

MOLTEN SALT REACTOR
Journées Scientifiques de Massy 2018
22/23 mars

Réacteurs à Sels Fondus /

Rapport Scientifique des Journées des 22-23 mars 2018

**M. Allibert^a, S. Beils^g, S. Bourg^e, M. Brovchenkoⁱ, G. Campioni^c, B. Carluet^g,
P. Chamelot^j, M. Delpech^c, S. Delpech^b, P. Gauthé^d, D. Gerardin^a,
A. Gerschenfeld^c, Y. Gorsse^c, J. Guidez^c, D. Heuer^a, E. Ivanovⁱ,
A. Laureau^{a,f}, D. Lecarpentier^h, J. Martinet^a, E. Merle^a, J. Serp^e**

^a LPSC-IN2P3-CNRS, UGA, Grenoble INP, Grenoble, France

^b IPNO-IN2P3-CNRS, Orsay, France

^c CEA, Direction de l'Énergie Nucléaire, Saclay, France

^d CEA, Direction de l'Énergie Nucléaire, Cadarache, France

^e CEA, Direction de l'Énergie Nucléaire, Marcoule, France

^f EPFL, Lausanne, Suisse

^g FRAMATOME, Lyon, France

^h EDF, Saclay, France

ⁱ IRSN, Clamart, France

^j LGC - UMR 5503, Université Toulouse III

Réacteurs à Sels Fondus / Rapport Scientifique des Journées des 22-23 mars 2018

Document édité par le CEA - 2018

Correspondants de rédaction : Joël Guidez et Guillaume Campioni

Référence : [DEN/DANS/DM2S/DIR/AU/2018-62842](#)

Cadre du rapport

Ce rapport fait suite aux deux journées scientifiques, organisées conjointement par le CEA et le CNRS, les 22 et 23 MARS 2018 à Massy, sur le concept MSR « MOLTEN SALT REACTOR ».

Ces journées avaient pour but de faire un point scientifique sur le concept de réacteur à sels fondus qui est l'un des six concepts du GIF (International forum Sur les réacteurs de quatrième génération), tout en se plaçant dans le cadre français.

Ce concept très original consiste à dissoudre dans un sel fondu les éléments combustibles. La réaction nucléaire se produit alors dans ce fluide qui est aussi le fluide caloporteur, qui va transférer la chaleur produite à un fluide intermédiaire. On notera qu'il existe des concepts de réacteurs où le sel fondu est utilisé comme simple caloporteur avec un combustible solide (généralement type HTR). Ces concepts ne faisaient pas l'objet de ces journées.

Ces journées ont réuni l'ensemble des organismes ayant quelques connaissances en France sur le sujet : CNRS, CEA, IRSN, FRAMATOME, EDF, ORANO, mais aussi des membres de start-up des membres de l'académie des sciences, de la CNE, etc.

On trouvera en **ANNEXE 5.2** la liste des participants à ces journées et leur affiliation.

Ce rapport fait le point scientifique de nos connaissances et conclut par des propositions d'axes de recherche et développement dans ce domaine.

Remerciements

Que soient ici remerciés l'ensemble des participants à ces journées des 22/23 Mars 2018, notamment pour leur réactivité (l'annonce officielle du séminaire ayant été faite début janvier 2018) et leur présence active durant ces deux jours ; remerciements à la hiérarchie CEA qui a supporté cette action et assuré l'organisation ; et bien sûr, remerciements à l'ensemble des co-auteurs pour leurs travaux et réflexions dans leurs domaines de compétences respectifs ayant permis d'aboutir à la qualité de ce document d'ensemble et de synthèse. Enfin, un grand merci à Marion Bard pour sa contribution à la communication web qui fût très appréciée.

Le présent rapport, les présentations et les informations sur ces journées (et les séminaires à venir) sont disponibles sur le site : <http://irfu.cea.fr/Meetings/seminaires-MSR/>

Contacts : Joel Guidez (joel.guidez@cea.fr) et Guillaume Campioni (guillaume.campioni@cea.fr)

Table des matières

Cadre du rapport	3
Remerciements	3
Avant-propos /	
MSR - Quel type d'innovation ?	7
Première partie /	
Les MSR en France et dans le monde REX et état des lieux en 2018	9
1.1. Historique des MSR	9
1.2. Avantages et intérêts des MSR.....	9
1.3. REX du MSRE	10
1.3.1. Choix du sel (FLiBe).....	11
1.3.2. Les matériaux	11
1.3.3. Neutronique et écoulements dans le circuit combustible	12
1.3.4. Extraction de chaleur.....	14
1.3.5. Traitement du sel	15
1.3.6. Bilan final du MSRE.....	16
1.4. Les programmes nationaux dans le monde en 2018	16
1.4.1. Chine.....	16
1.4.2. Russie.....	18
1.4.3. Inde.....	19
1.5. Projets portés par des start-up.....	19
1.5.1. L'ISRM 400 de Terrestrial Energy au Canada	20
1.5.2. Le Molten Chloride Fast Reactor de Terra Power	20
1.5.3. Le Molten Chloride Salt Fast Reactor (MCSFR) de Elysium Industry	21
1.5.4. Le transatomic power reactor (projet du MIT)	21
1.5.5. Thorcon de Martingale	22
1.5.6. Liquid Fluorid Thorium Reactor de Flibe Energy	22
1.6. Analyse des différents concepts.....	22
1.7. ... Et la France ?.....	23
Deuxième partie /	
Bilan des connaissances en 2018	25
2.1. Introduction.....	25
2.2. Choix des sels	26
2.3. Choix des matériaux	28
2.4. Chimie des sels	31
2.5. Produits de fission non solubles.....	32
2.6. Choix du fluide intermédiaire	32
2.7. Neutronique	33
2.8. Matières combustibles / Cycle du combustible	38
2.9. Incinération	39
2.9.1. Contexte et possibilités des RNR à combustible solide.....	39

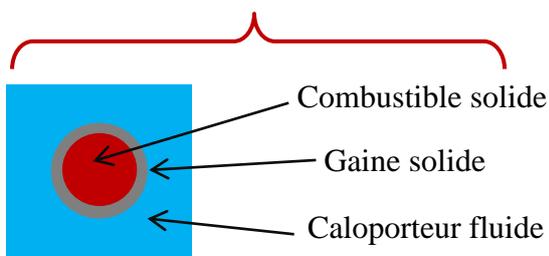
2.9.2.	Possibilités offertes par les MSR	40
2.9.3.	Stratégies possibles pour les MSR.....	40
2.9.4.	Conclusion sur l'incinération	42
2.10.	Mode de pilotage / Suivi de réseau.....	42
2.11.	Retraitement du combustible	44
2.12.	Les composants	48
2.13.	L'instrumentation.....	50
2.14.	Approche de sûreté et licensing.....	51
2.14.1.	Trois axes principaux de la sûreté	51
2.14.2.	Liste d'évènement initiateurs (EIS).....	52
2.14.3.	Barrières	53
2.14.4.	Conclusion sur la sûreté	53
2.15.	Déchets et démantèlement.....	54
2.16.	Conclusion	54
Troisième partie /		
Analyse des moyens et équipes Propositions de R&D.....		55
3.1.	Intérêts potentiels de la filière pour la France	55
3.1.1.	Utilisation des matières disponibles.....	55
3.1.2.	Comparaison avec les RNR-Na	55
3.2.	Trois éléments d'analyse temporelle sur les MSR.....	56
3.2.1.	Suivi de charge du réseau.....	57
3.2.2.	Vie d'un noyau de Pu dans le cycle (combustibles solide et liquide)	57
3.2.3.	Impact sur la conception et la simplification	58
3.3.	Identification des choix techniques de base	59
3.4.	Bilan des moyens disponibles.....	60
3.4.1.	Moyens/équipes travaillant actuellement sur la thématique.....	60
3.4.2.	Moyens/équipes facilement convertibles.....	61
3.5.	Moyens nécessaires à court terme et axes de recherches associés : boucles, labo chauds, codes et design de « réacteur papier »	62
3.6.	Conclusion	65
Quatrième partie /		
Conclusion générale		67
Cinquième partie /		
ANNEXES		69
5.1.	Propos sur les MSR : innovation de rupture (et conséquences)	69
5.2.	Liste des participants (CNRS, CEA, IRSN, EDF, FRAMATOME, ORANO, ...)	74
5.3.	Programme des journées de Massy – 22/23 mars 2018.....	76
5.4.	Références cités dans le texte.....	78
5.5.	Éléments bibliographiques sur les MSR	79
5.6.	Listes des Figures.....	81

Avant-propos /

MSR - Quel type d'innovation ?

Le concept des MSR opère une profonde modification du « dominant design » en vigueur dans le nucléaire civil. Ce dominant design repose sur un trio : combustible solide + matériau de gainage solide + caloporteur fluide (liquide ou gazeux).

PWR, BWR, RNR-Na, HTR, CANDU, etc.



MSR
Modification profonde
du dominant design

**Combustible +
Caloporteur fluides**
(pas de matériaux de gaine)

Figure 1 : Modification du dominant design du nucléaire apportée par les MSR

Dans les MSR, ce « dominant design » classique est remplacé par un fluide combustible. Cette innovation opère ainsi non pas une innovation dite « **de soutien** », mais une innovation dite « **de rupture** ». En effet, à elle seule, cette innovation a des conséquences potentielles majeures sur le réacteur nucléaire (en tant qu'objet technologique), mais également d'un point de vue économique et social, avec les avantages suivants visés :

- Les études MSFR réalisées à ce jour montrent que les caractéristiques du concept à combustible liquide apportent des avancées en termes de sûreté intrinsèque. L'effet de dilatation du combustible procure notamment un comportement favorable vis-à-vis des accidents de réactivité,
- Plus de matériaux de structures : de gainage (gaine, assemblage) et de pastille combustible qui sont les premiers facteurs limitant la durée du combustible en réacteur (impact sur l'incinération des déchets, leur quantité et leur nature),
- Un cycle du combustible hors réacteur réduit à moins d'une semaine (il est d'une durée comprise entre 5 et 10 ans pour un RNR à combustible solide), donc un impact sur l'industrie.
- Réduction de la présence des structures internes (impact sur la fabrication d'un réacteur),
- simplification de l'utilisation de la matière puisqu'un même réacteur est très flexible sur la composition du sel combustible qu'il peut recevoir (impact sociétal, utilisation maximale des réserves),
- Incinération des déchets de manière plus simple et plus efficace qu'un RNR à combustible solide (impact sur le coût de la gestion des déchets),

L'annexe (§ 5.1) du présent document pose les différences structurelles entre un processus d'innovation « de soutien » et un processus d'innovation « de rupture », aussi bien pour les objets technologiques en eux-mêmes, que pour les impacts sur les niveaux de performance, mais aussi sur le développement des sociétés et, bien sûr, sur les acteurs économiques ou de R&D suivant leurs positionnements face à une innovation dite « de rupture » et la prise en compte qu'ils en font.

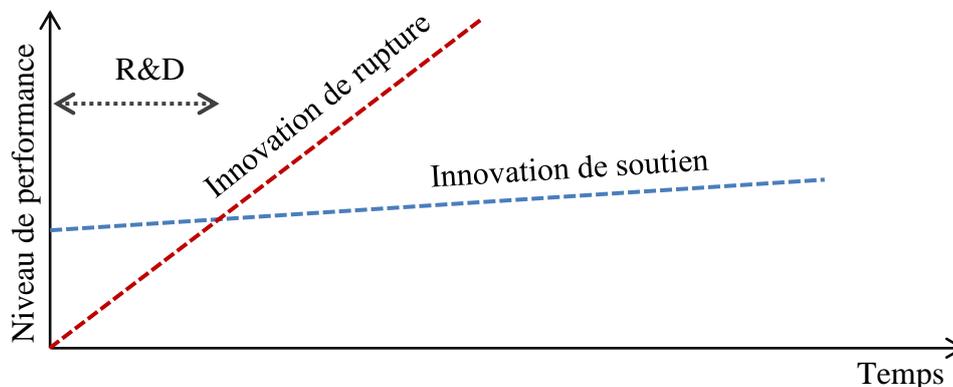


Figure 2 : Evolution structurelle de la performance (croissance, rentabilité, productivité, économie de matières, etc.) suivant l'introduction d'innovations de rupture ou de soutien (source travaux de Peter Schumpeter)

A cet égard, on peut prendre, comme exemples d'innovation de rupture, l'introduction de la photographie numérique (dont une des conséquences directes a été la disparition du leader mondial, Kodak qui choisit de ne pas prendre en considération l'introduction du numérique), le développement de l'informatique personnelle (minoré par IBM pourtant créateur du dominant design du PC) ou encore le fort développement économique actuel du « new space » (notamment par l'innovation de rupture que représente le retour des lanceurs spatiaux) conduisant à une remise en cause des technologies en place, des coûts pratiqués et surtout des positions des acteurs historiques face aux nouveaux entrants utilisant l'innovation de rupture.

Parce que l'emploi d'un combustible liquide opère une rupture majeure dans la conception nucléaire, l'analyse des MSR ne peut pas se faire en fonction des repères, outils et principes usuellement appliqués et en vigueur pour les réacteurs à combustible solide car ils s'avèrent, de facto, n'être plus nécessairement opérants. Ils peuvent même conduire à une analyse erronée des potentialités et des débouchés de la filière (c'est le REX de l'historique de Kodak).

Pour étudier aussi bien le concept de MSR, que la sûreté ou encore les conséquences en termes de développement de la filière, il est nécessaire de sortir des schémas liés au combustible solide pour reconstruire des outils d'analyses adaptés. Ceci est particulièrement flagrant quant à l'approche de sûreté où des notions comme « circuit primaire », matériaux de gainage ou encore « accident de sur-criticité prompt » n'existent tout simplement plus pour les MSR alors qu'elles sont fondamentales pour les réacteurs à combustible solide. La construction de nouveaux repères s'avère donc nécessaire pour mettre en perspective ce qu'apporte l'innovation du combustible liquide et en percevoir les potentiels en termes de développement, de renouveau et de gains en productivité et en retours sur investissement.

Le présent rapport contribue à mettre en lumière une partie des possibilités offertes aujourd'hui par les réacteurs à sels fondus dans le contexte français.

Première partie /

Les MSR en France et dans le monde REX et état des lieux en 2018

1.1. Historique des MSR

Le concept MSR (réacteur à combustible dissous dans un sel fondu) date des années 50, où fut développé aux USA ce réacteur pour un projet d'avion militaire à propulsion nucléaire à très long rayon d'action (on est en pleine guerre froide !). Les raisons de ce choix sont la souplesse de pilotage des MSR et leur très grande rapidité de variation de puissance.

Un prototype : l'ARE (Aircraft Reactor Experience) de 2,5 MWth sera développé et construit. Il ne fonctionnera que du 3 au 12 Novembre 1954. Certains points positifs seront confirmés (comme les très forts coefficients de contre-réaction et le pilotage), mais des problèmes de corrosion des matériaux utilisés (Inconel) et la complexité de l'installation vont amener à l'arrêter rapidement.

Par la suite, les éléments liés à la sûreté et la radioprotection dans un avion vont faire arrêter le développement militaire des MSR pour l'aviation. Le concept passe alors dans la filière civile, et se traduit par la conception et la construction du MSRE (Molten Salt Reactor Experience) à Oak Ridge.

Ce réacteur expérimental de plus forte puissance (7,4 MWt) fonctionnera de 1965 à 1969. En 1976, sur la base de cette expérience, un projet de réacteur électrogène de plus forte puissance, le MSBR (Molten Salt Breeder Reactor) sera lancé puis abandonné.

Depuis aucun réacteur, même prototype, n'a été construit et le REX de fonctionnement se limite donc au REX du prototype MSRE.

1.2. Avantages et intérêts des MSR

Ce concept a une grande originalité avec son cœur fondu dès le départ ; et ce qui correspondrait à une situation accidentelle pour les réacteurs à combustible solide, présente ici des avantages et des caractéristiques très intéressantes :

- Pas de contraintes liées à l'emploi d'un combustible solide (interaction combustible-gaine, tenue des matériaux sous irradiation, inertie thermique du combustible solide, etc.),
- Il n'y a pas de risque de fusion du cœur et d'interaction entre du combustible fondu et le caloporteur primaire, susceptible de solliciter significativement les barrières de confinement. De plus, le circuit combustible n'a pas besoin d'être pressurisé lors du fonctionnement normal,

- Le cycle du combustible est beaucoup plus simple, puisqu'il n'y a plus besoin de fabriquer du combustible (pastille, gaine assemblage) et de le retraiter, pour séparation avant fabrication. Il suffit d'alimenter en combustible le cœur par adjonction périodique et de retraiter sur site (en ligne ou par batch),
- Potentiellement certains concepts permettent de brûler tous les déchets produits par les REP et de minimiser les déchets finaux de l'ensemble des activités nucléaires,
- Les versions rapides ont tous les avantages liés aux rapides (maximisation de la ressource en uranium, possibilités d'utilisation du thorium, possibilités de transmutation et minimisation des déchets, etc.),
- L'ensemble présente une grande compacité,
- Pas d'effet d'échelle sur le pilotage et fonctionnement,
- Grande souplesse de pilotage pour le suivi de réseau.

Ces avantages potentiels conduisent aujourd'hui à de nombreuses recherches dans le monde sur ce concept soit dans le cadre de programmes nationaux, soit dans le cadre de start-ups, attirées par l'originalité du concept et par ses potentialités.

1.3. REX du MSRE

Le MSRE est un réacteur construit au National Laboratory d'Oak Ridge. C'est un réacteur à spectre thermique, avec modérateur graphite, sels fluorures, de puissance 7,4 MWt.

Les études de conception démarrent en 1960, la construction se termine en 1964 pour une divergence en 1965. Il fonctionnera de 1965 à 1969. La référence [1] résume cette expérience du MSRE (cf. *Figure 3*). Par ailleurs, une importante documentation sur ce fonctionnement existe (plusieurs milliers de pages), elle est totalement ouverte et disponible (cf. [20] dans 5.5).

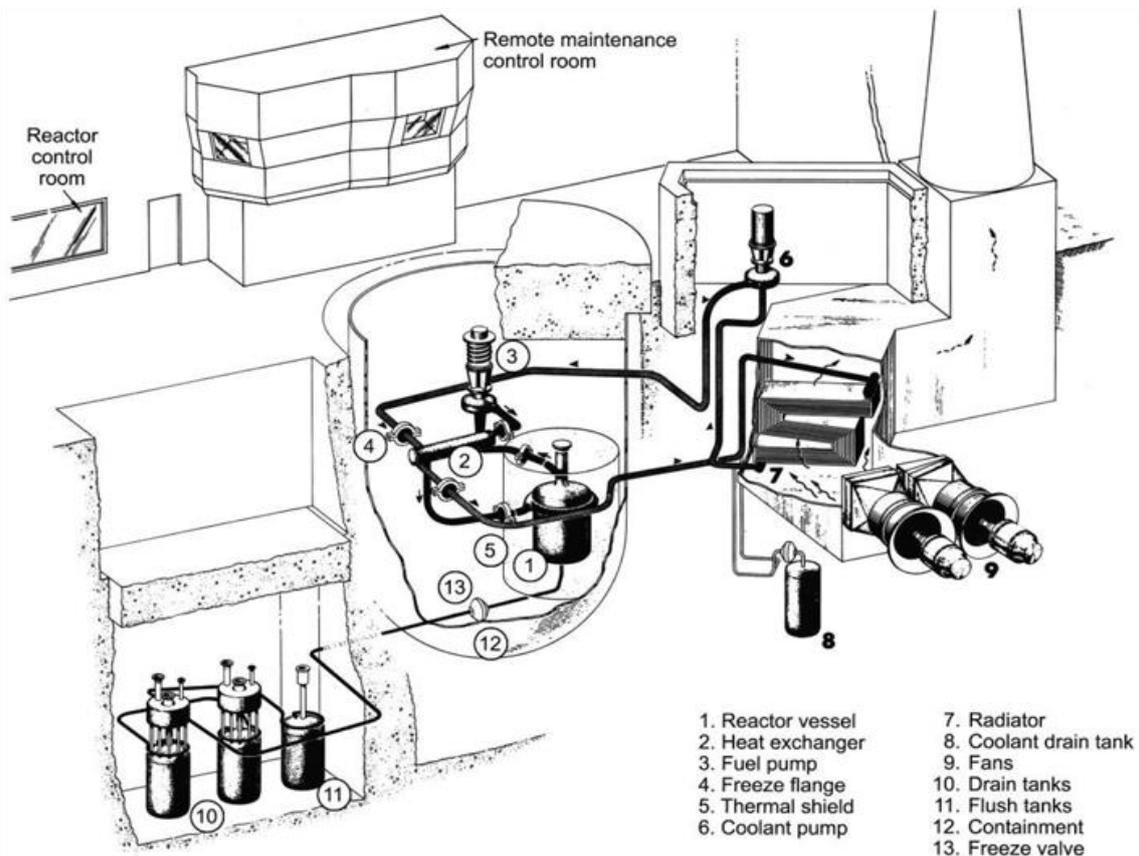


Figure 3 : Vue générale du MSRE

1.3.1. Choix du sel (FLiBe)

L'expérience ARE a conduit à choisir des fluorures de Lithium et de Béryllium (FLiBe, cf. *Figure 4*). Elle a fourni comme validations et résultats expérimentaux :

- La bonne économie de neutrons (section de capture plus faible),
- L'emploi du Be permet d'abaisser la température de fusion,
- L'utilisation du Li 7 permet d'éviter la formation de tritium et de s'affranchir de la forte absorption neutronique du Li 6,
- Le bon comportement sous irradiation a été confirmé,
- L'utilisation du lithium permet d'éviter la formation d'oxydes d'uranium et ainsi de ne pas ajouter de ZrF_4 , composé utilisé d'ordinaire pour éviter la formation d'oxydes d'uranium,
- La validation des forts coefficients thermiques de contre-réaction du combustible liquide.

