

ÉTUDE DES CONTRAINTES INHÉRENTES AU
DÉPLOIEMENT MASSIF DE RÉACTEURS À SELS FONDUS



Louiliam Clot
2A GEN

Encadré par
Laura Mesthiviers
Elsa Merle
Daniel Heuer

17 mai 2021 – 20 août 2021

Remerciements

Laura qui est totalement géniale.
Elsa qui est absolument fabuleuse.
Daniel qui est complètement extraordinaire.
Hugo pour ses simus superbes.
Axel pour le magnifique modèle 3D.
Toute l'équipe pour les cafés et pour votre patience.

Les potes de la Phear pour les burritos de l'amitié et les invectives pour ne pas dépasser les 50 heures par semaine, Maylis pour le choix de la magnifique couleur du PMFR.

Présentation du LPSC

Le Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie de Grenoble (LPSC) est une Unité Mixte de Recherche affiliée à l'Institut de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) du CNRS, l'université Grenoble-Alpes (UGA) et l'Institut d'ingénierie et de management de Grenoble (Grenoble INP), fondée en 1967 et dirigé par Arnaud Lucotte.

Situé sur le polygone scientifique, le laboratoire se veut être celui des deux infinis au travers de quatre axes de recherche :

- « des quarks aux noyaux »
- « astroparticules, cosmologie et neutrinos »
- « énergie et santé »
- « accélérateurs, sources d'ions et plasma »

L'équipe MSFR (*Molten Salt Fast Reactor*) du LPSC est une des équipes de recherche de la branche « énergie et santé » du laboratoire. Indépendante de l'équipe Physique des Réacteurs Nucléaires, elle s'intéresse plus généralement aux Réacteurs à Sels Fondus (RSF) à travers divers projets et concepts comme le « MSFR de référence », le projet européen SAMOFAR (*Safety Assessment of the MOLten salt FAST Reactor*) ou encore des petits réacteurs modulaires (*Small Modular Reactor* ou SMR) de faible puissance.

Coordonnées

- Louiliam Clot : louiliam.clot@phelma.grenoble-inp.fr
- Laura Mesthiviers : laura.mesthiviers@lpsc.in2p3.fr
- Elsa Merle : elsa.merle@lpsc.in2p3.fr
- Daniel Heuer : daniel.heuer@lpsc.in2p3.fr

Sommaire

Page

Glossaire	iv
Liste des tableaux	iv
Table des figures	v
Introduction	1
I. Problématique et définition d'une DÉM potentielle	1
1 ^e) Définition pragmatique d'un scénario	1
2 ^e) Travaux préliminaires de l'équipe MSFR du LPSC	2
3 ^e) Problématique(s)	3
4 ^e) Une nouvelle Demande Énergétique Mondiale	3
II. Présentation du code utilisé et scénario préliminaire avec des réacteurs à eau	5
1 ^e) Présentation et fonctionnement du code SdF	5
2 ^e) Illustration par l'exemple avec un parc composé uniquement de Réacteurs à Eau Légère (REL)	7
3 ^e) Comparaison avec les résultats d'un article antérieur	12
4 ^e) Réaliser une Évolution avec MCNP (REM)	13
III. Scénarios avec les réacteurs à sels fondus	13
1 ^e) Les réacteurs à sels fondus	13
2 ^e) Le <i>Thorium Molten Fluorine Reactor</i> (TMFR)	15
3 ^e) Le <i>Plutonium Molten Chloride Reactor</i> (PMCR)	18
4 ^e) Le <i>Plutonium Molten Fluorine Reactor</i> (PMFR)	20
IV. Comparaison des résultats obtenus	23
1 ^e) TMFR vs PMCR : la comparaison principale	23
2 ^e) TMFR vs PMFR : zoom sur les fluorures	23
3 ^e) PMCR vs PMFR : zoom sur le cycle U/Pu	23
4 ^e) Métacomparaison et conclusion partielle	24
V. Les réacteurs incinérateurs	26
1 ^e) La notion de déchet	26
2 ^e) Incinérateur ou Convertisseur?	26
3 ^e) Intérêt et fonctionnement des RICARD	26
4 ^e) Conclusion partielle	28
Conclusion	28
Références	a
Annexes	b
A Diagramme de Gantt	b
B Diagrammes DOT de sortie de SdF	b
C La relecture	k
D Sorties de compo.py	l

E Fichiers SdF du TMFR #2 0

Glossaire

- AM** Actinide Mineur
DÉM Demande Électrique Mondiale
EPR *European Pressurized Reactor*
Évomat Évolution d'un matériau
FdV Fin de Vie
GIF *Generation IV International Forum*, Forum International Génération IV
LPSC Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
MCNP Monte Carlo avec *N* Particules
MOx Mélange d'Oxydes, *Mixed Oxides*
MSFR *Molten Salt Fast Reactor*
PMCR *Plutonium Molten Chloride Reactor*
PMFR *Plutonium Molten Fluorine Reactor*
PF Produit de Fission
REL Réacteur à Eau Légère
REM Réaliser une Évolution avec MCNP
REP Réacteur à Eau Pressurisée
RICARD Réacteur Incinérateur à Conversion des Actinides pour la Réduction de la radioactivité des Déchets
RSF Réacteur à Sels Fondus
SdF Scénarios du Futur
TMFR *Thorium Molten Fluorine Reactor*
TRT Transsthoriens
TRU Transuraniens
UER Unités d'Enrichissement ou de Retraitement
UNGG Uranium Naturel Graphite-Gaz
UOx *Uranium Oxide*

Liste des tableaux

	Page
1	Caractéristiques des REP et des EPR 10
2	Appellations <i>ad hoc</i> nouvelles et personnelles des différents MSFR utilisés 14
3	Caractéristiques des TMFR moyennées sur 60 ans 16
4	Caractéristiques des PMCR moyennées sur 60 ans 19
5	Caractéristiques des PMFR moyennées sur 60 ans 21
6	Comparaison de certaines valeurs des scénarios 25
7	Caractéristiques des RICARD 27

Table des figures

	Page	
1	<i>I don't believe in global warning</i> , Banksy, 2009.	1
2	Schéma de principe d'un réacteur à sels fondus	2
3	Comparaison entre l'ancienne DÉM et la puissance installée effective de 1970 à 2020	4
4	Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle DÉM	4
5	Pictogrammes et conventions colorées des éléments du code SdF	5
6	Principe de fonctionnement de l'algorithme SdF à chaque pas	6
7	Simplification des réserves par ses évomats	7
8	Schéma de principe du cycle du combustible actuellement mis en œuvre en France	8
9	Le cycle du combustible nucléaire	8
10	Le cycle simplifié du combustible nucléaire	8
11	Scénario REL – Illustration du parc REL avant simplifications	9
12	Scénario REL – Illustration du parc REL	10
13	Scénario REL – Déploiement mondial du parc à eau actuel	11
14	Scénario REL – Ressources	11
15	Scénario à réacteurs à eau de l'article [4]	12
16	Scénario REL – Déploiement mondial du parc à eau actuel – EPR non moxés	12
17	Scénario REL – Ressources – EPR non moxés	13
18	Vue conceptuelle du circuit combustible du MSFR	14
19	Scénario REL+TMFR – Entrées et sorties du TMFR #2	16
20	Scénario REL+TMFR – Déploiement mondial	17
21	Scénario REL+TMFR – Stocks mondiaux	17
22	Scénario REL+TMFR – Répartition de l'énergie produite	18
23	Scénario REL+PMCR – Déploiement mondial	19
24	Scénario REL+PMCR – Stocks mondiaux	20
25	Scénario REL+PMCR – Répartition de l'énergie produite	20
26	Scénario REL+PMFR – Déploiement mondial	21
27	Scénario REL+PMFR – Stocks mondiaux	22
28	Scénario REL+PMFR – Répartition de l'énergie	22
29	Comparaison de la consommation d' ^{nat} U et de Thorium et de la production d' ^{app} U dans les trois scénarios	24
30	Scénario REL+TMFR+RICARD – Déploiement mondial	27
31	Scénario REL+PMCR+RICARD – Déploiement mondial	27
32	Scénario REL+PMFR+RICARD – Déploiement mondial	28
A	Diagramme de Gantt du stage	b
B	Scénario REL – Illustration du parc REL	c
C	Scénario REL – Illustration du parc REL – EPR non moxés	d
D	Scénario REL+TMFR – Illustration du parc REL+TMFR	e
E	Scénario REL+PMCR – Illustration du parc REL+PMCR	f
F	Scénario REL+PMFR – Illustration du parc REL+PMFR	g
G	Scénario REL+TMFR+RICARD – Illustration du parc REL+TMFR+RICARD	h
H	Scénario REL+PMCR+RICARD – Illustration du parc REL+PMCR+RICARD	i
I	Scénario REL+PMFR+RICARD – Illustration du parc REL+PMFR+RICARD	j

Introduction

Dans une société de plus en plus demandeuse en énergie électrique, il est nécessaire de s'interroger sur les modes de production de celle-ci. Alors que le scénario mondial « +2°C en 2050 » du GIEC [1] est en train de devenir un lointain phantasme, il devient primordial de trouver une solution décarbonnée et pérenne à ce défi en passe d'être le plus grand que l'Humanité aura à affronter (illustré à merveille par l'œuvre de la figure 1).



FIGURE 1 – *I don't believe in global warning*, Banksy, 2009.

Aujourd'hui en 2021, ces solutions existent sous la forme de barrages hydrauliques ou de centrales nucléaires fonctionnant sur le principe de la fission de l'Uranium 235; mais la place sur les rivières et les fleuves est limitée et les ressources en Uranium ne sont pas infinies. La *Nuclear Energy Agency* estime même en 2016 les réserves d'Uranium à moins de 130\$/KgU à 5,72 millions de tonnes, ce qui représente moins d'un siècle de combustible en considérant la consommation actuelle [2].

Les réacteurs nucléaires d'aujourd'hui – ainsi que ceux de demain – n'utilisent en très large majorité que la fission de l' ^{235}U pour fonctionner, et cet isotope ne représente que 0,7% de l'Uranium naturel ($^{\text{nat}}\text{U}$). La question intéressante sera comment optimiser cette ressource et valoriser les 99,3% de matière fertile que compose le reste de l' $^{\text{nat}}\text{U}$.

Pour cela, il sera nécessaire de s'intéresser à une potentielle quatrième génération de réacteurs nucléaires, qui viendra fatalement avec son lot de contraintes. Après avoir montré que les scénarios n'impliquant que les réacteurs à technologie actuelle ne sont pas pérennes, et en explicitant la démarche entreprise – notamment le fonctionnement du code utilisé pour ces dits-scénarios – il sera comparé différents types de ces réacteurs de quatrième génération parmi ceux que l'on appelle les Réacteurs à Sels Fondus (RSF).

I. Problématique et définition d'une Demande Électrique Mondiale potentielle

1^{er}) Définition pragmatique d'un scénario

Un scénario – de l'italien *scenario* signifiant « canevas d'une pièce de théâtre » [3] – est une esquisse, une ébauche de ce que pourrait être le futur d'une filière (ici électrogène) en prenant en compte certains paramètres initiaux et dans le but d'arriver à un objectif pré-établi. Un scénario n'est en aucun cas une prédiction de l'avenir, et les différents marqueurs temporels annoncés sont à prendre avec un recul inhérent à certaines approximations dans les différents modèles et aux aléas politiques et socio-économiques – comme une pandémie mondiale par exemple – qui peuvent survenir de manière imprévisible. Ainsi les différentes dates sont

données à titre d'indication et il est surtout pertinent de se concentrer sur les durées des différentes phases, donc le temps relatif par opposition au temps absolu.

Cette précision faite, un scénario va donc consister à prendre comme point de départ la condition et l'état du parc électro-nucléaire actuel et d'essayer d'arriver à un but précis : arriver à suivre et à satisfaire la demande énergétique mondiale (DÉM) en électricité, appelée simplement Demande Électrique Mondiale (toujours DÉM). Pour arriver à atteindre la consigne, le scénario va devoir prendre en compte un certain nombre de paramètres comme par exemple la disponibilité des ressources naturelles ainsi que des ressources constituées en réacteurs ou inhérentes à la fabrication du combustible et différents types de filières électronucléaires avec leurs caractéristiques [4]. Ces différentes filières sont démarrées selon un ordre de priorité établi et prenant en compte la disponibilité des ressources nécessaires à leur démarrage [5].

2^e) Travaux préliminaires de l'équipe MSFR du LPSC

En 2001, le Forum Génération IV (en anglais *Generation IV International Forum*, ou GIF) retient six concepts de potentiels réacteurs de quatrième génération avec pour l'objectif d'atteindre le déploiement à l'échelle industrielle pour 2030 [6]. Ces réacteurs sont dits de 4^e génération ; en effet, la première génération était composée des prototypes et des premières filières comme les UNGG (Uranium Naturel Graphite-Gaz) français. La deuxième génération correspond au premier déploiement massif de réacteurs majoritairement à eau. Et enfin, la troisième génération se veut être une amélioration de la deuxième, notamment en terme de sûreté et au niveau de l'enrichissement de l'Uranium. Les REP (Réacteur à Eau Pressurisée) français sont de 2^e génération et l'EPR (*European Pressurized Reactor*) se veut l'ambassadeur de la 3^e. La quatrième génération essaie de mettre l'emphase sur la gestion durable des ressources ainsi qu'un haut niveau de sûreté.

Sur les six concepts retenus par le GIF, celui principalement étudié au LPSC à Grenoble est le Réacteur à Sels Fondus (RSF, *Molten Salt Reactor* ou MSR en anglais) et en particulier le RSF à spectre neutronique rapide, appelé *Molten Salt Fast Reactor* ou MSFR, dont le schéma de principe est représenté à titre indicatif figure 2.

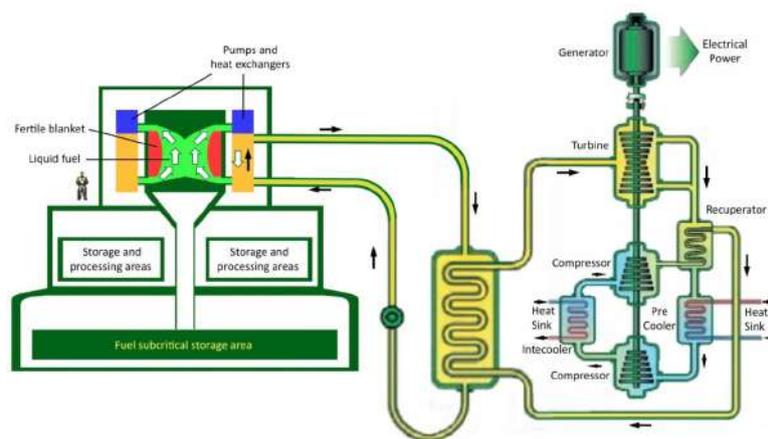


FIGURE 2 – Schéma de principe d'un réacteur à sels fondus [6].

La figure 2 nous montre les trois circuits du réacteur. Le circuit combustible, contenant le sel combustible liquide (*Liquid fuel*) circulant dans la zone critique (la partie vert clair) vers les échangeurs de chaleur (*heat exchangers* en orange). En dessous du réacteur se trouve un réservoir de vidange servant à rendre le sel sous-critique (*Fuel subcritical storage area*). Les échangeurs de chaleur transfèrent l'énergie thermique vers le circuit intermédiaire qui la transfère vers le circuit de conversion (avec les turbines) qui fabrique de l'électricité

comme n'importe quelle autre centrale nucléaire.

En 2006, l'équipe en charge des études au LPSC publie un article étudiant différents scénarios de déploiement mondial de réacteurs nucléaires [4]. En montrant d'abord qu'un parc exclusivement composé de réacteurs à eau n'arrive plus à satisfaire une demande énergétique croissante avant la fin du siècle, cet article s'intéresse à la possibilité de déployer massivement des réacteurs de 4^e génération au niveau de la gestion des ressources. Ces réacteurs de 4^e génération sont des réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium et des réacteurs à sels fondus au thorium, appelés à l'époque TMSR-NM (Pour *Thorium Molten Salt Reactor* non modéré [7]) et aujourd'hui « MSFR de référence. »

Ces scénarios — du point de vue de la gestion des ressources et du cycle du combustible — arrivent à satisfaire la demande croissante jusqu'à la fin du XXII^e siècle au moins et aboutissent à la conclusion qu'une quatrième génération de réacteurs nucléaires fondamentalement différente des trois premières doit nécessairement voir le jour.

Cette conclusion semble être partagée par le GIF qui a fixé comme objectif un déploiement massif pour 2030, témoignant d'un nombre de projets croissant et d'un gain d'intérêt important.

3^e) Problématique(s)

Les réacteurs à eau actuels ne peuvent donc pas satisfaire la demande mondiale en électricité future sans présenter trois problèmes majeurs que sont :

- La non-pérennité de la filière électronucléaire. En lien quasi-direct avec l'épuisement des ressources, la problématique réside dans le fait que la filière peut ne pas durer assez longtemps pour permettre par exemple le développement d'une source alternative telle que la fusion [7]. En clair et avec des mots simples : il faut durer le plus longtemps possible.
- L'épuisement et le gaspillage inutile des ressources naturelles. Dans une démarche de développement durable, l'épuisement des ressources est un problème qui non seulement met en péril la pérennité de la filière électronucléaire, mais il est aussi question de l'héritage que l'on peut laisser aux générations futures : dans l'éventualité où il serait nécessaire de redémarrer des filières nucléaires de fission dans le futur proche ou lointain, il peut être intéressant de laisser des ressources accessibles.
- La gestion des déchets produits. Que cela soit par entreposage, incinération ou stockage, le meilleur moyen reste avant tout d'en produire le moins possible pour avoir à en gérer le moins possible. Il ne sera pas détaillé pour le moment la définition exacte de ce qui est un déchet ou non.

Ces trois problèmes — en restant dans une logique de production d'électricité nucléaire — peuvent donc être résolus en introduisant une quatrième génération de réacteurs, ce qui amènerait fatalement à des contraintes inhérentes à un déploiement massif de ces réacteurs. Mais avant de se poser la question en détail de la pertinence d'un tel déploiement, il pourrait être intéressant de se demander si celui-ci est déjà possible avec les différents types de réacteurs à sels fondus actuellement en étude.

Le but de ce stage sera donc de comparer ces différents types de MSFR après les avoir identifiés.

4^e) Une nouvelle Demande Énergétique Mondiale

Dans l'article [4] paru en 2006, les différents scénarios s'appuient sur une prévision de la puissance électrique demandée, en partant du principe que cette demande serait multipliée par huit de 2000 à 2050. La figure 3 compare cette demande avec la puissance effectivement installée entre 1970 et 2020. Il est intéressant de remarquer que la tendance de l'époque était de considérer le nucléaire comme étant en plein essor (les pointillés marquent la rédaction de l'article [4]) alors qu'une vingtaine d'année plus tard, cette puissance n'a pas autant augmenté.

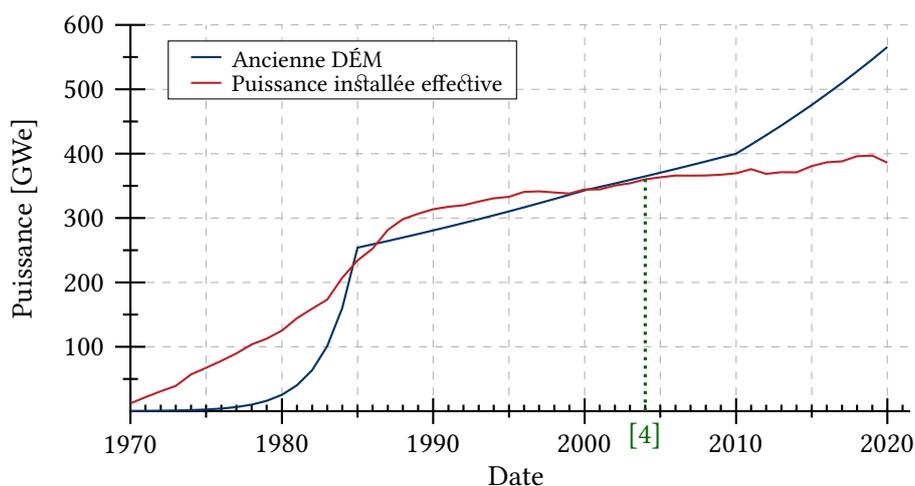


FIGURE 3 – Comparaison entre l'ancienne DÉM et la puissance installée effective [8] de 1970 à 2020

Cette observation tend à reconsidérer la DÉM projetée. En pariant sur une augmentation brutale du nucléaire pour les trente prochaines années, multipliant par dix la puissance installée entre 2020 et 2050, en considérant une croissance d'1% durant la seconde moitié du siècle (en considérant une croissance fixe du PIB de 2% et d'1% sur l'efficacité énergétique) et une croissance de 0,5% durant le siècle prochain il vient la courbe rouge de la figure 4 sur laquelle seront fondés les scénarios de la suite de ce rapport. Les hypothèses choisies étant réalistes, elles ne seront pas détaillées dans ce rapport.

