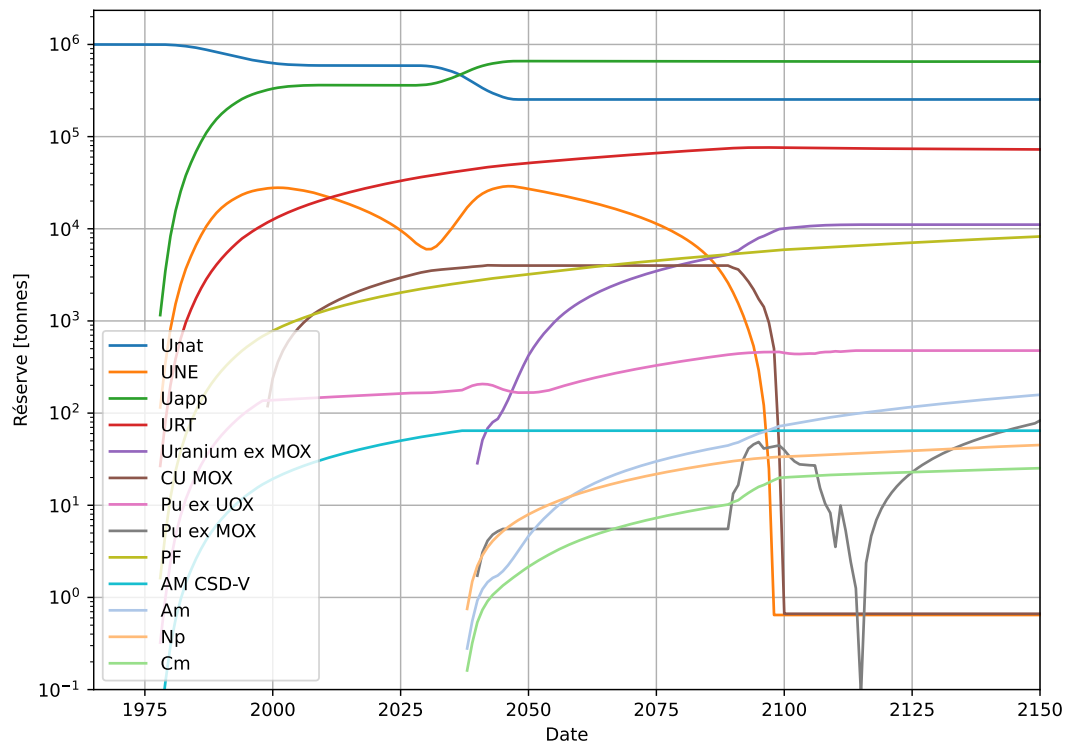


FIGURE A.1 – Scénario ISAC – Réserves du parc REL+RNR

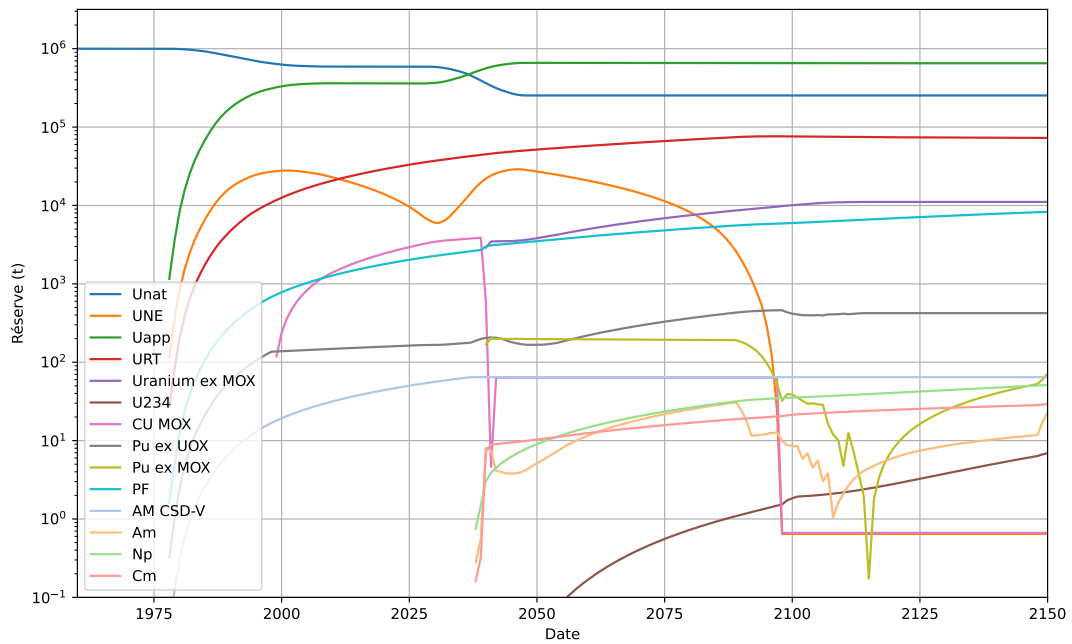


FIGURE A.2 – Scénario ISAC – Réserves du parc REL+RNR+RSF

B Figures des scénarios TerraWater

B.1 Parc REL+RSF

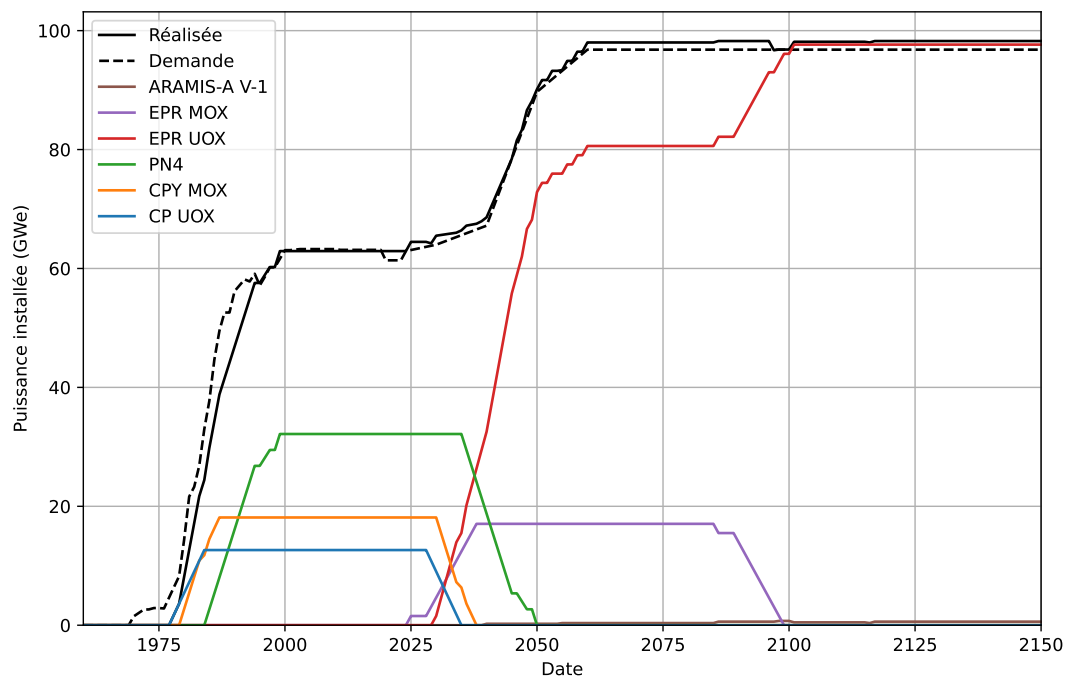


FIGURE B.1 – Scénario TerraWater REL+RSF – Puissance installée