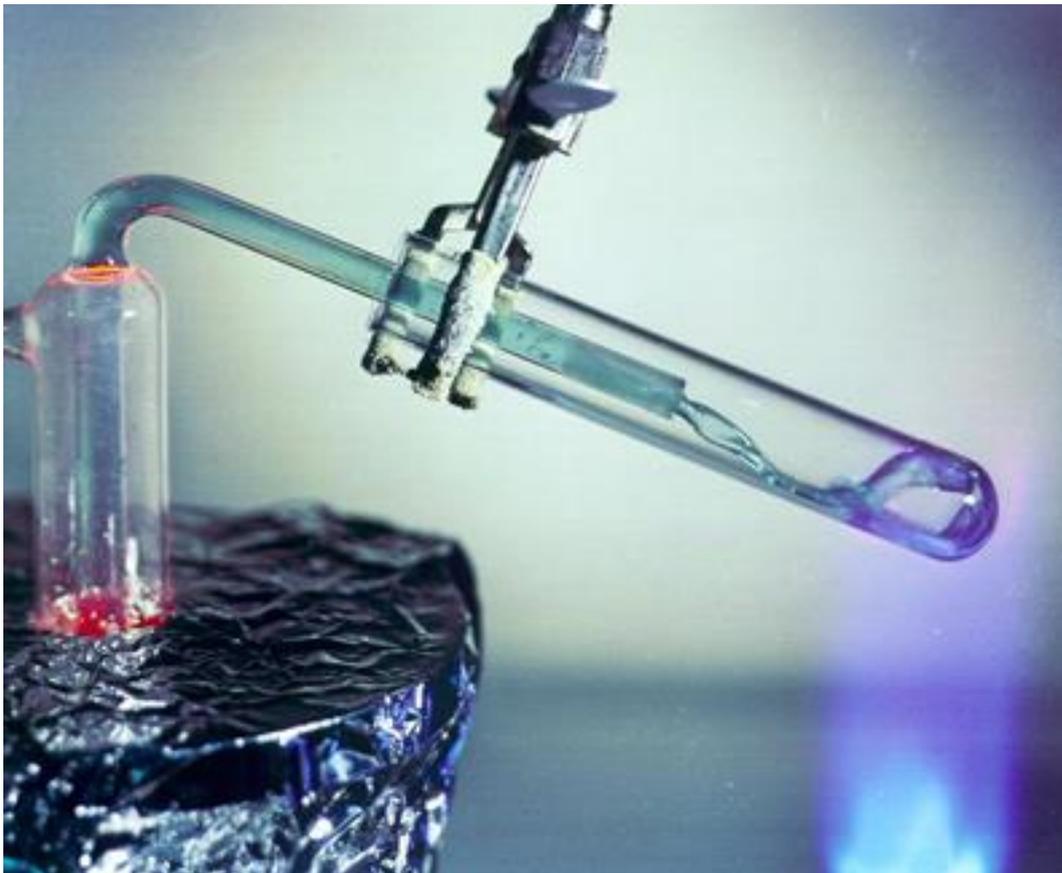


Figure 4 : Sel fondu

1.3.2. Les matériaux

La corrosion de l'inconel sur l'ARE, a conduit au développement d'un matériau : l'Hastelloy N, un matériau à base de Nickel et à haute teneur en Molybdène. Ce matériau a montré une excellente tenue à la corrosion par les sels.

Par contre, une fragilisation de faible profondeur par les tellures a été observée. Sur ce point, il a pu être établi que ce sont les PF dissous dans le sel qui sont facteurs de corrosion potentielle, ce qui oblige à une maîtrise des potentiels redox.

1.3.3. Neutronique et écoulements dans le circuit combustible

Le sel « froid » (635°C) descend en périphérie pour maintenir la cuve « froide », se retourne dans le plenum inférieur pour un écoulement ascendant dans des canaux graphites (cf. *Figure 5*) qui assurent également la modulation des neutrons, et dont il sort à 665 °C. On est donc dans un spectre thermique où le graphite joue le rôle du modérateur, et avec un faible delta T (donc une température assez homogène dans le cœur réduisant les contraintes thermiques sur les matériaux).

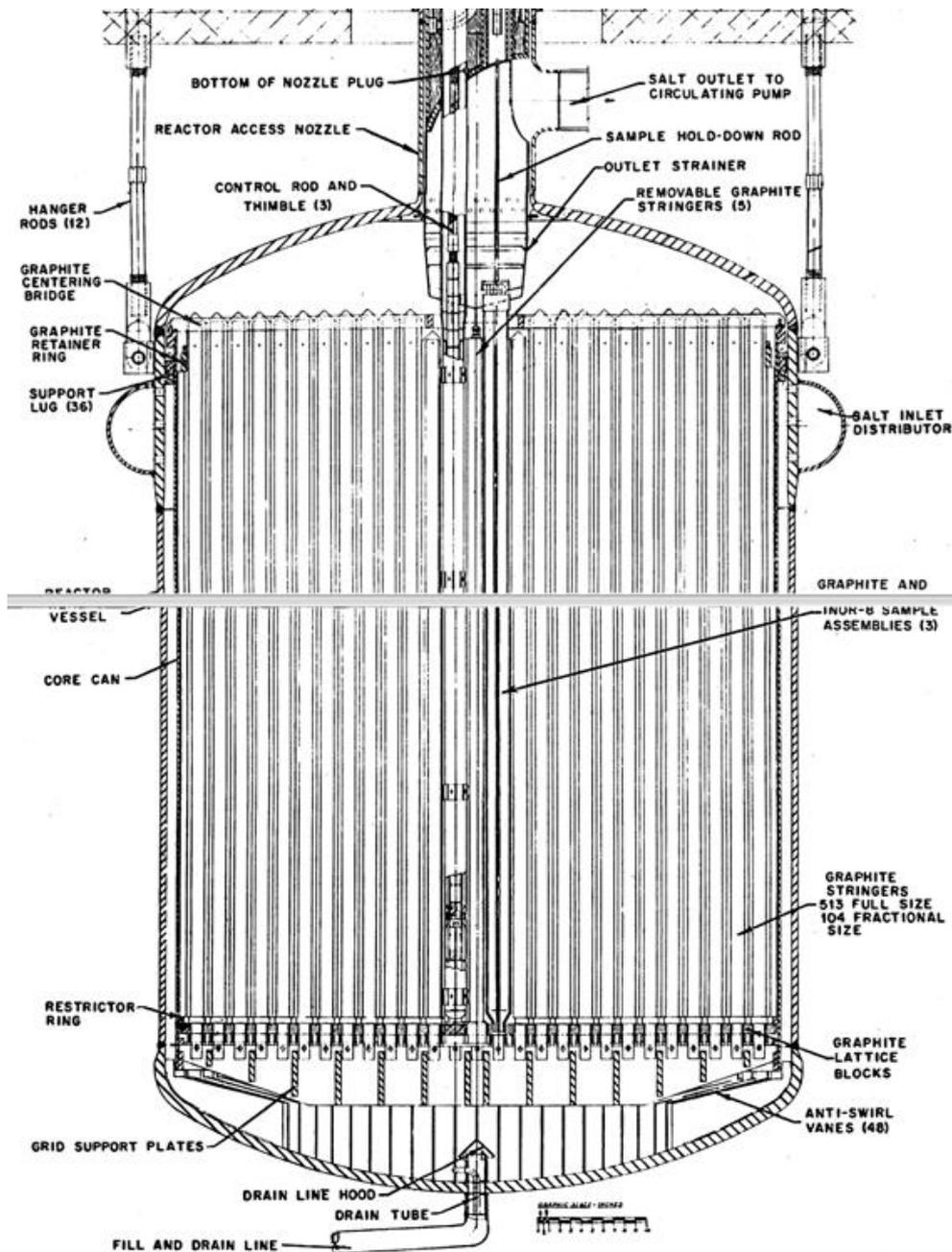


Fig. 5.4.
CROSS SECTION
MSRE REACTOR VESSEL AND ACCESS NOZZLE

Figure 5 : Vue du réacteur

Ces canaux graphites sont au nombre de 513 et occupent 77,5% du volume du cœur (cf. *Figure 6*). Les écoulements y sont laminaires.

Trois barres de sécurité étaient prévues, réparties dans le cœur, tenues par des électro aimants et sans contact avec le sel (placées au-dessus du niveau libre). Chaque barre avait 38 cylindres à base de Gadolinium. Ces barres présenteront quelques problèmes de refus de chute lors des tests. Des dispositifs de vidange étaient également prévus.



Figure 6 : Vue des éléments graphite du cœur MSRE

Une pompe primaire (cf. *Figure 7*) en partie haute assure la circulation du fluide combustible dans un vase d'expansion, où s'effectue l'extraction des gaz de fission, les ajouts éventuels et les prélèvements. De par sa conception et ses fonctions, elle est un élément technologique central du réacteur.

L'étanchéité au niveau du passage de l'arbre de pompe est assurée par un courant descendant d'hélium, qui va ensuite entrainer les gaz de fission pour une séparation ultérieure.

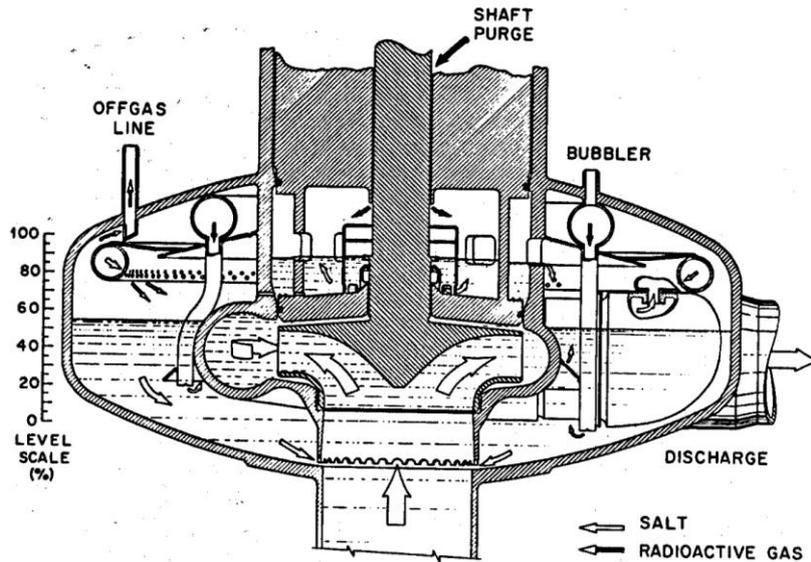


Figure 7 : Pompe primaire du MSRE

Les problèmes rencontrés seront essentiellement des dépositions d'aérosols, des bouchages de systèmes de filtration, et des entrainements de gaz fluctuants dans le sel. Ceci a entraîné des fluctuations de puissance (celle-ci étant très sensible à la teneur en gaz) durant les premières phases de fonctionnement. L'ajustement du débit en gaz a permis de résoudre ce problème rapidement.

1.3.4. Extraction de chaleur

Cette extraction est effectuée par des échangeurs (diamètre total 40cm, formé de 163 tubes de longueur 2,5 m, cf. Figure 8) entre le circuit combustible et le circuit intermédiaire (en sel également). Le circuit intermédiaire évacue la chaleur par un radiateur de 120 tubes de longueur 9m (échangeur sel-air) et un ventilateur.



Figure 8 : Vue des échangeurs du MSRE

Le seul problème notable rencontré durant l'exploitation sera une panne de ventilateur durant 11 semaines.

1.3.6. Bilan final du MSRE

Succinctement :

- Le réacteur a fonctionné 15 mois dont 6 en continu sans vidange du sel,
- Temps équivalent pleine puissance 9 005 h en U235 et 4 167 h en U233 (soit 13 172 h au total pour le combustible à base d'uranium),
- Temps total de circulation du sel combustible 21 788 h,
- Temps total de circulation du sel du circuit intermédiaire 26 026 h,
- 51 cycles de remplissage / vidange primaire,
- 19 cycles de remplissage / vidange du circuit intermédiaire.

Sur cette durée, le fonctionnement s'est bien déroulé et la petite série de problèmes d'exploitation lors de la phase de démarrage ont été résolus simplement (rupture du ventilateur, entrainement de gaz, défaut de chute de barres, fissuration d'une vanne lors d'une vidange, etc.).

Le principal poison neutronique étant le Xénon récupéré sous forme gazeuse en continu, il n'y a pas eu nécessité de retraiter le sel pour pouvoir fonctionner. Seul l'uranium 233 a été extrait et récupéré lors d'une campagne effectuée ultérieurement. Le sel lui-même est toujours stocké avec ses PF sur le site.

1.4. Les programmes nationaux dans le monde en 2018

Le tableau ci-dessous résume les principaux programmes et start-up consacrés aux MSR dans le monde, tels que présentés, dans la suite du rapport.

	CA	CH	CN	FR	IN	IT	RU	TR	UK	US
Programmes	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
Equipes	0	1	-	1	1	1	-	-	0	-
Start-ups	1	0	0	0	0	0	0	0	1	5

1.4.1. Chine

C'est le pays qui a le programme le plus vaste et le plus structuré.

L'ensemble des moyens a été alloué à un centre de recherche, le SINAP situé à Shanghai qui doit développer l'ensemble du concept sous toutes ses formes : recherche sur le concept, les codes, les matériaux, la technologie, le retraitement, etc. On estime qu'environ 1000 personnes travaillent dans ce centre, avec des boucles à sels fondus opérationnelles, des recherches technologiques et l'annonce d'un petit prototype (cf. *Figure 10* et *Figure 11*).

Suivant son habitude, la Chine part de l'acquis, c'est-à-dire sur la base initiale du concept MSRE, et avec les mêmes options initiales, à savoir un réacteur thermique, sels fluorures, avec modérateur graphite.

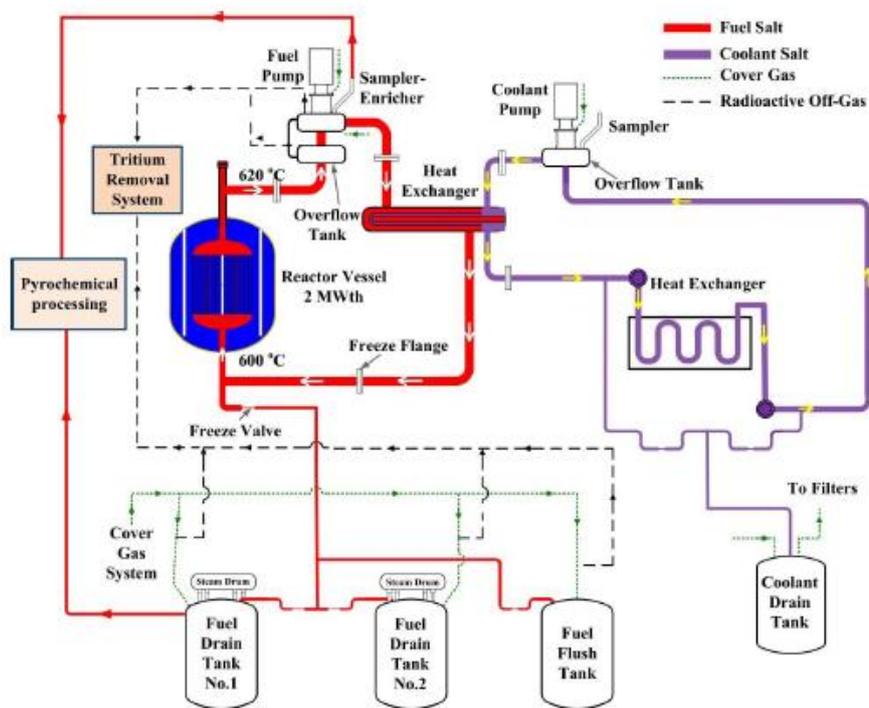


Figure 10 : Vue du projet de réacteur chinois de 168 MWe

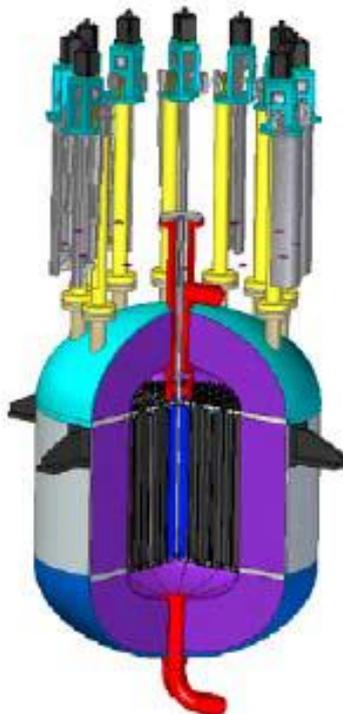


Figure 11 : Vue du bloc réacteur

On notera que des études sont aussi en cours sur des types de réacteurs utilisant le sel fondu comme simple caloporteur sur des assemblages solides.

1.4.2. Russie

En Russie, une petite équipe travaille à l'institut Kurchatov sur le projet MOSART de réacteur de 1000 MWe (cf. *Figure 12* et *Figure 13*). Là aussi la recherche s'effectue autour du concept dans différents domaines. Sur les matériaux, des recherches se poursuivent pour obtenir des matériaux supportant sans corrosion de plus hautes températures. Dans le domaine du retraitement, des recherches se poursuivent également. Enfin, des études de base précieuses y ont été effectuées sur les valeurs de dissolution des différents produits dans les sels.

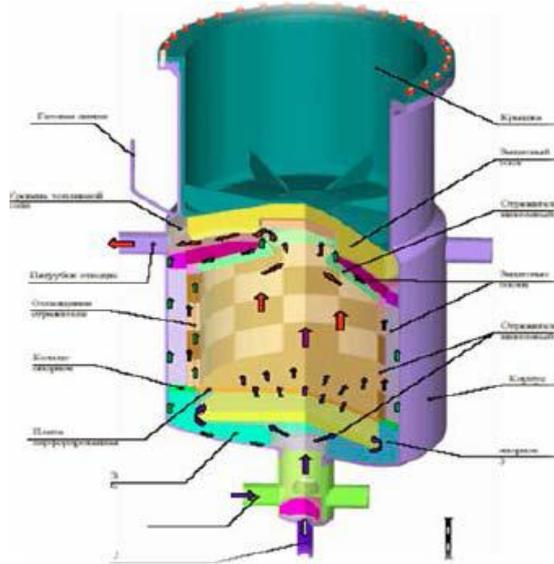


Figure 12 : Vue du bloc réacteur MOSART

Le concept MOSART est plus innovant : c'est un réacteur rapide avec sels fluorures, visant à utiliser les déchets disponibles (U/Pu/Actinides) tout en intégrant les possibilités du thorium.

Certaines dispositions sont spécifiques comme l'utilisation, au niveau du cœur, d'une paroi en graphite permettant de jouer un rôle de réflecteurs à neutrons et de protecteurs de la paroi pour en augmenter la durée de vie.

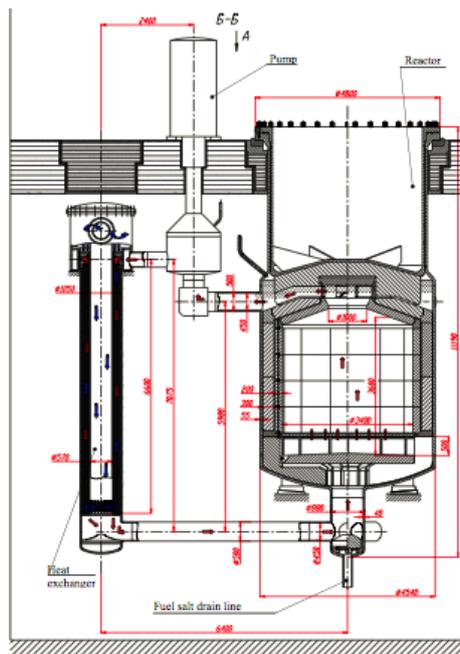


Figure 13 : Vue en coupe du projet MOSART

1.4.3. Inde

Un programme national plus modeste existe. C'est un réacteur rapide, avec sels fluorures, et valorisant du thorium. Il est donc cohérent avec la stratégie nationale de fermeture du cycle et d'utilisation du thorium.

On trouvera *Figure 14* un dessin de leur projet de 850 MWe.

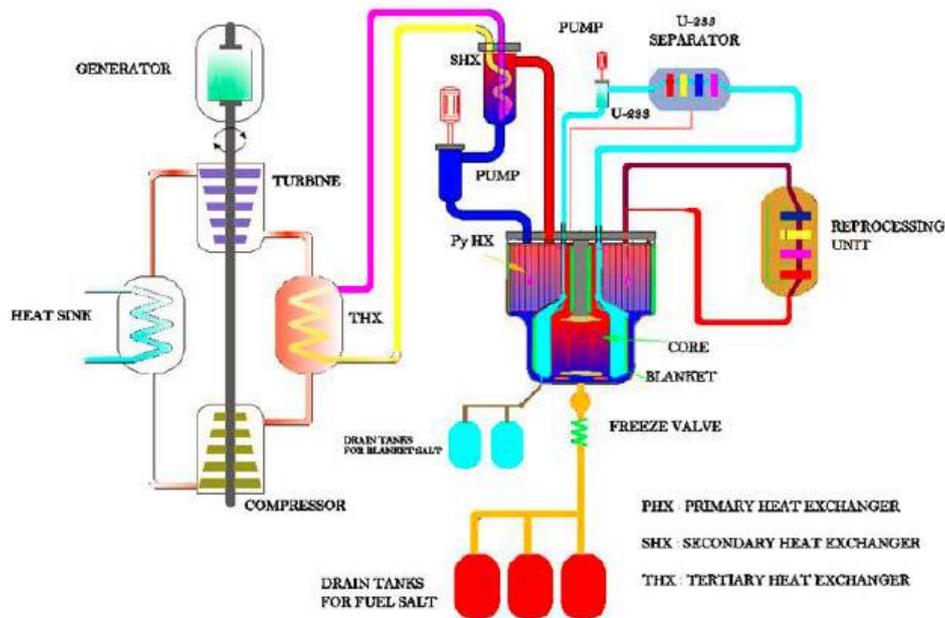


Figure 14 : Vue du projet indien de 850 MWe

1.5. Projets portés par des start-up

Dans le monde anglo-saxon et européen, de nombreuses start-up proposent aujourd'hui des concepts de réacteurs utilisant les sels fondus dont voici une liste pas forcément exhaustive ! Précisons que certaines utilisent le sel fondu uniquement comme caloporteur et continuent d'employer un combustible solide, avec gainage. Elles ne sont donc pas concernées par le présent rapport (par exemple : MOLTEX qui combine un sel caloporteur avec un combustible qui devient liquide en fonctionnement, à l'intérieur de crayons rassemblés en assemblages carrés). Parmi les projets de réacteurs à combustible liquide, on trouve :

- Integral Molten Salt Reactor 400 (Terrestrial Energy, Canada) *thermal*,
- Molten Chloride salt Fast Reactor (Terrapower and co, USA) *fast*,
- Transatomic Power Reactor (Transatomic + MIT, USA) *thermal*,
- ThorCon (Martingale, USA) *thermal*,
- Liquid Fluoride Thorium Reactor (Flibe Energy, USA) *thermal*,
- Stable Salt Reactor (Moltex Energy, UK) *fast*,
- Molten Chloride Salt Fast Reactor (Elysium industries, USA) *fast*,
- Seaborg Waste Burner (Seaborg technologies, Denmark) *thermal*,
- Copenhagen Atomic Waste Burner (Copenhagen Atomic, Denmark) *thermal*,
- Thorenco Process Heat Reactor,
- Etc.

Ces start-up ont souvent des moyens assez réduits, font peu de développements basiques, bénéficient d'aides de l'état (par exemple le programme GAIN du DOE) et fonctionnent aussi sur le

principe du dépôt de brevets ou d'une licence pour qu'ils soient ensuite commercialisables. Cependant, le nombre de projets se développant montre le dynamisme de la R&D sur les MSR, et illustre les intérêts de la filière en rupture avec l'utilisation d'un combustible solide.

Parmi celles développant un concept à combustible liquide, les plus intéressantes dont abordées ci-dessous.

1.5.1. L'ISRM 400 de Terrestrial Energy au Canada

Ce projet est un réacteur thermique de 400 MWt à base de fluorures et utilisant du graphite. C'est un concept à capacités passives pour l'évacuation de la puissance résiduelle, brûlant de l'uranium (LEU). Le concept développé est passif (convection naturelle) et s'inspire directement du MSRE dont il se veut le prolongement direct (cf. Figure 15).