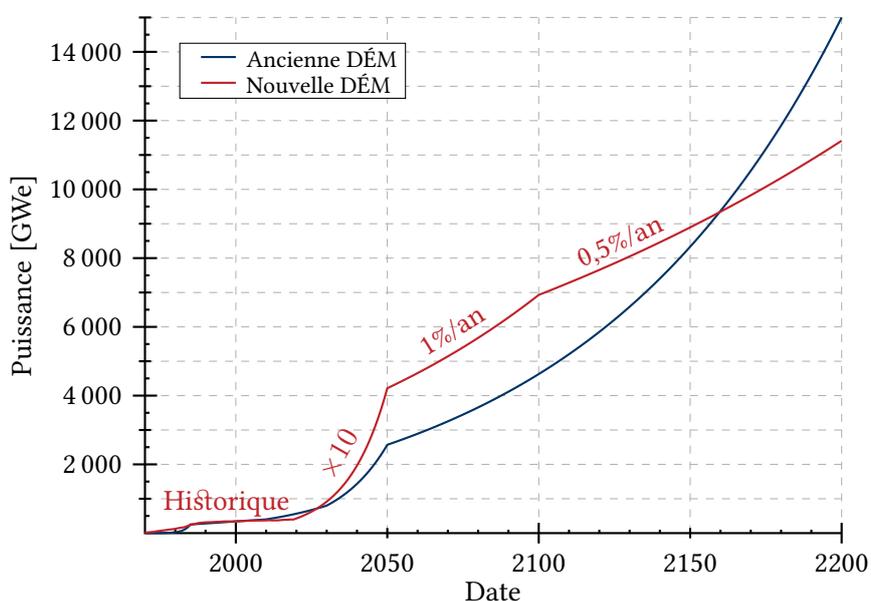


FIGURE 4 – Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle DÉM

Fournir une DÉM comme objectif est la première étape d'utilisation du code utilisé pour l'étude des scénarios de ce rapport et présenté dans la section suivante.

II. Présentation du code utilisé et scénario préliminaire avec des réacteurs à eau

1^{er}) Présentation et fonctionnement du code SdF

Le code Scénario du Futur (SdF) a été développé par Daniel Heuer dans l’environnement DALI en interne au LPSC pour les études de scénarios décrites dans l’article [4]. Il construit des scénarios du point de vue de la gestion des différents parcs des différentes filières électrogènes à disposition ainsi que la gestion des ressources présentes. Il se différencie des codes comme CLASS et COSI – appartenant respectivement au CNRS et au CEA – par son accessibilité et le fait qu’il s’agisse d’un code simplifié qui n’intègre pas le calcul des évolutions du combustible. En outre, la différence fondamentale de SdF est la possibilité de pouvoir y intégrer des RSF. SdF met donc en relation différents facteurs :

- **Matériaux** possédant un vecteur isotopique propre ;
- **Évomat**, l’évolution temporelle de la quantité d’un matériau ;
- **Stocks et Réserves** de matériaux ;
- **Réacteur** ayant une puissance, une année minimale de mise en service, une durée de vie et des évomats en entrée et en sortie ;
- **Unité d’Enrichissement ou de Retraitement (UER)**, fonctionnant comme un **Réacteur** mais avec une puissance nulle, servant à transformer des évomats ;
- **Parc** de réacteurs, régissant le tout.

Ces différents éléments ainsi que leurs relations peuvent être représentés dans un graphe orienté avec la convention montrée dans la figure 5. Ces graphes sont générés par le code SdF en langage DOT puis générés en dessin vectoriel ou alors dessinés avec le langage TikZ.

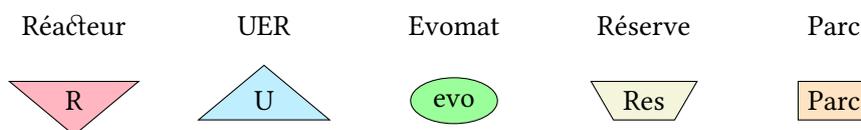


FIGURE 5 – Pictogrammes et conventions colorées des éléments du code SdF

L’algorithme met en relation des matériaux à l’aide d’un parc composé de différentes filières de réacteurs classées par ordre de priorité. Cette priorité peut être définie par rapport aux ressources (par exemple préférer démarrer un REP moxé au lieu d’un REP classique) et l’est de toutes façons par les dates minimales des mises en service (un EPR du XXI^e siècle ne sera pas démarré en 1980). L’algorithme a donc plusieurs réacteurs et a pour objectif de satisfaire une demande – ici, la DÉM – à chaque pas de temps, qui est ici d’un an. Autrement dit, chaque année, SdF va tenter tour à tour d’allumer des réacteurs pour atteindre la DÉM en fonction des ressources disponibles et de si la filière peut exister à la date considérée, comme il est montré dans la figure 6.

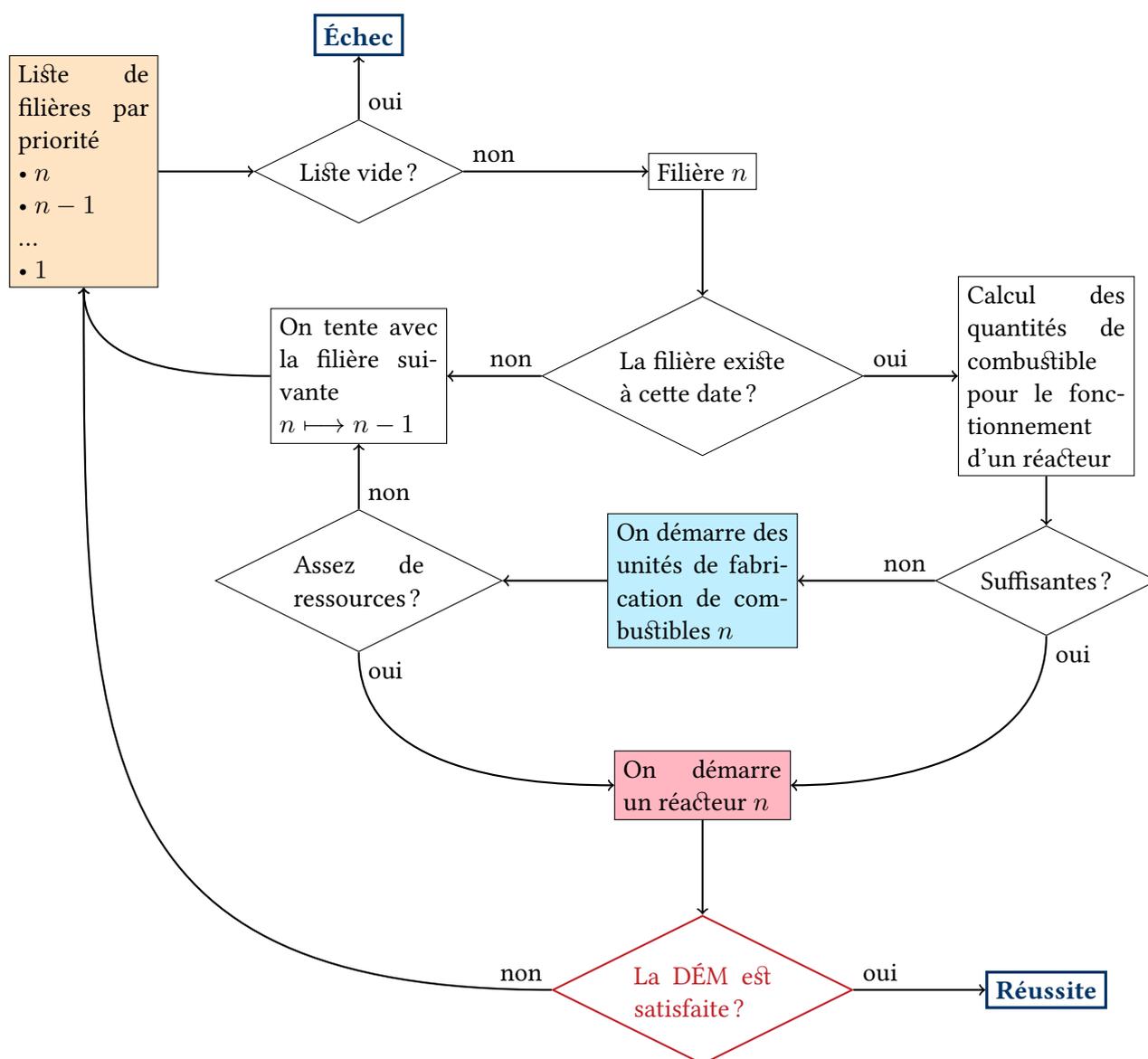


FIGURE 6 – Principe de fonctionnement de l’algorithme SdF à chaque pas [5]

À chaque pas de temps, l’algorithme va essayer de démarrer le premier réacteur de sa liste. Si la date de démarrage de la filière est atteinte, alors il va calculer les quantités de combustible nécessaires pour le fonctionnement du réacteur **durant toute sa vie**. Si ces quantités sont suffisantes, il le démarre. Si elles ne le sont pas, il va tenter de démarrer une UER associée à ce réacteur pour les fabriquer.

Les UER fonctionnent de la même manière que les réacteurs au niveau du code, elles nécessitent une quantité de matières premières suffisante pour pouvoir démarrer et produire le combustible. Si ces quantités sont suffisantes, alors le combustible est fabriqué et le réacteur peut démarrer. Si ce n’est pas le cas, alors il est impossible pour le code de démarrer le réacteur. Lorsqu’un réacteur sur la liste des priorités est dans l’incapacité de démarrer, l’algorithme recommence avec la filière suivante, et ainsi de suite, jusqu’au pas suivant.

Il y a deux manières de terminer un pas de temps. En effet, dès qu’un réacteur est allumé, SdF regarde si la puissance qu’il ajoute au parc effectif suffit à satisfaire la DÉM. Si tel est le cas, l’algorithme passe à l’année

suivante. Si ce n'est pas le cas, il recommence le cycle, et ce jusqu'à atteindre la DÉM à ce pas. Enfin, si l'algorithme épuise sa liste de filières, en n'arrivant jamais à démarrer suffisamment de réacteurs pour satisfaire la DÉM par manque de ressources — en d'autres mots, s'il arrive à la fin de la liste — alors le code passe à l'année suivante sans avoir satisfait la DÉM. Il s'agit d'un échec qui n'arrête pas pour autant le code.

Si chaque réacteur a une durée de vie et une date minimale de mise en service, c'est également le cas du parc et par extension de l'algorithme. Ainsi, que la DÉM soit satisfaite ou non année par année, l'algorithme commence et termine à des dates précisées, l'empêchant de boucler indéfiniment.

Il est à noter que durant la suite de cette explication, une grosse simplification sera faite dans les schémas, résumée dans la figure 7. En effet, les réacteurs mettent en relation des réserves de matériaux au travers d'événements. Pour simplifier les schémas (dont la relative complexité peut être admirée dans l'**Annexe B**) les réserves seront remplacées par les événements d'entrée et de sortie de celles-ci.

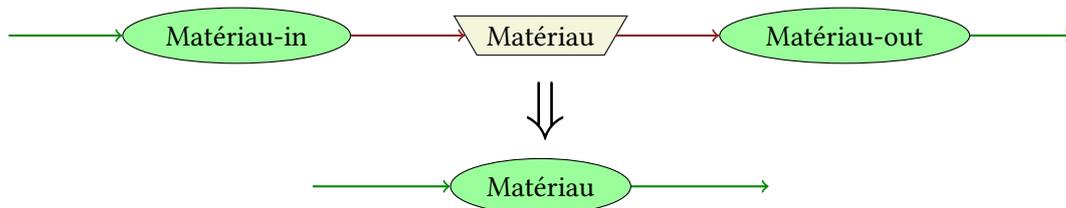


FIGURE 7 – Simplification des réserves par ses événements

Remarque anecdotique : les flèches en relation avec les réserves sont rouges tandis que les autres sont vertes. Il n'y a pas spécialement de raison évoquée si ce n'est une certaine sensibilité au fait de rendre les schémas lisibles.

2^e) Illustration par l'exemple avec un parc composé uniquement de Réacteurs à Eau Légère (REL)

Ⓐ Simplification du cycle du combustible

Pour illustrer le fonctionnement de SdF, il peut être intéressant de prendre un exemple relativement simple. Le parc ici considéré est appelé REL, pour Réacteurs à Eau Légère et est composé de REP et d'EPR, qui peuvent fonctionner avec de l'UOx (combustible d'oxyde d'Uranium) ou avec du MOx (mélange d'oxydes, avec de l'Uranium et du plutonium), le plutonium servant à la fabrication du MOx étant produit dans les réacteurs fonctionnant avec l'UOx [9]. Ce cycle du combustible est représenté dans la figure 8.

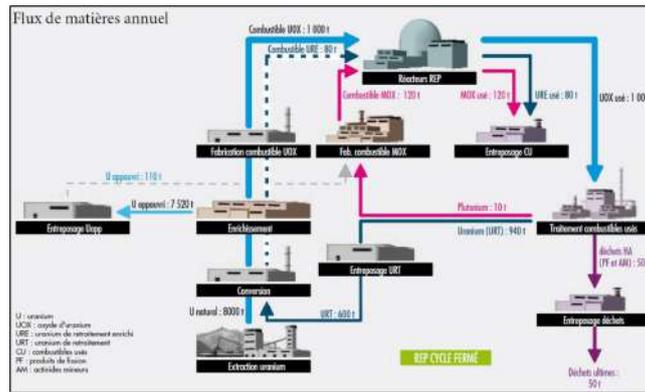


FIGURE 8 – Schéma de principe du cycle du combustible actuellement mis en œuvre en France [10]

Ce cycle peut être simplifié et schématisé avec les conventions établies dans la section précédente pour donner la figure 9. Il s'agit d'une première étape dans laquelle les usines et les transformations successives ont été pour certaines concaténées, comme par exemple les usines Comurhex de Malvézi et de Pierrelatte ainsi que l'usine Georges-Besse II du Tricastin qui sont regroupées sous l'appellation « Eurodif. »

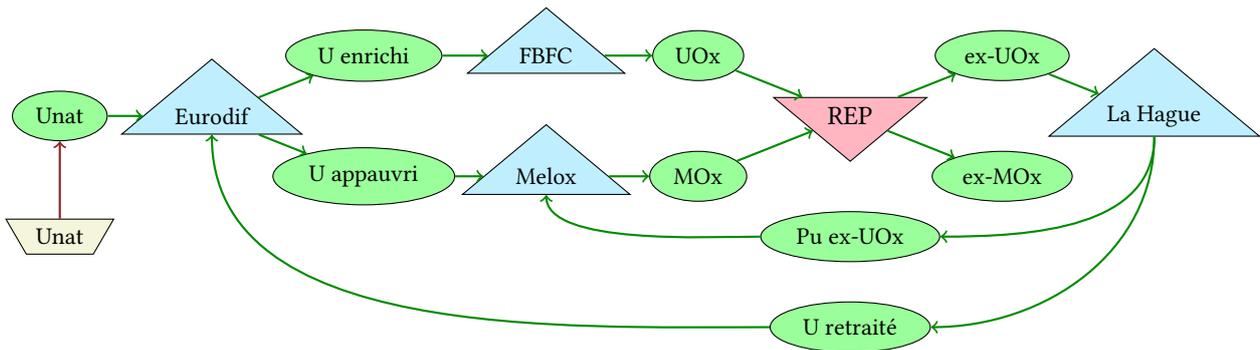


FIGURE 9 – Le cycle du combustible nucléaire

Ce cycle peut être simplifié une dernière fois en incorporant certaines unités d'enrichissement ou de retraitement dans les réacteurs, ce qui nécessite la séparation de la filière en deux distinctes composées d'une part des réacteurs « classiques » fonctionnant à l'UOx et d'autre part des réacteurs moxés, utilisant donc en plus le combustible MOx. Cette relative simplification, faisant en sorte qu'il n'y ait plus qu'une seule évomat entre chaque réacteur et UER donne la figure 10.

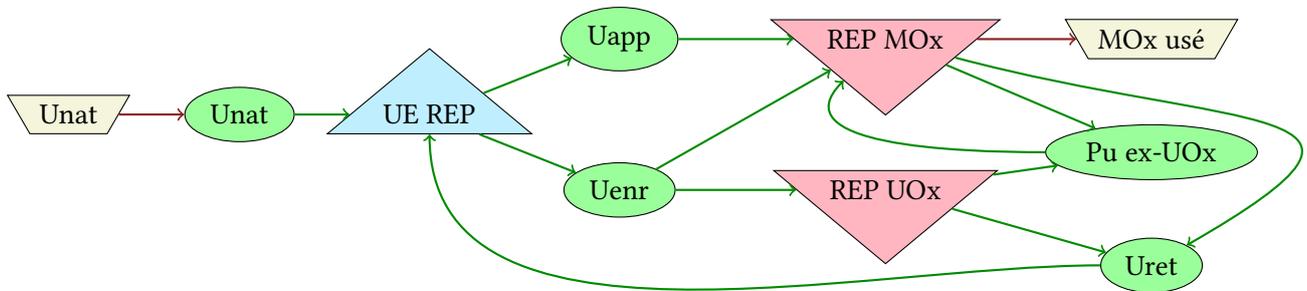


FIGURE 10 – Le cycle simplifié du combustible nucléaire

Ici, la notion même d'UOx et de MOx disparaît pour laisser place à de l'Uranium plus ou moins enrichi ou appauvri. Les appellations « ex-UOx » et « ex-MOx » sous entendent un retraitement (comme le Pu ex-UOx) tandis que les combustibles irradiés sont plutôt appelés respectivement « UOx usé » et « MOx usé. » Il est enfin intéressant de noter qu'aujourd'hui en 2021, le MOx usé qui sort des réacteurs nucléaires français sont simplement entreposés sur site et à La Hague en attendant une potentielle revalorisation future [11].

Enfin, il est à noter que, contraire à ce que peut suggérer la simplification faite avec le principe illustré figure 7, ce n'est pas parce que l'évomat Uenr entre à la fois dans le REP UOx et le REP MOx que les quantités consommées par chaque réacteur sont les mêmes. La simplification ne fait pas état des quantités, ce qui est le cas avec les diagrammes DOT.

⑥ Création du scénario avec SdF

Maintenant que le cycle de vie d'un réacteur de type REP est prêt à être implanté dans le code SdF, il suffit d'appliquer la même procédure pour les réacteurs de type EPR et de mettre les deux cycles en parallèle comme dans la figure 11, non sans avoir simplifié les entrées et les sorties de l'EPR MOx qui sera considéré comme étant moxé à 100%.

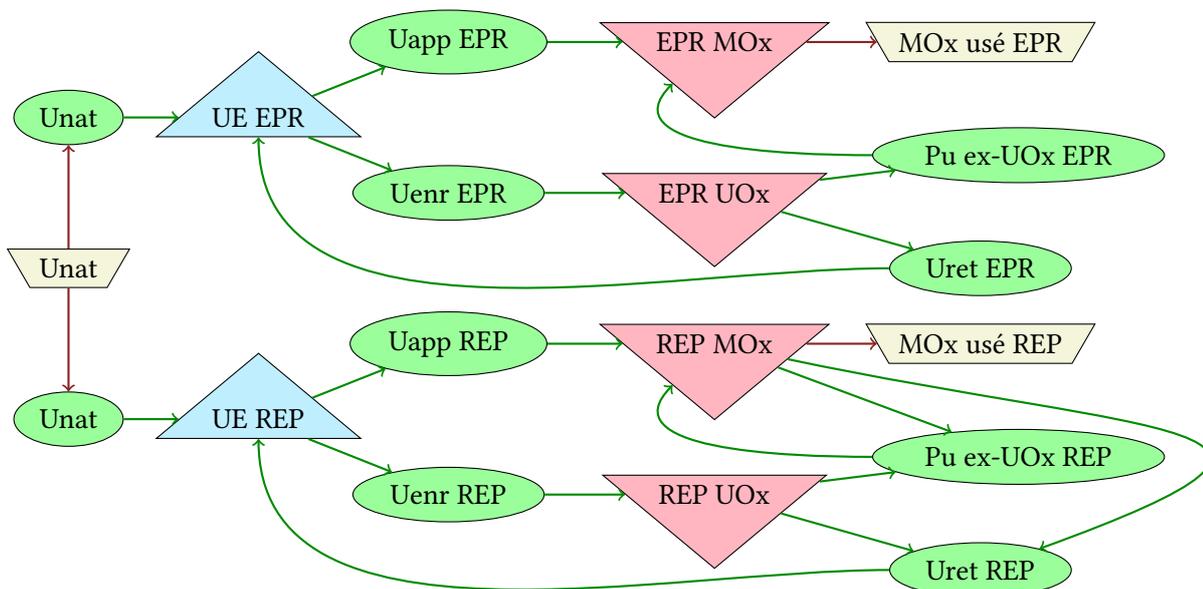


FIGURE 11 – Scénario REL – Illustration du parc REL avant simplifications

Ici, toutes les évomats sont affublées d'un « REP » ou d'un « EPR » mais si cela est nécessaire pour certains matériaux comme l'Uranium enrichi, il sera fait une ultime simplification concernant notamment le Pu ex-UOx, le MOx usé et l'Uranium retraité. La figure 12 montre ce parc REL simplifié.