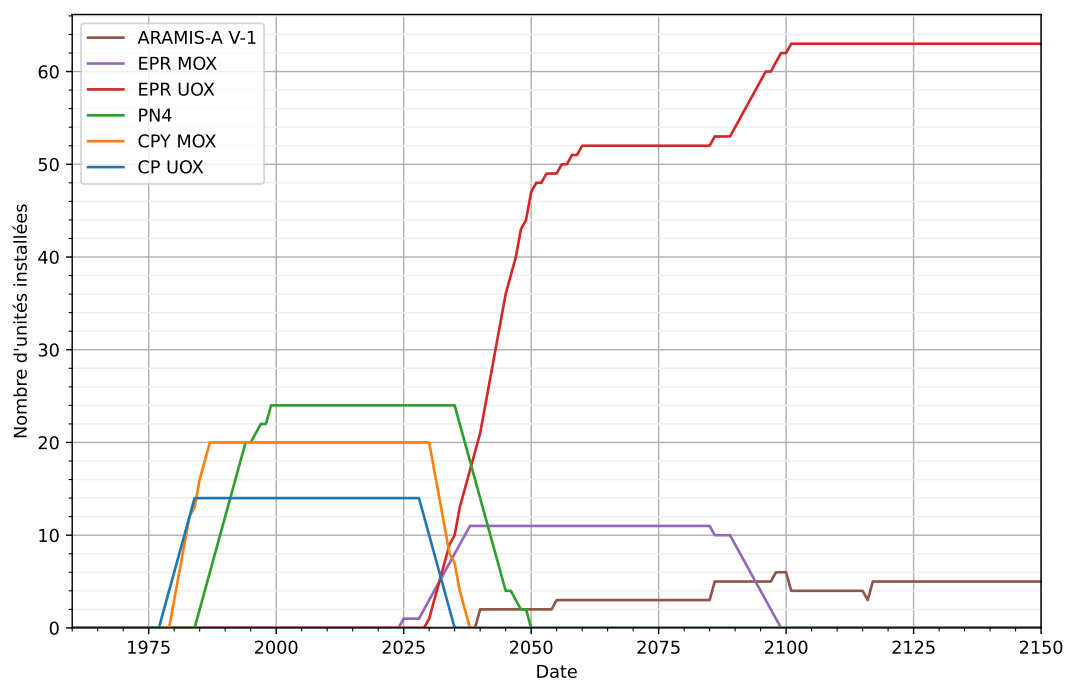


FIGURE B.2 – Scénario TerraWater REL+RSF – Nombre d'unités installées

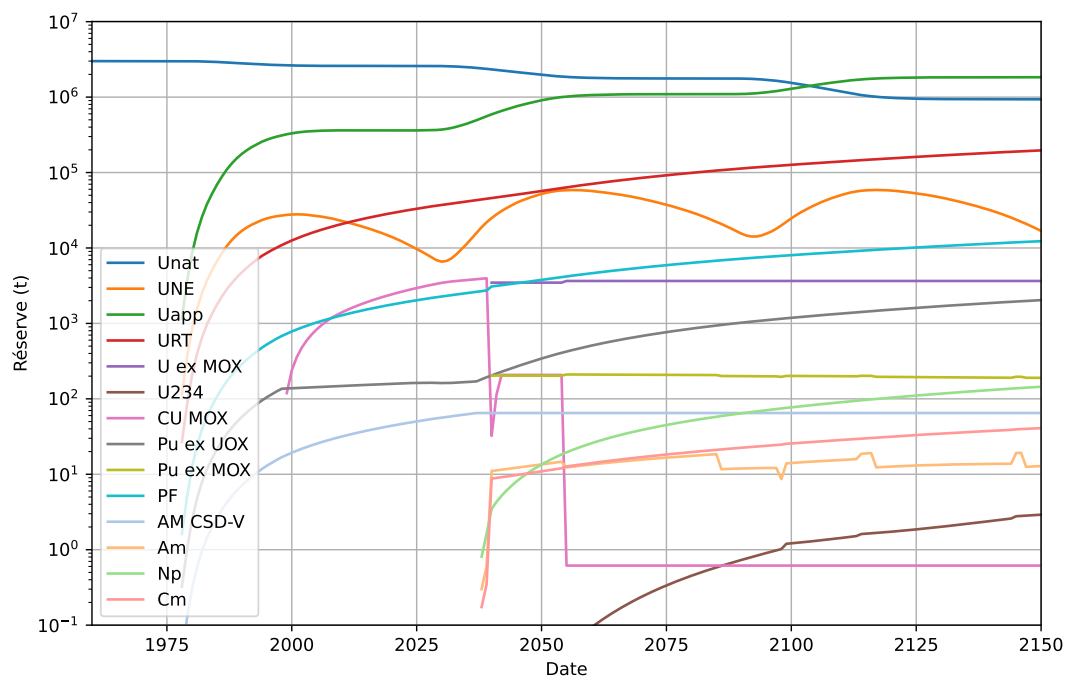


FIGURE B.3 – Scénario TerraWater REL+RSF – Réserves

B.2 Parc REL+RNR+RSF

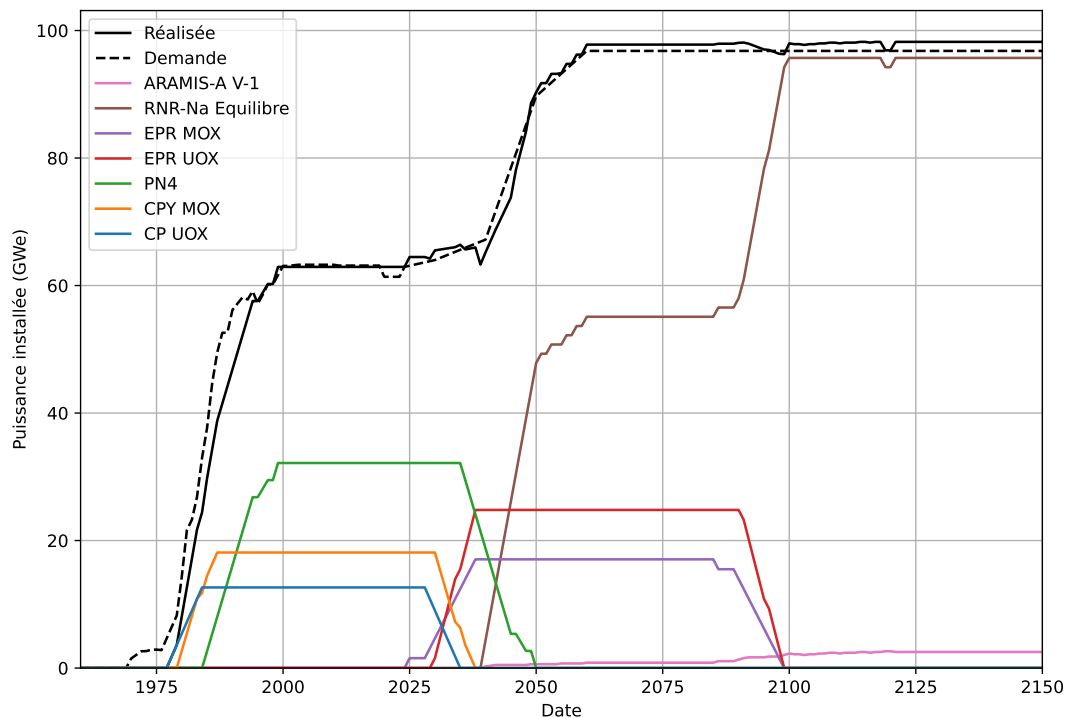


FIGURE B.4 – Scénario TerraWater REL+RNR+RSF – Puissance installée