Ils annoncent avoir 17,2 Millions de dollars de fonds et un pré-licensing review en cours au Canada.

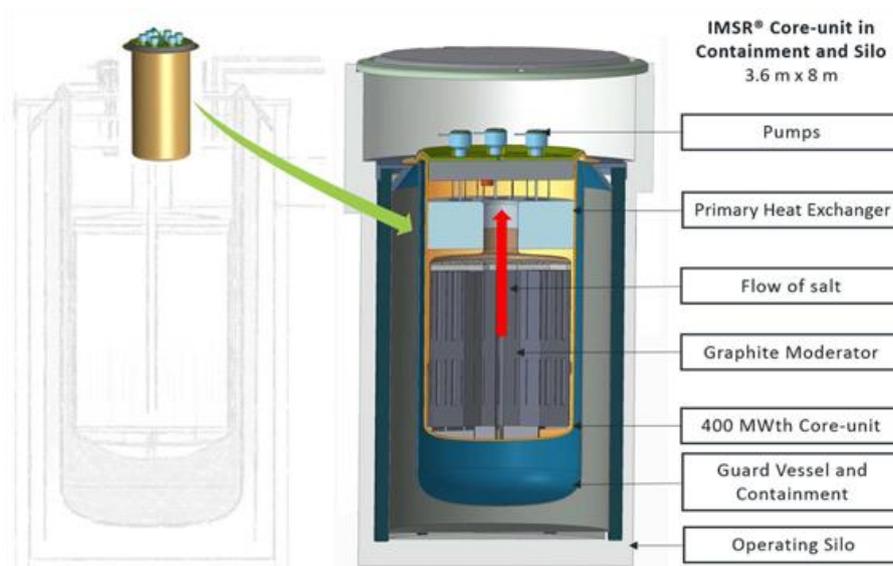


Figure 15 : Vue du projet Terrestrial Energy

1.5.2. Le Molten Chloride Fast Reactor de Terra Power

Terra Power présente un réacteur prototype de 30 MWt, rapide mais avec des sels chlorures (cf. Figure 16). Ce réacteur a été étudié avec les deux cycles régénérateurs : U/Pu et Th/U. En 2016, Terrapower aurait touché 40 millions de dollars du DOE pour ce projet.

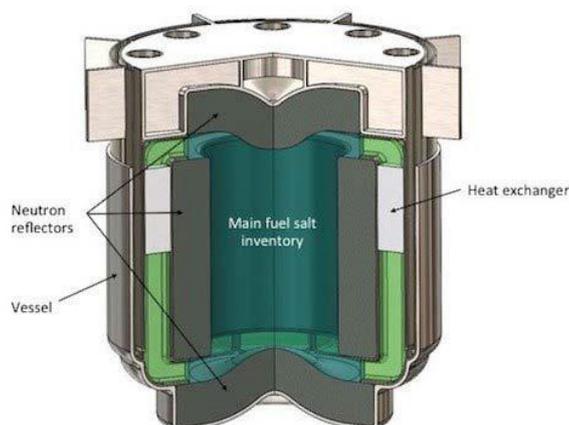


Figure 16 : Vue du projet Terrapower

1.5.3. Le Molten Chloride Salt Fast Reactor (MCSFR) de Elysium Industry

Ce réacteur d'une puissance de 1000 MWe vise un cycle fermé du combustible en utilisant du combustible usé (cf. *Figure 17*). Il a donc fait le choix d'un spectre rapide et d'un sel chlorure.

Fondé en 2015, la start-up compte une quarantaine d'employés.

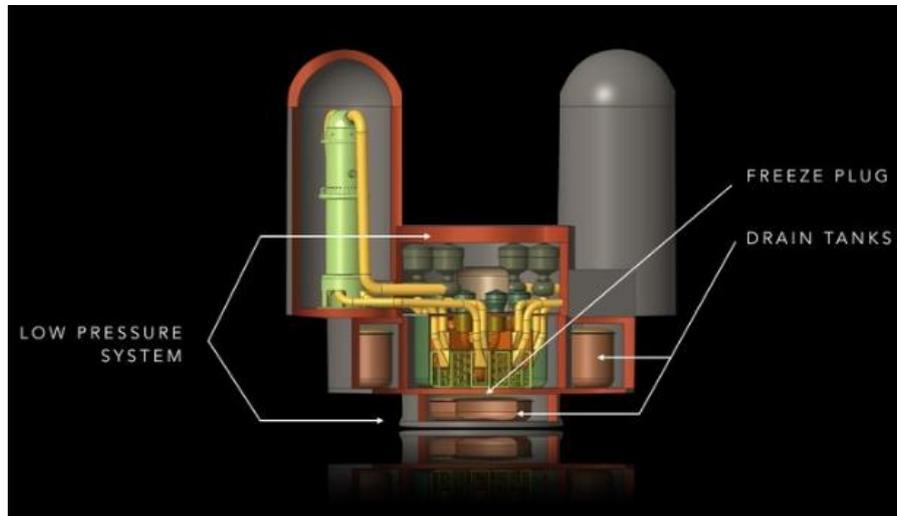


Figure 17 : Le MCSFR d'Elysium Industry

1.5.4. Le transatomic power reactor (projet du MIT)

Ce projet reprend la lignée du MSRE (réacteur thermique) mais en tentant de remplacer le graphite par de l'hydrure de zirconium (cf. *Figure 18*).

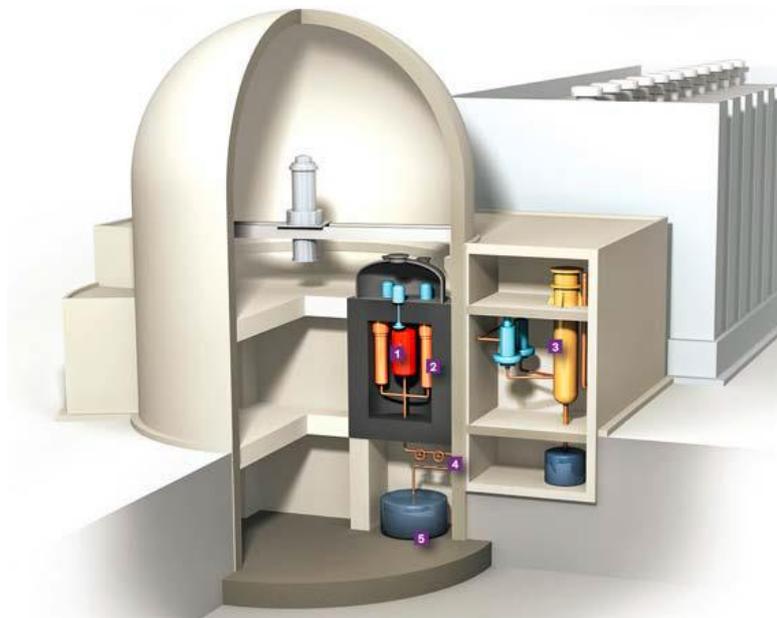


Figure 18 : Vue du projet Transatomic

1.5.5. Thorcon de Martingale

Là on est toujours dans un projet thermique proche du MSRE, mais sous une forme de concepts modulaires (cf. Figure 19).

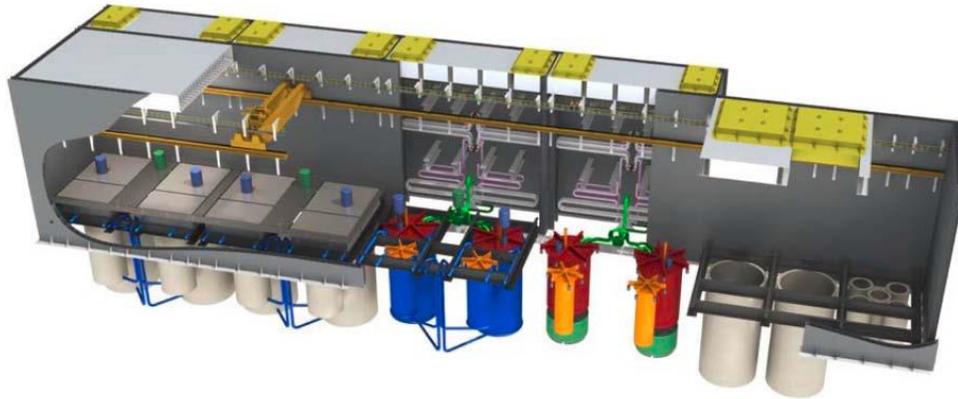


Figure 19 : Vue du projet Thorcon

1.5.6. Liquid Fluorid Thorium Reactor de Flibe Energy

Encore un concept thermique proche du MSRE, mais plus axé sur l'utilisation du thorium (cf Figure 20).

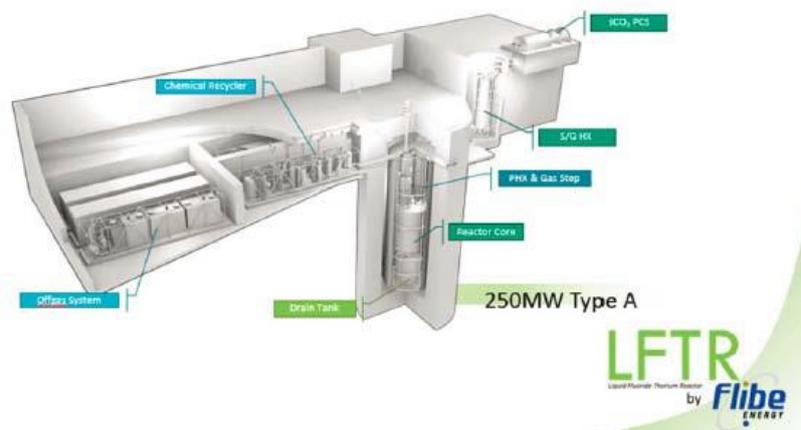


Figure 20 : vue du LFTR

1.6. Analyse des différents concepts

On remarque tout d'abord une grande variété dans les choix techniques proposés ce qui montre l'absence actuelle de solution faisant le consensus mais montre aussi la versatilité du concept.

Il y a de nombreux concepts thermiques électrogènes qui s'apparentent souvent au MSRE, avec un modérateur (souvent du graphite), et de nombreux concepts rapides qui présentent tous les avantages potentiels des rapides, en particulier pour des fermetures de cycle.

Pour le choix des sels, les fluorures sont souvent retenus, mais les chlorures qui ont aussi certains avantages, ne sont pas définitivement écartés.

Pour le choix du combustible, on trouve souvent le cycle U/Pu, l'utilisation de combustible usé, mais les possibilités du cycle du thorium sont souvent présentées en complément ainsi que les possibilités d'incinération de déchets de type actinides (par exemple le réacteur développé par Terra Power).

Le retraitement du combustible liquide, lorsqu'il est prévu, est présenté soit en ligne, soit en batch.

Certains projets ont des versions modulaires (économie de coûts sur la fabrication en série des modules).

En fait, c'est le choix des objectifs qui détermine certains choix techniques de base, en particulier entre le spectre thermique ou rapide (des objectifs privilégiant la fermeture du cycle, conduiront au choix d'un spectre rapide). La deuxième partie du présent rapport expliquera les avantages et inconvénients de chaque option : spectre thermique ou rapide, sels chlorures ou fluorures, cycles U/Pu ou Th/ U ou actinides, modes de retraitement, etc.

1.7. ... Et la France ?

L'objectif national est la fermeture du cycle et la minimisation des déchets. Dans ce contexte, des études antérieures ont été effectuées à deux périodes de temps par le CEA et EDF :

- De 1970 à 1983, des études de dimensionnements autour du réacteur MSBR,
- A partir de 2000, le CEA et EDF se sont intéressés aux RSF dans l'objectif premier d'incinérer le Pu et/ou les actinides mineurs (concept TASSE au CEA, concept AMSTER à EDF), avant de mettre en avant des concepts surgénérateurs : une version de AMSTER surgénératrice en spectre thermique et cycle thorium, et le concept REBUS surgénérateur en spectre rapide, cycle U/Pu et sel chlorure.

Depuis, il n'y a pas eu beaucoup de boucle d'essais. La seule expérience, menée à EDF, a été une installation d'étude de la corrosion des alliages à base nickel en fluorure (cf.[10]). Et une boucle d'essais en sel fondu inactif a été construite et utilisée au CNRS/LPSC à Grenoble pour des recherches technologiques (cf. [6][7]).

Plus récemment, le CNRS (LPSC - Grenoble) a été porteur d'études sur un projet de MSR à spectre rapide à sel fluorure : Le MSFR (cf. *Figure 21*) est conçu pour fermer le cycle en utilisant les « déchets » produits par la filière nucléaire actuelle (U et Pu) et pour incinérer les actinides. De nombreux calculs ont été effectués avec le cycle thorium mais ce type de réacteur est par conception « très souple » d'un point de vue combustible et peut de ce fait recevoir le cycle U/Pu sans modification. Documentation complète sur le MSFR : cf. [21] de l'Annexe 5.5

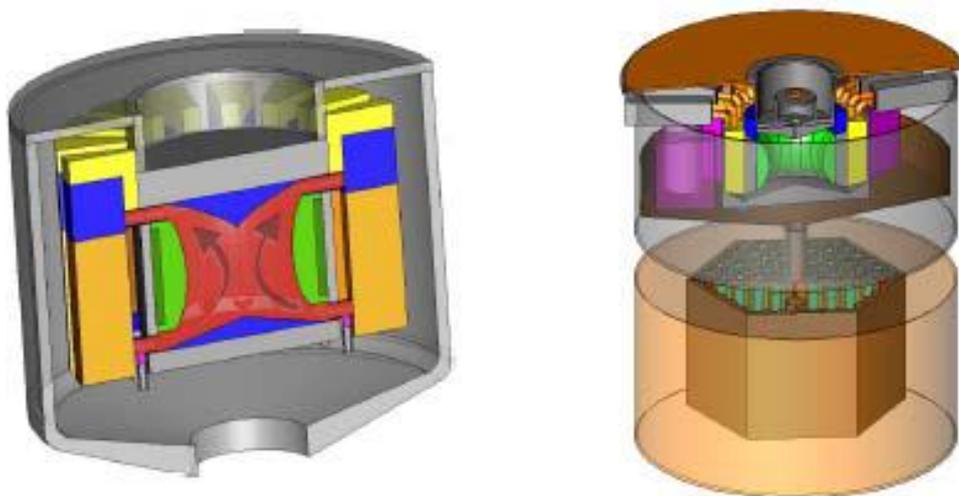


Figure 21 : vue du concept MSFR du CNRS (LPSC - Grenoble)

Ce type de réacteur est potentiellement capable de transformer tous nos déchets (U appauvri, U de retraitement, thorium, Pu, voire ultérieurement actinides) en production énergétique. Il permet donc de fermer le cycle et minimiser nos déchets finaux. La puissance choisie est de 3 GWt.

Le projet MSFR est bien avancé en termes de calculs et de choix de conceptions argumentés, c'est pourquoi ce « réacteur papier » a servi de référence aux études européennes EVOL, puis SAMOFAR, et un nouveau projet européen consacré à l'analyse de sûreté du MSFR est actuellement en préparation (SAMOSAFER).

On notera qu'un prototype de plus faible puissance (entre 100 et 300 MWt) est aussi à l'étude.

Enfin, le développement du projet MSFR a nécessité l'exploration et l'étude d'un grand nombre de possibilités, de choix de conceptions et de scénarios, produisant par conséquent une grande quantité de connaissances et d'outils désormais disponibles pour des études sur les MSR.

Deuxième partie /

Bilan des connaissances en 2018

2.1. Introduction

Le CEA et EDF ayant porté ces dernières années l'essentiel de leurs efforts sur la filière RNR-Na, ce bilan de connaissances porte essentiellement sur les travaux et thèses effectués dans le cadre des études du CNRS et dans le cadre des études européennes associées (MOST, Projets FP7 EVOL et H2020 SAMOFAR). Ces dernières études intègrent par ailleurs les connaissances disponibles et existantes. On notera à ce sujet dans les références un certain nombre d'études effectuées par EDF ou le CEA, avant 2010.

La *Figure 22* présente les circuits et dénominations d'un MSR de type MSFR.

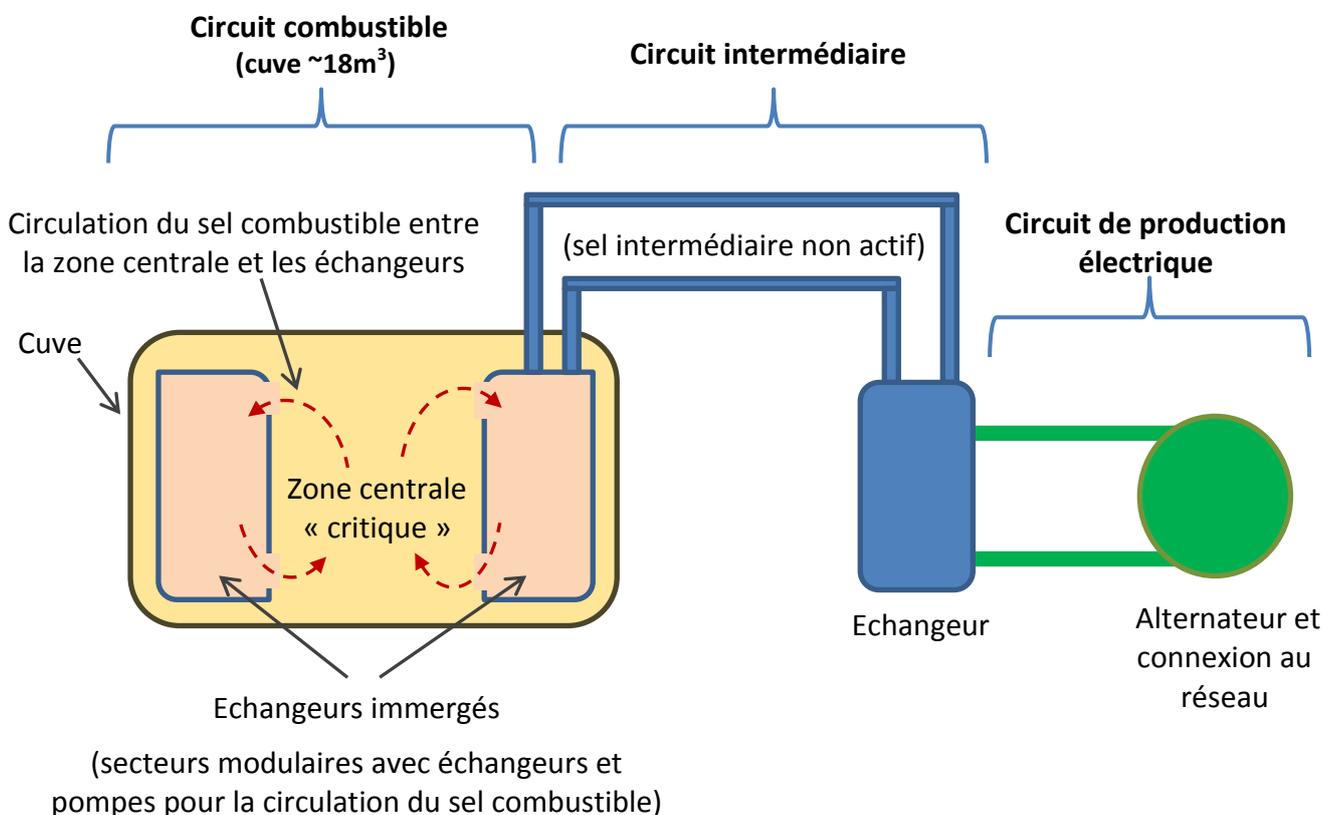


Figure 22 : Schéma des trois circuits du concept MSFR du CNRS (LPSC - Grenoble)

2.2. Choix des sels

Les contraintes principales sont que les sels doivent avoir une bonne tenue sous irradiation, être transparents aux neutrons, avoir une bonne stabilité chimique à haute température (>1300°C), ne pas s'activer et produire des radioéléments difficilement gérables, disposer d'une basse pression de vapeur, avoir de bonnes caractéristiques thermiques (conductivité et capacité), avoir de bonnes propriétés thermohydrauliques, pouvoir solubiliser les matières fissiles et fertiles (uranium, plutonium, thorium), et faciliter le retraitement et le contrôle redox.

Deux grandes familles de sels peuvent être utilisées : les chlorures et les fluorures.

Ce sont généralement les fluorures qui sont proposés dans les différents projets (comme sur le MSRE) mais certains concepts comme celui de Terrapower (USA) proposent des chlorures. Ces chlorures ont certains avantages qui peuvent expliquer ce choix :

- Une température de fusion pour certains eutectiques (vers 400/500° C) plus faible que celle des fluorures,
- Une meilleure solubilité du Pu et des produits de fission selon le sel retenu (par ex. le binaire NaCl-UCl₃).

Néanmoins, les chlorures présentent des inconvénients qui viennent limiter les avantages ci-dessus :

- Une production importante de chlore ³⁶ par irradiation. Cet isotope est particulièrement gênant. Il a une période de 300 000 ans et il est par ailleurs très difficile à gérer et à stocker,
- Ils présentent un spectre neutronique plus dur, qui peut présenter certains avantages pour une version rapide, mais qui est gênant pour la tenue des matériaux proches de la zone active (réflecteur axiaux, couvertures fertiles),
- Pour le retraitement, les composés UCl_n et PuCl_n sont beaucoup moins volatiles (donc moins récupérables par ce procédé) que les composés fluorés,
- Ils sont nettement plus hygroscopiques (absorption d'eau) que les fluorures et peuvent conduire à une corrosion agressive par piqûres,
- Ils sont solubles dans l'eau (en cas de contact, possibilité d'entraînement des éléments présents dans le sel),
- L'« aire de migration » des neutrons est plus grande que pour les fluorures ; cela conduit à une fuite neutronique plus importante nécessitant soit un cœur plus gros, soit la mise en place de réflecteurs.

La plupart des projets proposent donc l'utilisation de sels fluorures pour lesquels on a déjà un premier REX sur le MSRE. Ceux-ci ont un bon comportement sous irradiation, leurs propriétés neutroniques sont bonnes et leurs températures de fusion restent correctes si l'eutectique est bien choisi. Ils simplifient aussi certaines phases du retraitement grâce à la volatilité de l'UF₆.

Par contre, ils ont certains inconvénients :

- Les températures d'utilisation sont plus élevées (plutôt entre 600 et 700 °C),
- Le Li6 est générateur de tritium²,
- Le Li6 est par ailleurs un poison neutronique,
- Le PuF₅ est également très volatile, et sa fluoration est réalisable mais plus difficile.

En pratique, l'enrichissement en Li7 est nécessaire (typiquement 99,995%) pour pouvoir être critique et limiter la production de tritium (NB : EDF utilise déjà de manière industrielle du lithium enrichi en Li7 pour gérer le pH de l'eau).

¹ Pour une puissance de 3 GWt, cette production est de 375g de chlore ³⁶ par an, soit par capture sur le Chlore 35, soit par n-2n sur les chlore 37.

² Pour un 3 GWt, cette production est de 165 g par an à partir de Li6 (le Li6 est produit même si le lithium est enrichi à 99,995% en Li7).