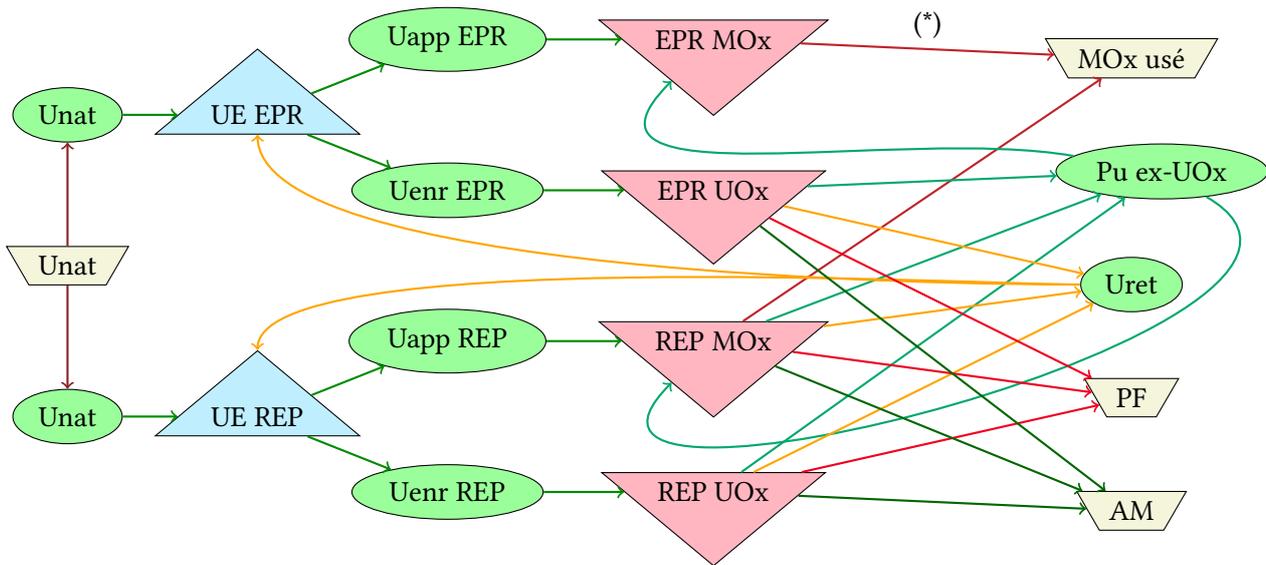


FIGURE 12 – Scénario REL – Illustration du parc REL – cf. FIGURE C

Il est à noter ici que c'est le parc qui est simplifié. Pour des raisons de lisibilité, le code couleur des sorties a été légèrement modifié, cela dit, il est intéressant de comparer la figure 12 avec la version produite par le code SdF présentée dans la figure C en **Annexe B**. Enfin, il est à noter l'apparition des matériaux PF et AM (respectivement les Produits de Fission et les Actinides Mineurs) qui avaient été omis dans les schémas précédant par soucis de clarté. Le tableau 1 vient en complément donner la valeur des échanges de matière.

	REP	REP moxé 30%	EPR	EPR moxé 100%
Puissance nominale	1,08 GWe	1,08 GWe	1,65 GWe	1,65 GWe
Date de début de la filière	1970	1998	2018	2030
Durée de vie d'un réacteur	50 ans	50 ans	60 ans	60 ans
Caractéristiques du combustible :				
Alimentation en U enrichi	27,2 t/an	19,04 t/an	19,3 t/an	-
Production d'U retraité	26 t/an	18,2 t/an	17,55 t/an	-
Production de Pu ex-UOx	270 kg/an	653 kg/an	250 kg/an	-
Production de PF	909 kg/an	636 kg/an	1,47 t/an	(*)
Production d'AM	21 kg/an	15 kg/an	34 kg/an	(*)
Alimentation en U appauvri	-	7,5 t/an	-	18 t/an
Alimentation en Pu ex-UOx	-	189 kg/an	-	410 kg/an
Production de MOx usé	-	18,41 t/an	-	8,16 t/an

TABLE 1 – Caractéristiques des REP et des EPR [4, 7]

Une remarque (*) importante sur le tableau 1 et sur la figure 12 : les EPR moxés produisent des PF et des AM. Seulement, dans ce scénario où le MOx usé n'est pas retraité, toutes les matières en sortie sont mélangées dedans.

Ainsi, SdF va tenter d'allumer successivement et dans cet ordre des EPR MOx, des EPR UOx, des REP MOx ou des REP UOx, année par année, et ce pour atteindre l'objectif de la DÉM. S'il n'arrive pas à démarrer un réacteur, il va alors démarrer une UE, unité d'enrichissement pour fabriquer le combustible nécessaire. Cela

va donner finalement le scénario de la figure 13.

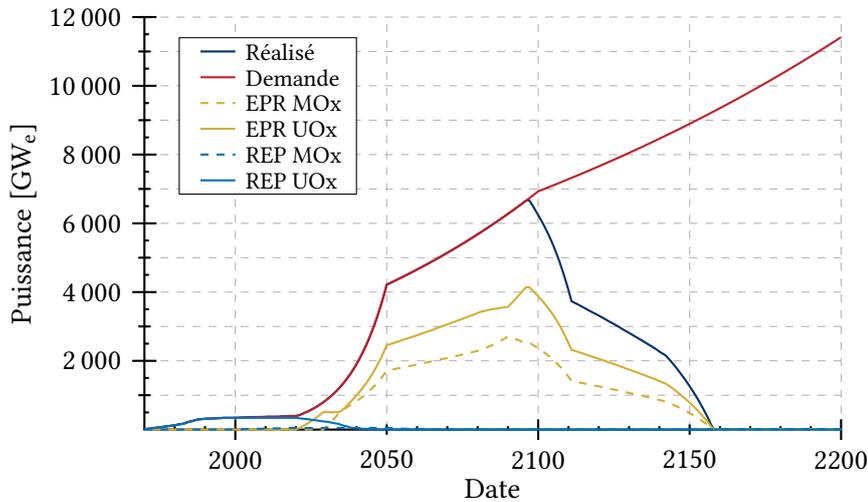


FIGURE 13 – Scénario REL – Déploiement mondial du parc à eau actuel

La DÉM est assurée jusqu’à la fin du siècle, puis les réserves d’Uranium naturel s’épuisent à partir de cette date, comme montré dans la figure 14. Il est à noter que l’on part d’un scénario très optimiste où les réserves d’Uranium naturel sont prises à 23 millions de tonnes. Il s’agit ici d’un choix complètement arbitraire [4] et ne sert qu’à titre d’exemple.

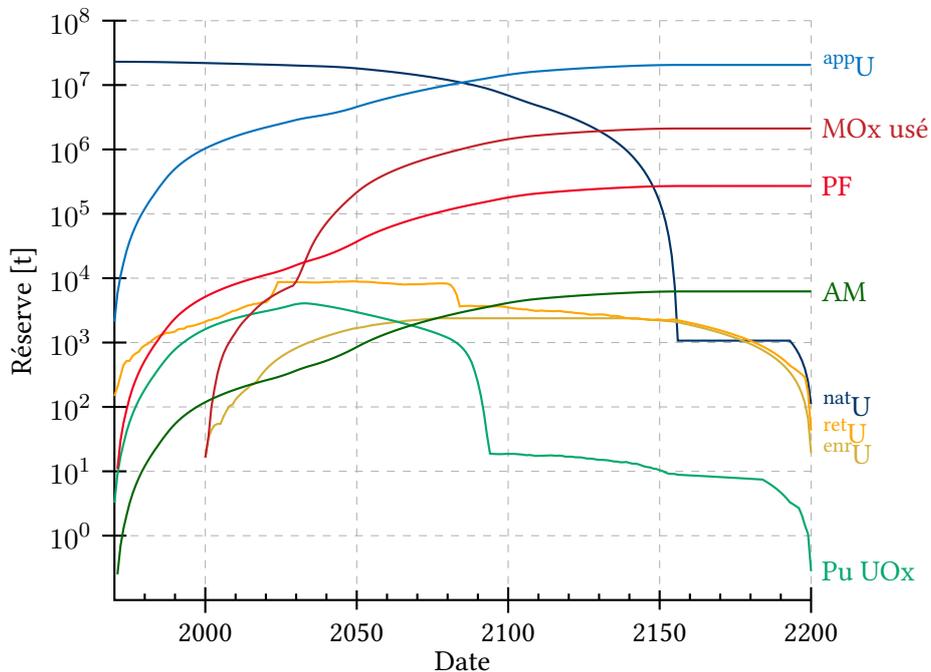


FIGURE 14 – Scénario REL – Ressources

Cet exemple illustre parfaitement le fonctionnement de SdF. La figure 13 montre que plus aucun EPR n’est démarré à partir d’environ 2080, or la figure 14 montre qu’il reste encore une quantité non négligeable d’Uranium à cette date. Cela montre comment SdF ne démarre un réacteur que s’il possède la quantité de combustible

suffisante pour le faire fonctionner toute sa vie durant. D'ailleurs, en fin de scénario, tout l'Uranium naturel initial a été consommé, en devenant de l'Uranium appauvri ou irradié, du Plutonium, des AM ou des PF.

3^e) Comparaison avec les résultats d'un article antérieur

Dans l'article [4] présenté dans la partie I.2^e), l'équipe MSFR du LPSC a reproduit ce même scénario, et a abouti au graphique de la figure 15.

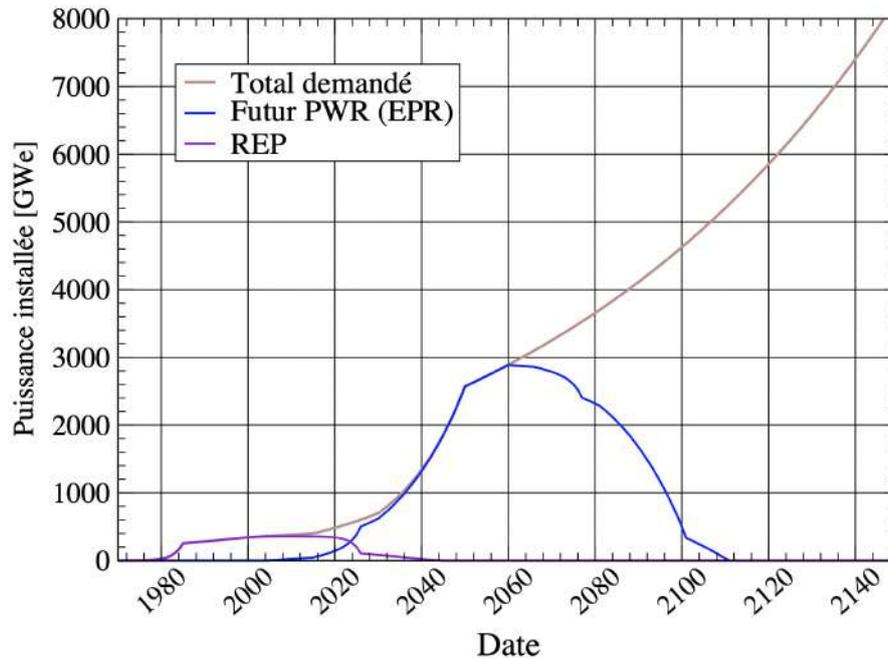


FIGURE 15 – Scénario à réacteurs à eau de l'article [4]

Ce scénario ne prévoyait pas de mixer les EPR. Avec les nouvelles hypothèses énoncées ci-dessus, cela revient à comparer la figure 15 avec la figure 16.

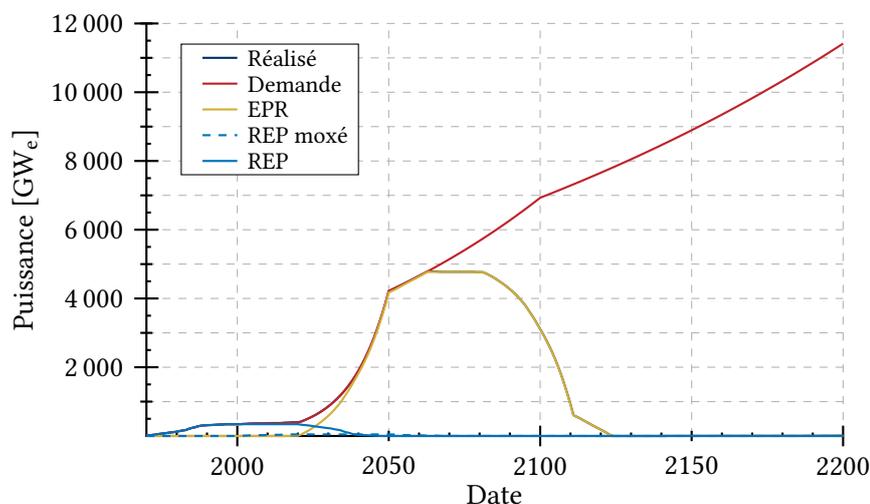


FIGURE 16 – Scénario REL – Déploiement mondial du parc à eau actuel – EPR non mixés

Nonobstant la DÉM différente, il est intéressant de remarquer des similitudes entre les deux courbes de puissance des EPR. Ce parc de REL (Réacteurs à Eau Légère) sera celui utilisé dans les scénarios impliquant des MSFR, sans moxage des EPR dans un premier temps, ce qui n'empêche pas ce scénario de produire quelques 18000 tonnes de MOx usé (figure 17) à mettre en perspective avec les 2 mégatonnes de la figure 14.

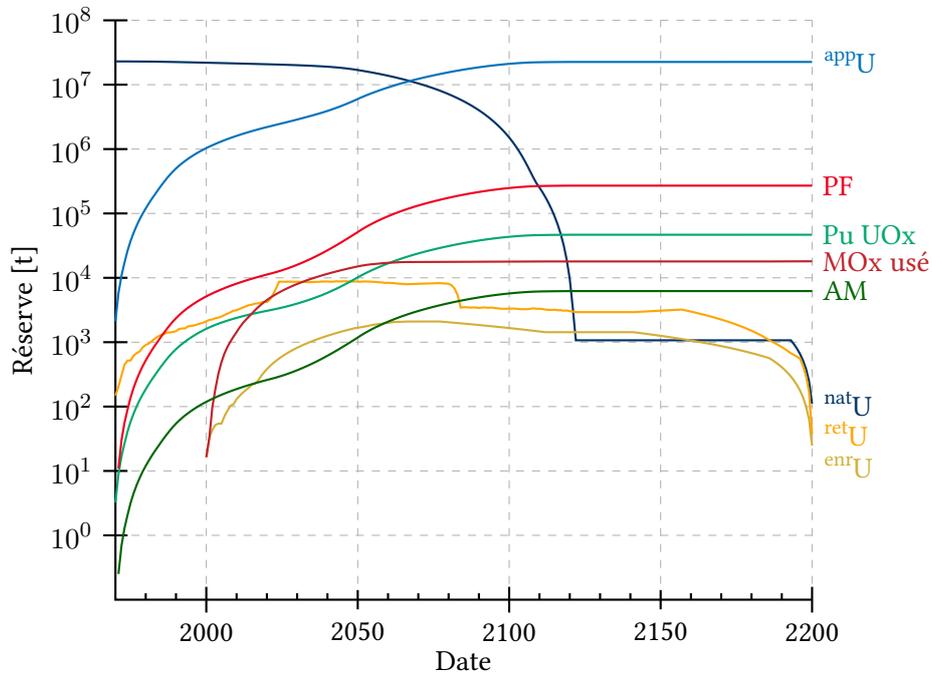


FIGURE 17 – Scénario REL – Ressources – EPR non moxés

4^e) Réaliser une Évolution avec MCNP (REM)

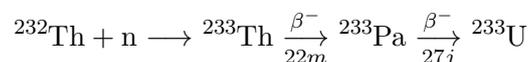
Les données de la section suivante ont été produites et extraites avec le code REM (Réaliser une Évolution avec MNCP, MCNP signifiant Monte-Carlo à N Particules) développé en interne au LPSC. Ce code est utilisé pour calculer les évolutions des matériaux dans les RSF ainsi que leur irradiation en ajustant les alimentations et les extractions afin de garder la criticité du sel (entre autres critères de contrôle). Ce code possède un module de relecture des données produites dont la procédure d'utilisation est explicitée dans l'Annexe C.

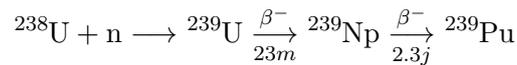
III. Scénarios avec les réacteurs à sels fondus

1^e) Les réacteurs à sels fondus

Les réacteurs à sels fondus à spectre neutronique rapide – ou MSFR – peuvent avoir comme particularité de pouvoir être régénérateurs, en plus du fait que leur combustible est incorporé dans un sel solvant qui joue le rôle de caloporteur et qui circule.

Le principe de régénération repose sur le fait qu'il existe deux éléments fertiles présents en abondance dans la nature : le ^{232}Th et l' ^{238}U . Ces deux éléments sont dits fertiles car ils peuvent produire un élément fissile par capture neutronique :





Ces cycles sont appelés les cycles ${}^{232}\text{Th}/{}^{233}\text{U}$ et ${}^{238}\text{U}/{}^{239}\text{Pu}$, ou encore Th/U et U/Pu. Si un réacteur fonctionne à l' ${}^{233}\text{U}$ (respectivement au ${}^{239}\text{Pu}$) et que l'on insère du ${}^{232}\text{Th}$ (resp. de l' ${}^{238}\text{U}$) dans le combustible, celui-ci va produire de l' ${}^{233}\text{U}$ (resp. du ${}^{239}\text{Pu}$) en capturant un neutron : le réacteur produit son propre combustible en utilisant la matière fertile injectée. Un réacteur est dit isogénérateur s'il produit autant de combustible qu'il n'en consomme. S'il en produit davantage, il est qualifié de surgénérateur.

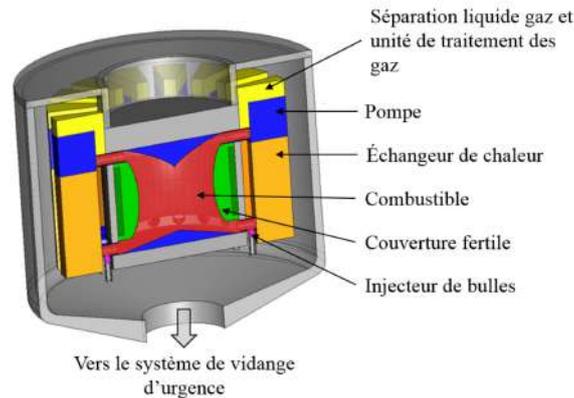


FIGURE 18 – « Vue conceptuelle du circuit combustible du MSFR » [12]

Le circuit du réacteur dans lequel circule le combustible lors de la production de puissance est nommé circuit combustible. Il est composé de la zone de cœur (où les fissions ont lieu, en sur la figure 18) et de secteurs de circulation et de refroidissement du sel combustible (avec une pompe et un échangeur de chaleur par secteur). Une couverture fertile est située entre le cœur et les échangeurs de chaleur : il s'agit d'un circuit séparé contenant un sel liquide nommé sel fertile (en vert sur la figure 18) contenant comme son nom l'indique de la matière fertile destinée à produire du combustible en se servant des fuites neutroniques du réacteur. L'autre utilité bénéfique de la couverture fertile est la radioprotection des éléments du réacteur comme les échangeurs de chaleur [12, 7]. Dans la suite de ce rapport, les matières localisées dans le circuit combustible seront étiquetées « Cœur » et celles de la couverture fertile « Couverture. »

Il y a donc deux cycles fertile/fissile. En outre, deux grandes familles de solvants dans lesquels les matières fertiles et fissiles sont incorporées ont été identifiés. Ces deux familles peuvent être soit des sels chlorures, soit des sels fluorures. Cela donne donc quatre grandes familles théoriques de MSFR, comme le tableau 2 le résume.

Sel : \ Cycle :	${}^{232}\text{Th}/{}^{233}\text{U}$	${}^{238}\text{U}/{}^{239}\text{Pu}$
Fluorure	TMFR	PMFR
Chlorure	TMCR	PMCR

TABLE 2 – Appellations *ad hoc* nouvelles et personnelles des différents MSFR utilisés

Dans la suite de ce rapport ne seront étudiés que trois de ces quatre familles. Chacune a hérité d'un nom propre à ce rapport :

- **TMFR** — *Thorium Molten Fluorine Reactor*, réacteurs à sels fluorures fonctionnant sur le cycle Th/U. Il s'agit du MSFR de référence, étudié et optimisé depuis des années.

- **PMCR** — *Plutonium Molten Chloride Reactor*, réacteurs à sels chlorures fonctionnant sur le cycle U/Pu. Il s'agit de la deuxième sorte de MSFR principalement étudiée. Il est en cours d'optimisation, notamment dans le cadre de la thèse d'Hugo Pitois au LPSC et dont proviennent les données de ce rapport.
- **PMFR** — *Plutonium Molten Fluorine Reactor*, réacteurs à sels fluorures fonctionnant sur le cycle U/Pu. Un article dont proviennent les données de ce rapport est paru en 2019 [13]. Il ne sera étudié ici qu'à titre de curiosité.

La quatrième famille, qui porterait logiquement le nom de *Thorium Molten Chloride Reactor*, n'est pas étudiée ici de par le manque flagrant de données.