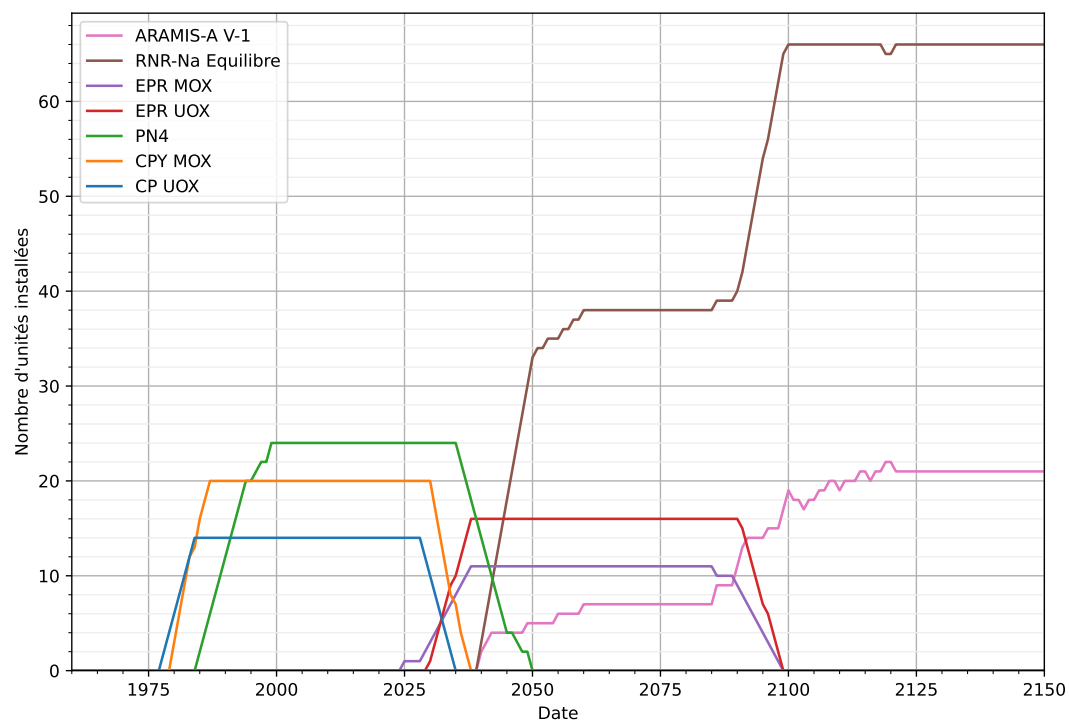


FIGURE B.5 – Scénario TerraWater REL+RNR+RSF – Nombres d'unités installées

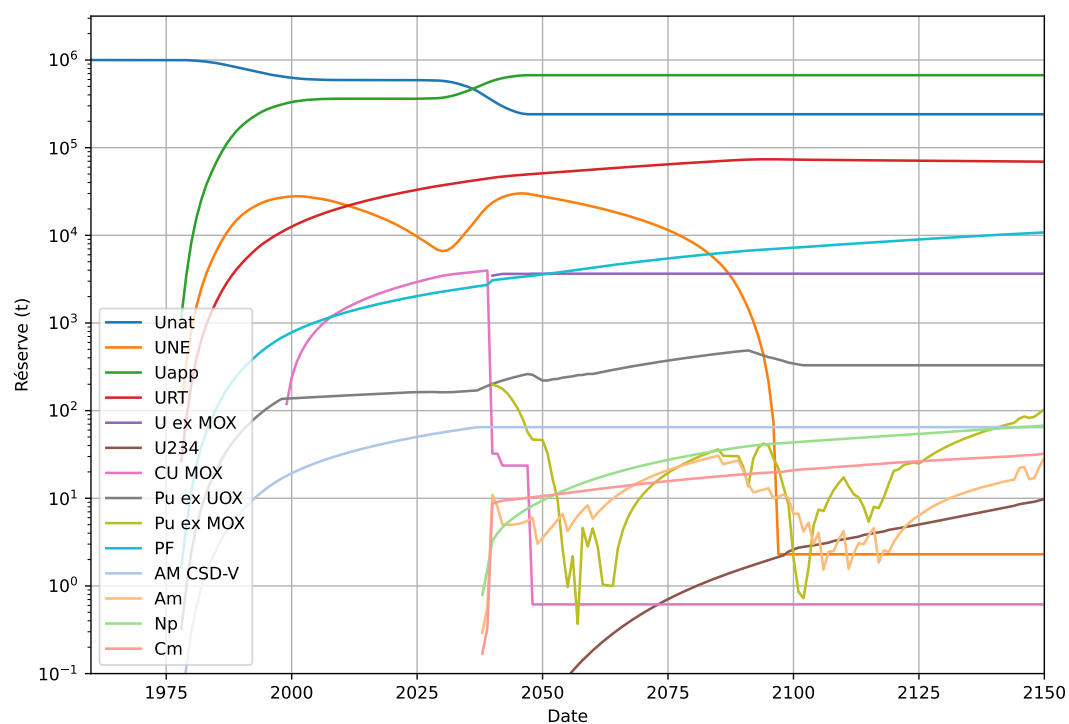


FIGURE B.6 – Scénario TerraWater REL+RNR+RSF – Réserves

C Figure du scénario RAPTOR

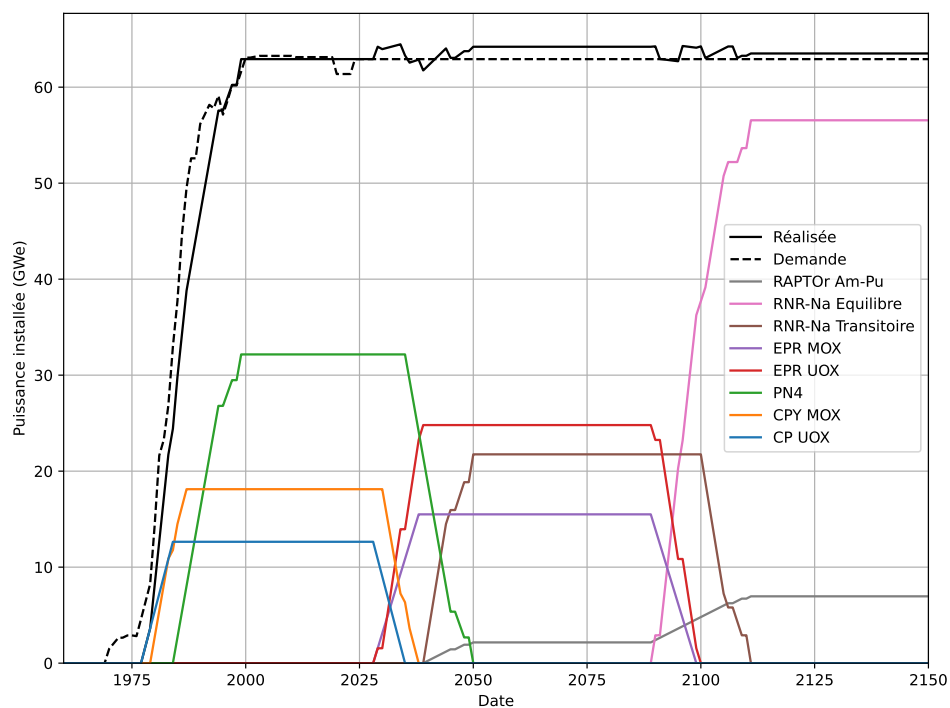


FIGURE C.1 – Scénario RAPTOR – Puissance installée