Ceci étant acté, il y a une grande gamme de fluorures possibles : le mélange LiF et BeF₂ (FliBe) a été utilisé sur le MSRE. Mais KF, NaF sont aussi possibles.

Dans le cadre du MSFR, et après choix des fluorures, il a été proposé : LiF-ThF₄-UF₄-(TRU)F₃, c'est-à-dire un sel à base de LiF (avec environ 22 %mol de noyaux lourds).

Pour un cycle U/Pu, le LiF-UF₄-PuF₃ est utilisable avec environ 22 %mol de noyaux lourds (cf. [8]).

On évite d'utiliser comme composant secondaire du sel combustible :

- Le BeF₂ parce que le Béryllium et ses composés sont toxiques (et plutôt à éviter en Europe). Il a la propriété d'abaisser la température de fusion et d'augmenter la thermalisation des neutrons,
- Le KF parce qu'il est difficile à déshydrater³ et qu'il peut conduire à la formation de K gazeux lors de réductions à haute température,
- Le NaF parce qu'il n'apporte pas beaucoup d'avantage net en termes de température de fusion (il baisse la température de 50°C) et de solubilité, et qu'il est moins stable chimiquement que le LiF,
- Le ZrF₄ car même s'il baisse fortement la température de fusion et capture l'oxygène avant les actinides, il abaisse par ailleurs la solubilité du Pu. Enfin, son extraction est nécessaire car sa concentration augmente (il est un des principaux PF),
- Le RbF car même s'il est très transparent aux neutrons et abaisse la température de fusion, il peut être problématique lors d'un retraitement utilisant tout processus chimique de réduction.

En conclusion, le LiF est le produit final retenu par le CNRS comme base du sel pour le projet MSFR. La température de fusion du mélange avec les noyaux lourds est de 585°C. Le LiF a l'avantage d'être une base mono-constituante pour le sel combustible ainsi formé, ce qui simplifie le retraitement du sel combustible. Par contre, un enrichissement en lithium 7 est nécessaire pour minimiser la production de tritium et pour atteindre la criticité (le lithium 6 étant un poison neutronique).

Le tableau ci-dessous (cf. *Figure 23*) indique des exemples de solubilité du Plutonium.

Sel	600°C	700°C	800°C
LiF-ThF ₄ -UF ₄ -PuF ₃ (80%-20%mol en Noyaux Lourds)	4.5 %	6.5 %	≈10 %
LiF-ThF ₄ -UF ₄ -PuF ₃ (78%-22%mol en Noyaux Lourds)	4 %	6 %	>8 %
LiF-KF , LiF-RbF (sans U)	≈25 %		
LiF-NaF-KF (sans U)	16 %		
(LiNaK)F - PuF ₃		≈ 20 %	
(LiNaK)F - UF ₄ - PuF ₃		≈ 6 %	
LiF-UF ₄ -PuF ₄	34 %	42 %	50 %
LiF-UF ₃ -PuF ₃	solide	≈ 25 %	≈ 30 %
LiF-BeF ₂ -ThF ₄	1.5 %		

Figure 23 : Exemples de valeurs de solubilité des fluorures de Pu

³ Opération nécessaire pour éliminer l'eau du sel avant son insertion dans le réacteur.

NB : La solubilité du PuF_3 dans les sels à base de fluorures alcalins est forte en l'absence de constituants à valence 4 (comme UF_4), mais elle chute très fortement pour des concentrations en valence 4 d'environ 22% molaire qui correspondent le plus souvent aux plus bas points de fusion des mélanges. Lorsque les valences de U et Pu sont les mêmes, la solubilité de Pu est très forte. Sa solubilité est très faible dans les sels contenant BeF_2 .

2.3. Choix des matériaux

Suite aux déboires initiaux avec l'Inconel sur l'ARE, le projet MSRE avait développé un nouveau matériau base nickel contenant du molybdène : l'Hastelloy-N (cf. Figure 24) qui sera utilisé pour la cuve et les échangeurs et pour lequel on dispose donc d'un REX de fonctionnement (cf. [1]). Ce REX a montré que, sous réserve du contrôle du potentiel redox $\text{U}^{\text{IV}}/\text{U}^{\text{III}}$, la corrosion était limitée, à 650 °C, à environ 2,5 microns/an, ceci en supposant une vitesse de corrosion constante.

Ni	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	V	C	Co	Cu	W	Al+Ti
~71	7	16	4	1	0,8	0,5	0,06	0,2	0,35	0,5	0,5

Figure 24 : Composition de l'Hastelloy N en masse %

La synthèse bibliographique issue de la thèse de S. Fabre [10], donne les renseignements suivants. Le molybdène apporte la résistance mécanique et vis-à-vis de la corrosion par les fluorures, le chrome confère à l'alliage une bonne résistance à l'oxydation par l'oxygène de l'air par la formation d'une couche d'oxyde de surface. L'addition des autres éléments (Al, Ti, Nb, W) renforce les joints de grains vis-à-vis de la fragilisation par les neutrons retardés et l'interaction avec le tellure.

Le processus de corrosion observé correspond à une dissolution du matériau (par réaction d'oxydo-réduction avec le milieu). Celle-ci conduit à une perte de masse associée à un appauvrissement en chrome dans l'alliage à partir de la surface. L'influence de divers paramètres, tels que la nature des autres éléments constituants de l'alliage, la température d'essai, la présence d'impuretés dans le milieu, la nature du mélange de sels, a été étudiée. Les tendances suivantes peuvent être constatées (cf. [10][11]) :

- La perte de masse augmente avec la durée d'immersion et la température,
- La vitesse de corrosion, calculée par le rapport de perte de masse sur la durée d'essai, diminue avec le temps, cette décroissance pourrait être liée à la diffusion de Cr dans l'alliage,
- Les sels contenant BeF_2 semblent plus corrosifs que ceux contenant ZrF_4 ,
- La présence de LiF tend à accélérer la corrosion (sauf dans le cas où il est mélangé avec NaF),
- En présence de UF_4 , l'épaisseur de matériau attaqué est globalement plus importante,
- L'INOR-8, contenant entre 6 et 8 % mass. de chrome, est moins attaqué que l'Inconel 600, qui en contient entre 14 et 17 % mass.

Les oxydes métalliques sont généralement très solubles dans les solvants de fluorures alcalins expliquant la non-passivation des matériaux de structure. Dans ces conditions, la corrosion est imposée par les équilibres thermodynamiques entre les différentes espèces du système.

Le mélange NaBF_4 -NaF a été plus particulièrement étudié. Il a ainsi été montré qu'en milieux purs, les vitesses de corrosion de l'Hastelloy-N sont pratiquement nulles. Cependant, pour certains essais dans NaBF_4 -NaF, la vitesse de corrosion de l'Hastelloy-N a atteint environ 15 $\mu\text{m}/\text{an}$ à 607 °C [12]. Ces vitesses de corrosion relativement élevées ont été expliquées par la présence de 500 ppm de H_2O et O_2 .

En fait, le sel pur ne serait pas l'agent corrosif en lui-même, ce sont les polluants (eau, oxydes résiduels et PF) dissous dans le sel qui le sont.

Le REX du MSRE a permis d'identifier ainsi une corrosion par le Tellure (cf. [2]). Le Te métallique forme avec le Cr de l'alliage un composé intermétallique qui se concentre aux joints de grains et fragilise l'alliage. Pour éviter ce phénomène, il suffit de réduire le Te métallique en ions tellurure Te^{2-} qui est soluble dans le sel. Cette réduction est assurée par la présence d'un tampon chimique $\text{U}^{4+}/\text{U}^{3+}$. Ce tampon permet de maintenir le potentiel chimique du sel dans une gamme où la corrosion est très limitée. Par ailleurs, les réactions de fission ont un caractère oxydant. En effet, lorsque les fissions font disparaître un ion U^{4+} pour le remplacer par un ensemble de produits de fission dont la charge moyenne est proche de 3+, le milieu devient plus réducteur (nécessitant donc le contrôle du potentiel redox afin d'éviter la corrosion).

On voit ainsi que sous réserve d'un contrôle du potentiel redox, on peut espérer pouvoir limiter ces problèmes de corrosion.

On notera également que l'Hastelloy-N avait à l'époque été certifié (enceinte sous pression et nucléaire) pour un fonctionnement jusqu'à 704°C.

Cependant, et outre la corrosion, un matériau sous spectre rapide va être soumis à une forte irradiation en dpa et à une production d'hélium (réaction n, α sur le Ni) qui vont le fragiliser. Ces effets sont mal connus, même si les températures élevées pourraient permettre des guérisons de défauts par diffusion et une élimination de l'hélium.

Les autres facteurs de dégradation sont le fluage et la fatigue cyclique liée aux fluctuations de température (phases d'arrêt et redémarrage) et de niveau libre.

Pour ces raisons, l'utilisation de matériaux qui seraient encore plus performants est étudiée : nouveaux alliages toujours base nickel (EM 819 d'Aubert et Duval), avec du molybdène et/ou du tungstène. L'alliage avec du tungstène a été étudié par l'entreprise Thierry Auger. Par ailleurs, l'entreprise Aubert et Duval avait produit les EM721 et EM722, et les Russes ont testé l'EM721 que Thierry Auger leur avait fourni (cf. [9]). Mais aucun de ces nouveaux matériaux n'est ni disponible ni validé.

Concernant les matériaux de protection de la cuve, le graphite pose des problèmes de changement de volume en fonction de la température et de la fluence reçue (cf. *Figure 25*). Son emploi est donc plus simple en flux thermique qu'en flux rapide. Il a cependant été retenu par les russes sur le projet rapide MOSART pour protéger le matériau de la cuve. Sa durée de vie est aussi limitée (Terrestrial Energy, dans sa version du réacteur thermique, annonce une durée de 7 ans sous flux). Notons par ailleurs que la gestion du graphite irradié reste toujours problématique. Pour l'ensemble de ces raisons, il a été écarté de la conception du MSFR.

Enfin, le SiC est un autre matériau intéressant (de type céramique), à la fois pour la protection thermique des parois directement en contact avec le sel combustible (réflecteur axiaux et couverture fertile) et pour faire les échangeurs. Il a une bonne tenue mécanique jusqu'à 2000°C, une bonne résistance à la corrosion s'il est assez pur, et une bonne résistance à l'irradiation. Enfin sa conductivité thermique est largement supérieure à celle des aciers (d'environ un facteur 5).

Par contre, le SiC pose certains problèmes industriels (mode d'assemblage, liaison avec des métaux, etc.) et présente à ces températures des risques de rupture de type « fragile » (propagation très rapide de la fissure en cas de rupture, même si le matériau est par ailleurs très solide). Notons que l'utilisation de composites SiC - SiC-fibre permet de supprimer cet aspect de rupture de type « fragile ».

Si on compare aux matériaux disponibles, on arrive au bilan présenté à la *Figure 26*.

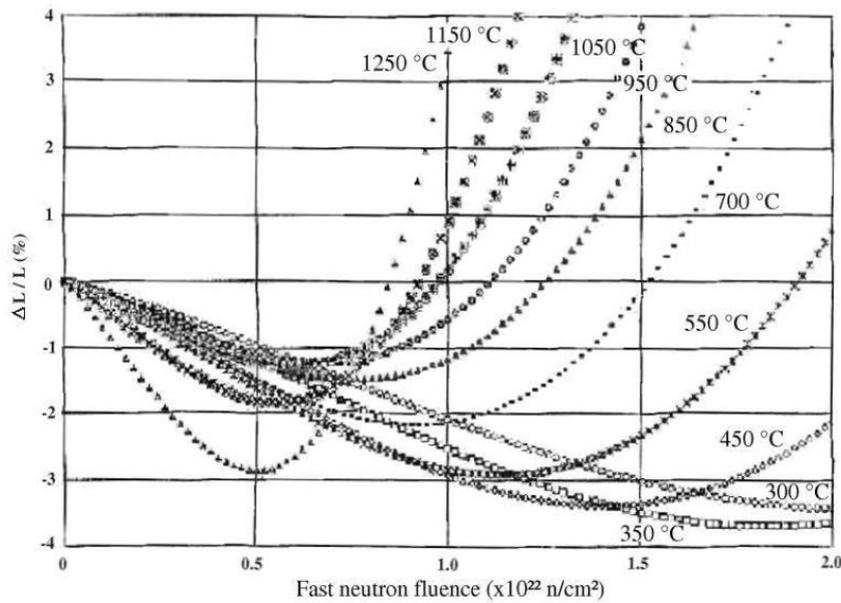


Figure 25 : Variation dimensionnelle du graphite en fonction de la fluence et de la température

Matériau	T°C d'emploi estimée	Avantages principaux	Inconvénients majeurs	Doutes à lever
Hastelloy N	700°	Réalisation et assemblage de pièces complexes. Tenue à la corrosion prouvée.	Fluage excessif à T°>750°C	Tenue à l'irradiation +He à 700°C
Ni-Cr (Inconel 800)	1000°	Réalisation et assemblage de pièces complexes	Nécessite un sel réducteur U ³⁺ et Pu ³⁺	Comportement sous irradiation
Mo	>1700°C	Tenue chimique et en température	Assemblages. Fragile T°<400°C	
Mo-Re	1600°C	Tenue chimique et en température	Transmutation du Re	Mise en forme Soudure
SiC	>1700°C	Tenue chimique et en température. Résistance à l'irradiation.	Rupture fragile	Tenue des assemblages

Cycle	Combustible	T°C Fusion du sel	T°C d'exploitation des matériaux
Th/U (MSFR)	LiF-ThF4-UF4	580	680/730°
Th/U (MSBR)	LiF-BeF2-ThF4-UF4	500	600/650°
U/Pu	NaCl-MgCl2-UCI3-PuCl3	450	550/600°
U/Pu incinérateur	NaF-KF-UF4-PuF3	450	550/600°
U/Pu	LiF-UF3-PuF3	700	800/850°
U/Pu	LiF-UF4-PuF4	500	600/650°

Figure 26 : Bilan comparatif matériaux et sels

En conclusion, des recherches sont en cours sur des matériaux prometteurs, mais aujourd'hui le seul matériau disponible et validé semble toujours l'Hastelloy-N utilisé sur le MSRE (et de son homologue chinois le GH3535, cf. *Figure 27*). Ce matériau est certifié jusqu'à 700°C.

Ni	Cr	Mo	Fe	Si	Mn	C
~compl	7	16,1	4	0,5	0,5	0,05

Figure 27 : Composition de l'alliage GH3535 masse %

Son utilisation sur un nouveau réacteur montant à 750°C (comme le MSFR) demanderait soit une baisse de la puissance volumique pour atteindre des températures de fonctionnement plus faibles et plus proches de son domaine de validation, soit une extension de son domaine de certification de +50°C (ce qui implique des tests à réaliser). On peut aussi envisager un matériau de protection thermique au niveau des parois du cœur. Enfin, les effets de l'irradiation restent aussi à valider.

2.4. Chimie des sels

Si le LiF est retenu comme sel combustible pour le MSFR, après fluoration de l'U, du Pu (voire du Th), les produits sont dissous dans le LiF pour le démarrage du réacteur. Un grand nombre de produits vont alors se créer par réactions nucléaires durant le fonctionnement (voir chapitre neutronique et incinération).

Des tables donnant la limite de solubilité dans LiF des principaux produits concernés existent. Elles sont, en particulier publiées par l'institut Kurchatov et le JRC Karlsruhe. Les différentes études (voir les chapitres instrumentation et choix des matériaux) montrent que la composition chimique réelle du fluide primaire doit être surveillée.

De plus, la montée en concentration de certains produits de fission (comme les Lanthanides ou le zirconium) va entraîner l'atteinte de leur limite de solubilité et conduire à des risques de précipitation et de dépôt (éventuellement en co-dépôt avec le PuF₃). C'est un des points qui nécessite le retraitement du sel combustible pour leur extraction (voir chapitre retraitement). Du point de vue de la sûreté, il sera certainement nécessaire de disposer dans le circuit combustible d'un prélèvement en ligne, avec circulation continue (par exemple via un piège froid, du type des purifications en ligne des RNR-Na). Si ce système fonctionne pour les MSR, il devrait permettre à la fois d'être sûr de l'endroit où se déposeront les produits et aussi de pouvoir les extraire et les traiter (soit pour recyclage ou comme déchets). Cependant, ce concept innovant reste à valider (par exemple, sur une boucle à sel fondu). On notera par ailleurs que la température de fonctionnement retenue pour le piège froid serait alors la température à prendre en compte pour évaluer la concentration nominale des espèces dissoutes dans le sel primaire.

Enfin, les risques liés à des solidifications sélectives d'isotopes particuliers devront être étudiés, ainsi que les procédures de réchauffage pour fusion et renvoi du sel dans le circuit combustible lors de l'exploitation.

En conclusion, le fonctionnement d'un réacteur va entraîner la création de nombreux produits dans le sel combustible, dont il faudra assurer la gestion pour éviter toute déposition intempestive.

2.5. Produits de fission non solubles

Les réactions neutroniques entraînent la formation en continu de produits de fission non solubles. Certains de ces PF sont métalliques et pourraient se déposer, en particulier dans les échangeurs. D'autres sont gazeux (Kr, Xe) et vont naturellement remonter vers les niveaux libres. Il est préférable qu'ils soient extraits et traités en continu.

Sur le MSRE, cette extraction des PF gazeux est faite par bullage avec un gaz neutre (généralement hélium ou argon, voire Kr/Xe recyclés). Une fois cette extraction réalisée, des séparations sélectives sont envisageables selon les gaz produits. Ces séparations sont des dispositions assez classiques sur tous les réacteurs (PWR, RNR-Na, ...) mais qui, comme pour toutes les filières, demandent à être définies, en fonction des produits à séparer, jusqu'au mode de gestion des déchets finaux. Cette gestion peut aller du simple rejet (gaz inactif à faible période type Krypton), à un stockage dans des ballons de décroissance pour des produits à vies courtes), et à des stockages définitifs pour d'autres produits (charbons actifs, etc.).

Sur le MSRE, l'étanchéité au niveau de l'arbre de la pompe mécanique primaire était assurée par une injection continue d'hélium. C'est cet hélium qui entraînait les gaz de fission vers leur traitement final. On notera dans le REX MSRE quelques bouchages de filtre et la forte influence des variations d'entraînement de gaz sur la réactivité du cœur, ceci du fait du spectre thermique puisque le gaz contient des PF absorbants (effet inexistant en spectre rapide).

On notera l'enrichissement du lithium à 99,995% en Li7 pour supprimer la production de tritium (réaction $n + \text{Li6}$). EDF utilise déjà le lithium enrichi en Li7 pour la chimie intervenant dans les REP.

2.6. Choix du fluide intermédiaire

Un fluide intermédiaire est nécessaire pour évacuer la chaleur des échangeurs intermédiaires, vers le circuit de conversion d'énergie (en eau ou en gaz).

Ce fluide doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Être liquide aux températures de fonctionnement avec les marges nécessaires pour la solidification et la vaporisation,
- Supporter des niveaux d'irradiation importants sans s'activer. Les données d'activation doivent aussi être confirmées (s'il y a radiolyse ou création de radio-isotopes par activation la gestion du circuit fluide intermédiaire est complexifiée),
- Ne pas être corrosif vis à vis des matériaux utilisés, en particulier, le matériau de l'échangeur intermédiaire qui doit supporter les fluides combustible et intermédiaire,
- Ne pas provoquer de perturbations importantes en cas de fuite vers le combustible,
- Pouvoir gérer les conséquences d'une fuite d'eau dans le circuit intermédiaire, dans le cas d'un système de conversion d'énergie eau/vapeur (détection et mitigation). La détection d'une entrée de vapeur d'eau et la gestion des conséquences restent cependant des points délicats qui doivent faire l'objet d'études technologiques.

Pour toutes ces raisons, mais aussi de neutralité chimique, c'est également un sel liquide qui est généralement utilisé comme fluide intermédiaire.

Usuellement, il est proposé un mélange de fluorures car ils répondent bien aux besoins (LiF-NaF-BeF₂, LiF-NaF-ZrF₄, LiF-NaF-BF₃, LiF-NaF-KF), cf. [2][3]. Les études effectuées sur le MSBR avaient proposé le fluoro-borate de sodium (NaBF₄ avec 8% de NaF) qui présente l'avantage de ne pas s'activer et de capturer le tritium.

Notons également que ce bilan ne ferme pas la porte à la recherche d'un fluide, même autre qu'un sel, qui répondrait encore mieux à l'ensemble des critères.

2.7. Neutronique

Les études initiales du CNRS ont porté sur les comparaisons entre spectres thermique, épithermique et rapide. Très vite le choix s'est porté sur un spectre rapide qui répond mieux aux besoins de la filière française, et présente de nombreux avantages :

- Des coefficients de contre réaction très négatifs et comportant une faible inertie temporelle, ce qui représente des points importants pour la sûreté, le pilotage du réacteur et l'acceptabilité du concept par la société,
- Une meilleure capacité de fission/transmutation, qui offre des avantages du point de vue de l'incinération des déchets),
- L'absence de graphite ; en effet la durée de vie en réacteur du graphite est limitée (obligation de le changer régulièrement) et il constitue aujourd'hui un déchet nucléaire sans exutoire.

La Figure 28 présente le principe des contre réactions dans un MSR.

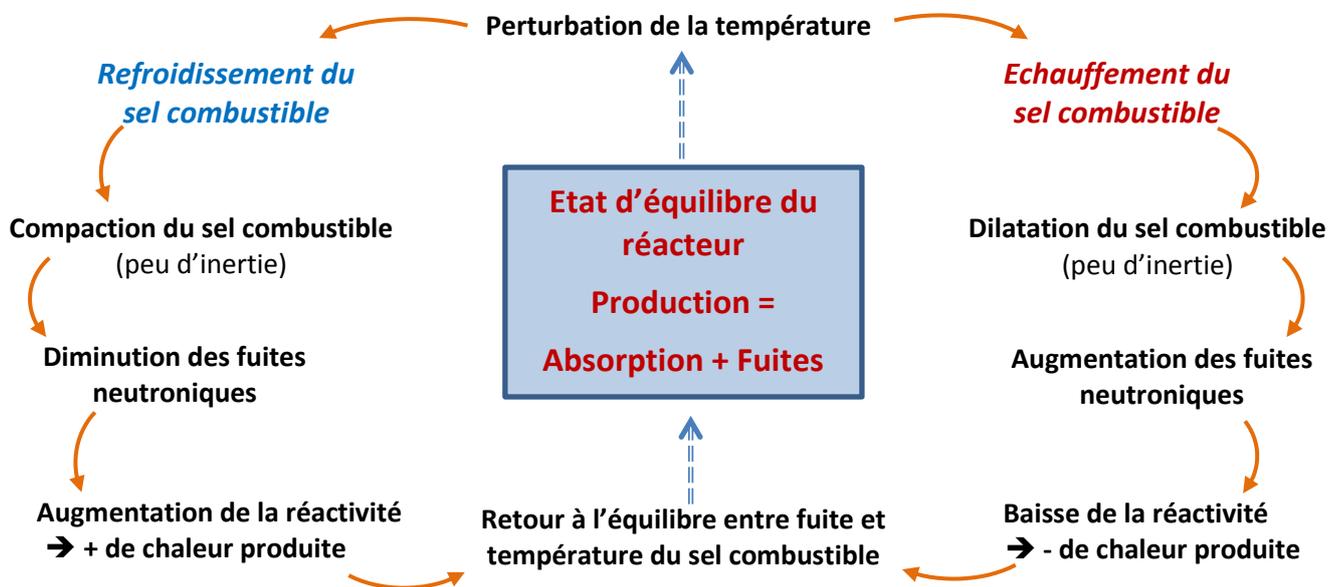


Figure 28 : Boucle de contre-réaction des réacteurs à combustible liquide garantissant le retour à l'équilibre neutronique et permettant le pilotage de la puissance.