Ces réacteurs vont donc venir à la suite des REP et des EPR dans les scénarios de déploiement mondial. Chaque famille de ces réacteurs possède deux ou trois types de MSFR : les premiers démarreront avec de l'Uranium ou du plutonium produit par les REL, et les seconds (ou troisièmes) pourront démarrer avec les matières fissiles produites dans les premiers. Dans tous les cas, leur durée de vie a été prise de 60 ans, ils démarreront à partir de 2030 dans les scénarios et auront des puissances électriques de 1.5 GW_e (ces réacteurs sont conçus pour avoir une puissance thermique de 3 GW_{th} et il sera fait l'hypothèse d'un rapport de conversion électrique de 50%).

Il est enfin à noter que la différence fondamentale du point de vue du code SdF entre les REL et les MSFR concernent les entrées et les sorties des réacteurs. Si celles-ci ont été prises de manière simplifiée (et faute de plus de données) comme constantes chez les REL (c'est à dire que tous les ans, il entre la même quantité de combustible) ce n'est pas le cas pour les MSFR. En effet, il est plutôt courant d'avoir une grande quantité de matière — nommée inventaire initial — au démarrage du réacteur, une entrée et une sortie variables (même si elle est globalement constante tout de même) durant toute la durée de vie et enfin une grande quantité de matière — nommée inventaire final — à la Fin de Vie (FdV) du réacteur. Ce phénomène est explicité par la figure 19 montrant année par année les quantités de matières en entrée et en sortie des MSFR de référence. Cette subtilité justifie la procédure explicitée dans l'**Annexe C**, tandis que l'**Annexe E** montre la manière dont celle-ci est implémentée au sein même du code.

2^e) Le *Thorium Molten Fluorine Reactor* (TMFR)

Le MSFR de référence, sur cycle $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ et à sels fluorures, est ici appelé *Thorium Molten Fluorine Reactor* ou **TMFR**. Deux réacteurs de ce type, appelés sobrement TMFR #1 et TMFR #2, ont été considéré pour cette étude et ce scénario.

Le **TMFR #1** démarre avec 31 tonnes de $^{\text{enr}}\text{U}-\text{Pu}_{\text{EVOL}}$. Il s'agit d'Uranium enrichi (13%) mélangé avec du Plutonium provenant des REP et des EPR. Ce réacteur va produire de l' ^{233}U à partir de ^{232}Th , et cet ^{233}U va permettre de démarrer le TMFR #2.

Le **TMFR #2** démarre avec 4,86 tonnes d' ^{233}U , et est alimenté avec du Thorium.

Les valeurs moyennées sur toute la durée de vie des réacteurs — ici de 60 ans — sont compilées dans le tableau 3. Ces valeurs sont moyennées car, comme la figure 19 le montre, les évènements d'entrées et de sorties varient d'une année à l'autre.

	TMFR #1	TMFR #2
Puissance nominale	3 GW _{th} – 1,5 GW _e	
Date de début de la filière	2030	
Durée de vie d'un réacteur	60 ans	
Caractéristiques du Cœur :		
Alimentation en ²³³ U	112 kg/an	4,86 t + 142 kg/an
Alimentation en thorium	12,7 t + 1,08 t/an	38,5 t + 1,06 t/an
Alimentation en ^{enr} U–Pu _{EVOL}	31,26 t	-
Extraction de ²³³ U	60 kg/an + 4,19 t	66,9 kg/an + 4,85 t
Extraction de thorium	30,6 t	34,5 t
Extraction d' ^{enr} U–Pu _{EVOL}	6,27 t	-
Extraction de PF	70,6 t	72,6 t
Extraction d'AM	1,2 t	0,62 t
Caractéristiques de la couverture :		
Alimentation en thorium	17,6 t + 116 kg/an	17,6 t + 112 kg/an
Extraction de ²³³ U	113 kg/an + 56,6 kg	109 kg/an + 53,7 kg
Extraction de thorium	17,7 t	17,6 t

TABLE 3 – Caractéristiques des TMFR moyennées sur 60 ans

La convention utilisée dans le tableau 3 (mais aussi dans les tableaux 4 et 5) est la suivante. La case « 12,7 t + 1,08 t/an » signifie une alimentation initiale de 12,7 t suivie d'une alimentation annuelle moyenne de 1,08 t. La case « 113 kg/an + 56,6 kg » signifie quand à elle une extraction annuelle moyenne de 113 kg terminant par une extraction finale de 56,6 kg en fin de vie du réacteur.

Il est important de noter que, du point de vue du code – et donc dans la figure 19 – la distinction Cœur/Couverture n'existe pas. Ainsi, l'apport de Thorium initial est de 57,1 t, ce qui correspond bien à la somme des alimentations initiales (38,5 t dans le Cœur et 17,6 t dans la Couverture) et de celle de la première année (environ 1 t dans le Cœur et une centaine de kg dans la Couverture). Les fichiers d'entrées et de sorties utilisés par SdF pour simuler le TMFR #2 se trouvent dans l'Annexe E.

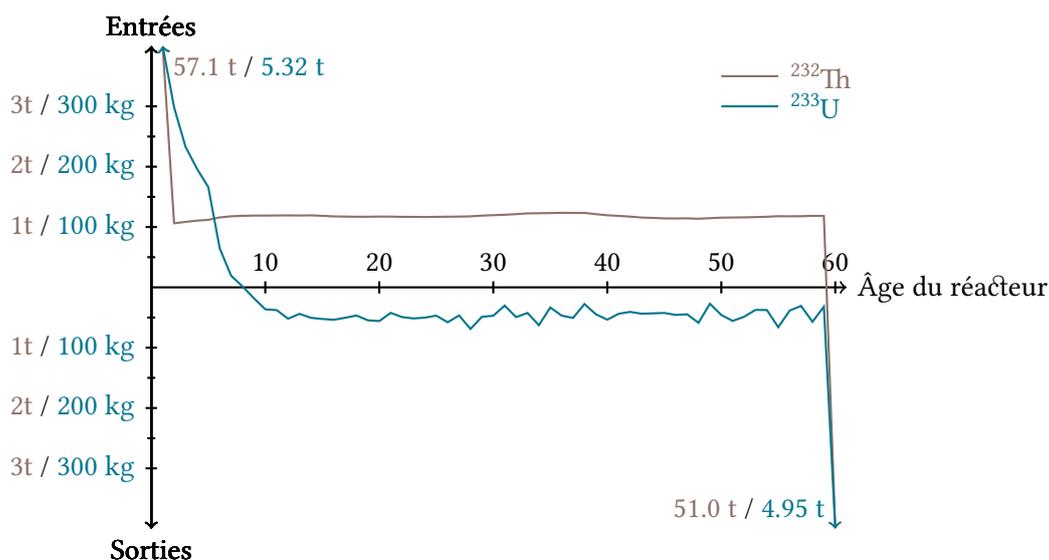


FIGURE 19 – Scénario REL+TMFR – Entrées et sorties du TMFR #2

Le scénario final donne la figure 20, où il est possible de voir la succession de réacteurs amenant à un déploie-

ment massif de TMFR #2 : les EPR qui produisent du plutonium pour les TMFR #1 qui produisent de l' ^{233}U pour les TMFR #2. Il est d'ailleurs pertinent de noter qu'à terme, il n'y a quasiment plus que des TMFR #2 en service.

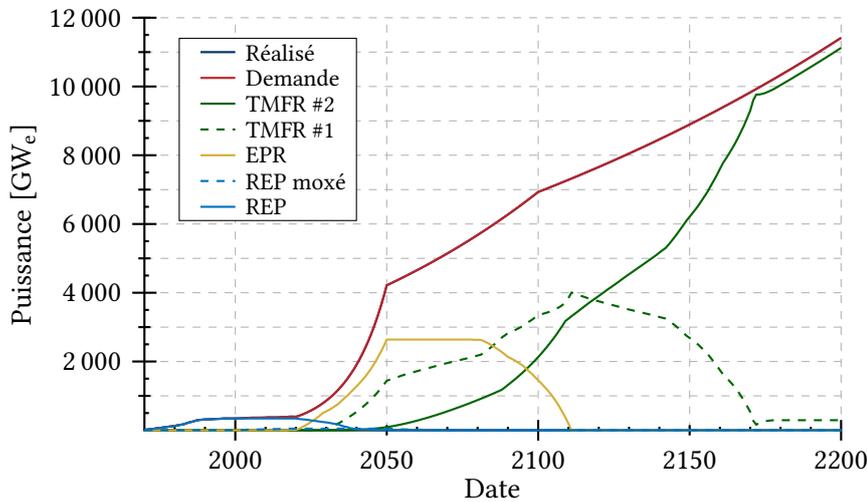


FIGURE 20 – Scénario REL+TMFR – Déploiement mondial

Tout comme la quantité initiale d'Uranium naturel, celle du Thorium a été prise arbitrairement à 23 Mt. Cela n'a pas d'importance pertinente sur le scénario. La figure 21 montre les réserves de matériaux en fonction du temps.

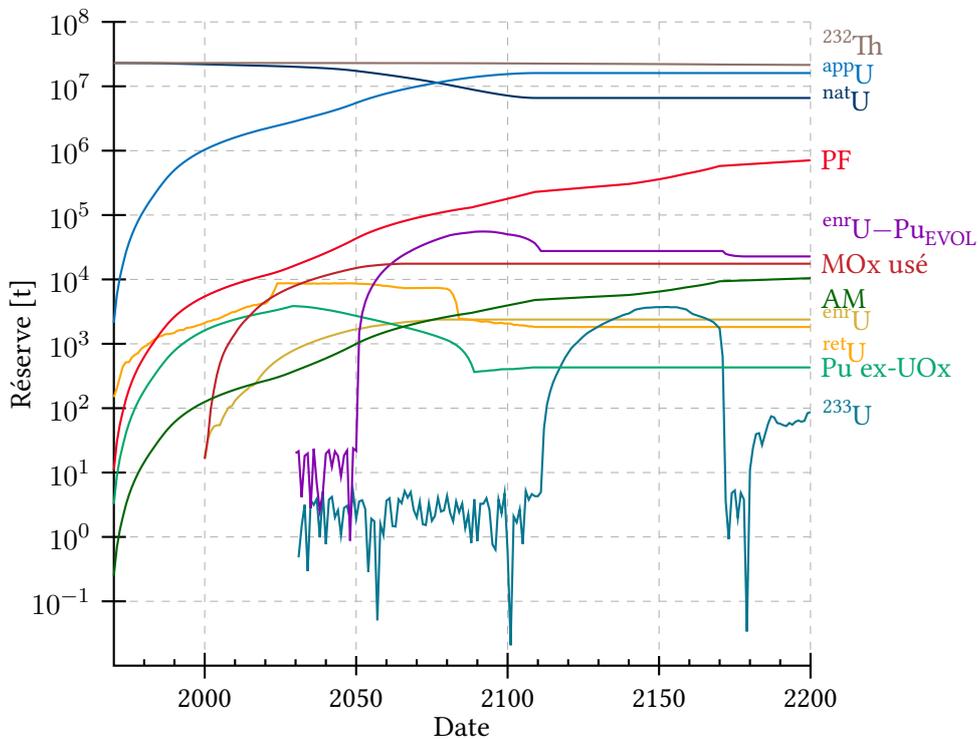


FIGURE 21 – Scénario REL+TMFR – Stocks mondiaux

Il y a plusieurs remarques importantes à faire sur la figure 21.

La quantité de Pu ex-UOx se stabilise autour de 2080, en gardant une valeur non nulle. Dans les faits, il faut considérer cette valeur comme étant nulle. La quantité qu'il reste n'est pas suffisante pour faire fonctionner un réacteur toute sa vie, et SdF ne pouvant pas faire démarrer des « demi-réacteurs » il ne peut pas utiliser cette quantité.

Il reste une petite quantité d' ^{233}U en fin de jeu. Il est possible de pallier cela en jouant sur la surgénération des TMFR en mettant une couverture fertile ou non, ou en faisant varier le temps de retraitement. Ces aspects ne seront pas traités ici.

Il y a autant de MOx usé que dans le scénario REL dans lequel les EPR n'étaient pas moxés (cf. figure 17) ce qui est normal étant donné que ce MOx usé provient uniquement des REP moxés.

Enfin, la dernière donnée intéressante de ce scénario est la répartition en fonction du temps de l'énergie produite par les différents types de réacteurs, comme montré dans la figure 22.

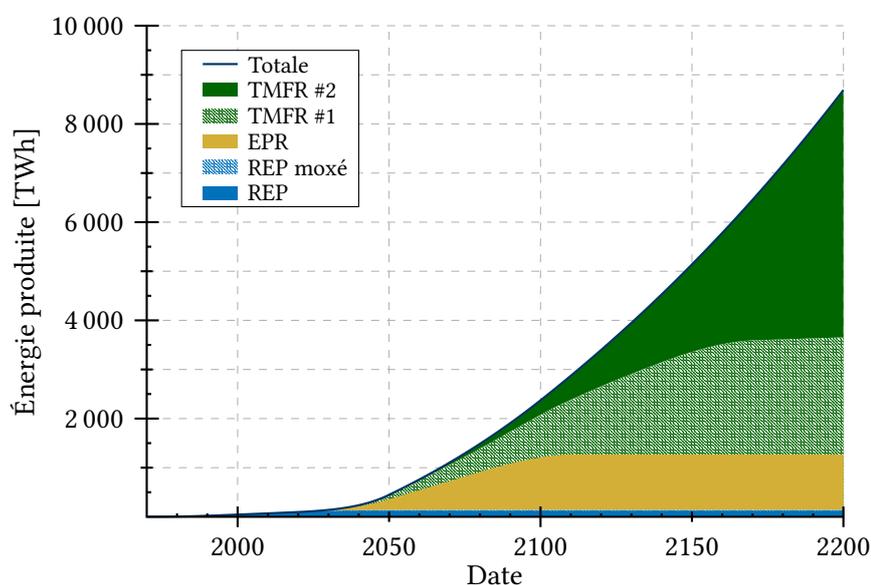


FIGURE 22 – Scénario REL+TMFR – Répartition de l'énergie produite

Il faut attendre la moitié du XXII^e siècle pour que l'énergie produite par les TMFR #2 dépassent celle par les TMFR #1.

3^e) Le Plutonium Molten Chloride Reactor (PMCR)

L'autre MSFR principalement étudié, sur cycle $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ et à sels chlorures, est ici appelé *Plutonium Molten Chloride Reactor* ou PMCR. Tout comme le TMFR, deux réacteurs de ce type ont été considérés, le **PMCR #1** et le **PMCR #2**, le premier ayant la charge de produire le combustible nécessaire au démarrage du second. Leurs caractéristiques sont compilées dans le tableau 4 et, tout comme le TMFR, ces valeurs sont moyennées sur la durée de vie des réacteurs tandis que le code SdF utilise des évolutions variables d'une année à l'autre, à l'image de la figure 19.

III. SCÉNARIOS AVEC LES RÉACTEURS À SELS FONDUS

	PMCR #1	PMCR #2
Puissance nominale	3 GW _{th} – 1,5 GW _e	
Date de début de la filière	2030	
Durée de vie d'un réacteur	60 ans	
Caractéristiques du Cœur :		
Alimentation en plutonium	20,4 t + 1,9 t/an	13,6 t + 150 kg/an
Alimentation en ^{app} U	92,7 t + 1 t/an	100,7 t + 1,14 t/an
Extraction de plutonium	1,76 t/an + 24,4 t	154 kg/an + 16,8 t
Extraction de ^{app} U	14,1 kg/an + 91 t	0,5 kg/an + 96,6 t
Extraction de PF	66,8 t	71,3 t
Extraction d'AM	3,21 t	0,3 t
Caractéristiques de la couverture :		
Alimentation en ^{app} U	63,9 t + 352 kg/an	63,9 t + 368 kg/an
Extraction de plutonium	658 kg/an + 793 t	328 kg/an + 831 kg
Extraction de ^{app} U	62 t	62,1 t

TABLE 4 – Caractéristiques des PMCR moyennées sur 60 ans

Ces réacteurs donnent donc le scénario présenté sur la figure 23.

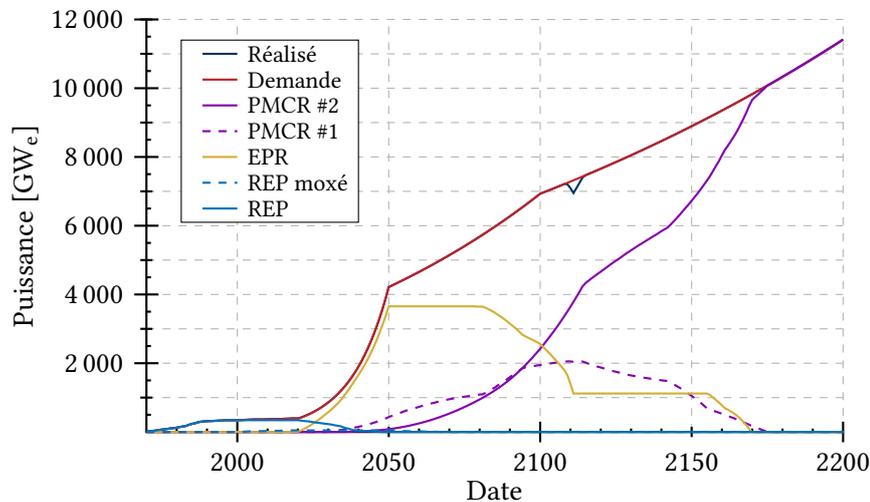


FIGURE 23 – Scénario REL+PMCR – Déploiement mondial

Il est notable de remarquer qu'à terme, il ne subsiste plus que des PMCR #2 à la fin du jeu. Malgré un temps de doublement plutôt rapide, le déploiement ne va pas assez vite pour ne pas contraindre à la fermeture des EPR faute d'Uranium. Il pourrait être intéressant de moxer ces EPR s'ils venaient vider les ressources d'Uranium naturel, comme le suggère la figure 24.

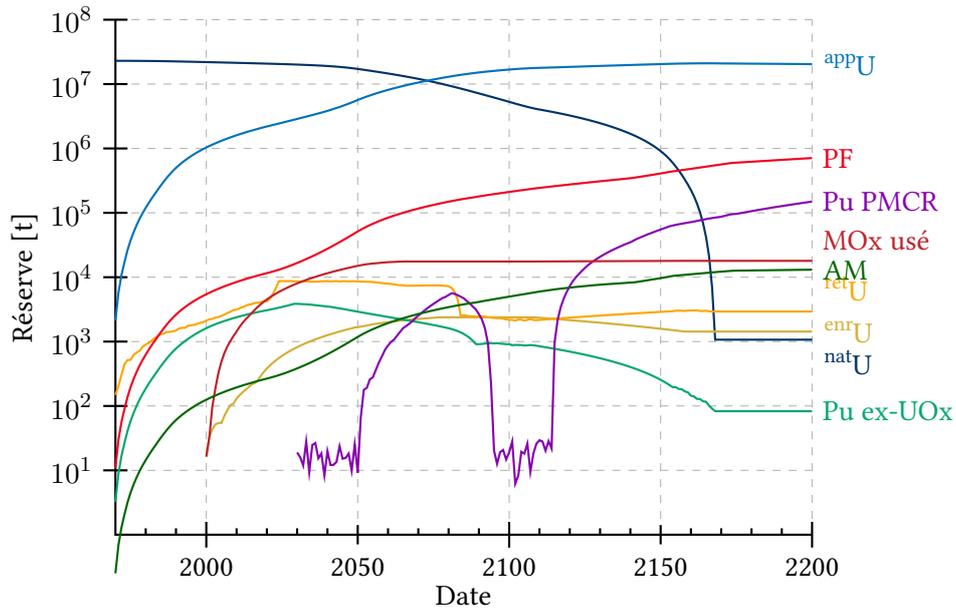


FIGURE 24 – Scénario REL+PMCR – Stocks mondiaux

Enfin, la répartition de l'énergie produite en fonction des types de réacteurs dans la figure 25 nous renseigne que le PMCR #1 a vraiment le rôle d'un réacteur de transition entre la filière EPR et la filière PMCR.

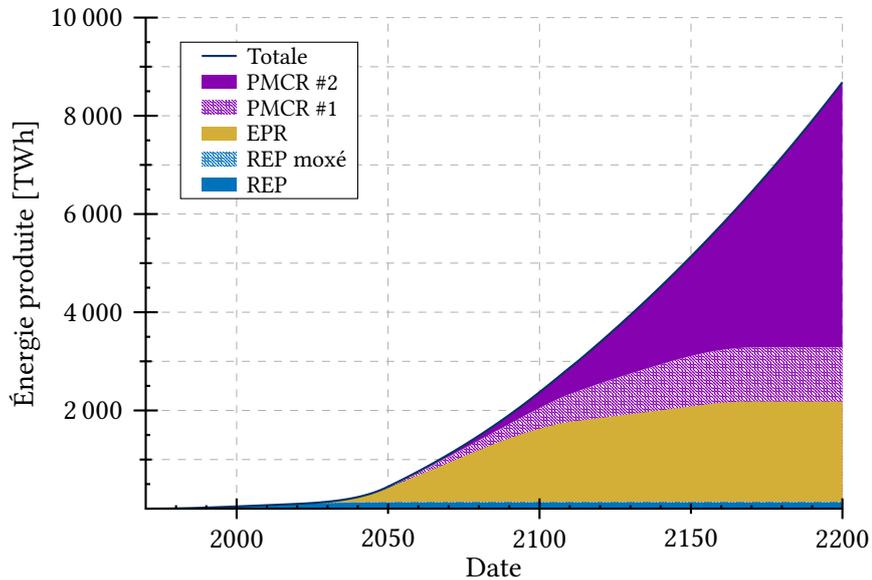


FIGURE 25 – Scénario REL+PMCR – Répartition de l'énergie produite

4^e) Le Plutonium Molten Fluorine Reactor (PMFR)

Un troisième MSFR, sur cycle $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ et à sels fluorures, est ici appelé *Plutonium Molten Fluorine Reactor* ou PMFR, dont les caractéristiques sont données dans le tableau 5 et donc le fonctionnement est assez analogue avec celui du PMCR.