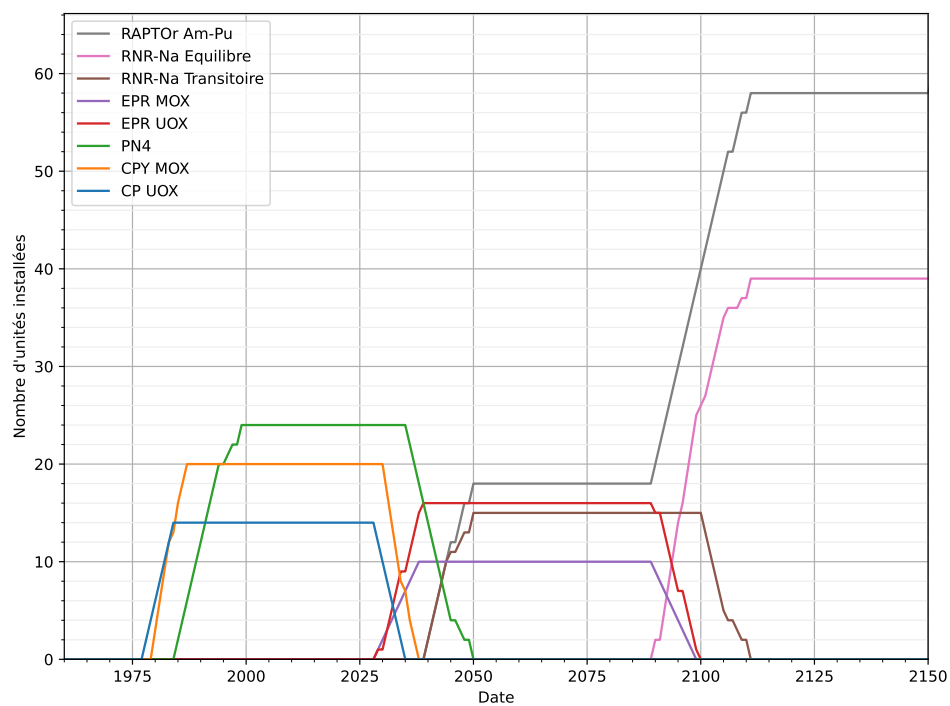


FIGURE C.2 – Scénario RAPTOR – Nombre d'unités installées

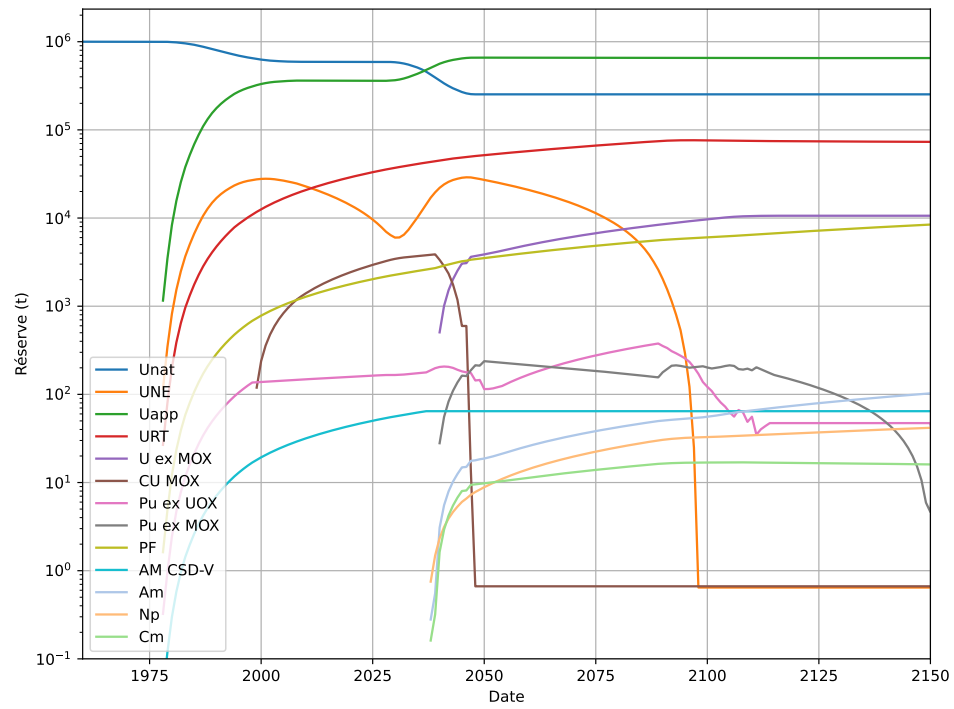


FIGURE C.3 – Scénario RAPTOR – Réserves

D Diagrammes DOT

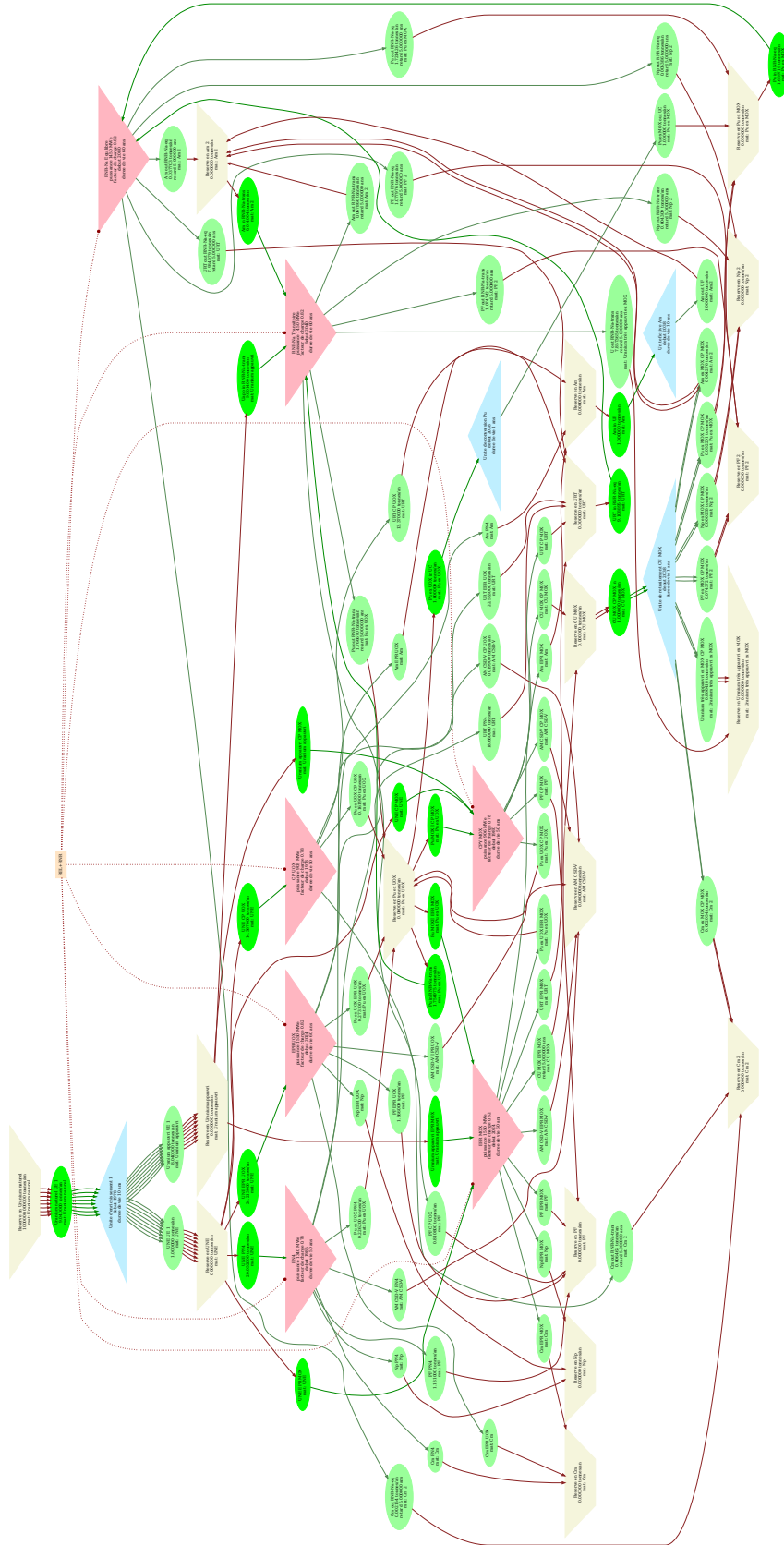


FIGURE D.1 – Scénario ISAC – Diagramme DOT du parc REL+RNR

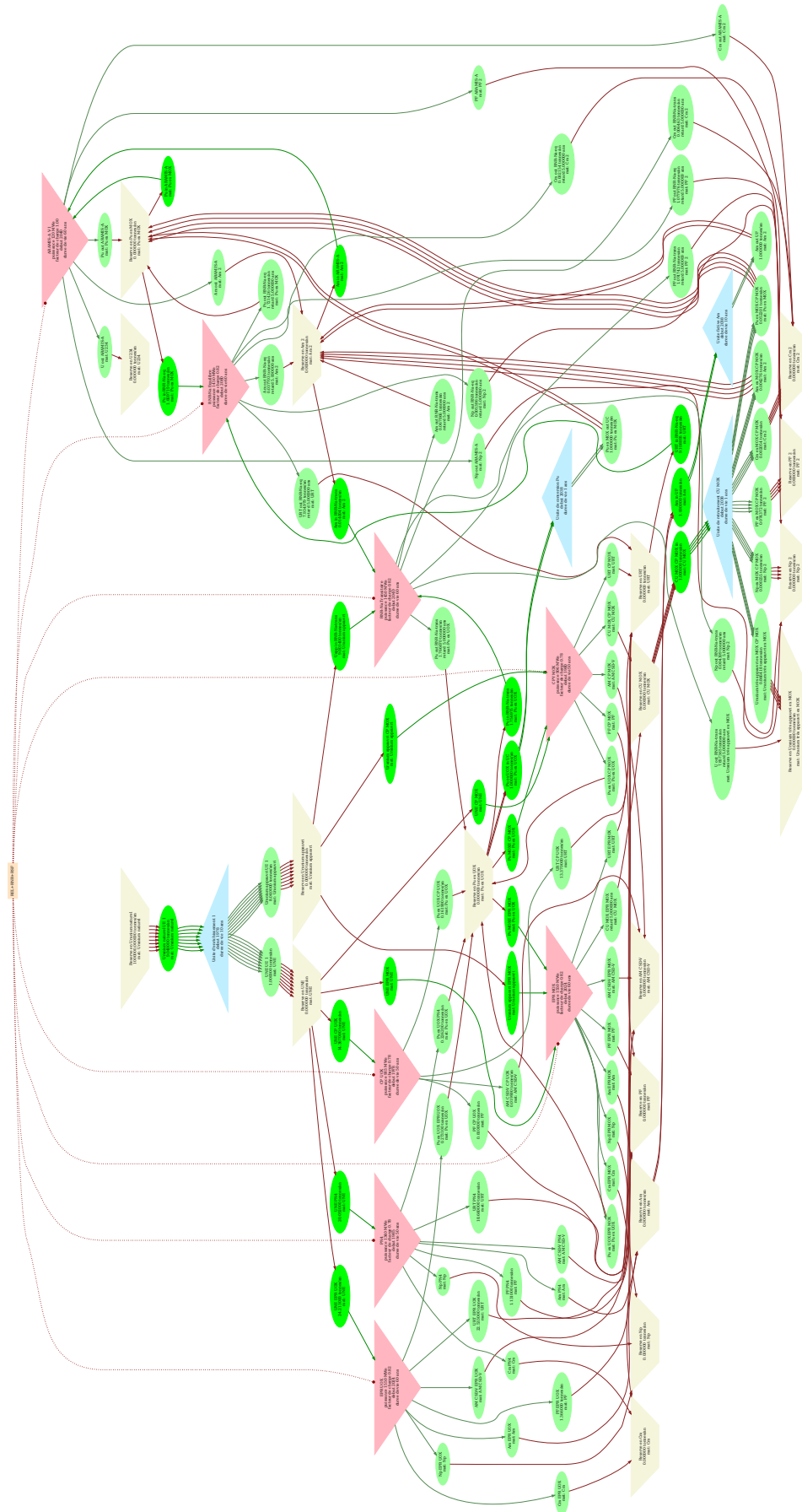