Le design du MSFR prévoit une zone centrale de la cuve où se produit, du fait de la géométrie critique, la réaction en chaîne avec dégagement de chaleur. Le fluide combustible s'échauffe et continue ensuite sa course pour se refroidir dans les échangeurs (où la géométrie n'est plus critique). En sortie des échangeurs, le sel retourne dans la zone centrale. Le circuit complet est composé de secteurs indépendants immergés dans la cuve : le sel ne sort jamais de la cuve.

Les Figure 29 et Figure 30 présentent respectivement la répartition du taux de fission et la carte des températures du sel combustible dans le MSFR.

La Figure 31 présente une vue 3D des sections modulaires immergées dans la cuve (chaque secteur contenant une pompe et un échangeur avec le secondaire).

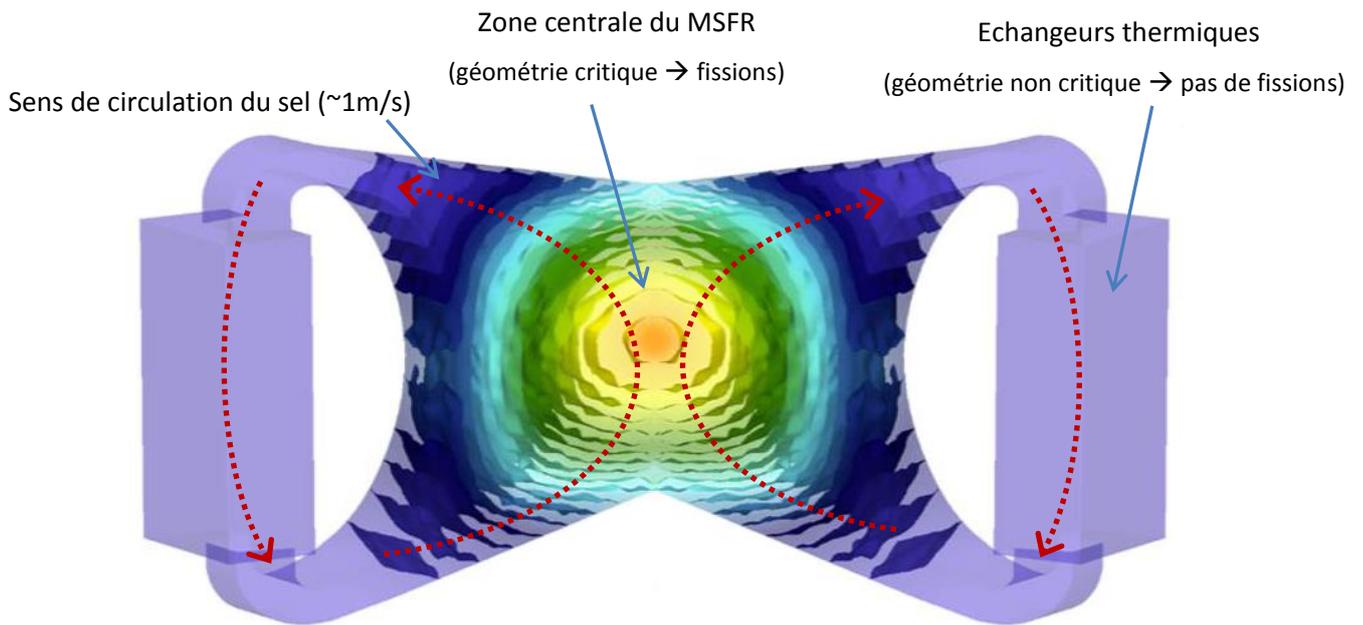


Figure 29 : Répartition du taux de fission dans une vue en coupe de deux secteurs du circuit combustible du MSFR : la zone centrale permet la réaction en chaîne du fait de la géométrie critique, dans les échangeurs la géométrie ne permet plus la réaction en chaîne.

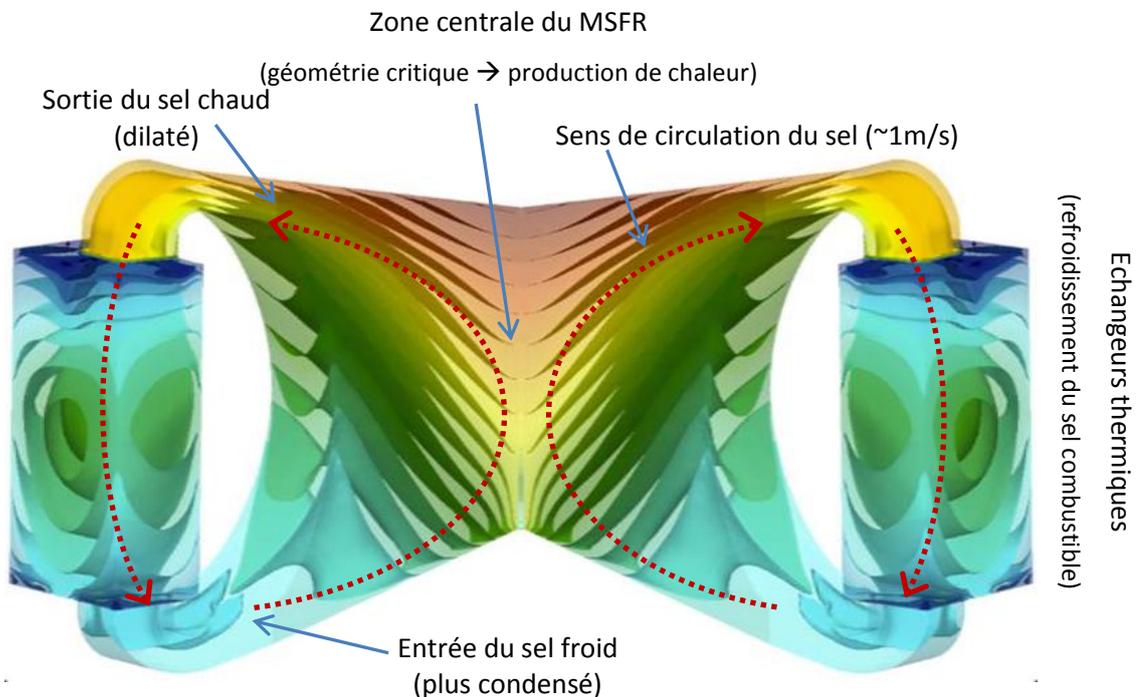


Figure 30 : Carte de températures du sel dans une vue en coupe de deux secteurs du circuit combustible du MSFR : échauffement dans la zone centrale, refroidissement dans les échangeurs.

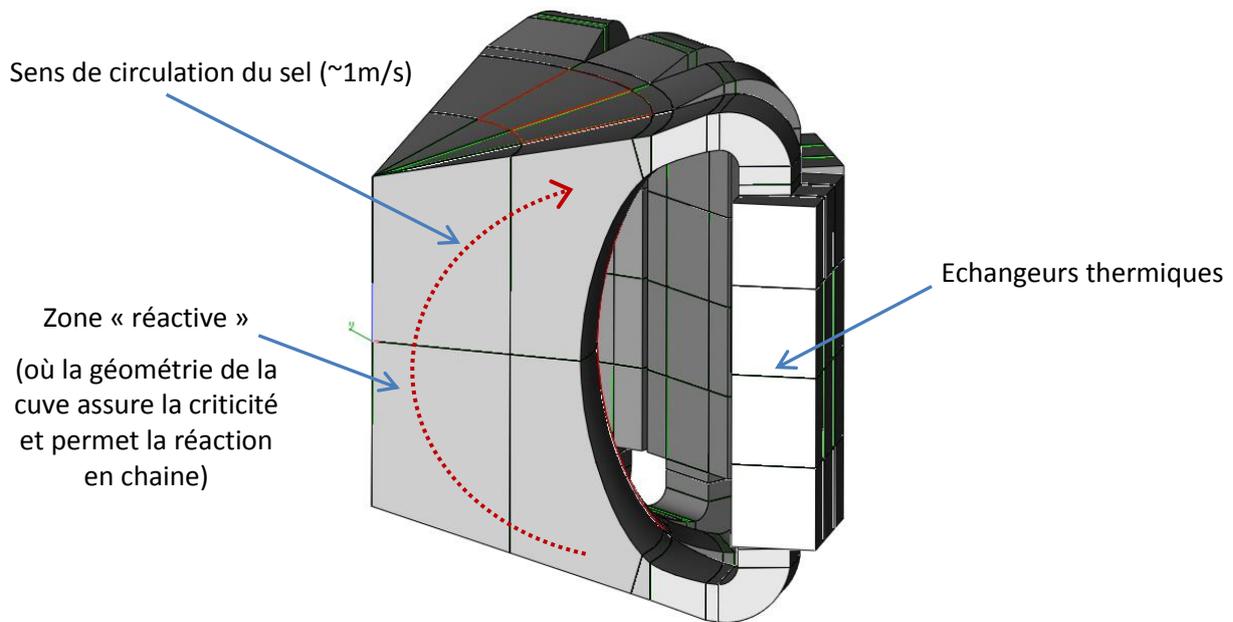


Figure 31 : Vue de plusieurs secteurs (échangeurs +pompes) immergés dans la cuve du MSFR

Une première particularité du concept est l'absence de barres de commande. En effet, les très forts coefficients de contre réaction thermiques (dilatation du sel combustible entraînant la fuite neutronique) et l'absence d'inertie thermique (à l'inverse d'un combustible solide) permettent de piloter la puissance par la thermique avec une très grande rapidité de réponse. Le pilotage s'effectue alors par le refroidissement du fluide intermédiaire (voir chapitre pilotage).

A priori, il n'y aurait pas besoin de barres de commandes. Si on doit en mettre une il est nécessaire de définir son utilité en regard du risque pour la sûreté en cas de dysfonctionnement.

Notons que la situation d'arrêt de ce réacteur est similaire à un réacteur maquette à puissance nulle : la température d'entrée du sel correspond à sa température de sortie : aucune puissance n'est retirée du sel combustible qui reste chaud soit par la production de quelques réactions de fission soit par la puissance résiduelle du sel combustible.

Une relocation du sel combustible (dans une géométrie sous-critique) par vidange de la cuve est par ailleurs possible.

Un point important est la nécessité de mener calculs de conception avec code de calcul couplant la neutronique et thermohydraulique. En effet, c'est la forte dilatation du sel qui induit les coefficients de contre réaction neutronique permettant le pilotage du réacteur. Ce point est bien clair pour tous les spécialistes. Les calculs en cours ont déjà pris en compte ce couplage et il a par ailleurs été validé expérimentalement sur tous les réacteurs et expériences à combustible liquide. Cette spécificité du combustible liquide est l'un des points fondamentaux de l'intérêt de la filière.

Enfin, une partie des neutrons retardés (nécessaires à la stabilité neutronique d'ensemble) sont entraînés dans le fluide combustible qui sort de la zone centrale pour circuler dans les échangeurs. Ce point spécifique aux MSR est bien sûr à prendre en compte dans les calculs puisqu'il diminue le bêta effectif. Notons toutefois que cette réduction du bêta effectif augmente la rapidité des contre réactions et renforce ainsi la stabilité du réacteur.

Plusieurs points très intéressants émergent des calculs déjà effectués :

- Une efficacité dans un volume réduit : on arrive pour le MSFR (1400 MWe) à 18 m^3 avec 330 W/cm^3 avec un inventaire initial de $3,5 \text{ t/GWe}^4$. On notera cependant que nos collègues russes et américains ont fait le choix d'une densité de puissance moindre. En effet, la forte densité de puissance rend bien sûr le concept attractif en termes de compacité et d'utilisation de la matière (et donc de capacité de déploiement d'une filière) mais introduit plus de contraintes sur les capacités des échangeurs à évacuer la puissance. On notera que la densité de puissance pour MOSART est à minima le tiers de la valeur du MSFR. Le niveau de cette densité de puissance est un choix de conception.
- Une grande efficacité de combustion des déchets (cf. § 2.9 sur l'incinération).
- Un très gros avantage d'un réacteur à spectre rapide vis-à-vis d'un réacteur à spectre thermique est la capacité de fonctionner sans être empoisonné par les PF et de ne nécessiter que d'une faible réserve de réactivité.
- La possibilité du combustible liquide de fissionner tous les actinides (par exemple : américium) puisqu'ils sont conservés indéfiniment en cœur, à l'inverse d'un combustible solide qui doit être retiré à cause de la dégradation des matériaux. Notons que le faible taux de neutrons retardés des actinides n'induit pas de conséquences sur la stabilité du réacteur (cf. remarque sur le faible bêta effectif).
- Le spectre rapide conduit à des besoins de retraitement beaucoup plus réduits (entre 10 et 40 litres par jour). Ce point important sera évoqué dans le § 2.11 consacré au retraitement.

On notera que le Zirconium est un poison neutronique et que sa production peut entraîner des difficultés après quelques années. Il faudra donc trouver un moyen de l'extraire. Pour l'heure, il y a des pistes à explorer mais le procédé d'extraction n'est pas encore disponible.

Notons par ailleurs que la conception repose sur le choix de la puissance spécifique (en W/cm^3) qui conditionne la capacité des échangeurs à extraire la chaleur produite. Celle-ci reste la même quelle que soit la puissance nominale recherchée pour le réacteur. En somme, un réacteur d'un volume deux fois plus petit a une puissance nominale deux fois moindre (il y a deux fois moins d'échangeurs).

Le tableau suivant (cf. *Figure 32*) donne les principales caractéristiques du dernier cœur étudié pour les projets EVOL et SAMOFAR.

⁴ Pour comparaison, dans un REP, il y a environ 3 tonnes d'U235 pour 1 GWe pour un spectre thermique. Notons également qu'un réacteur à spectre thermique est plus intéressant d'un point de vue chargement du combustible fissile qu'un réacteur spectre rapide. On constate donc qu'un réacteur à sel fondu à spectre rapide ne mobilise pas plus de matière qu'un réacteur à spectre thermique.

“Reference MSFR” neutronic characteristics: from EVOL to SAMOFAR

Review of previous studies \Rightarrow list of constraints leading to the following proposal:

Parameter	Value
Thermal/electric power	3000 MWth / ~1300 MWe
Fuel salt temperature rise in the core (°C)	100
Fuel molten salt - Initial composition	LiF-ThF ₄ - ²³³ UF ₄ or LiF-ThF ₄ - ²³² UF ₄ -(Pu-MA)F ₃ with 77.5 mol% LiF
Fuel salt melting point (°C)	585
Mean fuel salt temperature (°C)	725
Fuel salt density (g/cm ³)	4.1
Fuel salt dilation coefficient (g.cm ⁻³ /°C)	8.82 10 ⁻⁴
Fertile blanket salt - Initial composition (mol%)	LiF-ThF ₄ (77.5%-22.5%)
Breeding ratio (steady-state)	1.1
Total feedback coefficient (pcm/°C)	-8
Toroidal core dimensions (m)	Radius: 1.06 to 1.41 Height: 1.6 to 2.26
Fuel salt volume (m ³)	18 (1/2 in the core)
Total fuel salt cycle in the fuel circuit	3.9 s
Intermediate fluid	fluoroborate (8NaF-92NaBF ₄), FLiNaK, LiF-ZrF ₄ , FLiBe
Structural materials	Ni-based alloy (Hastelloy-N)

Figure 32 : Principales caractéristiques du MSFR

Le spectre dans le MSFR est un spectre rapide (cf. Figure 33), un peu plus modéré que celui d'un RNR-Na du fait de l'emploi du sel fluorure : Les neutrons de plusieurs centaines de keV sont déplacés vers la zone épi-thermique haute (ce qui permet la réduction des dégâts sur la cuve par rapport à un spectre plus dur, typiquement avec un sel chlorure).

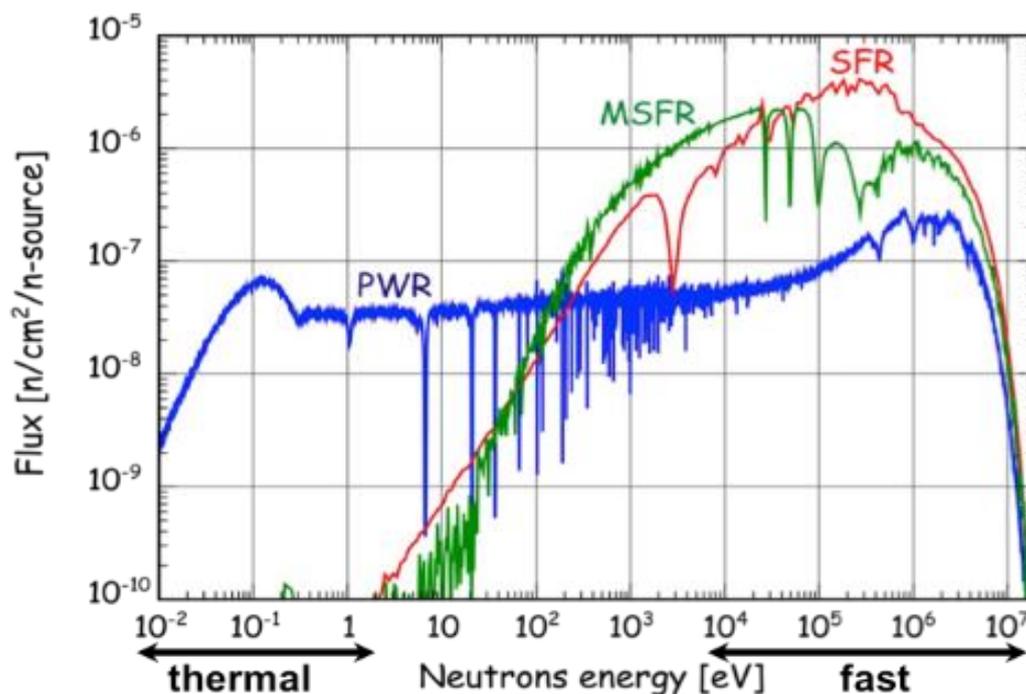


Figure 33 : Spectre neutronique du MSFR (courbe verte)

Enfin, un point intéressant pour tous les MSR, est qu'une excursion neutronique ne se traduit pas par la fusion d'un cœur solide et son interaction avec le fluide de refroidissement, mais par une simple dilatation du fluide de la zone centrale du cœur entraînant l'augmentation de la fuite neutronique et donc la baisse de la réactivité. Donc, et sous certaines réserves (existence d'une surface libre, etc.), le dégagement potentiel d'énergie mécanique est beaucoup plus faible (voire quasi nul) ce qui est un avantage en termes de sûreté et d'acceptabilité du réacteur (voir chapitre sûreté).

Notons que le réacteur Silène à la DAM, à combustible liquide, offre également une validation de cet effet de la dilatation contre un pulse sur-critique prompt.

2.8. Matières combustibles / Cycle du combustible

Un même MSR rapide peut fonctionner avec une grande variété de combustibles : U naturel ou appauvri voire enrichi, thorium, Pu, actinides, etc. La seule contrainte est que ce mélange de fissiles, fertiles, voire de déchets, doit permettre d'atteindre la criticité pour garantir le fonctionnement. Cette souplesse est un atout énorme puisqu'elle permet de mixer tous les types d'isotopes dans le sel combustible.

Dans le cas du cycle U/Pu, c'est le Pu qui sera l'élément fissile privilégié car il est déjà disponible en grande quantité ; l'uranium appauvri et l'uranium de retraitement servent d'élément fertile. Ce cycle U/Pu a les avantages suivants :

- C'est le cycle régénérateur le mieux connu,
- La France dispose déjà de compétences et d'équipements industriels opérationnels,
- La France dispose de presque 300 000 tonnes d'uranium appauvri (sans compter l'uranium de retraitement),
- Si on introduit du thorium (élément fertile), la production d'U233 permet de disposer peu à peu d'un élément fissile complémentaire. Notons toutefois que la solubilité du Pu dans un sel combustible comportant du Thorium est plus faible.

Le cycle U/Pu est donc celui qui semble le plus prioritaire pour des MSR dans le contexte français autant pour des raisons de ressources que pour des raisons de compétences, d'installations et de maîtrises techniques directement disponibles dans l'industrie nucléaire française.

Notons toutefois que le cycle thorium présente plusieurs intérêts :

- Le thorium est disponible (environ 10 000 tonnes en France),
- Le cycle Th/U est l'un des deux seuls cycles régénérateurs disponibles,
- Le thorium produit de l'U233 qui est un excellent fissile.

De ce fait, il semble intéressant de ne pas le négliger et de l'étudier.

Les éléments fertiles actuellement disponibles en France sont l'uranium (naturel ou enrichi ou appauvri ou de retraitement) et le thorium. Mais si une séparation des actinides mineurs vient à être possible lors du retraitement, alors ces éléments deviennent aussi candidats à une incinération dans un MSR. Pour cela il suffit de les remettre en cœur, avec le Pu et l'U, lors de la phase de retraitement du sel.

Notons qu'il est possible de démarrer un réacteur avec des mélanges variés de fissiles en fonction des disponibilités, ce qui rend le concept très flexible en fonction des conditions du moment. De même, l'alimentation en cours de fonctionnement a la même flexibilité, l'essentiel étant de maintenir la criticité.

Par exemple : dans le livrable EVOL (projet européen), la composition de démarrage comporte 77,5% de LiF, 6,6% de ThF₄, 12,3% d'UF₄ comportant de l'uranium enrichi à 13% et 3,6% de transuraniens (TRUF₃ : UOx irradié à 60 GWj/t, refroidi 5 ans).

Pour finir, précisons que si on ne cherche pas la régénération, il suffit de ne pas ajouter d'élément fertile et le réacteur devient de type « burner » dont la seule fonction est la consommation d'isotopes fissiles dans le spectre rapide.

2.9. Incinération des actinides

2.9.1. Contexte et possibilités des RNR à combustible solide

Le contexte est que la France possède, grâce au fonctionnement combiné d'un parc REP et de l'usine de retraitement de La Hague, un stock important d'uranium appauvri, d'uranium recyclé, une production de plutonium⁵ d'environ 10 tonnes par an et des assemblages MOX usagés et non retraités car les produits de retraitement obtenus ne seraient pas utilisables dans un REP.

Notons également qu'actuellement les actinides mineurs (américium, curium et neptunium) produits par le parc REP ne sont pas séparés des produits de fission et qu'ils sont mis aux déchets finaux avec l'ensemble des produits de fission. En effet, le retraitement fait à La Hague ne récupère que l'uranium et le plutonium. Les études ont toutefois montré que la séparation des actinides mineurs est théoriquement faisable, rendant possible un traitement spécifique des actinides mineurs ; par exemple : leur incinération dans un réacteur au lieu de leur stockage en profondeur. Mais cette incinération n'est possible qu'à la condition de pouvoir les insérer facilement dans un combustible pour un cœur de RNR.