III. SCÉNARIOS AVEC LES RÉACTEURS À SELS FONDUS

	PMFR #1	PMFR #2
Puissance nominale	3 GW _{th} – 1,5 GW _e	
Date de début de la filière	2030	
Durée de vie d'un réacteur	60 ans	
Caractéristiques du Cœur :		
Alimentation en plutonium	9,22 t + 48 kg/an	11,5 t + 1,15 kg/an
Alimentation en ^{app} U	35 t + 1,12 t/an	32,9 t + 1,16 t/an
Extraction de plutonium	10,9 t	10,7 t
Extraction de ^{app} U	32,9 t	33,2 t
Extraction de PF	61,3 t	69,2 t
Extraction d'AM	1,63 t	1,91 t
Caractéristiques de la couverture :		
Alimentation en ^{app} U	17,8 t + 136 kg/an	17,8 t + 137 kg/an
Extraction de plutonium	130 kg/an + 71,6 kg	133 kg/an + 72,4 kg
Extraction de ^{app} U	17,8 t	17,8 t

TABLE 5 – Caractéristiques des PMFR moyennées sur 60 ans

Ces réacteurs produisent le scénario présenté dans la figure 26 où l'on voit que la filière PMFR #2 devient autonome en fin de jeu.

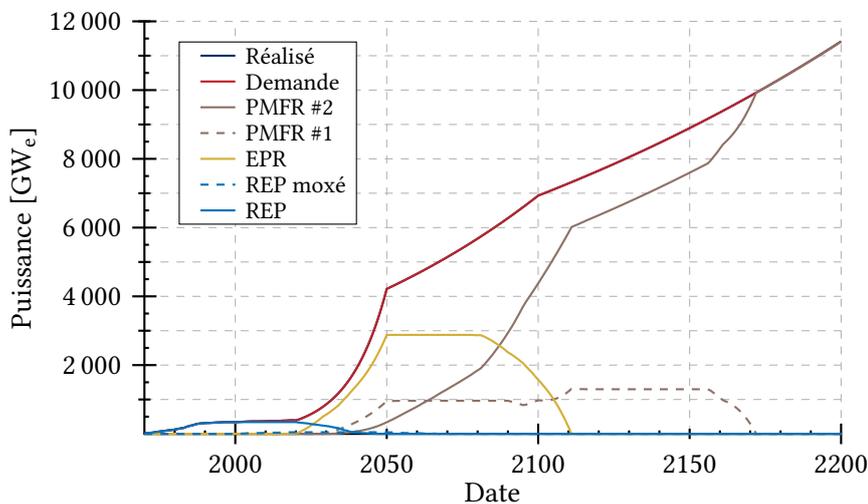


FIGURE 26 – Scénario REL+PMFR – Déploiement mondial

La figure 27 nous montre l'évolution des quantités de matériau en fonction du temps et il est possible de remarquer une augmentation des réserves de plutonium malgré l'arrêt des EPR, ce qui témoigne du caractère surgénérateur de cette filière.

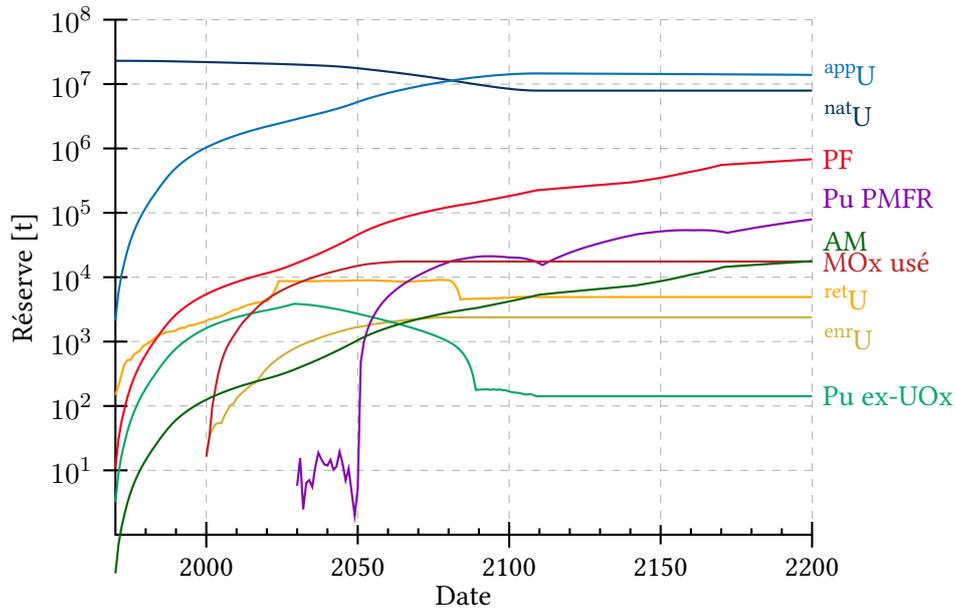


FIGURE 27 – Scénario REL+PMFR – Stocks mondiaux

Enfin, la figure 28 nous montre que l'écrasante majorité de l'énergie produite l'est par les PMFR #2; les PMFR #1 jouent également un simple rôle de transition entre les EPR et les MSFR.

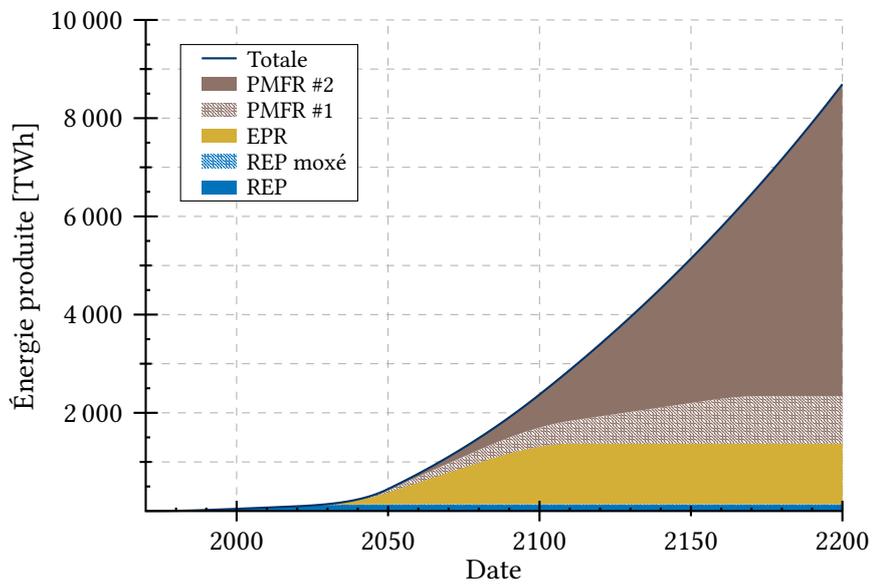


FIGURE 28 – Scénario REL+PMFR – Répartition de l'énergie

IV. Comparaison des résultats obtenus

Fort de ces trois scénarios, il est maintenant possible de comparer les différents types de réacteurs à sels fondus à disposition, en commençant par les comparer deux à deux.

1^e) TMFR vs PMCR : la comparaison principale

La comparaison principale à effectuer est entre le MSFR de référence, appelé ici TMFR, et le PMCR. Les cycles sur lesquels ces technologies s'appuient et les sels sont ici différents.

Les figures 20 et 23 montrent que le TMFR est bien moins long à être indépendant des REP et des EPR par rapport au PMCR (respectivement en 2110 et en 2170). Ce dernier va d'ailleurs consommer tout l'Uranium naturel initial, ce qui n'est pas le cas du TMFR (figures 21 et 24). Si l'on prend en compte les critères de la section I.3^e) :

- Les deux filières sont pérennes car elles deviennent indépendantes. Les TMFR utilisent le Thorium et les PMCR l'Uranium appauvri qui se trouve en abondance du fait de la disparition de l'Uranium naturel ;
- La filière TMFR utilise moins d'Uranium naturel que la filière PMCR, qui épuise entièrement les ressources naturelles ;
- La filière TMFR produit un peu moins de déchets que la filière PMCR.

En prenant en compte les trois critères de la problématique (page 3), la filière TMFR est préférable à la filière PMCR avec les scénarios étudiés.

2^e) TMFR vs PMFR : zoom sur les fluorures

La comparaison entre le TMFR et le PMFR revient à fixer un solvant — ici le sel fluorure — et à voir si le choix du cycle — Th/U pour le TMFR et U/Pu pour le PMCR — a un impact sur les scénarios. Il va falloir comparer en fonction des trois critères de la problématique :

- Les deux filières sont pérennes en devenant indépendantes des REP et des EPR en même temps ;
- La filière TMFR utilise moins d'Uranium naturel que la filière PMFR, mais utilise une quantité de Thorium de la même ordre de grandeur que la différence donc la quantité de ressources naturelles utilisé est sensiblement la même, juste les matières changent ;
- Les déchets produits sont du même ordre de grandeur, mais la filière PMFR produit un plus de Plutonium en fin de jeu.

Les deux filières sont sensiblement similaires. La différence va surtout se jouer sur la matière utilisée. La filière TMFR est toutefois préférable si l'on impose un critère de sobriété au niveau de l'Uranium naturel consommé et au niveau du Plutonium produit.

3^e) PMCR vs PMFR : zoom sur le cycle U/Pu

La comparaison entre le PMCR et le PMFR revient cette fois-ci à fixer le cycle — donc le U/Pu — et à s'intéresser à l'influence que peut avoir le solvant — sel chlorure pour le PMCR et sel fluorure pour le PMFR — sur les scénarios. Toujours selon les trois critères de la problématique :

- Les deux filières sont pérennes mais la filière PMCR ne survit à terme que grâce à l'Uranium appauvri ;
- La filière PMCR utilise tout l'Uranium naturel initial mais non la filière PMFR ;
- La filière PMCR produit ainsi bien plus d'Uranium appauvri et de Plutonium. Mais l'^{app}U est le combustible de ces réacteurs, or le PMCR en consomme plus que le PMFR. Les réserves en terme d'années-réacteurs sont équivalentes.

Par analogie avec la comparaison entre le TMFR et le PMCR, la filière PMFR est potentiellement préférable à la filière PMCR.

4^e) Métacomparaison et conclusion partielle

Le point vraiment pertinent à comparer se trouve être la consommation finale d'Uranium naturel. Les réserves d' ^{nat}U des trois scénarios ci-dessus sont tracées dans la figure 29.

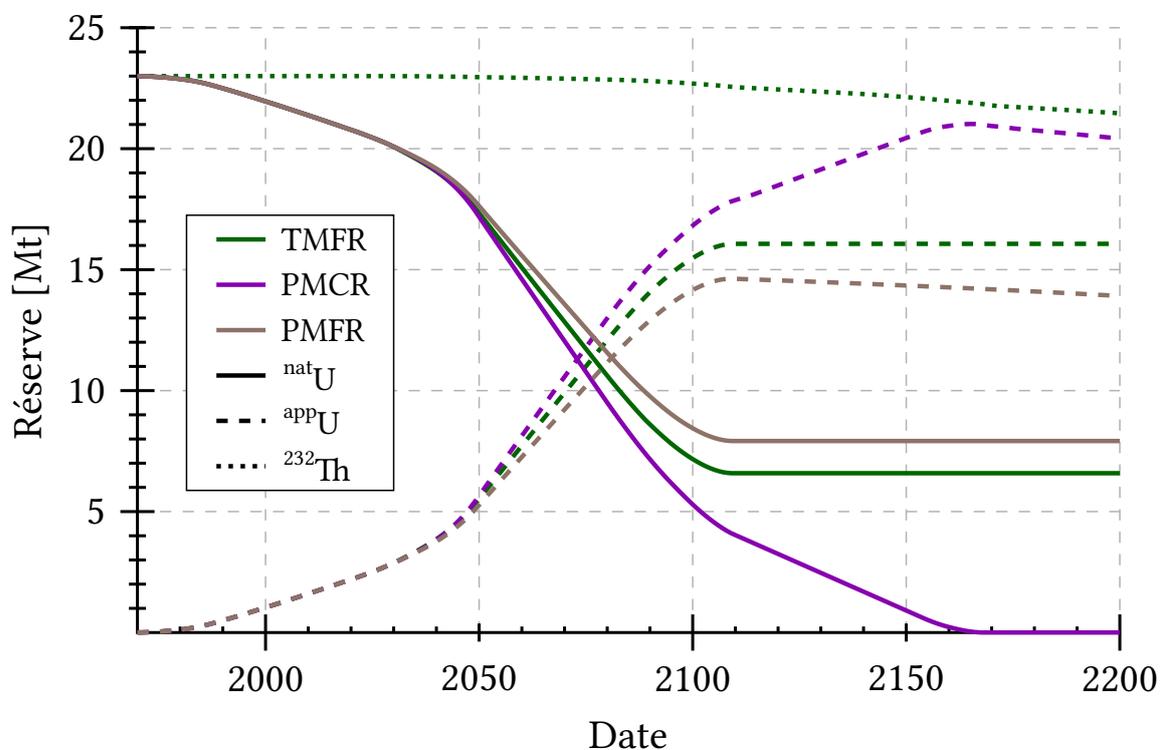


FIGURE 29 – Comparaison de la consommation d' ^{nat}U et de Thorium et de la production d'appU dans les trois scénarios

De ce seul critère, nous pouvons donc classer provisoirement les scénarios dans l'ordre PMFR, TMFR et enfin PMCR. Il est à noter que du strict point de vue de la consommation des ressources, le TMFR consomme aussi du Thorium.

Le tableau 6 synthétise quelques valeurs provenant des scénarios ci-dessus, dans le but de les comparer entre elles. La date d'émancipation des MSFR signifie le moment (à la décennie près) où les REL s'arrêtent et donc où les MSFR sont seuls contributeurs à la DÉM.

IV. COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS

Scénario	REL	TMFR	PMCR	PMFR
Date d'émancipation des MSFR	-	2110	2170	2110
Part de l'énergie produite finale (en 2200)	-	85,4 %	74,9 %	84,2 %
^{nat} U consommé [Mt]	23	16,4	23	15,1
Pourcentage (23 Mt initiales)	100 %	71,4 %	100 %	65,6 %
²³² Th consommé [Mt]		1,5		
Pourcentage (23 Mt initiales)		6,6 %		
^{app} U produit [Mt]	20,5	16,1	20,4	13,9
Réserve [Ma-r]		17,3	12,7	10,8
PF produit [kt]	270,5	708,6	710,3	679,4
AM produit [kt]	6,2	10,5	13,1	17,8
MOx usé produit [kt]	2115	17,5	17,9	17,5

Ma-r : Million d'années-réacteur

TABLE 6 – Comparaison de certaines valeurs des scénarios

Il est intéressant de noter tout d'abord que la somme des valeurs du tableau ne correspondent pas toujours exactement avec les 23 Mt d'Uranium naturel en entrée. Ce problème provient du code utilisé et sera discuté dans la Conclusion générale de ce rapport.

Ensuite, les quantités de MOx usé produites par les scénarios MSFR sont équivalentes du fait de l'utilisation similaire des REP moxés. Elle est largement supérieure dans le scénario avec uniquement des réacteurs à eau du fait du moxage des EPR.

Les réserves d'^{app}U sont aussi données en Million d'années-réacteur pour les scénarios PMCR et PMFR. Une année-réacteur est la quantité de matière nécessaire à faire fonctionner un réacteur pendant un an. Il est primordial de noter que la valeur donnée pour le scénario TMFR (en *italique* dans le tableau 6) est en réalité la réserve de Thorium restante des 23 Mt initiales, ce chiffre ayant été pris arbitrairement égal au stock d'uranium naturel pour faciliter la comparaison. Les réserves de Thorium sont actuellement mal connues mais elles sont plus importantes que celles d'Uranium.

Pour terminer de comparer les scénarios entre eux, nous allons reprendre les trois points de la problématique, en se rappelant que ces critères sont subjectifs et qu'ils ne dépendent que des scénarios :

- La non-pérennité de la filière électronucléaire. Les trois filières sont pérennes.
- L'épuisement et le gaspillage inutile des ressources naturelles. Au niveau de la stricte utilisation des ressources naturelles (Uranium et Thorium) nous avons PMFR, TMFR puis PMCR.
- La gestion des déchets produits. Sans encore définir ce qu'est un déchet, plusieurs points peuvent être évoqués :
 - La quantité d'^{app}U produite est logiquement proportionnelle à la quantité d'^{nat}U consommée.
 - Dans les scénarios PMCR et PMFR, l'^{app}U est un combustible donc une matière valorisable.
 - Les AM ici produits ne le sont que du fait de la rigidité du code SdF. Dans une utilisation réelle, ces AM pourraient être transformés en PF dans le réacteur en fonctionnement.

Ici, la filière produisant le plus de matières non valorisables est probablement la filière TMFR.

Il peut être dorénavant utile de s'intéresser un peu plus en détails sur ce qui pourrait être à proprement parler des déchets nucléaires en introduisant la notion de réacteurs incinérateurs.

V. Les réacteurs incinérateurs

Une solution pour réduire la radioactivité des déchets serait des réacteurs dit incinérateurs. Ils ne sont pas conçus pour produire de l'énergie de prime abord mais pour consommer les actinides et les noyaux lourds à vie longue pour les convertir en PF à durée de vie plus courte.

1^e) La notion de déchet

Dans la législation française en vigueur, un déchet est une matière nucléaire non valorisable.

Du point de vue des scénarios, sont donc véritablement considérés comme déchets les PF destinés à être enterré (projet Cigéo) et l'Uranium appauvri dans les cas où il n'est pas utilisable comme combustible. En effet, le MOx usé, les AM et les restes d'Uranium et de Plutonium dans les cuves de MSFR peuvent être convertis dans les incinérateurs en PF.

Il est également intéressant de noter que l'Uranium appauvri — étant moins enrichi donc moins radioactif et radiotoxique que l'Uranium naturel — pourrait éventuellement être remis à la place de ce dernier dans les mines. La radioactivité étant moindre, cela n'aurait pas de conséquences à terme. Il ne s'agit donc pas de déchets « préoccupants » comme pourraient l'être les PF.

2^e) Incinérateur ou Convertisseur ?

Initialement appelé incinérateur, le terme convertisseur est aujourd'hui préféré pour éviter la connotation que peut avoir l'ancien terme, un incinérateur servant à réduire quelque chose en fumée : ici aucune fumée et aucun gaz carbonique. De plus, il y a autant de matière en entrée qu'en sortie.

Le terme convertisseur peut cependant également porter à confusion. En effet, les convertisseurs sont des composants à part entière du génie électrique, que cela soient les convertisseurs de tension, de courant ou de puissance. La filière nucléaire étant l'un des supports de la filière électrique, l'utilisation de ce terme peut être discuté.

C'est ainsi qu'un terme a été trouvé et sera utilisé dans la fin de ce rapport. En partant du principe que les sigles et les acronymes semblent avoir la vie dure dans le milieu du nucléaire, un jeu de mot facétieux a donc été proposé : le Réacteur Incinérateur à Conversion des Actinides pour la Réduction de la radioactivité des Déchets, ou RICARD.

Il est à noter qu'en cas de litige avec une certaine marque alcoolisée, le terme homophone RICARRD peut également être utilisé.

3^e) Intérêt et fonctionnement des RICARD

Les RICARD fonctionnent sur le même principe que les RSF électrogènes. La différence fondamentale réside dans leur dimensionnement. Celui-ci n'est pas motivé par un désir de production d'électricité mais pour consommer le plus rapidement et efficacement possible les noyaux lourds à vie longue.

Laura Mesthiviers — qui étudie ces réacteurs dans le cadre de sa thèse de doctorat — a spécialement dimensionné des RICARD pour les fins des scénarios de ce rapport. Leurs caractéristiques sont dans le tableau 7.

V. LES RÉACTEURS INCINÉRATEURS

	TMFR	PMCR	PMFR
Puissance	363 MW _{th}	321 MW _{th}	467 MW _{th}
Volume du Cœur	3,49 m ³	3,22 m ³	4,54 m ³
Alimentation en U-Pu-AM	1,55 t + 119 kg/an	1,45 t + 104 kg/an	2,06 t + 153 kg/an
Extraction d'U-Pu-AM	2,75 t	1,98 t	3,09 t
Extraction de PF	5,96 t	5,72 t	8,12 t

TABLE 7 – Caractéristiques des RICARD

Du point de vue des scénarios, les MSFR cessent d'être démarrés à partir de l'année 2200 et laissent la place aux RICARD qui incinèrent les déchets produits. La DÉM est laissée constante à la valeur de 2200 pour avoir un objectif suffisant. Il ne sera jamais atteint et ce n'est de toute façon pas le but. Les figures 30, 31 et 32 montrent les déploiements pour les trois scénarios étudiés jusqu'à présent.