FIGURE D.2 – Scénario ISAC – Diagramme DOT du parc REL+RNR+RSF

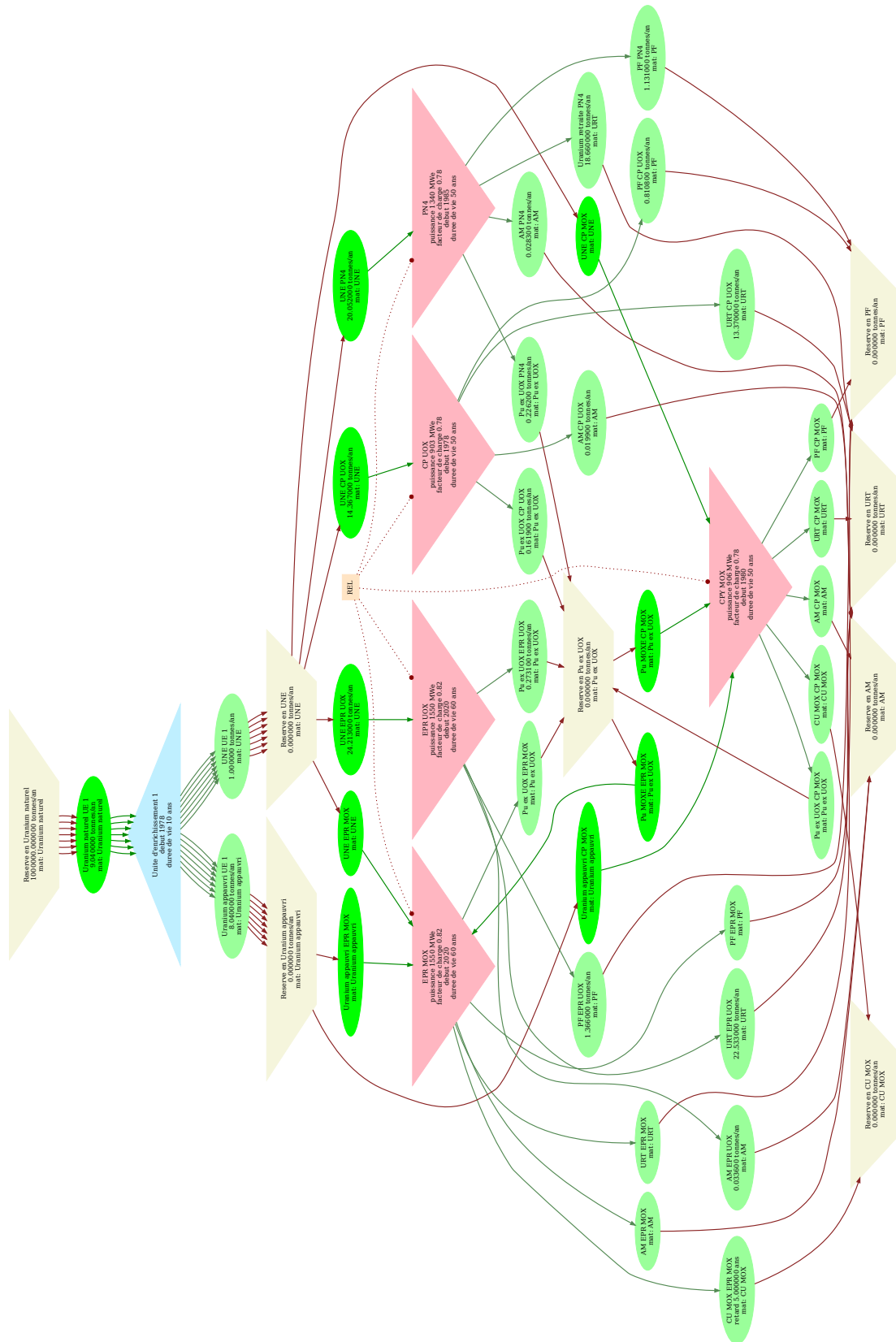


FIGURE D.3 – Scénario négawatt – Diagramme DOT du parc REL

E Compétences

E.1 Compétence 1 – Concevoir ou réaliser des solutions techniques, théoriques ou expérimentales, permettant de répondre à un cahier des charges