Notons aussi que la France dispose d'un stock de Thorium issu de l'extraction d'autres matières premières.

Concernant l'utilisation des actinides (plutonium et actinides mineurs), on sait également depuis l'expérience Phénix que les RNR-Na (ou Sodium Fast Reactor) sont capables d'effectuer, par multi recyclage, une utilisation du plutonium et de l'uranium appauvri dans le but de brûler ces produits en produisant de l'énergie. Mais ceci se fait au prix de cycles longs (et coûteux) de fabrication / stockage / utilisation / décroissance / retraitement / transport du combustible qui offre un ratio final de 10 à 15 ans hors cœur pour 5 ans en cœur d'un RNR-Na (cf. § 3.2.2 pour plus d'éléments sur ce point). Par ailleurs, au fur et à mesure du multi recyclage par combustible solide, il est de plus en plus difficile de le fabriquer et de le manipuler du fait de l'accumulation des produits formés en réacteur. Ces éléments limitent l'incinération du plutonium sur un plan pratique.

Concernant les actinides mineurs, ils ne sont pas remis en réacteur pour incinération car il s'avère difficile de fabriquer et de manipuler un combustible solide pour RNR-Na contenant des actinides mineurs. Ils sont donc retirés et mis aux déchets finaux de type HAVL (Haute Activité à Vie Longue) qui sont actuellement destinés au stockage profond.

⁵ On rappelle qu'un réacteur produit des actinides de différents types : le plutonium, qui représente la plus grande quantité produite, et les autres (américium, curium, neptunium) qui sont produits en plus faible quantité, d'où le terme « actinides mineurs » pour les désigner. Aujourd'hui, seul le plutonium est valorisé (dans le combustible MOX), mais il n'est pas multirecyclé (il est utilisé une seule fois) ; les actinides mineurs quant à eux sont gérés comme des déchets finaux de type HAVL avec d'autres produits de fission.

2.9.2. Possibilités offertes par les MSR

Dans ce cadre, les MSR à spectre rapide présentent d'intéressantes caractéristiques d'incinération de l'uranium de retraitement et de l'uranium appauvri, mais également des actinides produits par la filière REP, à savoir : le plutonium et les actinides mineurs.

D'un point de vue pratique, contrairement aux réacteurs à combustible solide, dans un MSR les actinides produits (plutonium et actinides mineurs) restent dissous dans le sel combustible et l'étape de retraitement du sel combustible vise à les laisser dans le sel pour qu'ils soient incinérés durant le fonctionnement du réacteur ; alors que pour un RNR-Na, le plutonium doit refaire toutes les étapes de fabrication du combustible avant de revenir en cœur et que les actinides mineurs sont retirés et s'ajoutés aux déchets finaux de type HAVL. Mieux : lors de l'étape de retraitement du sel combustible dans un MSR, il est possible de procéder à des ajouts d'isotopes que l'on souhaite incinérer. Ces isotopes peuvent venir d'autres réacteurs (par exemple, ceux produits par les REP du parc actuel).

2.9.3. Stratégies possibles pour les MSR

Deux stratégies sont possibles pour incinérer les actinides (plutonium et actinides mineurs) :

- 1- MSR fonctionnant avec un cycle surgénérateur,
- 2- MSR fonctionnant avec un cycle brûleur.

Cycle régénérateur

On peut profiter de la première charge d'un MSR type MSFR pour introduire dans le sel combustible les actinides à incinérer en même temps qu'un élément fertile (^{238}U ou ^{232}Th). Chaque nouveau réacteur MSR incinérera alors cette charge initiale avant de devenir régénérateur dans le cycle choisi. Il est aussi possible de configurer ces réacteurs pour qu'ils soient sous-générateurs. Dans ce cas, ces réacteurs continueront à incinérer des actinides au fur et à mesure de leur introduction dans le sel combustible lors de l'étape de retraitement de celui-ci.

Cycle brûleur

On peut dédier des MSR à l'incinération des actinides. Dans ce cas, seuls les actinides fissiles sont injectés dans le sel combustible, il n'y a pas d'isotopes fertiles introduit dans le sel. Par exemple, ce peut être des actinides mineurs seuls, ou du plutonium seul, ou de ^{233}U seul, ou un mélange de tous ces éléments. Concrètement, pour un cycle brûleur, il n'y a ni de ^{238}U ni de ^{232}Th (éléments fertiles) dans le sel combustible puisqu'ils produiraient du plutonium ou de ^{233}U alors que le but est de réduire leur quantité en les incinérant.

Exemple d'un cycle surgénérateur :

Des calculs ont été effectués dans le cadre du projet européen EVOL. Le démarrage d'un MSR de type MSFR (3 GWth, 18 m³ de sel combustible) a été calculé avec différents mélanges pouvant contenir de l'uranium enrichi, du thorium, de ^{233}U , du plutonium et des actinides mineurs venant du parc REP.

Le réacteur est chargé initialement avec 24 tonnes d'uranium enrichi à 13%, 6230 kg de plutonium et pour les actinides mineurs (380 kg d'américium, 440 kg de neptunium, et 60 kg de curium). Les résultats obtenus (cf. *Figure 34*) montrent que ce sont ces actinides (Pu, Am, Np et Cm) qui sont incinérés pendant les premières années de fonctionnement du réacteur. Le réacteur, pour être régénérateur, est alimenté en élément fertile (du thorium dans le cadre du projet EVOL) ce qui facilite l'incinération du plutonium et des actinides mineurs et la mise en place progressive du cycle régénérateur (cycle Th/U dans ce cas).

Les calculs ont été faits sur des durées très longues (200 ans) afin de voir si on arrivait à une composition stationnaire des éléments présents dans le sel combustible. Un réacteur a une durée de vie beaucoup plus courte (typiquement entre 40 et 60 ans suivant les hypothèses prises) mais le sel combustible peut être transféré et utilisé dans un autre réacteur pour continuer le processus d'incinération.

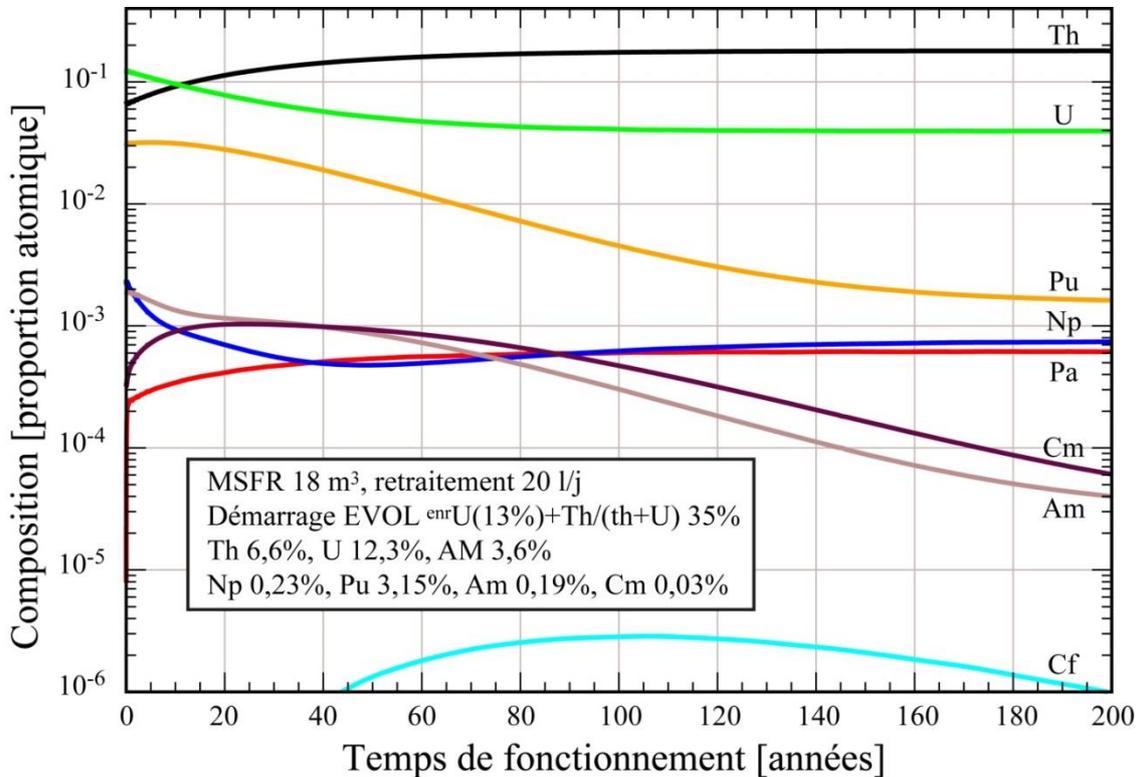


Figure 34 : Exemple de calcul d'incinération à partir d'un chargement initial du projet EVOL

Cette option est adaptée pour l'utilisation progressive des produits issus d'un parc de REP par un parc de MSR qui prendrait alors en charge l'ensemble des « déchets » laissés par ce parc de REP. L'exemple présenté concerne un cycle régénérateur avec thorium, mais il est possible de réaliser un scénario régénérateur identique avec le cycle uranium-plutonium.

Exemple d'un cycle brûleur :

Un brûleur ne régénère pas d'éléments fissiles, il faut donc lui en fournir en permanence ce qui permet de les incinérer sans en créer d'autres. Un brûleur peut permettre par exemple d'incinérer les actinides mineurs issus du retraitement d'un combustible REP.

L'exemple suivant part d'une situation où l'on dispose des produits contenus dans un parc de réacteurs MSR en fin de vie, et il s'agit d'incinérer tous ces produits pour limiter la quantité de déchets à mettre en stockage profond sous terre. Pour cela, on construit un MSR de type brûleur.

La Figure 35 montre cet exemple d'incinération. Le MSR de type brûleur (3 GW_{th}, 18 m³ de sel combustible) contient initialement 685 kg d'éléments variés (thorium, uranium, plutonium, actinides mineurs) et consomme environ une tonne de ces éléments par an. Les résultats indiquent qu'après 60 ans de fonctionnement l'équivalent de 9 inventaires finaux de MSR est incinéré, ce qui permet de réduire d'un ordre de grandeur les déchets finaux de la filière. Cet exemple est évidemment transposable à l'incinération des déchets issus d'un parc REP.

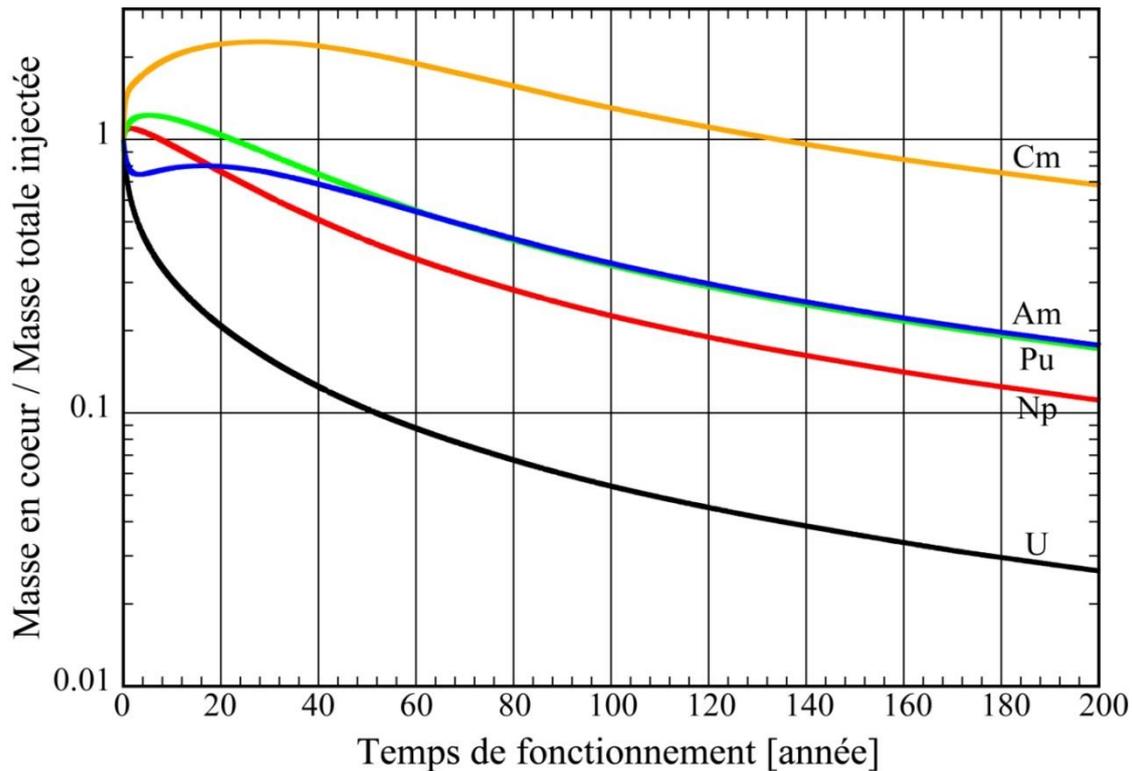


Figure 35 : Exemple de calcul d'incinération de l'inventaire final d'un parc de MSFR lors de son arrêt

2.9.4. Conclusion sur l'incinération

Un MSR de type MSFR peut faire de l'incinération. Par rapport à un RNR-Na, cette incinération est rendue plus simple :

- Par la flexibilité de la composition du sel combustible qui est adaptable en fonction de ce qui est disponible et de ce que l'on souhaite incinérer,
- Par la possibilité de séparation des actinides mineurs des produits finaux afin de les mettre dans le sel combustible pour les incinérer,
- Par l'étape de retraitement du sel combustible dans un MSR qui permet d'ajouter les éléments à incinérer sans passer par tout un cycle de fabrication de combustible (cf. § 3.2.2).

La situation actuelle en France est que tous ces actinides produits par les REP (plutonium et actinides mineurs) sont des déchets potentiels car ils sont très mal réutilisés, voire pas du tout. Cette situation pose des problèmes de stockage et de dépendance à des ressources venant de pays étrangers. Or, leur quantité pourrait être réduite par incinération tout en fournissant de l'énergie à la France pour des siècles. Dans cette optique, les MSR ont l'avantage potentiel, vis-à-vis des RNR-Na, d'une utilisation définitive et finale de ces produits, après intégration dans le sel combustible d'un MSR, jusqu'à leur disparition.

2.10. Mode de pilotage / Suivi de réseau

La conception du MSFR ne comporte pas de barres de commande, soit de pilotage, soit de mise à l'arrêt.

Le pilotage de la puissance s'effectue par le réglage de la température du sel en entrée cœur (ie. en sortie d'échangeur), grâce à l'absence de délai des contre réactions qui sont toutes négatives. Si on augmente l'extraction de puissance au niveau du circuit intermédiaire, la température d'entrée cœur

va baisser, ce qui va entraîner une plus grande densité du sel combustible, donc une baisse des fuites neutroniques et ainsi une augmentation de puissance dans le cœur quasi instantanée jusqu'à atteinte d'un nouvel équilibre entre température du sel combustible et les fuites neutroniques.

Si par contre on diminue le refroidissement, le sel en sortie d'échangeur est plus chaud, donc moins dense (plus dilaté), les fuites neutroniques sont alors plus importantes, la réactivité baisse et le cœur « s'étouffe » et entraîne la baisse de puissance produite.

Notons que ce mécanisme de contre réaction par la dilatation du sel est très rapide : il garantit la réponse du réacteur à toute variation de la température d'entrée du sel dans la zone centrale du réacteur. C'est cette caractéristique, validée expérimentalement, qui a conduit à utiliser les MSR pour concevoir les avions nucléaires dans les années 1950 vu que le pilotage des avions nécessite une grande rapidité de réaction.

Pour le pilotage du réacteur, l'avantage de cette caractéristique des MSR est de permettre un excellent suivi de réseau. Ainsi, les simulations montrent pour le MSFR un passage de 2 à 3 GWt en un temps caractéristique de l'ordre de la minute (non atteignable avec un combustible solide). Cette contre réaction thermique très rapide rend possible plusieurs points :

- La puissance produite suit parfaitement la puissance extraite,
- Le suivi de charge est piloté par la puissance appelée par le réseau électrique, et donc par la vitesse des pompes des circuits du sel intermédiaire et du sel combustible,
- D'un point de vue thermomécanique, le réacteur est adapté pour ces suivis de charge avec des températures en paroi quasi constantes,
- Le delta de température min/max dans le cœur étant faible même en cas de variation de la puissance extraite par les échangeurs, les contraintes thermiques sur les structures sont donc faibles (assurant ainsi une longévité des structures).

On a donc un réacteur très « souple » et bien adapté au suivi de charge.

Par ailleurs, des calculs ont été effectués pour un cas incidentel théorique : si le réacteur est initialement à une puissance de 0,1 GWt, les calculs couplés neutronique-thermohydraulique montrent qu'en cas d'un sur-refroidissement quasi instantané (en 1 seconde...), on observe une montée de puissance à 3 GWt où les puissances produites et extraites du MSFR restent pourtant équilibrées avec une faible augmentation de la température du sel combustible. Même en cas de cinétique très rapide, la physique du combustible liquide repositionne le réacteur dans un nouvel état d'équilibre (comme pour une phase de pilotage normal).

Evidemment, ce cas ne détaille pas comment un tel refroidissement est possible physiquement. Pour l'étude de sûreté, il conviendra d'analyser l'ensemble des situations où un refroidissement intempestif peut se produire (voir chapitre sûreté) et d'en regarder les conséquences sur le fonctionnement du réacteur. Néanmoins, ces études montrent que le suivi de charge (notamment dû à l'augmentation de la part des énergies renouvelables) ne pose pas de problème du point de vue de la production de puissance thermique et de l'intégrité des structurés liées au combustible.

Notons enfin plusieurs points spécifiques du pilotage du réacteur :

Démarrage du réacteur

- Ce démarrage demande une approche sous critique par remplissage du cœur et mesure de l'amplification de la source de neutrons. A mi-hauteur de remplissage, les simulations montrent qu'on devrait pouvoir estimer la réactivité finale à -250 pcm.
- Le remplissage se poursuit avec ajustement si nécessaire des compositions injectées.

- La divergence peut s'effectuer soit avec une mise en circulation du sel et un ajustement correspondant de la température d'entrée, soit avec un remplissage rendu sous critique par un dispositif absorbant (par exemple un élément réflecteur absorbant) que l'on enlève pour effectuer la divergence.

Arrêt du réacteur

- L'arrêt du refroidissement conduit à un arrêt du réacteur, où la puissance émise est quasi nulle, en dehors de la puissance résiduelle.
- L'arrêt dit « sûr » pour un réacteur à combustible solide est une mise en situation où les barres de contrôle sont tombées, rendant impossible toute criticité du cœur. Pour un MSR, l'arrêt « sûr » correspond à une situation où le cœur est critique à une puissance de fission nulle (cœur de type maquette critique).
- Les systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle doivent être disponibles pour gérer les évolutions de température.
- Un système de vidange rapide reste nécessaire, en particulier pour les cas accidentels non gérables en cœur.

Les dispositifs de pilotage

Le pilotage repose sur :

- Les vitesses de pompes des circuits combustibles et intermédiaires,
- Les conditions thermiques du circuit de conversion qui est connecté au réseau,
- La possibilité d'injection de gaz dans le cœur, dont les effets thermiques sont faibles mais dont les effets de contre réaction neutroniques sont importants par effet de vide et/ou d'absorption.
- Des by-pass dans le circuit intermédiaire peuvent aussi donner des paramètres de réglage supplémentaires. Ces dispositifs donnent des possibilités mais complexifient aussi l'analyse de sûreté qui doit les prendre en compte.

Enfin, une étude de fonctionnement en convection naturelle du combustible (comme retenu dans le projet Terrestrial Energy) serait intéressante, vu les simplifications entraînées et vu la disposition générale du MSFR qui s'y prête bien. Le pilotage d'ensemble devient cependant assez complexe, avec la perte du paramètre de réglage qu'était la vitesse de pompe combustible et le débit imposé correspondant. Un fonctionnement en convection naturelle demande d'accepter une faible puissance spécifique induisant une augmentation de l'inventaire initial par GW électrique. Ceci dit, avec ce fonctionnement, le débit du circuit combustible va s'adapter naturellement à la puissance demandée, mais la température de sortie cœur augmente lorsque la puissance demandée augmente, il y a donc une limite mais cette piste peut s'avérer intéressante à étudier toujours dans une optique de simplification des systèmes et de robustesse.

2.11. Retraitement du combustible

La particularité des MSR est que le retraitement du combustible s'effectue en parallèle du fonctionnement (cf. *Figure 36*). C'est un avantage d'ensemble pour la filière qui peut donc minimiser considérablement la quantité de combustible hors cœur. Il faut par contre développer simultanément le design du réacteur avec son mode de retraitement, ce qui rend le développement de l'ensemble plus complexe. Notons tout de même que cette complexité ne repose pas sur le cœur en lui-même mais sur l'unité de retraitement qui est annexe.

Les MSR thermiques doivent retraiter en parallèle des quantités assez importantes pour éviter l'empoisonnement progressif du réacteur par les PF. Les MSR à spectre rapide nécessitent beaucoup moins de quantités à retraiter (entre 10 et 40 litres par jour) car il n'y a pas d'empoisonnement neutronique par les PF dans ce spectre. Le retraitement vise surtout à éviter la déposition de certains produits (lanthanides, ...) dont la concentration augmente dans le temps et dont l'accumulation peut aussi perturber la solubilité des actinides, notamment du plutonium.

Ce retraitement peut s'effectuer par prélèvement continu (en ligne) ou discontinu (par batch). La vitesse moyenne de retraitement est d'environ 1 litre/heure. Le sel purifié est renvoyé dans le circuit combustible avec d'éventuelles adjonctions de produits à incinérer mais aussi une certaine quantité de fissile/fertile correspondant à la consommation du réacteur (3 kg/jour pour le MSFR).

Notons une indication en termes de taille et de volume : la vitesse moyenne de retraitement est d'environ 1 litre/heure, ce qui renseigne sur la place nécessaire et les volumes des récipients mis en jeu.

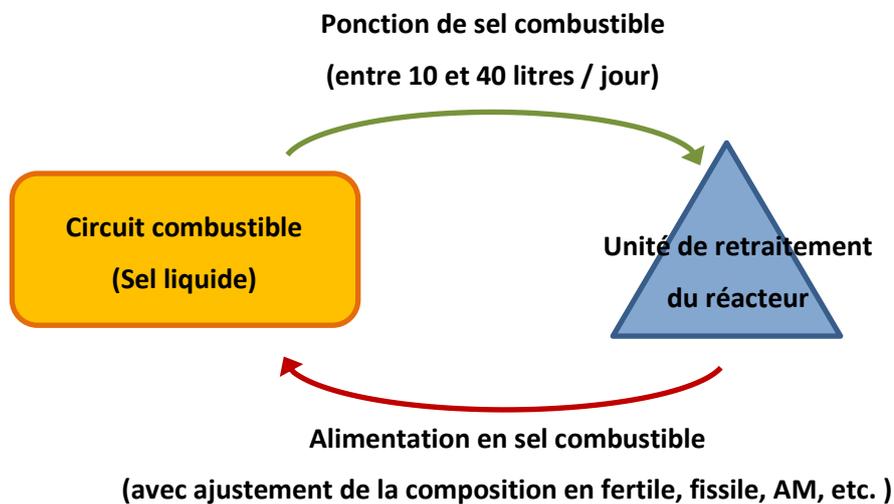


Figure 36 : Schéma de principe du retraitement du sel combustible par l'unité au sein du réacteur

La technologie de retraitement par dissolution utilisée en France pour les combustibles oxyde des REP n'est pas ici applicable directement et un traitement pyrochimique semble à première vue le plus approprié (cf. Figure 37).