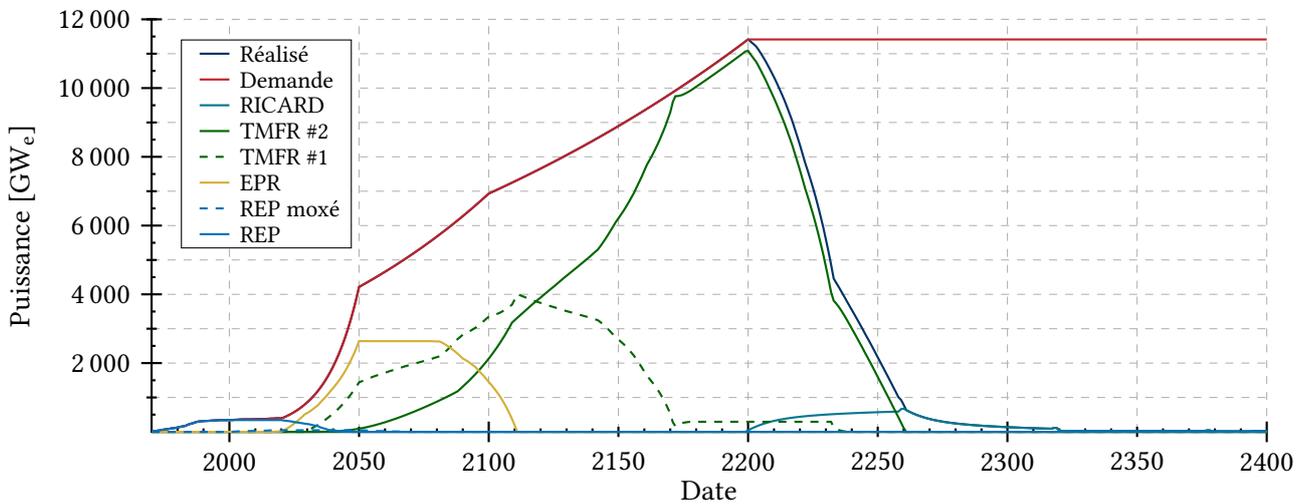


FIGURE 30 – Scénario REL+TMFR+RICARD – Déploiement mondial

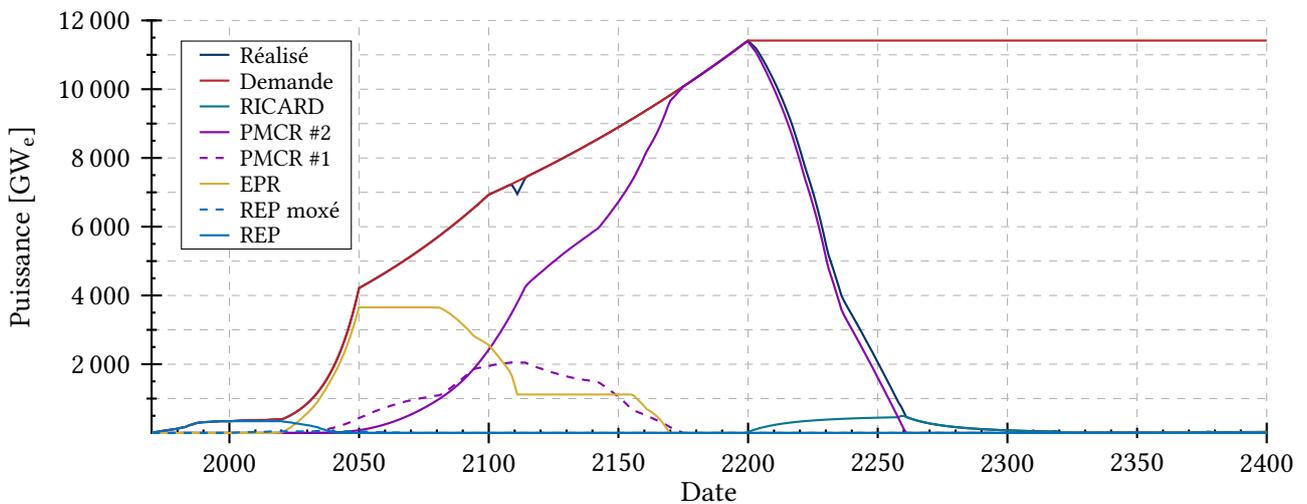


FIGURE 31 – Scénario REL+PMCR+RICARD – Déploiement mondial

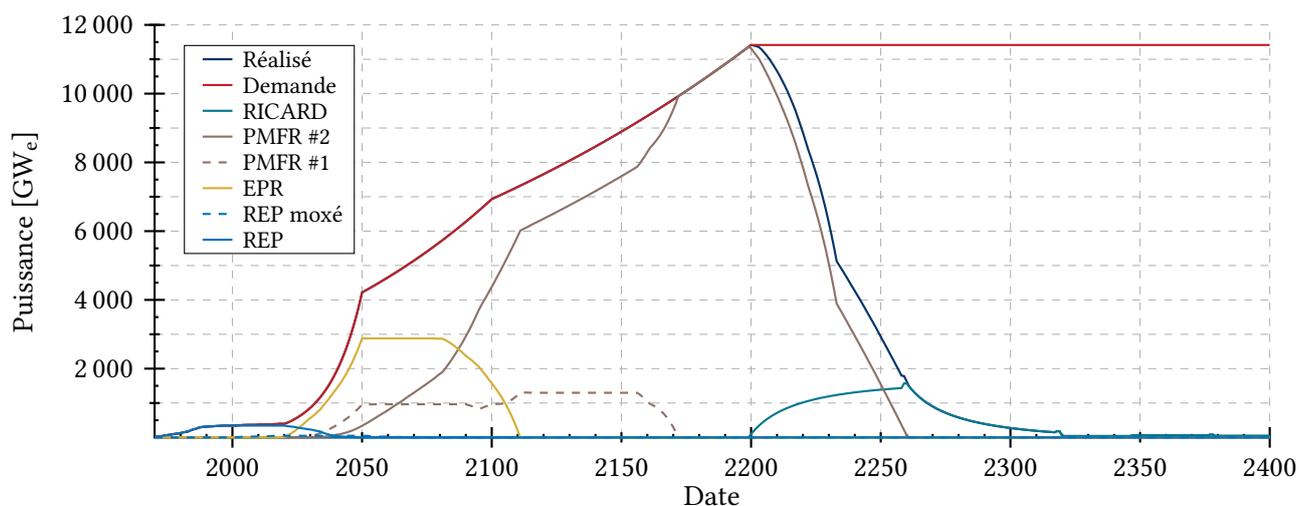


FIGURE 32 – Scénario REL+PMFR+RICARD – Déploiement mondial

Les diagrammes DOT de ces trois scénarios se trouvent dans l'**Annexe B** pour information.

4^e) Conclusion partielle

Dans les trois scénarios, les RICARD s'arrêtent significativement en 2320, soit 120 ans après le début de leur mise en service. Il est intéressant de noter que la durée de vie des RICARD est de 60 ans, soit la moitié. Les derniers petits soubresauts négligeables peuvent être assumés comme étant dû à la rigidité du code SdF qui éteint les réacteurs après exactement 60 ans ; un véritable réacteur est bien plus modulable dans son utilisation.

Ainsi, les AM produits peuvent être convertis en PF en un siècle, et cela donne un ordre de grandeur du temps qu'il faudrait pour stopper brutalement la production d'électricité nucléaire avec les contraintes de ces scénarios — l'hypothèse initiale ayant été que le nucléaire s'arrête en 2200 ; il n'est plus produit d'énergie un siècle plus tard.

Conclusion et perspectives

Conclusion

Conclusion sur les résultats

En reprenant les trois critères de la problématique (pérennité, économie des ressources, gestion des déchets) il est aisé de se convaincre que seul le deuxième est pertinent pour comparer et conclure sur les résultats obtenus. La pérennité est assurée dans les trois scénarios et la gestion des déchets n'est plus une problématique comparative.

Sur le seul critère de l'économie des ressources naturelles, la filière PMFR prend les devants avec un déploiement massif consommant 15,1 Mt d'Uranium naturel. Vient ensuite la filière TMFR avec 16,4 Mt d'^{nat}U suivie d'1,5 Mt de Thorium ce qui fait 17,9 Mt de ressources naturelles consommées. Vient enfin la filière PMCR avec une consommation de 23 Mt d'^{nat}U pour un déploiement massif mondial.

Conclusion sur la méthode

Le code SdF est un code simple à utiliser et à mettre en œuvre. Il permet de dresser rapidement des scénarios cohérents pour se faire une idée sur la viabilité d'une ou de plusieurs filières de réacteurs nucléaires. Son grand avantage réside dans le fait qu'il peut intégrer plutôt aisément des réacteurs à sels fondus.

Cependant, ce code a des limites qu'il est facile d'atteindre. Sa simplicité est un atout pour se donner une idée ou une tendance mais il ne permet pas de construire des scénarios trop complexes et sur lesquels nous pourrions être tentés de s'appuyer pour dresser une politique de déploiement massif d'une filière, par exemple.

Conclusion générale sur le stage

Ce stage au LPSC avait pour but d'exhumer le code SdF et d'y intégrer les données les plus récentes en matière de MSFR en utilisant le prétexte de comparer les différentes filières entre elles. Ce fut une première expérience très enrichissante dans le milieu de la recherche dans une équipe particulière d'un laboratoire particulier.

Ce stage a été une véritable bouffée d'oxygène à la fin d'une deuxième année d'école d'ingénieur difficile socialement du fait de la crise sanitaire en cours. Se retrouver au sein d'une équipe aussi soudée et incroyable malgré la distanciation a été un privilège.

Perspectives

Le code SdF pourrait se voir être amélioré

D'une part, une interface entre le code REM et SdF pourrait pertinemment voir le jour. Quand le nombre de réacteurs et de filières devient trop grand, il est assez difficile de fabriquer les scénarios à la main. L'**Annexe D** montre la sortie d'un script développé durant ce stage et qui est une première étape vers un potentiel code de transition. Celui-ci n'a été conçu que pour répondre aux besoins des scénarios présentés ci-alors et a parfaitement joué son rôle. Le rendre universel demanderait un certain investissement qui pourrait – à long terme – s'avérer être un gain de temps fabuleux pour ce qui est d'utiliser SdF comme un code pour construire un scénario « vite fait. »

D'autre part, SdF est assez « rigide » dans son fonctionnement. Les entrées et les sorties des réacteurs sont exactement définies à l'avance (un exemple pour le MSFR de référence est donné dans l'**Annexe E**) et tous les réacteurs d'une filière prennent au même âge la même chose. Il n'y a aucune variation ni aucune souplesse ce qui donne des résidus en fin de vie de matériaux qui auraient été gérés autrement dans une utilisation réelle – donc souple.

Les RICARD, ou convertisseurs, ont beaucoup de potentiel

Les réacteurs convertisseurs – ici appelés RICARD – ont été introduit dans les scénarios plus par curiosité et par ouverture que par un réel besoin de répondre à une problématique. D'ailleurs, une conclusion pouvait déjà être tirée avant de les introduire, et l'objectif a surtout été de savoir s'il était possible de les intégrer rapidement dans le code SdF – ce qui fut le cas.

Nonobstant, les recherches sont encore à leurs balbutiements et promettent beaucoup d'applications très intéressantes.

Références

- [1] Les scénarios du GIEC [En ligne, consulté en juillet 2021]. <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-giec-groupe-dexperts-intergouvernemental-sur-levolution-du-climat/les-scenarios-du-giec>.
- [2] NUCLEAR ENERGY AGENCY, IAEA. Uranium 2016 : Resources, production and demand. Rapport n°7301, 2016.
- [3] Dictionnaire de l'Académie française | 9e édition | scénario [En ligne, consulté en mai 2021]. <https://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9S0747>.
- [4] 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.
- [5] D. HEUER et E. MERLE-LUCOTTE. Programmes de simulation du déploiement de l'électro-nucléaire dans l'environnement DALI : module Scénarios Du Futur. Note interne LPSC Grenoble, Octobre 2004.
- [6] GIF Portal [En ligne, consulté en juillet 2021]. <https://www.gen-4.org/gif/>.
- [7] E. MERLE-LUCOTTE. *Le cycle Thorium en réacteurs à sels fondus peut-il être une solution au problème énergétique du XXI^e siècle?* Habilitation à Diriger les Recherches, Institut Polytechnique de Grenoble, Juin 2008.
- [8] The Database on Nuclear Power Reactors [En ligne, consulté en juillet 2021]. <https://pris.iaea.org/pris/>.
- [9] L. PATARIN. *Le cycle du combustible nucléaire*. EDP Sciences, 2002.
- [10] Avancées des recherches sur la séparation-transmutation et le multi-recyclage du plutonium dans les réacteurs à flux de neutrons rapides. Rapport, CEA, Juin 2015.
- [11] INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE. Entreposage du combustible nucléaire usé : concepts et enjeux de sûreté. *Rapport IRSN n°2018-00003*, Juin 2018.
- [12] D. GÉRARDIN. *Développement de méthodes et d'outils numériques pour l'étude de la sûreté du réacteur à sels fondus MSFR*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Octobre 2018.
- [13] J. GUIDEZ *et al.* Molten Salt Reactor to close the fuel cycle : example of MSFR multi-recycling applications. *Actes de la conférence internationale ICAPP2019*, Juan les Pins, France, 2019.
- [14] A. NUTTIN. *Potentialités du concept de réacteurs à sels fondus pour une production durable d'énergie nucléaire basée sur le cycle thorium en spectre épithermique*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I, Novembre 2002.
- [15] E. MERLE-LUCOTTE *et al.* Preliminary Design Assessment of the Molten Salt Fast Reactor. *Actes de la conférence European Nuclear Conference ENC2012*, Manchester, UK, 2012.

Annexe A Diagramme de Gantt

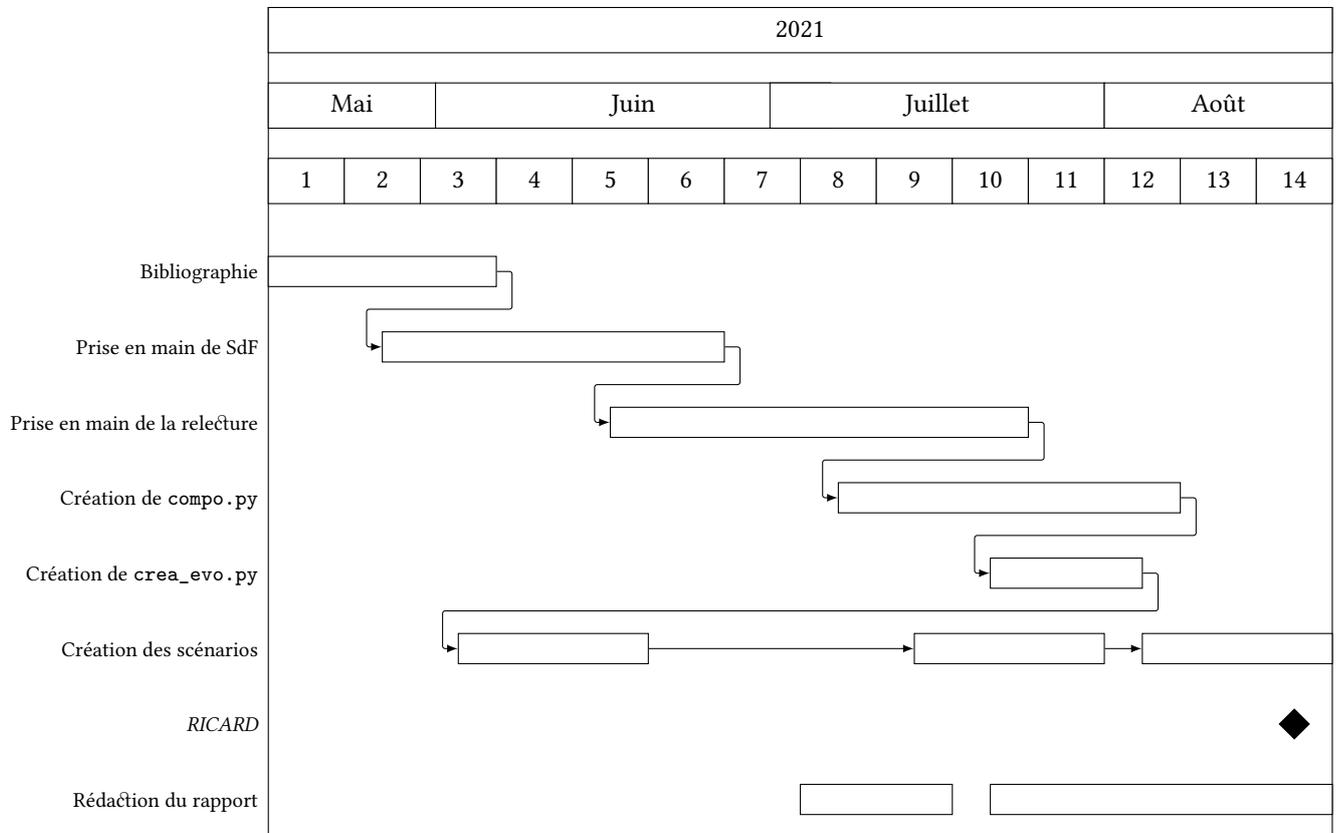


FIGURE A – Diagramme de Gantt du stage

Le stage a débuté par un mini-projet bibliographique pour introduire le sujet et commencer à avoir quelques références. Il a ensuite été question de prendre en main le code SdF en refaisant les scénarios REL de la partie II. du rapport. Au fur et à mesure de la prise en main de SdF, le module relecture du code REM a été également pris en main avec dans la foulée la création des codes `compo.py` suivi de `crea_evo.py`. Ces codes ont permis de pouvoir faire les différents scénarios et les différentes courbes de ce rapport tout au long de la durée du stage. Enfin, les RICARD ont principalement été étudiés lors de la dernière semaine, voire lors du dernier jour. La rédaction du rapport s’est principalement étalée lors de la deuxième moitié du stage.

Annexe B Diagrammes DOT de sortie de SdF

Le code SdF génère au format DOT – un langage permettant de tracer des graphes orientés ou non – les différents scénarios qu’il génère. Cette annexe regroupe donc les diagrammes de sortie de tous les scénarios présentés dans ce rapport.