E.1.1 Auto-évaluation

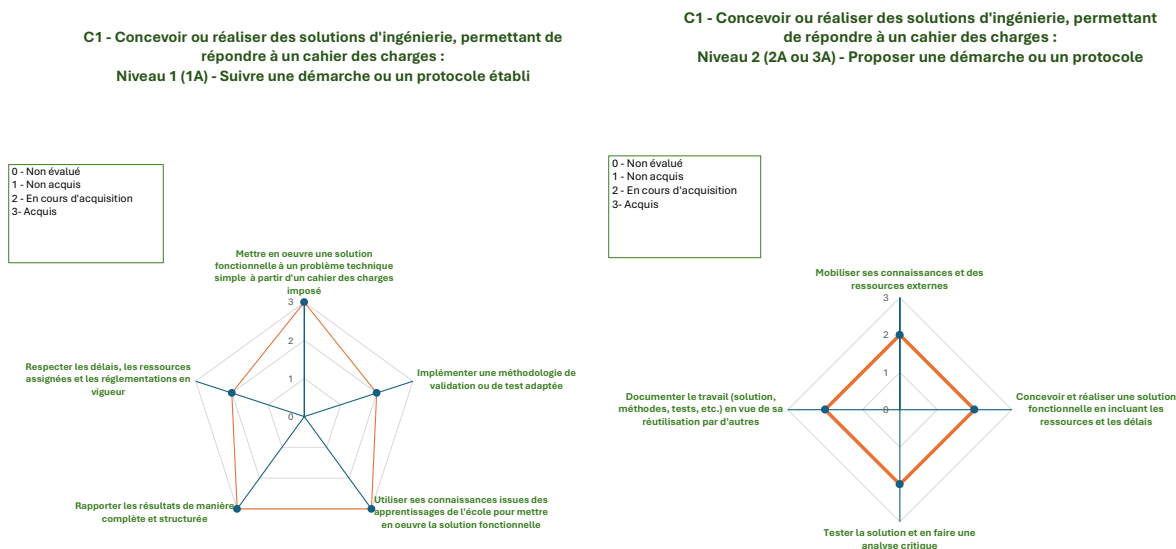


FIGURE E.1 – Auto-évaluation de la compétence 1

E.1.2 Niveau 1

Lors de ma deuxième année à Phelma dans la filière GEN, nous avons réalisé six travaux pratiques sur la plateforme d'instrumentation nucléaire du LPSC. Les séances comportaient un énoncé présentant les étapes à respecter. J'ai pu réaliser des manipulations sur différents détecteurs nucléaires. Ces TP ont permis de mobiliser les connaissances acquises du cours théorique de détecteur. Il a été nécessaire de produire un compte rendu à la fin de chaque séance, ce qui produisait un délai à respecter pour produire une synthèse des résultats. Ces résultats pouvaient être testés avec d'autres expériences, d'autres groupes, des solutions analytiques ou avec des méthodes de test du Khi 2.

E.1.3 Niveau 2

Lors de ce stage, j'ai été amené à produire des scénarios avec le code ISF. Pour utiliser le code ISF, il a été nécessaire de mobiliser les connaissances théoriques de la 2A GEN mais aussi d'avoir recours à de la documentation, notamment sur le cycle du combustible et les RSF. J'ai réalisé moi-même les scénarios. Le code ISF comportant de nombreux fichiers d'entrée, il a fallu réaliser différents tests afin d'éliminer les erreurs. Les résultats sont documentés dans ce rapport qui en est une trace. Les scripts que j'ai produits ont été systématiquement commentés en vue de potentielles réutilisations. De même, un fichier explicitant le contenu de chaque scénario a été construit. Certains de ces scénarios ont été utilisés pour produire une présentation pour le projet ISAC. Cette présentation a eu lieu un mois après le début du stage. J'ai donc dû concevoir et synthétiser les résultats des scénarios en respectant une échéance.

E.2 Compétence 2 – Mettre en œuvre une démarche de recherche fondamentale ou appliquée à des fins d'innovation

E.2.1 Auto-évaluation

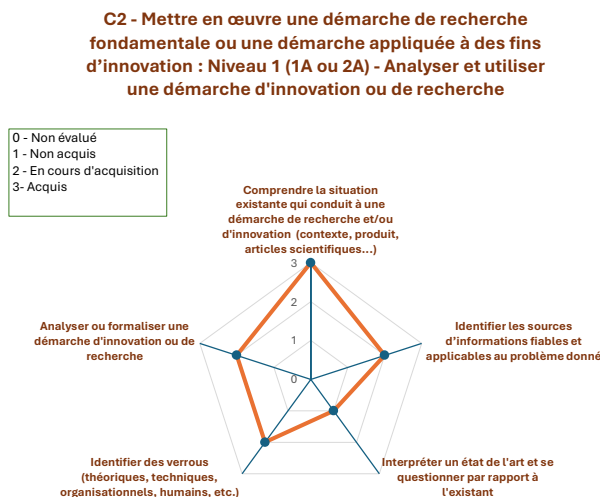


FIGURE E.2 – Auto-évaluation de la compétence 2

E.2.2 Niveau 1

Ce stage a été réalisé au sein de l'équipe de recherche MSFR du LPSC. L'épuisement des ressources d'uranium et la gestion des déchets font partie des enjeux auxquels les RSF tentent de répondre. Dans l'optique du déploiement de ce type de réacteur, des codes de scénario sont développés. Le début du stage a commencé par des recherches et par la rédaction d'un rapport bibliographique. Ce rapport a eu pour objectif de dresser le contexte global du stage et de définir les principaux termes utiles à la compréhension du sujet. J'ai pu parcourir de la documentation interne du CNRS ainsi que des sources externes pouvant être enrichissantes pour les études menées. Mes encadrants m'ont permis d'assister à des réunions ou des assemblées générales du projet ISAC et du projet MIMOSA. Cela m'a permis de comprendre les motivations des recherches, mais aussi de mieux comprendre les difficultés techniques ou organisationnelles de chacun des projets. Une réunion d'équipes hebdomadaire était réalisée pendant ce stage. Cela a permis de partager les travaux effectués par chacun pendant la semaine, mais aussi d'évoquer les difficultés rencontrées. Concernant les codes de scénario, je n'ai pas eu accès aux résultats des autres codes des partenaires du projet ISAC. Cependant, des entrevues avec d'autres partenaires ont permis de mettre en lumière des différences de fonctionnement dans les codes. Le travail de ce stage s'inscrit dans le projet ISAC dont l'un des objectifs est de comparer les codes de scénario. J'ai notamment pu identifier des subtilités de fonctionnement du code ISF, ce qui facilitera les futures utilisations ou le développement de ce code.

E.3 Compétence 3 – Coopérer dans une équipe ou en mode projet

E.3.1 Auto-évaluation

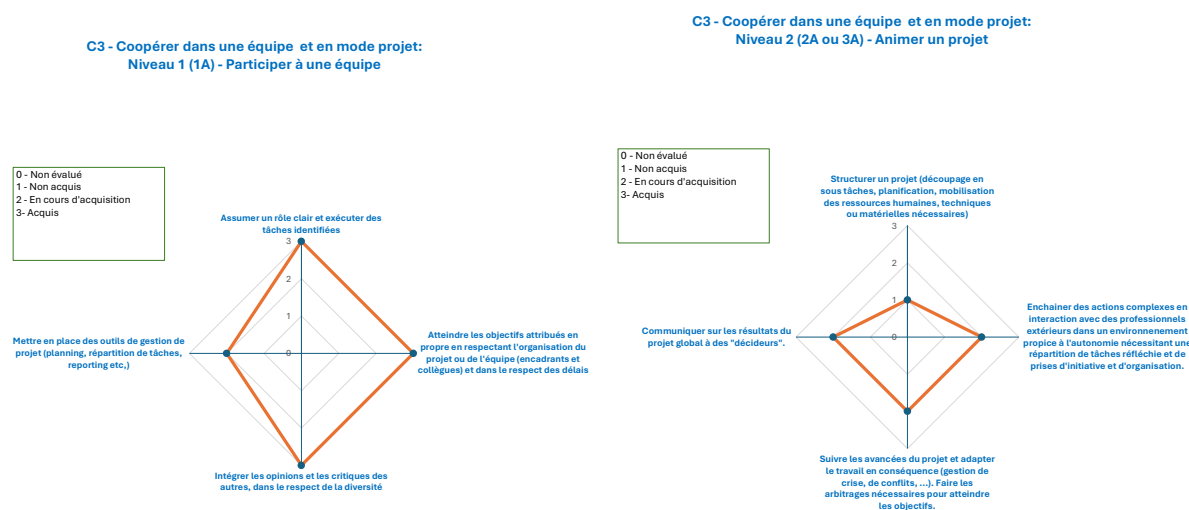


FIGURE E.3 – Auto-évaluation de la compétence 3

E.3.2 Niveau 1

Le niveau 1 de cette compétence a pu être particulièrement développé lors du projet 1A mené en fin de première année. Avec un groupe de six étudiants, nous avons réalisé un chauffe-eau solaire low-tech. Ce projet a notamment fait appel à des méthodes agiles de gestion de projet avec la mise en place de planning, de cahier des charges et d'un diagramme de Gantt. Chaque personne du groupe avait un rôle clair qu'elle devait assumer durant tout le projet. Des divergences de conception ou de choix ont amené à intégrer les critiques de chacun. Pour finir, les échéances de chaque rendu ont été respectées de la conception à la rédaction du rapport.