Pour le MSRE, plusieurs options ont été envisagées mais aucune n'a été testées. Certaines options développées aux USA pour le retraitement des combustibles métalliques dans le concept IFR (Integral Fast Reactor) pourraient être adaptées même si les concepts sont très différents.

General Schematic Drawing

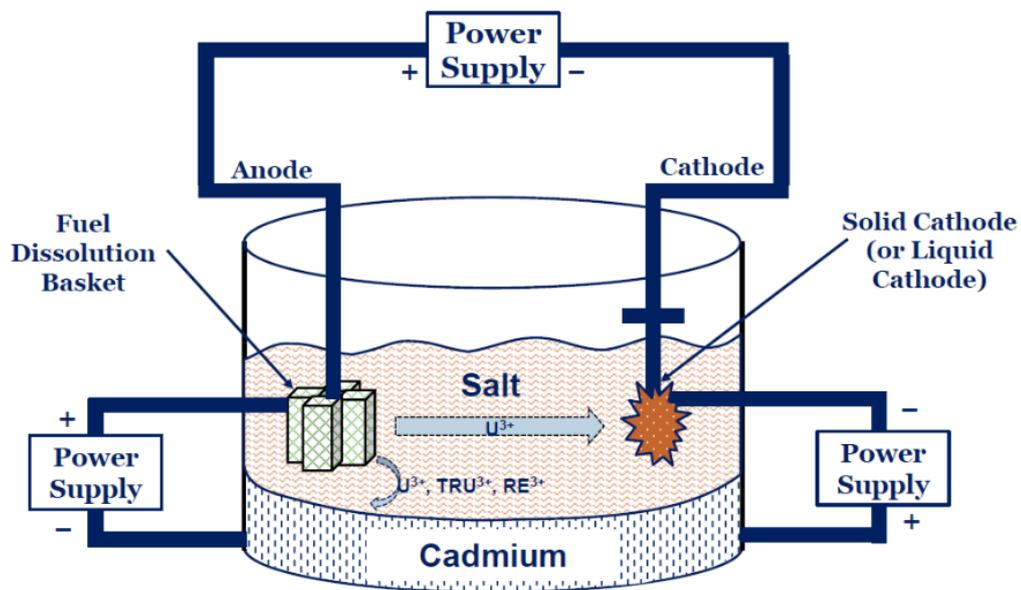


Figure 37 : Schéma de principe des extractions par pyrochimie

Le concept de base du procédé IFR (Integral Fast Reactor) repose sur un électro raffinage de l'uranium, suivi d'une électrodéposition du plutonium et des actinides mineurs. Avec ce schéma de procédé, les composés métalliques les plus stables restent au niveau de l'anode et partiront aux déchets. Lors de l'électro raffinage, on récupère l'uranium sur une cathode inerte alors que les transuraniens et les lanthanides sont dissous dans le sel. Dans un deuxième temps, les transuraniens sont ensuite déposés plus ou moins sélectivement avec les lanthanides sur une cathode réactive (cadmium liquide dans le procédé INL). Tous les produits non électro déposés s'accumulent dans le sel qui devient à la fin, un déchet final.

Ces procédés doivent être adaptés dans le cas du combustible des réacteurs à sels fondus.

Un procédé possible est résumé sur la *Figure 38* :

- Tout d'abord un bullage d'hélium permettrait d'extraire en continu les gaz de fission par entrainement (Kr, Xe, ...) et des métaux nobles par flottation (déjà évoqué dans le chapitre purification). Ces produits constituent les premiers déchets finaux (step 0).
- Ensuite, une fluoration permettrait d'extraire l'uranium, éventuellement le plutonium ainsi qu'un certain nombre de PF volatils qu'il est possible de séparer de l'U et du Pu lors de la condensation (step 1).
- Puis une série d'extractions réductrices sur métal fondu permettrait d'extraire les actinides restant ainsi que les lanthanides, en fonction du sel porteur (step 2). Cette étape pourrait être remplacée par une précipitation des solutés ou une distillation du solvant. En fonction de la teneur en actinides résiduels, une étape supplémentaire pourrait être envisagée pour valoriser ces actinides.
- Cette séparation permet de créer un troisième volume de déchets finaux (step 3) et de récupérer le sel restant pour le reconditionner avant de le renvoyer dans le réacteur (steps 4 et 5).

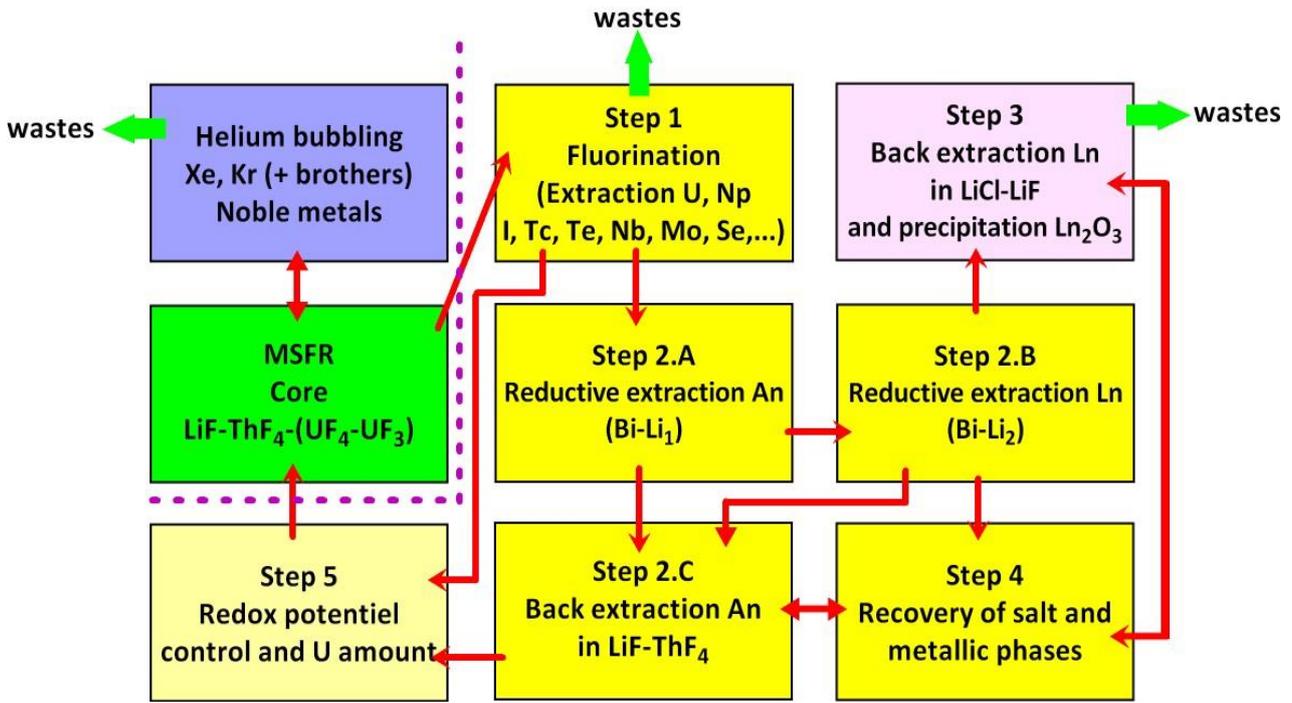


Figure 38 : Etapes possibles pour un retraitement du sel combustible d'un MSR

Le procédé d'extraction réductrice sur métal liquide (voir Figure 38) permet de réduire des éléments dont le potentiel redox est supérieur à celui de la limite cathodique du domaine d'électro activité et de réaliser des séparations sélectives du point de vue de la thermodynamique. D'autres procédés sont considérés (cf. Figure 39) pour les éléments qui ne peuvent être réduits sur électrode de métal liquide.

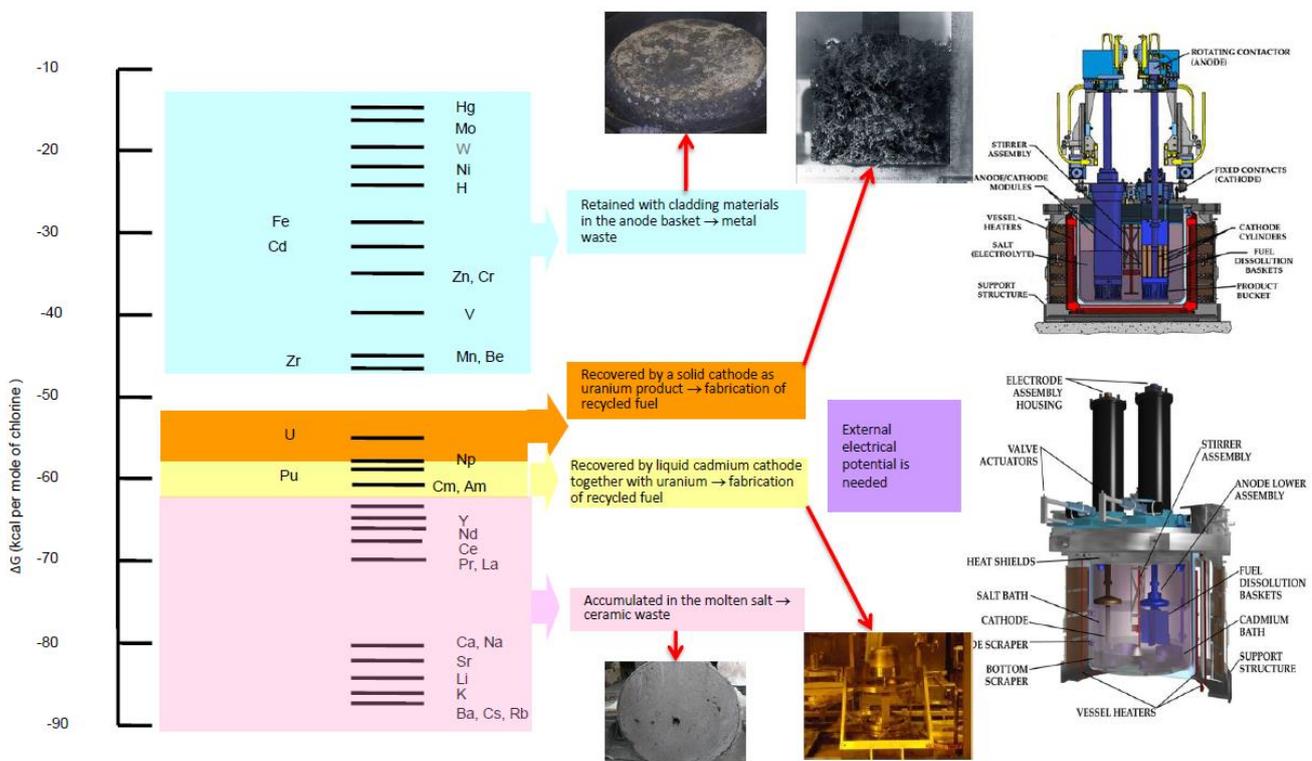


Figure 39 : Principe du procédé de séparation par électrochimie utilisé ou proposé pour les combustibles métalliques (EBR2)

Ceci étant les essais réalisés montrent un certain nombre de problèmes, en particulier s'il y a utilisation du cycle Th/U : de fortes concentrations de thorium bloquent certaines extractions.

Du point de vue de l'extraction, ORNL avait proposé de l'extraction liquide-liquide (sel/métal) à contre-courant pour améliorer les rendements d'extraction (technologie complexe à implanter en chaîne blindée). Par ailleurs, d'autres procédés sont regardés en particulier en Chine, par distillation ou cristallisation.

Notons enfin que le procédé d'extraction du zirconium n'est pas clairement identifié pour l'instant, or il est nécessaire de limiter son taux dans le sel car il est l'un des PF les plus abondants et sa section efficace de capture neutronique devient non négligeable du fait de son accumulation, cf. [15][13].

En conclusion : on voit que le procédé de retraitement du combustible d'un MSR demande des développements et que le schéma de procédé global n'est pas aujourd'hui validé ni opérationnel. On notera que le combustible du MSRE est toujours dans son lieu de stockage et n'a jamais été retraité.

Les déchets finaux de la filière seraient :

- Les produits extraits en continu par bullage,
- Les produits cristallisés extraits d'un piège froid durant le fonctionnement (dans la mesure où le procédé fonctionne),
- Les PF extraits lors de l'opération de retraitement (type zirconium, lanthanides, etc.),
- Le volume final de sel non retraité, en fin de vie du réacteur. Cependant, ce sel peut éventuellement être réutilisé pour démarrer un nouveau réacteur, évitant ainsi l'augmentation du volume des déchets à conditionner.

Enfin, une autre option existe si l'on veut minimiser davantage les déchets pour la filière : il peut être bon de réfléchir à l'intérêt fondamental d'un retraitement du combustible. En effet, si le fonctionnement n'est pas perturbé au niveau neutronique/chimique par les produits de fission créés, leur séparation/extraction n'est peut-être pas indispensable. Si on peut écarter des risques de déposition, alors une purification en ligne d'un débit dérivé, par déposition/cristallisation sur un piège froid (à l'image des SFR) est peut-être une solution suffisante. Un traitement, et peut-être une séparation, des produits obtenus dans ce piège froid sera très certainement nécessaire mais sera peut-être beaucoup plus simple à mettre en œuvre.

2.12. Les composants

Les impératifs sur les composants du réacteur sont qu'ils doivent pouvoir fonctionner dans des gammes de températures élevées (aux environs de 700°C) et sans problème de corrosion. Par rapport à des conceptions « tout intégrées », les MSR se prêtent bien à une vision de composants modulaires simplifiant la fabrication, le transport et l'assemblage.

Pompes

Les SFR utilisent des pompes mécaniques à température élevée (400 à 500°C) et avec certaines solutions techniques (palier hydrostatique, etc.) adaptables au MSR. C'est d'ailleurs une pompe mécanique qui était utilisée sur le MSRE. Des adaptations, en particulier au niveau des matériaux, restent à développer. Les pompes électromagnétiques ne sont efficaces qu'avec des métaux liquides. Des pompes à membranes sont utilisées dans l'industrie des sels fondus mais semblent peu adaptées. En conclusion, et sous réserve de benchmark sur ces pompes, une adaptation des pompes mécaniques semble aujourd'hui la meilleure solution industrielle. Notons que l'utilisation d'un entraînement magnétique (utilisée notamment sur l'AP1000) permettrait d'éviter de traverser la

cuve et ainsi de maintenir son étanchéité. Concernant le régime des pompes, dans le MSFR le sel circule à une vitesse moyenne d'environ 1m/s.

Echangeurs

Tous les types d'échangeurs industriels conviennent. Le principal problème est un choix de matériaux résistant à la corrosion. Par contre, ceux permettant d'extraire une puissance volumique élevée sont à privilégier, pour minimiser le volume de sel en dehors de la zone critique.

Vannes

Ces vannes sont nécessaires pour le fonctionnement industriel d'un réacteur. Pour les SFR, il existe des vannes à joints solidifiés ou des vannes à soufflet. Le principe des vannes à joints solidifiés semble a priori peu adaptable aux sels fondus, à cause des différences de propriétés mécaniques du sodium et du sel lorsqu'ils sont gelés (le sodium solide reste « souple », alors qu'un sel devient très dur). Il faudrait donc soit développer des vannes à soufflet acceptant ces températures et le fluide utilisé, soit développer d'autres concepts de vannes.

Les essais sur boucle, effectués notamment au CNRS à Grenoble, ont surtout utilisé des différences de pression ou des dispositifs passifs pour vidanger ou transférer le sel fondu. Sur la boucle grenobloise, il y a eu cependant une vanne mécanique conçue spécialement et qui a bien fonctionné (cf. [14]).

Préchauffages

Toutes les procédures de remplissage et de vidange supposent des technologies de préchauffage des tuyauteries et des bidons. Dans ce domaine, on peut s'inspirer des technologies SFR, bien que les niveaux de température à atteindre soient plus élevés (température de fusion d'environ 100°C pour le sodium et 585°C pour le sel fluorure). Le calorifugeage et le maintien en température des tuyauteries seront des éléments à prendre en compte pour éviter des gels intempestifs du sel. C'est un point qui justifie de continuer à regarder des sels à bas point de fusion (sel ternaire) pour le circuit intermédiaire (par exemple, la température de fusion du fluoroborate est de 384°C).

Réservoirs de vidange

Il y a deux types de réservoirs : les réservoirs dits « de transfert » (pour l'exploitation normale) et ceux dits « de vidange » (pour les situations incidentelle et accidentelle).

Pour les réservoirs de transferts, ils sont prévus pour être réversibles, et le MSRE en offre un premier REX de fonctionnement.

Concernant le réservoir de vidange du MSFR, celui-ci ressemble plus, dans sa conception, à un récupérateur de corium sur un SFR. Le cœur fondu qui y arrive se fige après quelques semaines, avec des refroidissements passifs en air. Lors des développements plus avancés, il sera nécessaire de faire un choix entre des réservoirs de vidange accidentels (conçus pour être réversibles) ou des réservoirs « irréversibles », type récupérateurs de corium.

Circuit générateur d'électricité

En cas d'utilisation d'un cycle classique de type « eau-vapeur », pour la production d'électricité, les hautes températures disponibles permettront d'atteindre des hauts rendements (environ 45% pour le MSFR). Mais d'autres systèmes sont envisageables comme l'utilisation de turbine à azote ou à CO₂ supercritique présentant une grande compacité.

En conclusion : un travail de développement est nécessaire pour disposer de composants adaptés. On notera également que les modes de lavage/décontamination des composants extraits pour la maintenance, ne sont pas encore développés et ne sont pas forcément simples. Une solution consiste à traiter ces composants directement comme des déchets finaux (non réutilisables) et à les

remplacer par des composants neufs. L'option de la modularité dans la conception du MSFR rend possible cette gestion (déclinable sur gros réacteur mais également sur un réacteur de type SMR).

2.13. L'instrumentation

Nous n'avons pas d'inventaire très précis de ce qui existe dans l'industrie utilisant les sels fondus, ce travail est donc à mener. Cependant, certaines instrumentations utilisées dans les SFR à haute température peuvent être utilisables sous réserve d'adaptation.

Mesure de température

Le principe des thermocouples chromel/alumel reste parfaitement adapté. Par contre, pour les thermocouples immergés dans le sel, la gaine devra être conçue avec un matériau adapté.

Débitmètres

Pas de solution évidente, car les débitmètres électromagnétiques utilisés sur les SFR ne sont pas adaptés au sel.

Mesures neutroniques

Les mesures neutroniques SFR hors cuve, sont a priori utilisables dans le même contexte externe.

Mesures de niveau et de pression

A développer, rien de directement disponible. Mais des systèmes électromécaniques robustes sont envisageables.

Suivi des compositions chimiques du sel

Il est indispensable de pouvoir suivre dans le temps l'évolution de la composition chimique du sel. Actuellement, et vu les niveaux de dose, un suivi en ligne par spectrométrie n'est envisageable que pour le sel du circuit intermédiaire. Seul des prélèvements discontinus devraient permettre des mesures suivant une procédure qui reste à préciser et à valider existent déjà. Le mode de prélèvement et parcours de ces échantillons est à préciser. Le prélèvement pourrait être installé au niveau des pièges froids.

Les échantillons seront ensuite envoyés au retraitement ou remis en cuve.

Détection de fuites/Dosimétrie

La solidification du sel et sa non-réactivité vis-à-vis de l'air conduisent plutôt à envisager des détections d'activité qui sont déjà disponibles et très sensibles pour les parties où le sel est activé.

Par contre, dans les parties où le sel est non actif les modes de détections de fuites demandent d'autres types de détecteurs (par exemple en utilisant la conductivité du sel sur le mode des détecteurs utilisés pour les SFR sur le circuit intermédiaire).

Inspection en service

On est ici devant un champ assez vierge sur les besoins et les moyens d'y répondre. Ceci étant, la relative simplicité du circuit combustible devrait permettre un certain nombre de vérifications par mode externe, comme des suivis d'épaisseurs de paroi, par ultrasons qui devraient être suffisantes. Dans ce domaine, l'industrie nucléaire dispose d'une bonne expérience.

2.14. Approche de sûreté et licensing

Les spécificités fortes du MSR doivent être prises en compte dans la définition de l'approche de sûreté qui doit être repensée en dehors de l'approche utilisée pour les réacteurs à combustible solide compte tenu des spécificités du combustible liquide.

Par exemple, dans le contexte spécifique aux MSR, il faut redéfinir les notions de barrière, la situation d'accident grave ou encore la situation d'arrêt sûr. Une orientation forte sera de chercher à mettre en avant des caractéristiques intrinsèquement favorables du concept, pour tenter d'en tirer parti en termes de simplicité pour les options de conception.

Par contre, la démarche générale de sûreté reste totalement identique ; à savoir l'application des principes de la défense en profondeur. Ainsi, les situations susceptibles de conduire à des rejets précoces ou significatifs doivent être prévenues et, en cas d'occurrence, leurs conséquences doivent rester limitées et en particulier n'entraîner aucune évacuation des populations environnantes.

Le recours à la méthodologie d'élimination pratique pour cette démonstration ne sera effectué qu'en dernier ressort et pour un nombre de cas aussi faible que possible.

Les spécificités liées à l'unité de retraitement du combustible doivent être prises en compte en parallèle : interfaces avec le réacteur, fonctions de sûreté à assurer quelle que soit la localisation du combustible, etc.

Enfin, une première définition de l'analyse de sûreté a été commencée dans le dernier projet SAMOFAR en partant des spécificités à prendre en compte pour les réacteurs à combustible liquide.

2.14.1. Trois axes principaux de la sûreté

Tout d'abord un certain nombre de points à approfondir ont été relevés vis à vis des trois grands sujets de la sûreté : le contrôle de la réactivité, le confinement et l'évacuation de la puissance résiduelle.

1^{er} axe : Contrôle de la réactivité pour un MSR

- Sûreté intrinsèque par effet de dilatation vis-à-vis des accidents de réactivité,
- Possibilité d'une relocalisation du combustible par vidange,
- Simplification de l'architecture des moyens de contrôle de la réactivité (pas de barre de contrôle à ce stade),
- Quantité totale en cœur de produits de fission émetteurs de neutrons différés faible en valeur absolue et avec un effet sur la réactivité à apprécier dans l'étude des transitoires (incertitudes comprises),
- Risques possibles d'insertion de réactivité à recenser et évaluer dans les différents états (y compris démarrage/arrêt). Par exemple : injection de matière fissile en excès, précipitation de matière fissile, remplissage des cavités fertiles avec de la matière fissile, choc froid, etc.
- Risque de criticité à évaluer dans l'ensemble de l'installation (en particulier vis-à-vis du risque de précipitation/cristallisation).