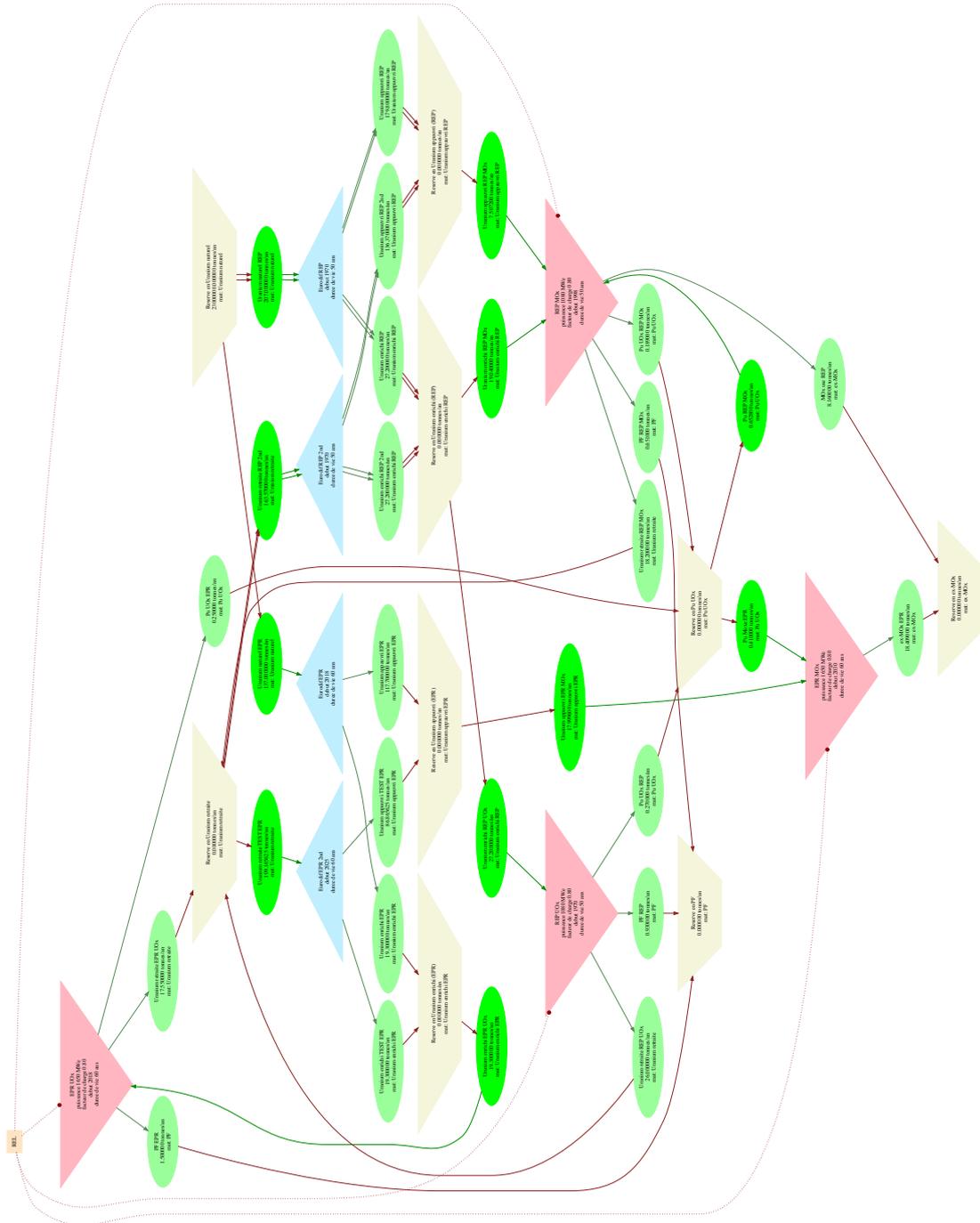
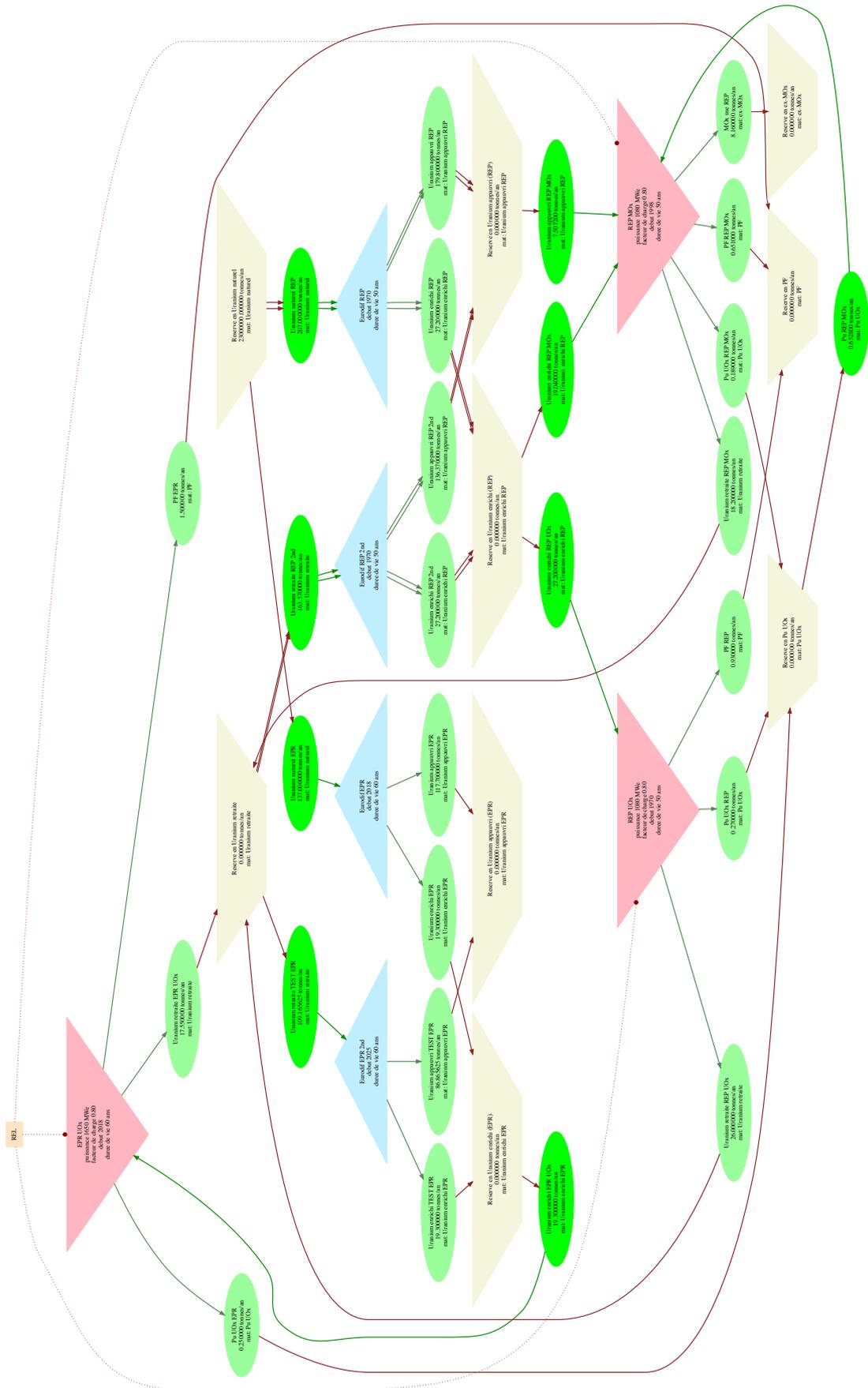


FIGURE B – Scénario REL – Illustration du parc REL – cf. FIGURE 12



d

FIGURE C – Scénario REL – Illustration du parc REL – EPR non mixés

GEN

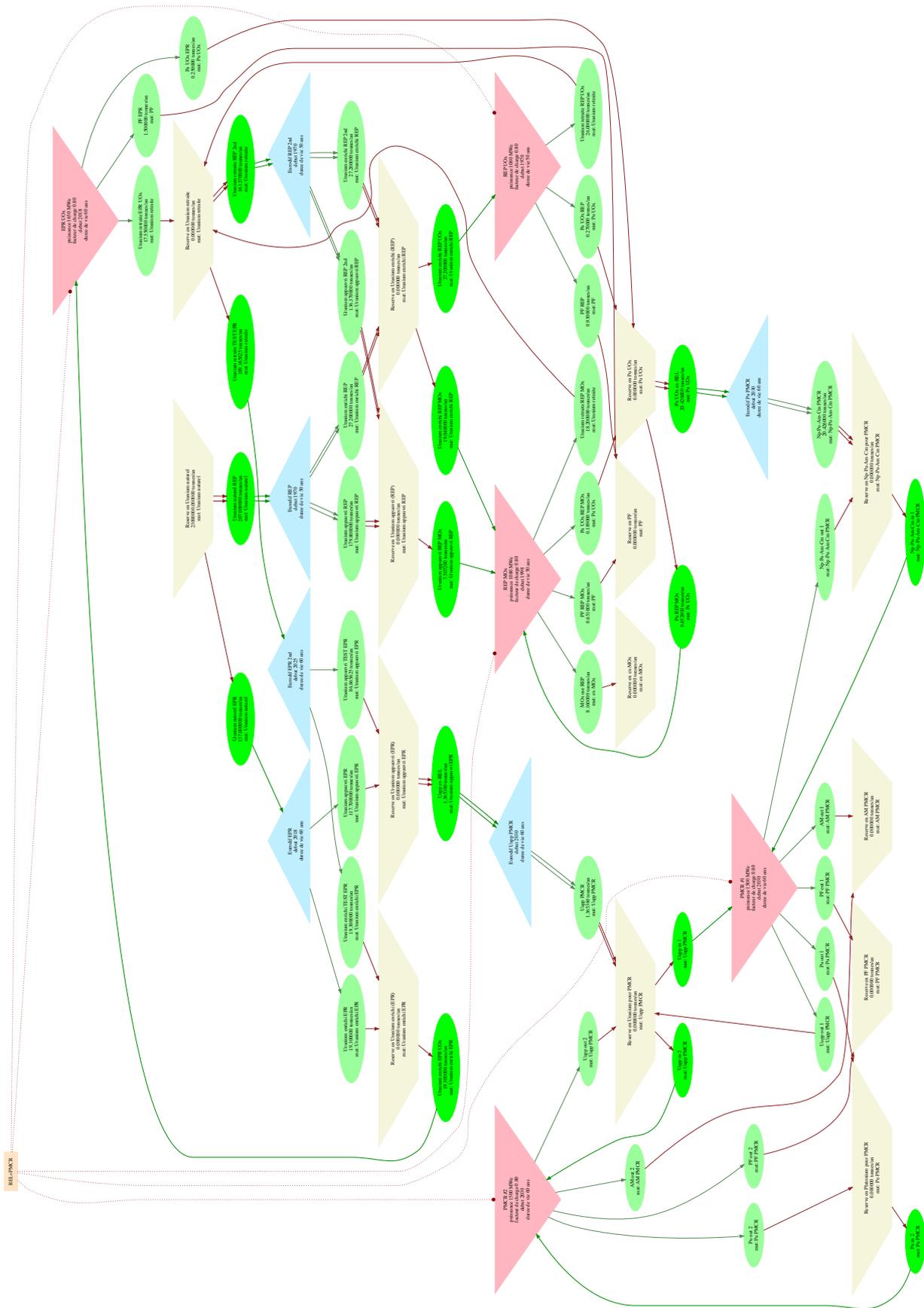


FIGURE E – Scénario REL+PMCR – Illustration du parc REL+PMCR

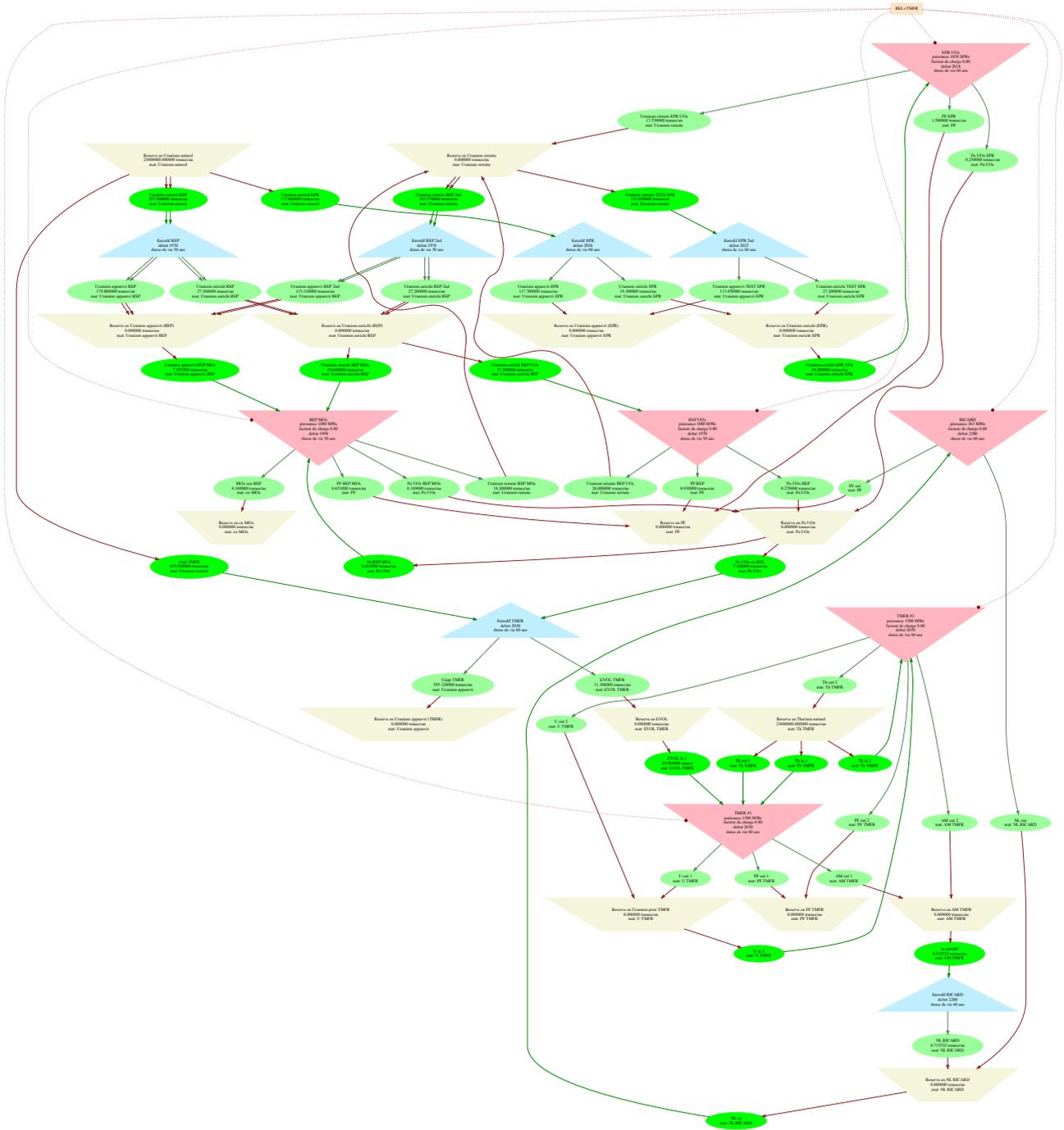
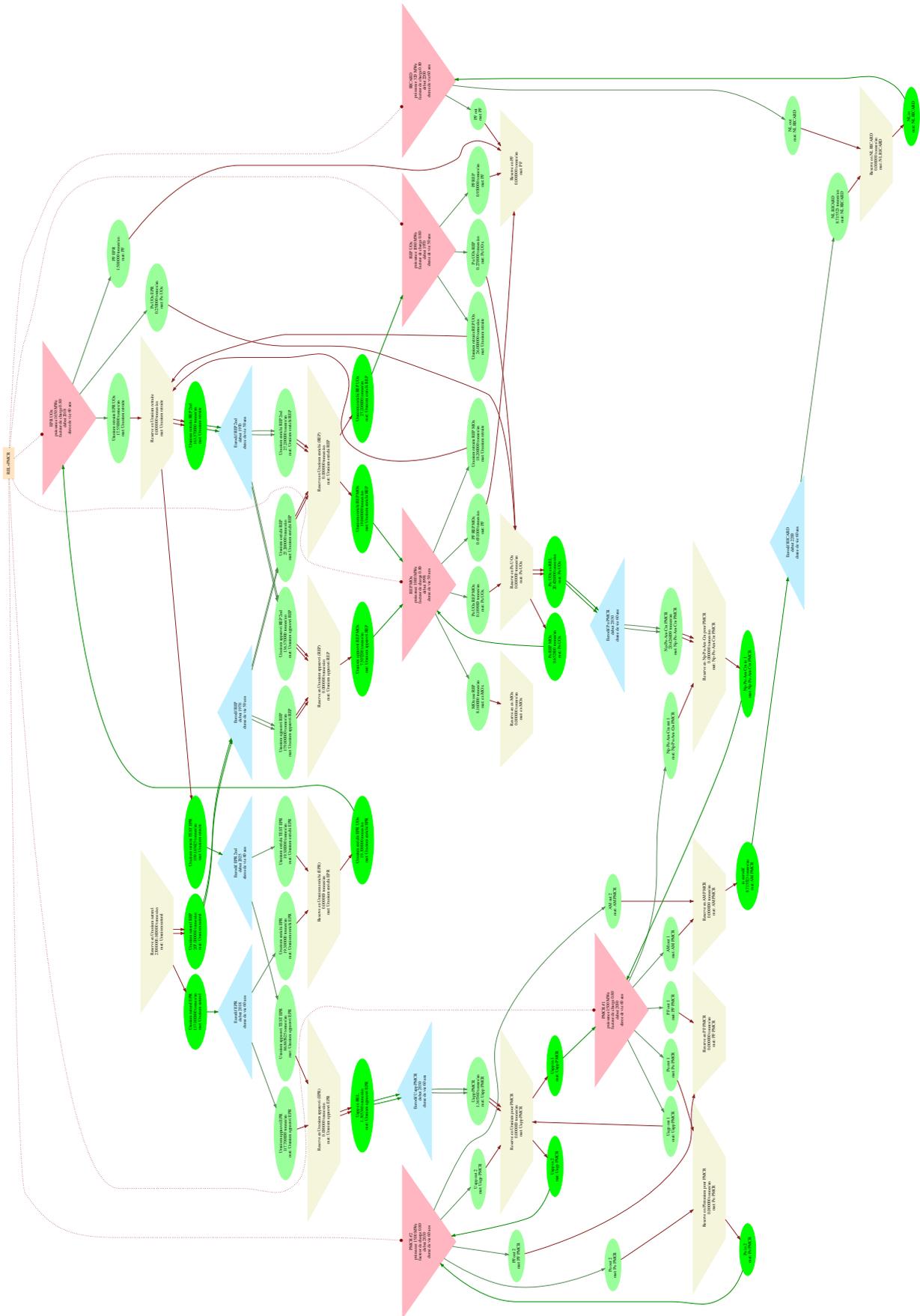


FIGURE G – Scénario REL+TMFR+RICARD – Illustration du parc REL+TMFR+RICARD



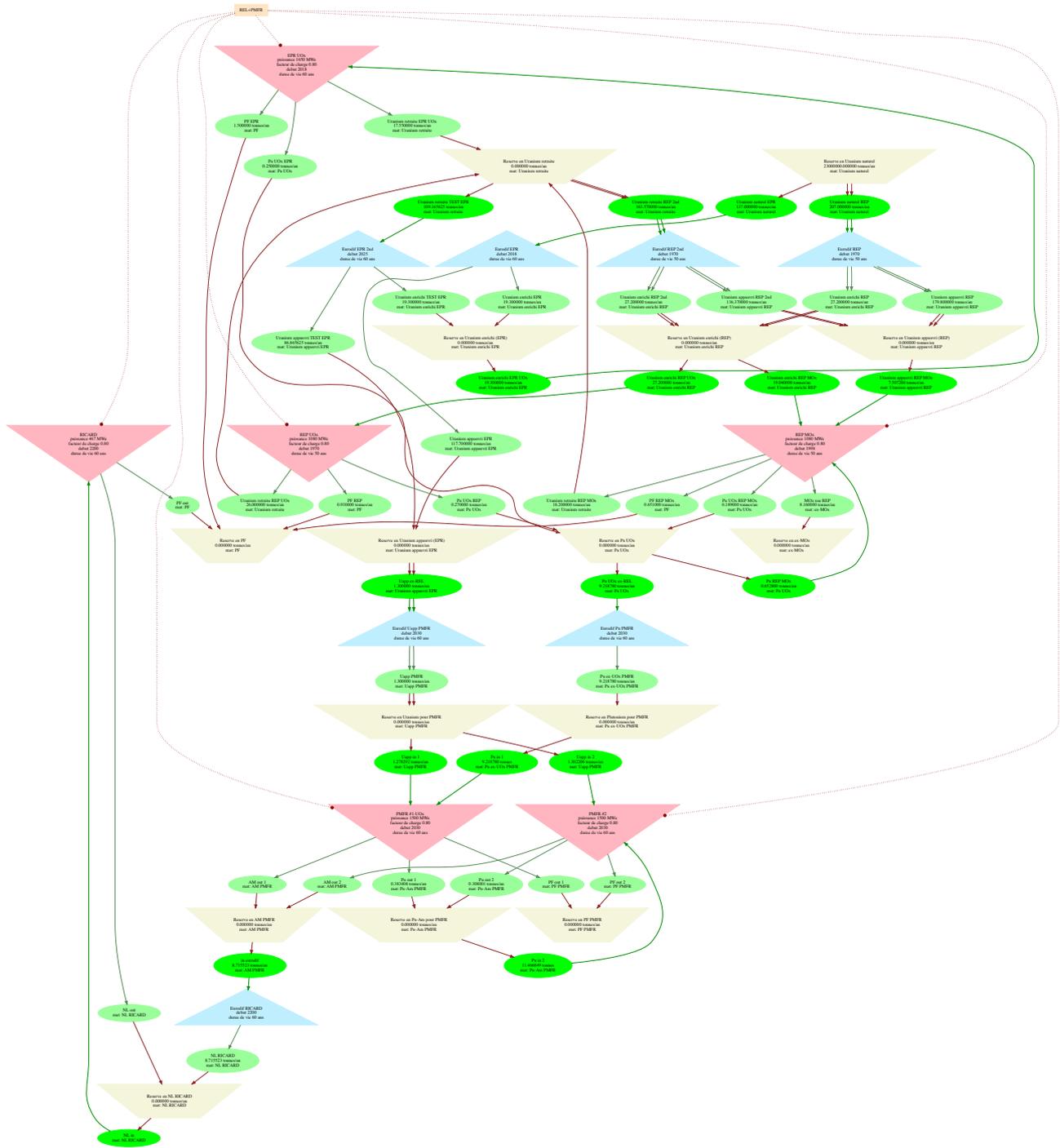


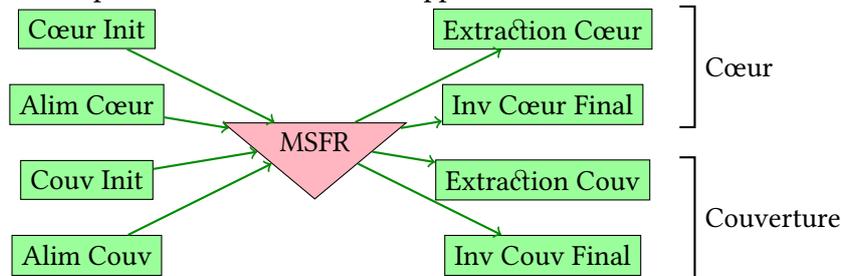
FIGURE I – Scénario REL+PMFR+RICARD – Illustration du parc REL+PMFR+RICARD

Annexe C La relecture

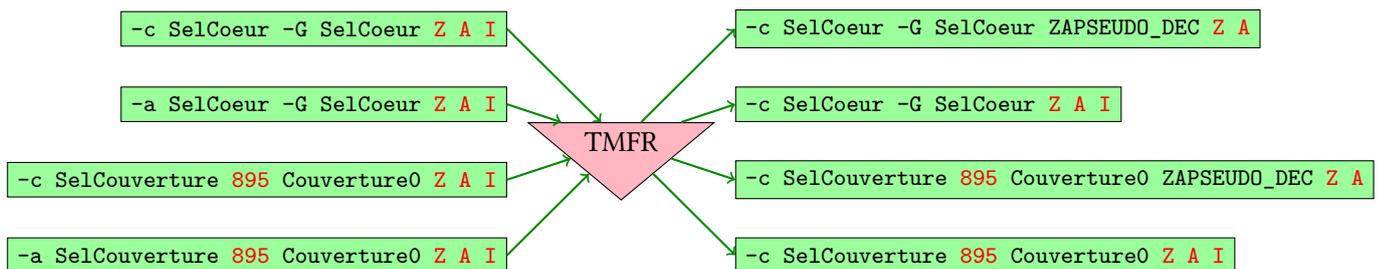
Le code REM permet de simuler des réacteurs. Le module relecture permet quant à lui de récupérer les évomats de ces simulations.