E.3.3 Niveau 2

Concernant le niveau 2, il a été développé lors de ce stage 2A. L'une des tâches a été de préparer des scénarios et une présentation des résultats pour le projet ISAC. J'ai dû communiquer mes résultats intermédiaires à des personnes extérieures au laboratoire lors d'une présentation d'environ 20 minutes avec mon maître de stage. Cette présentation a aussi permis d'organiser des entrevues avec certains partenaires du projet pour discuter de l'affinage du modèle et de prendre en compte différentes remarques afin d'adapter la suite du travail. Concernant la structure du projet, les échanges avec mon maître de stage se faisaient principalement de manière orale et sur tableau blanc pour les explications. Une synthèse par écrit était ensuite réalisée afin de mettre au clair les différentes tâches.

E.4 Compétence 5 – Piloter les transitions technologiques, environnementales, sociétales

E.4.1 Analyse de l'impact environnemental et sociétal de votre projet

Afin d'établir mon bilan carbone sur la durée de mon stage, j'ai utilisé le site [NosGES-tesClimats](#). Si je vivais sur une année comme lors de mon stage, mon empreinte carbone personnelle serait de 5,6 tCO₂e/an. À cela s'ajoutent les équipements utilisés pendant mon stage, à savoir un ordinateur portable ainsi qu'un écran. L'empreinte est d'environ 150 kg CO₂e/an d'après le site [ecoinfo](#) et elle pourrait varier selon les durées d'utilisation prévue de ces équipements. Nous avons réalisé un aller-retour à Framatome Lyon en TER, ce qui représente environ 7 kgCO₂e ([ademe](#)). Mes déplacements domicile-travail ont été effectués à vélo sur toute la durée du stage. Cependant, je rentrais à mon domicile familial tous les week-ends en TER. Je n'ai pas eu recours au chauffage ou à la climatisation pendant ce stage et à mon domicile. Pour finir, je n'ai pas réalisé de télétravail.

Pour essayer de réduire ces émissions, j'ai réalisé tous mes trajets à vélo durant ce stage, ce qui réduit fortement les émissions liées au trajet domicile-travail. Cependant, dès que je rentrais dans ma famille le week-end, j'utilisais majoritairement la voiture. Du point de vue de l'alimentation, des plats végétariens étaient proposés tous les jours à la cantine et je pense que ce serait un axe d'amélioration possible de ma part d'introduire avec plus de fréquence ces repas afin de limiter ma consommation de viande. Concernant les calculs effectués lors de ce stage, ils ont été effectués sur des machines de calcul. Bien que très rapide d'exécution, le code a été exécuté des centaines de fois afin d'identifier les erreurs et de réaliser les scénarios. Il pourrait être possible de consacrer plus de temps à l'identification manuelle des erreurs dans les fichiers d'entrées afin de moins solliciter les machines de calcul, cependant cela ralentirait considérablement l'avancement des études. De plus, cette caractéristique du code a permis une prise en main rapide du code.

La structure d'accueil (LPSC) a mené plusieurs activités durant la période du stage. Pour commencer, une matinée par mois, "le café du labo" rassemble l'ensemble du personnel. Elle est destinée à l'accueil et à une présentation des nouveaux arrivants, à une synthèse des activités d'une équipe et à une présentation pas forcément scientifique d'un intervenant extérieur (pour le mois de juin, un agent de la DGSI sur les cyberattaques). De plus, j'ai pu assister à la "journée du laboratoire". C'est une journée avec des conférences le matin, un repas convivial le midi ainsi que des activités variées (sportives, musicales) l'après-midi. Des groupes de travaux ont aussi été mis en place. Par exemple, le groupe de jardinage a commencé la construction d'un potager. Ces différents événements permettent un bon accueil des nouveaux arrivants et peuvent permettre de renforcer le lien entre les différentes équipes. Concernant le recyclage, je n'ai pas identifié des poubelles de tri ou pour le papier dans les bureaux.

D'un point de vue de l'institution d'accueil, les études menées trouveront plusieurs utilités. Les scénarios réalisés ont permis d'identifier des zones d'ombres du code ISF et d'améliorer l'intégration des RSF dans ce code. Différents scripts ont permis de simplifier quelques tâches, notamment le transfert de données de REM à ISF et pourront être réutilisés ou modifiés. Les scénarios réalisés dans le cadre du projet ISAC pourront servir dans la sous-tâche du projet destinée aux scénarios. Ils serviront de bases de comparaison avec les codes de scénario des autres partenaires. Ces scénarios permettent notamment de

dimensionner des parcs d'incinérateurs, ici ARAMIS-A pour le projet ISAC et d'identifier les variations d'inventaires de matériaux. Pour finir, mon maître de stage Louiliam a pour objectif de sa thèse le développement d'un code "ISF 2". Les études ont permis de trouver des axes d'améliorations de ISF et pourront lui servir dans le cadre de ce travail.

D'un point de vue des utilisateurs, les recherches sur les RSF sont au stade des études et de la conception. Dans le cas où ces recherches aboutiraient à la mise en service de RSF incinérateurs, ils pourraient résoudre des problématiques environnementales et sociales. La gestion des déchets nucléaires serait en partie solutionnée. Les sites de stockage seraient moins encombrés et les risques associés réduits. Mais du point de vue de l'opinion publique, cela améliorerait aussi l'acceptation du nucléaire par une partie de la population qui peut y être réticente, notamment à cause de la gestion actuelle des déchets nucléaires.

D'un point de vue personnel, ce stage m'aura permis dans un premier temps de découvrir le monde de la recherche et l'environnement associé aux doctorants. J'ai pu être immergé au sein de l'équipe de recherche MSFR. L'univers des RSF a été découvert. J'ai eu la possibilité de voir comment fonctionnaient des projets européens et français ; et de prendre part et de participer à certaines réunions. Cela m'a aidé à de comprendre comment synthétiser et présenter mes résultats devant un auditoire. Ce stage m'a aussi donné l'occasion d'améliorer mes compétences en Python.

Les impacts positifs de ce projet sont de pouvoir dimensionner des parcs d'incinérateurs. Cela permet notamment de comprendre comment pourraient être amenés à évoluer les stocks de déchets nucléaires accumulés par le passé, mais aussi d'anticiper comment les stocks futurs pourraient être stabilisés ou consommés par des RSF. Il y a donc un réel enjeu lié à l'utilisation de matières nucléaires non valorisées dans le cycle actuel qui pourrait le devenir.

Un des impacts négatifs est que des études similaires sont réalisées par différents partenaires. Or, ces études peuvent être coûteuses en énergie et en ressources et une mutualisation des résultats pourrait réduire cette empreinte. De plus, le code ISF ne possède pas une documentation très détaillée. Cela pourrait simplifier la prise en main et réduire les ressources d'un futur projet qui ferait appel à ce code si la documentation était plus fournie.