C.1 Procédure à réaliser

Au niveau de REM, un RSF possède plusieurs zones, chacune ayant des entrées et des sorties. Nous simplifions cela à huit évomats à récupérer, dans les deux zones appelées Cœur et Couverture.



Les évomats Init sont la matière initiale de la zone. Les Alim sont les alimentations année par année. Les Extraction sont les extractions années par année et les Inv Final sont les inventaires finaux des zones concernées.



La commande `-c` signifie « composition » et `-a` signifie « alimentation ». Il est nécessaire de savoir quels noyaux (identifiés par leur Z, leur A et leur I (s'ils sont excités ou non)) sont présents ou doivent l'être dans les différentes zones. Ainsi les commandes ci-dessus permettent de récupérer la composition ou l'alimentation année par année de tel ou tel noyau dans telle ou telle zone. Il est à noter que la couverture est à une certaine température qu'il faut savoir renseigner (dans l'exemple, 895 K).

C.2 `./krelire` et `./mrelire`

Pour récupérer ces données, il est nécessaire de rentrer les commandes ci-dessus dans des fichiers appelés `krelire` ou `mrelire` – k étant pour kg et m pour mole.

Tout d'abord, nous allons remplir le `krelire` avec tous les noyaux présents dans notre réacteur, en entrée et en sortie. Nous intégrons également des procédures (la commande `-p`) pour les RICARD.

`vim krelire`

```
#!/bin/csh
$DALI_DEV/REM/$DALI_chemin_exe/REM.exe MSFR\
-u composition kg\
-u temps a\
-c SelCoeur -G SelCoeur Z A I\
-a SelCoeur -G SelCoeur Z A I\
```

```
-c SelCoeur -G SelCoeur ZAPSEUDO_DEC Z A\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 Z A I\  
-a SelCouverture 895 Couverture0 Z A I\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 ZPSEUDO_DEC Z\  
-p SelCoeur -G SelCoeur ALL t 60\  
-p SelCouverture 895 Couverture0 ALL t 60\  
-p SelCouverture 895 Couverture0 ALLMODE 112 t 60
```

Les procédures servent à savoir quels noyaux sont présents à la fin de vie du réacteurs. Des fichiers produits sont extraits les Z, A et I entrés dans le fichier mrelire qui est sur demande de Laura en mole.

vim mrelire

```
#!/bin/csh  
$DALI_DEV/REM/$DALI_chemin_exe/REM.exe MSFR\  
-u composition mole\  
-u temps a\  
-c SelCoeur -G SelCoeur Z A I\  
-c SelCoeur -G SelCoeur Z 9\  
-c SelCoeur -G SelCoeur Z 17\  
-c SelCoeur -G SelCoeur ALL\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 Z A I\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 Z 9\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 Z 17\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 ALL\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 Z A I -11200\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 ZMODE 9 -11200\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 ZMODE 17 -11200\  
-c SelCouverture 895 Couverture0 ALLMODE -11200
```

Remplir ces fichiers à la main est une entreprise fastidieuse. Durant le stage a été développé un petit code appelé compo.py qui se charge de le faire tout seul.

Annexe D Sorties de compo.py

Nous n'allons pas rentrer dans le détail du fonctionnement du script Python compo.py développé dans le cadre du stage, par contre sa sortie est intéressante pour comprendre les données qui rentre dans le code et celle qui sortent. Ici est donné l'exemple du TMFR, autrement dit le MSFR de référence, mais tous les réacteurs sont passés par compo.py.

```
python3 compo.py MSFR_debutU3 TMFR_U3
```

```
Nous avons affaire à un Thorium Molten Fluorine Reactor démarré à l'U3.
```

EXTRACTION DES DONNÉES

```
Extraction du nom du réacteur : MSFR
Extraction du composite du coeur : SelCoeur
Extraction du groupe du coeur : SelCoeur
Extraction du volume du coeur : 18.00009 m³
Extraction du mode Extraction Sel Coeur : 100
Extraction du volume du réservoir : 18.00009 m³
Extraction du composite de la couverture : SelCouverture
Extraction de la cellule de la couverture : Couverture0
Extraction de la température de la couverture : 895
Extraction du volume de la couverture : 7.32567 m³
Extraction du mode Extraction Sel Couverture : 108
Extraction du mode Extraction TRT Couverture : 112
La durée de vie est de 60 ans.
```

MATÉRIAUX INTÉRESSANTS

EXTRACTION DES MATÉRIAUX

```
Création de TMFR_U3/relecture
Création de TMFR_U3/relecture/krelire -----o-----
Cœur
Cœur Init
Création de TMFR_U3/CoeurInit
Extraction de MSFR_debutU3/Composition/CompoCoeurInit vers TMFR_U3/CoeurInit/CompoCoeurInit
Extraction des éléments du cœur initial
Écriture du krelire
Alim Cœur
Création de TMFR_U3/AlimCoeur
Écriture du krelire
Couverture
Couv Init
Création de TMFR_U3/CouvInit
Extraction de MSFR_debutU3/Composition/CompoCouvertureInit vers TMFR_U3/CouvInit/CompoCouvertureInit
Extraction des éléments de la couverture initiale
Écriture du krelire
Alim Couv
Création de TMFR_U3/AlimCouv
Écriture du krelire
Extraction Couv
Écriture du krelire
Procédures pour Ricard
-----o-----
Copie des fichiers MSFR* dans la relecture
./krelire
-----o-----
```

EXTRACTION DES ACTINIDES MINEURS

```
Création de TMFR_U3/relecture/mrelire
Sel Cœur
Sel Couverture
./mrelire
Copie des données
Cœur
Cœur Init
TMFR_U3/CompoInit/CompoCoeurInit existe déjà.
Copie des MSFR_composition_k_SelCoeur_SelCoeur_Z_A_I.dat
Alim Cœur
Copie des MSFR_alimentation_kj_SelCoeur_SelCoeur_Z_A_I.dat
Couverture
Couv Init
TMFR_U3/CouvInit/CompoCouvertureInit existe déjà.
Copie des MSFR_composition_k_SelCouverture_895_Couverture0_Z_A_I.dat
Alim Couv
Copie des MSFR_alimentation_kj_SelCouverture_895_Couverture0_Z_A_I.dat
Copie des procédures pour Ricard
Création de TMFR_U3/RICARD
Copie terminée.
```

```

Lancement de crea_evo.py
> python3 crea_evo.py MSFR_debutU3 TMFR_U3

Nous avons affaire à un Thorium Molten Fluorine Reactor démarré à l'U3.

EXTRACTION DES DONNÉES
Extraction du nom du réacteur : MSFR
Extraction du composite du coeur : SelCoeur
Extraction du groupe du coeur : SelCoeur
Extraction du volume du coeur : 18.00009 m³
Extraction du mode Extraction Sel Coeur : 100
Extraction du volume du réservoir : 18.00009 m³
Extraction du composite de la couverture : SelCouverture
Extraction de la cellule de la couverture : Couverture0
Extraction de la température de la couverture : 895
Extraction du volume de la couverture : 7.32567 m³
Extraction du mode Extraction Sel Couverture : 108
Extraction du mode Extraction TRT Couverture : 112
La durée de vie est de 60 ans.

MATÉRIAUX INTÉRESSANTS
On récupère les listes importantes de compo.py
l_elt_r : liste des éléments initiaux du Cœur
l_elt_c : liste des éléments initiaux de la Couverture
elts_ricard_coeur : liste des éléments du Cœur destinés au RICARD
elts_ricard_couv : liste des éléments de la Couverture destinés au RICARD
elts_ricard_couvTRT : liste des éléments extraits de la Couverture destinés au RICARD

CRÉATION DES EVOS
Matériaux
Création de TMFR_U3/Materiaux
Th-232
Création de TMFR_U3/Materiaux/Th-232.dat
U-233
Création de TMFR_U3/Materiaux/U-233.dat
evo
Création de TMFR_U3/evo
ENTRÉES
Cœur
Th-232
Création de TMFR_U3/evo/Th-232-in-Coeur.dat
Alimentation initiale en Th-232 du Cœur : 38.465199999999996 t
Alimentation annuelle moyenne en Th-232 du Cœur :
1.064379293058679 t/an
U-233
Création de TMFR_U3/evo/U-233-in-Coeur.dat
Alimentation initiale en U-233 du Cœur : 4.8614939999999995 t
Alimentation annuelle moyenne en U-233 du Cœur :
0.14216805028553461 t/an
Couverture
Th-232
Création de TMFR_U3/evo/Th-232-in-Couv.dat
Alimentation initiale en Th-232 de la Couverture : 17.629540000000002 t
Alimentation annuelle moyenne en Th-232 de la Couverture :
0.11158434394882329 t/an
SORTIES
Cœur
Th-232
Création de TMFR_U3/evo/Th-232-out-Coeur.dat
Extraction annuelle moyenne de Th-232 du Cœur : 0.0 t/an
Extraction finale de Th-232 du Cœur : 34.53721446683239 t
U-233
Création de TMFR_U3/evo/U-233-out-Coeur.dat
Extraction annuelle moyenne de U-233 du Cœur : 0.0669122698040201 t/an
Extraction finale de U-233 du Cœur : 4.847643208687689 t
Couverture
Th-232
Création de TMFR_U3/evo/Th-232-out-Couv.dat
Extraction annuelle moyenne de Th-232 de la Couverture : 0.0 t/an
Extraction finale de Th-232 de la Couverture : 17.643708808059667 t

```

```

U-233
Création de TMFR_U3/evo/U-233-out-Couv.dat
Extraction annuelle moyenne de U-233 de la Couverture : 0.10901783919597997 t/an
Extraction finale de U-233 de la Couverture : 0.05368603287452571 t
SORTIES RICARD
Coeur
Couv
CouvTRT
Total
FIN DE LA CRÉATION DES ÉVOS

```

Il est à noter que le code `comp.py` appelle au bout d'un moment le code `crea_evo.py`. Au départ, ces deux codes n'en formaient qu'un seul; mais il a été décidé de les séparer par soucis de praticité. En effet, le programme `./krelire` peut être plutôt long (de quelques minutes à plusieurs heures) et il n'est pas forcément tout le temps nécessaire. D'où l'intérêt de ne le lancer qu'une seule fois et de pouvoir déboguer seulement le code `crea_evo.py`.

Annexe E Fichiers Sdf du TMFR #2

Cette annexe montre tous les fichiers servant à définir le réacteur TMFR #2 dans le code Sdf. Le fichier `Reacteurs/TMFR` possède le fichier `TMFR2.dat` ainsi que le dossier `evo2`. Le fichier décrivant le réacteur se présente sous cette forme :

```
vim Reacteurs/TMFR/TMFR2.dat
```

```

EVOMAT E-Th-in-2
E-Th-in-2.nom "Th in 2"
E-Th-in-2.idf_MATERIAU "Th TMFR"
E-Th-in-2.type_evolution Fichier Reacteurs/TMFR/evo2/Th-in.dat

EVOMAT E-U-in-2
E-U-in-2.nom "U in 2"
E-U-in-2.idf_MATERIAU "U TMFR"
E-U-in-2.type_evolution Fichier Reacteurs/TMFR/evo2/U-in.dat

EVOMAT E-Th-out-2
E-Th-out-2.nom "Th out 2"
E-Th-out-2.idf_MATERIAU "Th TMFR"
E-Th-out-2.type_evolution Fichier Reacteurs/TMFR/evo2/Th-out.dat

EVOMAT E-U-out-2
E-U-out-2.nom "U out 2"
E-U-out-2.idf_MATERIAU "U TMFR"
E-U-out-2.type_evolution Fichier Reacteurs/TMFR/evo2/U-out.dat

EVOMAT E-PF-out-2
E-PF-out-2.nom "PF out 2"
E-PF-out-2.idf_MATERIAU "PF TMFR"
E-PF-out-2.type_evolution Fichier Reacteurs/TMFR/evo2/PF2.dat

EVOMAT E-AM-out-2
E-AM-out-2.nom "AM out 2"
E-AM-out-2.idf_MATERIAU "AM TMFR"
E-AM-out-2.type_evolution Fichier Reacteurs/TMFR/evo2/AM2.dat

```

```

REACTEUR R-TMFR2
R-TMFR2.nom "TMFR #2"
R-TMFR2.puissance 1.5
R-TMFR2.date_initiale 2030
R-TMFR2.duree_de_vie 60
R-TMFR2.entree "Th in 2"
R-TMFR2.entree "U in 2"
R-TMFR2.sortie "Th out 2"
R-TMFR2.sortie "U out 2"
R-TMFR2.sortie "PF out 2"
R-TMFR2.sortie "AM out 2"
    
```

Le dossier evo2 contient :

```
ls Reacteurs/TMFR/evo2
```

```
AM2.dat PF2.dat Th-in.dat Th-out.dat U-in.dat U-out.dat
```

Et ces différents fichiers d'évolution se présentent sous les formes suivantes :

```
vim Reacteurs/TMFR/evo2/Th-in.dat
```

```

0 1 57.10650622725358          30 31 1.2027199466030087
1 2 1.0616950433642387        31 32 1.213664383607069
2 3 1.0847373733758778        32 33 1.2257404508418355
3 4 1.105170682755387         33 34 1.2284784044450583
4 5 1.1190421475818972        34 35 1.2311999607625133
5 6 1.1590758253859845        35 36 1.2354617523598472
6 7 1.1777059020007643        36 37 1.2331114232711826
7 8 1.1854268923790623        37 38 1.2338123894417443
8 9 1.1896474202500331        38 39 1.2127471482020056
9 10 1.189673924876565        39 40 1.1948413078127262
10 11 1.191223050974043        40 41 1.1844805900392934
11 12 1.1929662645695134       41 42 1.1723991520914288
12 13 1.1905162215617442       42 43 1.1573712170692958
13 14 1.1934993313430105       43 44 1.1512531098450256
14 15 1.1853791493938888       44 45 1.1433808133429428
15 16 1.1759744491517903       45 46 1.14175025690861
16 17 1.1727561297081546       46 47 1.1442296996977084
17 18 1.1700526603481443       47 48 1.1374062330554522
18 19 1.1700850070978956       48 49 1.1469733697153313
19 20 1.1731146952751241       49 50 1.155432152235408
20 21 1.172029226381975        50 51 1.1575961225808333
21 22 1.16846381946523         51 52 1.1600494722964467
22 23 1.1679862280682891       52 53 1.1642153436962681
23 24 1.1657221737677212       53 54 1.1702396633368246
24 25 1.1684318788419834       54 55 1.1789747184545645
25 26 1.1707997538849129       55 56 1.1775532562665263
26 27 1.1728519389359104       56 57 1.1789331010466777
27 28 1.1763815626203424       57 58 1.1849429911079263
28 29 1.1890613302734518       58 59 1.1837695019963899
29 30 1.1966700045448224       59 60 0
    
```

```
vim Reacteurs/TMFR/evo2/AM2.dat
```

```
0 59 0
```

```
59 60 0.615738264136662
```

```
vim Reacteurs/TMFR/evo2/PF2.dat
```

```
0 59 0
59 60 72.63849278500027
```

```
vim Reacteurs/TMFR/evo2/U-in.dat
```

```
0 1 5.318332499395535
1 2 0.29840372696088147
2 3 0.23313585974769474
3 4 0.196864999651906
4 5 0.166060454219282
5 6 0.06481075532870162
6 7 0.019341638619454926
7 8 0.001570067332193531
8 60 0
```

```
vim Reacteurs/TMFR/evo2/Th-out.dat
```

```
0 59 0
59 60 50.99810185091292
```

```
vim Reacteurs/TMFR/evo2/U-out.dat
```

```
0 8 0
8 9 0.018119240723800167
9 10 0.03637915383015655
10 11 0.03778031260456721
11 12 0.05193268970626219
12 13 0.04393680173059253
13 14 0.05044666126901495
14 15 0.052448772488006445
15 16 0.053733541236727966
16 17 0.05046881874091394
17 18 0.04668218660342724
18 19 0.05463559393041492
19 20 0.05592541787966135
20 21 0.042266985308752086
21 22 0.04927212831329966
22 23 0.05152123278692455
23 24 0.05018746489378978
24 25 0.04688298166333174
25 26 0.057889845661880046
26 27 0.04657015399259504
27 28 0.0690032319404695
28 29 0.048799315347794386
29 30 0.04707666455556747
30 31 0.03027586042172073
31 32 0.04935764349255689
32 33 0.042417861111771454
33 34 0.06268853509146752
34 35 0.03341032271176245
35 36 0.04685504561397413
36 37 0.0507272468673125
37 38 0.02763663653048054
38 39 0.04463728399304262
39 40 0.05356306053669194
40 41 0.04380070606111458
41 42 0.04066873657141079
42 43 0.043679470925293756
43 44 0.04311019500377278
44 45 0.0424474628866616
45 46 0.045708300581240896
46 47 0.044650194687931716
47 48 0.058751419024813484
48 49 0.027150649690526968
49 50 0.04577687806685449
50 51 0.055647473077765935
51 52 0.04873266262296094
52 53 0.03741278506600995
53 54 0.037573232704487175
54 55 0.06607667586603239
55 56 0.038510176671928326
56 57 0.03078299571571197
57 58 0.05705873392982985
58 59 0.03214377026250173
59 60 4.948350141123152
```

Résumé

Dans un monde en perpétuelle croissance, le réchauffement climatique impose de trouver et d'utiliser des sources d'énergie les plus propres possibles en matière de CO₂. Le nucléaire est une de ces solutions mais les réacteurs actuels à eau consomment beaucoup d'Uranium naturel sans utiliser tout le potentiel énergétique de ce matériaux, ce qui limite un potentiel déploiement massif mondial pérenne.

La famille des réacteurs à sels fondus à spectre neutronique rapide – ou MSFR en anglais – a été sélectionnée comme l'une des représentantes de la quatrième génération de réacteurs nucléaires, dont l'un des objectifs est de répondre à cette problématique. Après avoir défini trois filières de MSFR en variant les cycles fertile/fissile et les sels utilisés, il se pose la question de savoir laquelle est la plus pertinente pour répondre à une demande électrique mondiale fortement croissante.

À l'aide du code Scénario du Futur développé en interne au LPSC, des scénarios ont été fait pour comparer ces trois filières entre elles, en particulier sur la question de l'utilisation des ressources naturelles. Les résultats montrent que le réacteur appelé *Plutonium Molten Fluorine Reactor* est le plus économe, suivi du MSFR de référence nommé *Thorium Molten Fluorine Reactor* et enfin le *Plutonium Molten Chloride Reactor* est le réacteur utilisant le plus d'Uranium naturel pour parfaire la demande.

Ces trois filières produisent des quantités équivalentes de déchets, des matières radioactives non valorisables. Les déchets avec une demi-vie très longue pourraient être convertis en produits de fissions avec des périodes plus courtes dans des réacteurs incinérateurs appelés facétieusement RICARD.

Finalement, ce stage a rempli son objectif premier : exhumer le code SdF et préparer le terrain pour de potentiels futurs travaux sur son amélioration.

Abstract

In an ever-growing world, global warming requires finding and using the cleanest possible energy sources in terms of CO₂. Nuclear power is one of these solutions, but current water reactors consume a lot of natural uranium without using the full energy potential of this material, which limits their potential for massive deployment worldwide.

The molten salt fast reactors family – or MSFR – has been selected as one of the representatives of the fourth generation of nuclear reactors, one of the objectives of which is to address this issue. After having defined three MSFR systems by varying the fertile/fissile cycles and the salts used, the question arises as to which one is the most relevant to meet a strongly growing world electrical demand.

Using the *Scénario du Futur* code developed internally at LPSC, scenarios were made to compare these three technologies, in particular on the issue of natural resources use. The results show that the *Plutonium Molten Fluorine Reactor* is the most economical, followed by the reference MSFR named *Thorium Molten Fluorine Reactor* and finally the *Plutonium Molten Chloride Reactor* is the reactor using the most natural Uranium to meet the demand.

These three reactors produce equivalent quantities of waste, non-viable radioactive materials. The waste with a very long half-life could be converted into fission products with shorter half-lives in incinerator reactors facetiously called RICARD.

Finally, this internship has fulfilled its primary objective : to exhume the SdF code and prepare the ground for potential future work on its improvement.