E.4.2 Proposer des solutions d'ingénierie durable

Les RSF font appel à de nombreux domaines de la physique et de la chimie. Cela crée énormément d'études dans des domaines assez variés. On peut alors se demander si certaines études ne sont pas "prioritaires" par rapport à d'autres. Je n'ai pas pu observer si c'était le cas, mais il pourrait être intéressant de créer des hiérarchisations des études avec un système de validation. Dans le cas des RSF, est-il nécessaire de pousser toutes les études neutroniques, thermohydrauliques ou des scénarios tant que les problèmes de corrosion n'ont pas été résolus ? Il faudrait alors, selon les résultats de chaque étude, réévaluer la faisabilité des projets. Néanmoins, cela reste assez complexe, car les études sont souvent multiphysiques et des couplages entre toutes ces physiques sont nécessaires. Cela pose surtout une question plus large sur la recherche vis-à-vis du contexte écologique actuel. Est-il nécessaire de poursuivre des recherches même si la faisabilité du projet n'est pas avérée ? À plus petite échelle, au laboratoire, il y a des périodes dans lesquelles les machines de calcul sont peu utilisées. Par exemple, lors de périodes de vacances, il pourrait être utile d'éteindre certaines machines de calcul dans ces périodes.

E.4.3 Auto-évaluation

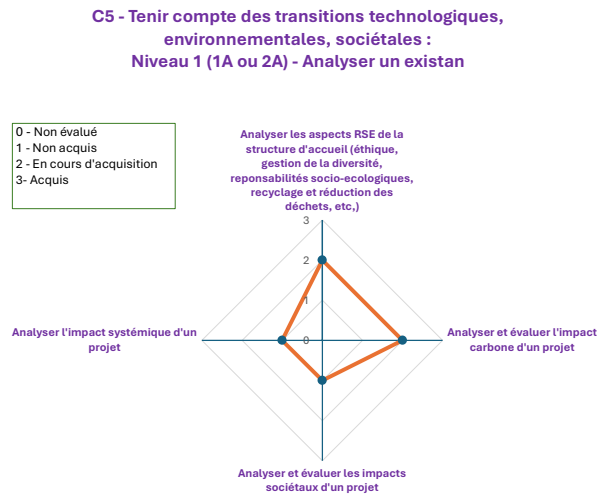


FIGURE E.4 – Auto-évaluation de la compétence 5

Bibliographie

- [1] LPSC, *Concept de Molten Salt Fast Reactor (MSFR) : réacteur à sels fondus en spectre neutronique rapide*. [En ligne, consulté en juin 2024]
<https://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/groupe-de-physique/msfr/presentation>
- [2] Projet de loi énergie climat. [En ligne, consulté en juillet 2024]
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/19060_Projet%20loi%20ENERGIE-CLIMAT_BAT.pdf
- [3] IAEA, NEA, *Uranium Resources, Production and Demand (Red Book 2022)*.
- [4] Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique. *France 2030 : Présentation des lauréats sur la thématique nucléaire « Matières et déchets radioactifs »*. Dossier de presse (2022)
- [5] MIMOSA [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://www.mimosa-euratom.eu/>
- [6] IRSN, *Le parc des réacteurs nucléaires français*. [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/parc-reacteurs-nucleaires-francais>
- [7] SFEN, *Le cycle du combustible nucléaire : de l'extraction au recyclage*. [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://www.sfen.org/academie235/le-cycle-du-combustible-nucleaire-de-l'extraction-au-recyclage/>
- [8] IRSN, *Cycle du combustible nucléaire en France - Dossier «Impact Cycle 2016»* (2018)
- [9] Laura Mesthiviers, *Capacité de conversion des transuraniens en Réacteurs à Sels Fondus (RSF)*, Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes (2022)
- [10] CEA, *Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides* (2015)
- [11] SFEN, *Qu'est-ce qu'un actinide mineur ?* [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://www.sfen.org/vos-questions/quest-ce-quun-actinide-mineur/>
- [12] Axel Laureau, *Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs*, Thèse de doctorat, Université Grenoble-Alpes (2015)
- [13] Elsa Merle et al, *Les réacteurs à sels fondus*. [En ligne, consulté en mai 2024]
https://www.encyclopedie-energie.org/reacteurs-sels-fondus/#_ftn1
- [14] GIF Portal [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://www.gen-4.org/gif/>
- [15] Louilliam Clot, *Étude des contraintes inhérentes au déploiement massif de réacteurs à sels fondus*, Stage de master 1, Grenoble INP - Phelma, UGA (2021)
- [16] E. Merle-Lucotte, D. Heuer, C. Le Brun, J.-M. Loiseaux, *Scenarios for a Worldwide Deployment of Nuclear Power*, International Journal of Nuclear Governance, Economy and Ecology, Volume 1, Issue 2, pp 168-192 (2006)
- [17] Elsa Merle et Daniel Heuer, *Programmes de simulation du déploiement de l'électro-nucléaire dans l'environnement DALI : module Scenarios Du Futur* (2004)

- [18] E. Merle-Lucotte, D. Heuer, M. Allibert, X. Doligez, V. Ghetta, *Simulation Tools and New Developments of the Molten Salt Fast Reactor*, Contribution A0115, Proceedings of European Nuclear Conference ENC2010, Barcelone, Spain (2010)
- [19] X. Doligez *et al*, *Coupled study of the Molten Salt Fast Reactor core physics and its associated reprocessing unit*, Annals of Nuclear Energy 64, 430440 (2014)
- [20] L. Clot *et al*, *New simulation controls for the molten salt reactors related neutronic evolution code REM*, Actes de la conférence internationale SNA+MC 2024, Paris, France (2024)
- [21] Alexis Nuttin, *Potentialités du concept de réacteur à sels fondus pour une production durable d'énergie nucléaire basée sur le cycle thorium en spectre épithermique*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier (2002)
- [22] O. Méplan *et al*, *MURE 2 : SMURE, Serpent-MCNP Utility for Reactor Evolution*, User Guide - Verion 1 (2017)
- [23] Baptiste Leniau *et al*, *A neural network approach for burn-up calculation and its application to the dynamic fuel cycle code CLASS*, Annals of Nuclear Energy, (2015)
- [24] Martin Guillet *et al*, *Coupled CLASS and DONJON5 3D full-core calculations and comparison with the neural network approach for fuel cycles involving MOX fueled PWRs*, Annals of Nuclear Energy, (2020)
- [25] Vincent Pascal *et al*, *Considerations for the Back End of the Fuel Cycle of Small Modular Reactors*, (2023)
- [26] CEA, (2012), *Séparation Transmutation des éléments radioactifs à vie longue*, Rapport sur la gestion durable des matières nucléaires, Tome 2 (2012)
- [27] Camille Laguerre, *ISAC T3.1.1 – Hypothèses du scénario du benchmark* (2022)
- [28] ANDRA, *Inventaire national des déchets radioactifs et des matières valorisables* (2006)
- [29] Power Reactor Information System. [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
- [30] Metawatt. [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://metawatt.fr>
- [31] négaWatt. [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://negawatt.org/>
- [32] Les Voix du Nucléaire. [En ligne, consulté en mai 2024]
<https://www.voix-du-nucleaire.org/campagnes/terrawater-le-scenario-energetique-des-voix/>

Résumé

Ce rapport présente des études réalisées au LPSC sur la capacité d'incinération d'une flotte de réacteurs à sels fondus. Ces réacteurs offrent des perspectives intéressantes concernant la gestion des déchets nucléaires. Plus particulièrement, ils permettent de transmuter le plutonium et les actinides mineurs.

Les études menées modélisent des scénarios de déploiement de réacteurs au sein du parc électronucléaire français, en utilisant le code ISF. Les résultats présentent comment des incinérateurs pourraient s'intégrer au parc et comment évoluent les stocks de matières. Ces scénarios permettent de dimensionner un parc d'incinérateurs d'actinides. Ces études montrent le potentiel de ces réacteurs pour réduire le stock d'actinides mineurs et de plutonium. Le rapport comprend des études qui s'inscrivent dans le projet ISAC.

Summary

This report presents studies carried out at the LPSC on the incineration capacity of molten-salt reactors. These reactors offer interesting prospects for nuclear waste management. Especially, they can transmute plutonium and minor actinides.

The studies carried out model reactor deployment scenarios within the French nuclear power fleet, using the ISF code. The results show how incinerators could be integrated into the fleet and how material stocks evolve. These scenarios can be used to size a fleet of actinide incinerators. These studies show the potential of these reactors to reduce the stock of minor actinides and plutonium. The report includes studies that are part of the ISAC project.