2^{ème} axe : Confinement

- Le circuit combustible est non pressurisé et le sel fluoré ne présente pas de risque de réaction chimique exothermique violente,
- Nombre minimal de barrières à déterminer sur la base des études de sûreté (ne pas s'imposer trois barrières *a priori* mais repenser cette notion, liée à l'emploi d'un combustible solide, en fonction de ce type de réacteur),
- Vis-à-vis du risque de fuite du circuit combustible par corrosion, développer des dispositions de prévention, de détection et enfin de limitation des conséquences,

- Analyses à mener sur l'ensemble de l'installation (chaudière, circuits auxiliaires, unité de traitement du sel...),
- Evaluation des termes sources et risques associés à mener :
 - Evaluation de la composition et de la localisation de l'inventaire radioactif au cours du temps (dont évacuation d'une partie du terme source produit en réacteur),
 - Activation du sel intermédiaire,
 - Phénoménologie en cas de déversement de sel combustible dans un local (solidification du sel/rétention du césium et de l'iode),
 - Risques de réaction entre le sel combustible et d'autres fluides.

3ème axe : Evacuation de la puissance résiduelle

- Le combustible est liquide ce qui permet si besoin de le relocaliser pour en assurer le refroidissement,
- Objectif de pouvoir gérer un cas de perte des circuits de refroidissement (y compris au niveau du réservoir de vidange d'urgence) et d'étalement du sel combustible, sans recours à des dispositions complexes, et en tenant compte de la faible inertie thermique du sel,
- Cas particuliers des opérations de remplissage / vidange avec un sel pouvant dégager une puissance résiduelle et une circulation dans l'échangeur intermédiaire non opérationnelle,
- Cas de perte du refroidissement des structures du réacteur à évaluer,
- Evacuation de la puissance résiduelle à assurer dans l'ensemble de l'installation (sel combustible, et également unité de bullage et de traitement) en tenant compte de l'évolution de la composition du combustible.

Autres points à prendre en compte qui ont été listés :

- Développement et qualification de matériaux résistant aux contraintes d'environnement (T°C, irradiation, sel combustible...),
- Développement de techniques de surveillance continue (paramètres physiques et composition chimique),
- Limitation de l'exposition des travailleurs pendant les opérations de fonctionnement et de maintenance (protection dosimétrique),
- Impact environnemental : option sans graphite et sans sel chlorure à privilégier, stratégie de gestion de la production accrue de tritium (comparée aux autres concepts de réacteurs de fission) à définir, technique de décontamination et conditionnement des déchets d'exploitation et de démantèlement qui seront à définir, avec la détermination des exutoires associés,
- Risques chimiques (composés fluorés) à analyser,
- Résistance à la prolifération et protection physique.

2.14.2. Liste d'évènement initiateurs (EIS)

Enfin, une première liste d'évènements initiateurs (EIS) a été établie, dont les principales familles sont les suivantes :

- Insertion de réactivité,
- Augmentation de l'extraction de chaleur/sur-refroidissement,
- Perte de débit combustible,
- Diminution de l'extraction de chaleur,
- Perte d'étanchéité du circuit combustible,
- Perte du contrôle de la composition/chimie du sel combustible,
- Surchauffe des structures du circuit combustible,
- Perte du refroidissement des autres systèmes contenant des matières radioactives,

- Perte du confinement des matières radioactives dans d'autres systèmes,
- Dégradation mécanique du circuit combustible,
- Perte du contrôle de la pression dans le circuit combustible,
- Fuite du circuit de conversion,
- Perte de l'alimentation électrique.

Cette liste a permis d'établir des listes plus resserrées d'accidents possibles et de commencer des études de transitoires sur certains cas accidentels majorés (par exemples : insertion de +1000 pcm en 1 sec, passage en une seconde de 100% à 0% du refroidissement à l'échangeur intermédiaire, etc.).

2.14.3. Barrières

Cette analyse a conduit à une première proposition de barrières pour les réacteurs à combustible liquide :

- 1ère barrière : structures contenant le circuit combustible,
- 2ème barrière : enceinte autour de la première barrière,
- 3ème barrière : bâtiment réacteur.

Proposition de barrières pour la maintenance :

- 1ère barrière : réservoirs de stockages + conduites de remplissage/vidange
- 2ème barrière : enceinte dédiée englobant ces structures
- 3ème barrière : bâtiment réacteur

En cas de vidange vers le réservoir d'urgence (EDS), l'EDS + circuit combustible peuvent former une première barrière indépendante des 2èmes et 3ème barrières, mais l'intégrité et l'étanchéité de l'EDS devraient alors être maintenues au même niveau que le reste de la 1ère barrière.

La réflexion en cours sur ces barrières repose sur le problème des traversées de ces barrières, de leur minimisation et de leur gestion.

Cette réflexion permet également d'avancer dans la définition de l'accident grave pour un MSR, qui pourrait être la perte d'étanchéité au niveau de la seconde barrière, après une perte de la première. Mais un accident grave pourrait aussi être la perte du fluide intermédiaire avec montée en température, fusion des parois échangeurs et écoulement du combustible vers le circuit intermédiaire. Ces propositions restent à consolider.

2.14.4. Conclusion sur la sûreté

Les premières études montrent un certain nombre de points positifs pour le concept, dont la sûreté passive apportée par les forts coefficients de contre réaction en cas d'accidents de réactivité. Cet aspect permet de repenser l'approche de sûreté avec un niveau de risque maximum réduit par rapport à l'utilisation d'un combustible solide (et avec les conséquences qui en découlent en termes d'acceptabilité).

Par contre, un certain nombre de points liés en particulier au confinement et à l'évacuation de puissance résiduelle devront être étudiés en liaison avec le design du réacteur. Ils n'ont pas fait l'objet d'études approfondies pour l'instant et ils auront certainement une influence sur le design du réacteur.

Enfin, le licensing d'un réacteur de ce type passera par l'acceptation par l'autorité de sûreté, d'un certain nombre de définitions spécifiques aux MSR, comme la définition des barrières, de l'accident grave de référence, d'une situation d'arrêt en état sûr sans barres de commande, etc. Il n'est en effet

pas possible, compte tenu des différences fondamentales, de faire entrer la sûreté d'un MSR dans le cadre défini pour la sûreté des réacteurs à combustibles solides.

En l'état, le concept MSFR ne permet pas d'approfondir les résultats, il est nécessaire de poser un design de réacteur plus précis. Une fois cela fait, les études permettront de commencer à produire une analyse de sûreté sur un cas concret, notamment vis-à-vis des accidents imaginables, et de produire des résultats plus précis.

2.15. Déchets et démantèlement

On a vu qu'en fonctionnement un certain nombre de déchets devraient être comptabilisés, traités et gérés : purification gazeuse, traitement combustible en ligne, et composants usagés. Le bilan de ces déchets et de leur gestion, reste à effectuer notamment en fonction des options d'incinérations.

Le démantèlement n'a pas été étudié. On a suggéré dans ce rapport l'option de réutilisation du sel dans le réacteur suivant permettant de limiter le volume de sel combustible reclassé comme déchet final. Cette option, si elle était validée, simplifierait le démantèlement et améliorerait notablement le bilan final des déchets produits.

Pour le démantèlement lui-même, on rappelle qu'actuellement le combustible solide représente 99,9 % de l'activité résiduelle et beaucoup moins de 1% du volume final. Ici, les contaminations par un combustible liquide amèneront une situation nouvelle et inédite par rapport à nos « habitudes » et il sera nécessaire de réaliser un inventaire précis des volumes, mais aussi des installations et des opérations nécessaires pour un MSR.

2.16. Conclusion

Ce bilan très rapide de nos connaissances en France, sur cette filière MSR, permet de valider un acquis et un certain nombre de choix techniques. Il constitue aussi une aide importante à la définition des axes de R&D souhaitables dans ce domaine, point qui est développé dans la troisième partie de ce rapport.

Troisième partie /

Analyse des moyens et équipes Propositions de R&D

3.1. Intérêts potentiels de la filière pour la France

3.1.1. Utilisation des matières disponibles

La France dispose d'un parc de PWR d'une puissance totale de 63,5 GWe installée. Elle dispose aussi d'installations industrielles de fabrication et de retraitement du combustible de ces réacteurs. Dans ce cadre, il est nécessaire d'assurer la gestion des déchets finaux de haute activité et à vie longue (PF et actinides mineurs), des stocks d'uranium appauvri et de retraitement, et du stock de plutonium produit par ce parc.

Par ailleurs, on notera qu'actuellement :

- le MOX irradié n'est pas retraité, il est donc inutilisé et simplement stocké à La Hague.
- les actinides mineurs ne sont pas séparés des Lanthanides, ils sont assimilés aux déchets HAVL (vitrifiés avec les PF) ; ils ne sont donc pas incinérés dans les réacteurs.

Dans ce contexte, par leur grande souplesse de composition du combustible utilisé, les MSR permettraient de consommer tous les produits ci-dessus après les avoir fluorés. Les études montrent qu'il est ainsi possible d'incinérer l'ensemble des transuraniens produits par le parc actuel. En particulier :

- les MOX irradiés pourraient être directement convertis en combustible pour MSR
- et sous réserve de pouvoir les séparer des PF, les actinides mineurs pourraient être incinérés dans les MSR.

Le parc actuel a besoin de 8 000 tonnes d'uranium naturel par an, un parc de réacteurs de type MSFR d'une puissance totale identique n'aurait besoin que de 50 tonnes par an de produits déjà stockés et disponibles en France. Cette voie permettrait de s'affranchir à terme du cycle amont de l'uranium (mine, enrichissement) et permettrait la production d'énergie sur la base de ces matières qui seraient ainsi valorisées.

3.1.2. Comparaison avec les RNR-Na

Il est possible de faire une comparaison des potentialités entre ces deux filières de 4^{ème} génération :

- RNR-Na et MSR (de type MSFR) présentent les mêmes avantages liés au spectre rapide.

- Par rapport au MSR, les RNR-Na ont un cycle du combustible beaucoup plus complexe dans sa mise en œuvre, les quantités de matières impliquées et sa temporalité (cf. § 3.2.2. – Éléments d'analyse temporelle).
- Les MSR présentent des possibilités d'incinération plus importantes dues au maintien du combustible en cuve ; en comparaison, le combustible d'un RNR-Na doit être déchargé régulièrement à cause de la dégradation des matériaux (pastilles, gaines, etc.). De plus, ces capacités d'incinérations sont potentiellement plus simples dans leur mise en œuvre pour un MSR que pour un RNR-Na.
- A l'inverse des RNR-Na, les MSR ont une composition de combustible très flexible, aussi bien au démarrage qu'en cours de fonctionnement ; ceci permet de faire évoluer cette composition en fonction des besoins et notamment de l'adapter à la qualité du plutonium produit par le parc actuel.
- Le suivi de charge du réseau est possible avec des MSR (les variations importantes de puissances ont des temps caractéristiques ~ 1 minute) et ne pose pas problèmes particuliers aux structures (faible écart de température), au sel combustible ou à l'exploitation, compte tenu des caractéristiques d'un MSR.
- La possibilité de développer de petites unités ; en effet, le facteur d'échelle est quasi-inexistant pour les MSR de type MSFR puisque dépendant principalement du nombre d'échangeurs.
- La taille réduite des composants permet d'envisager la possibilité d'une construction simplifiée et de mettre en œuvre des principes simplification et de modularité dans le design du réacteur.

Ordres de grandeurs des dimensions des deux composants du circuit combustible⁶ :

- **La cuve** : elle fait ~ 18 m³, ce qui correspond un cylindre de 3,5 m de diamètre et de 2m de hauteur. Comme un MSR n'est pas sous pression, l'épaisseur de cuve sera faible (entre 4 et 7 cm).
- **Un secteur modulaire (ensemble « pompe + échangeur » immergé en cuve)** : il loge dans un volume de $1,5 \times 2 \times 0,7$ m³. Sa fabrication en usine et son transport routier ne sont donc pas problématiques du point de vue de la taille.

3.2. Trois points d'analyse temporelle sur les MSR

Trois points sont détaillés ci-dessous pour donner des éléments de temporalité liés aux MSR ; éléments qui s'avèrent différents pour les réacteurs à combustible solide :

- 1- Le suivi de charge du réseau (et la pilotabilité d'un MSR),
- 2- La « vie d'un atome de Pu dans le cycle du combustible » ; point qui permet de rendre compte des flux de matières, des opérations à exécuter et des durées temporelles mises en jeu suivant le type de combustible utilisé,
- 3- L'impact de la simplification – dans la conception – lié à l'emploi d'un combustible liquide.

A travers ces 3 points, il s'agit de fournir une lecture complémentaire de ce qu'apporte l'utilisation d'un combustible liquide afin de ne pas se limiter à simple aspect technique.

⁶ Pour comparaison, la cuve de Superphénix (RNR-Na) faisait 22 m de diamètre et 22 m de hauteur. La cuve de l'EPR fait un peu plus de 5 m de diamètre, 11m de hauteur et 23 cm d'épaisseur, pour un poids de 425 tonnes. Un échangeur intermédiaire de Phénix faisait plus de 13 m pour un diamètre de 1,5 m, pour le réacteur ASTRID 600 MWe il fait 18 m de long et 2,5 m de diamètre, pour un poids de 92 tonnes.

3.2.1. Suivi de charge du réseau

Le développement des énergies renouvelables demande une capacité de suivi de charge du réseau plus importante du fait de leur intermittence. Notons ici que lors de la construction du parc nucléaire français, à partir des années 1970, une telle contrainte de suivi de charge ne figurait pas dans les contraintes de conception.

Sur ce point, la flexibilité de pilotage des MSR permet un suivi de réseau avec un temps caractéristique de l'ordre de la minute, ce qui est un temps largement inférieur à la variation des énergies renouvelable dites « intermittentes ». Par ailleurs, ce suivi de charge ne pénalise pas le fonctionnement des MSR puisqu'ils sont intrinsèquement prévus pour de telles variations de puissance⁷, et les faibles gradients de température (~30°C) dans les MSR minimisent les chocs thermiques sur les structures en cas de transitoires très rapides.

Cette caractéristique propre aux MSR permet ainsi d'équilibrer la charge du réseau électrique, et elle s'avère donc compatible avec le développement des énergies renouvelables.

3.2.2. Vie d'un noyau de Pu dans le cycle (combustibles solide et liquide)

Une analyse temporelle est possible concernant la différence sur les durées caractéristiques liées à l'utilisation d'un combustible solide ou d'un combustible liquide. Pour cela, il est effectué le suivi des étapes rencontrées par un atome de plutonium créé dans un cœur de RNR régénérateur ; étapes qui vont depuis son retrait du cœur jusqu'à son retour en cœur pour irradiation. L'analyse de ce suivi fournit les éléments de temporalité qui différencient l'utilisation d'un combustible solide et celle d'un combustible liquide.

Dans un RNR utilisant du combustible solide régénérateur, le cycle fermé du plutonium comporte les étapes suivantes : retrait du combustible usé du cœur, refroidissement en périphérie du cœur, retrait de l'assemblage hors du circuit primaire, nettoyage, transport des assemblages irradiés, découpage en usine, retraitement (dissolution, séparation du Pu, retour à l'état solide), transport vers l'usine de fabrication de combustible, fabrication du combustible, transport des assemblages neufs vers le réacteur, insertion de l'assemblage dans le stockage, insertion dans le cœur, irradiation en fonctionnement, déchargement du combustible usé.

L'ensemble de ces étapes durent entre 10 et 15 ans, pour environ 5 ans en cœur.

Dans un MSR régénérateur, le cycle fermé du plutonium comporterait les étapes suivantes : extraction d'une dizaine de litres par jour de sel combustible (contenant le Pu), passage dans l'unité de retraitement sur site (pour séparation des lanthanides et extraction des poisons éventuels), réinjection du sel combustible (contenant le Pu) dans le circuit combustible, irradiation en fonctionnement.

L'ensemble des étapes hors cœur durerait moins d'une semaine pour environ 5 ans en cœur.

On constate qu'à cette réduction temporelle hors du cœur se rajouterait :

- une réduction drastique du nombre de tâches à accomplir,
- une réduction du bilan combustible dans le cycle complet,
- une réduction de la quantité de matériaux de structures et de la consommation d'énergie impliqués dans l'ensemble des opérations (acier, produits, électricité, etc.),
- une réduction du nombre de transports et des équipements associés (véhicules, châteaux de transports, outils, etc.).

De tout cela, il devrait découler une simplification de la maîtrise de l'ensemble de la chaîne, et donc une réduction des risques mais également des coûts financiers.

⁷ Les réacteurs à sels fondus ont été choisis pour le projet d'avion militaire de l'US Air Force dans les années 1950.

3.2.3. Impact sur la conception et la simplification

Depuis plusieurs années, les spécifications de sûreté croissantes entraînent une complexification des réacteurs, entraînant de facto une complexification des démarches et du nombre d'intervenants, et par voie de conséquences, une augmentation des coûts et des délais.

La distinction entre un réacteur à combustible solide et un réacteur à combustible liquide vient du positionnement par rapport au risque maximum encouru ayant pour conséquence la fonte du cœur pouvant conduire jusqu'à l'expulsion d'une partie du cœur hors du réacteur.

Pour les réacteurs à combustible solides, notons que la complexification du design est liée à leurs caractéristiques propres. En effet, le développement des réacteurs à combustible solide repose sur l'acceptation que la conséquence maximale fasse intrinsèquement partie du concept de réacteur mis en œuvre. Or, ce positionnement entraîne, dans la conception et le fonctionnement prévu, l'ajout de systèmes, de dispositifs et de processus (y compris administratifs) dont la seule fonction est de prévenir ce risque et la survenue de la conséquence maximale.

Par ailleurs, l'évolution de la société va dans le sens d'un refus toujours plus important du risque, ce qui oblige à une complexification toujours croissante de la conception et du fonctionnement d'un réacteur à combustible solide. Ce constat peut se faire en regardant l'évolution de la conception des réacteurs nucléaires de puissance. Depuis les années 1950 jusqu'à aujourd'hui : elle ne cesse de se complexifier, d'augmenter en traitement administratifs, avec les conséquences qui en découlent sur les délais, coûts, maîtrise de l'ensemble, etc.

Pour les réacteurs utilisant un combustible liquide, le risque maximum ne fait plus intrinsèquement partie du concept du réacteur. Du fait de ce positionnement, une grande partie des systèmes, dispositifs et processus nécessaires à un réacteur à combustible solide sont ici à rediscuter du point de vue de leur simple utilité. C'est aussi en ce sens que les MSR portent une innovation rupture pour le nucléaire : ils offrent l'opportunité de repenser la démarche de conception pour la simplifier. Cette différence de positionnement face au risque maximum (accepté ou évité) est schématisé *Figure 40*.

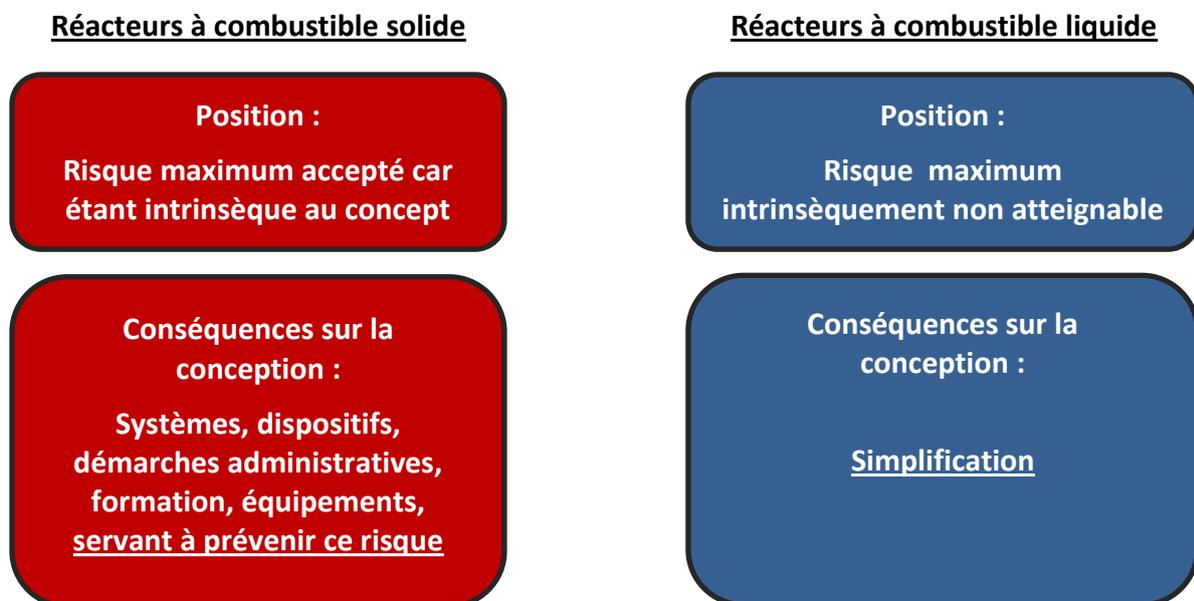


Figure 40 : Logique de positionnement des filières face au risque maximum et conséquences induites sur le design

Parmi les éléments pouvant conduire à un allègement de la conception, on trouve notamment :

- L'obtention d'une sûreté intrinsèque (par l'effet de dilatation du combustible en cas d'insertion de réactivité) fait que le niveau maximum d'accident atteignable par un réacteur à combustible liquide semble correspondre à celui de l'accident de Three Miles Island (perte du réacteur sans conséquences hors du bâtiment réacteur). Notons toutefois que les études de sûreté menées jusqu'à présent n'ont toujours pas permis de déterminer clairement un chemin vers cet accident. La perte du réacteur sans conséquences hors du bâtiment réacteur est donc une conséquence enveloppe.
- L'absence d'interaction fluide primaire/combustible énergétique.
- L'absence de mise en pression.
- L'absence d'effet d'échelle.
- La simplification des structures en cœur (notamment : plus de matériaux de structures).
- Le fait que le combustible soit déjà liquide (suppression des problèmes liés à la tenue du combustible solide ou à l'inertie thermique).
- La séparation de la complexité : réparties entre le cœur et l'unité de retraitement.
- L'introduction de la modularité dans les processus de fabrication et d'assemblage.
- La réduction des dimensions des composants.

Comme on peut le constater, la simplification de la conception repose à la fois sur des caractéristiques intrinsèques aux MSR (par exemple, la baisse du niveau de conséquence maximum), mais aussi sur des concepts nouveaux comme, par exemple, la modularité. L'ensemble de ces éléments permet de repenser la conception et, a priori, de l'alléger.

L'objectif d'une conception simplifiée est clair, mais il est également attendu un gain significatif en termes de démarches et de construction et en termes de compétitivité économique (réductions des coûts de constructions et des opérations).

Par ailleurs, notons qu'une possible réduction des coûts, si elle devait être in fine très significative, permettrait une utilisation partielle de l'installation (suivi de l'intermittence des énergies renouvelables) et rendre possible un choix d'arrêt du réacteur moins contraint du fait de l'investissement plus rapidement amorti.

Enfin, l'effet d'échelle est quasi nul pour les MSR. La voie des SMR (Small Modular Reactors) est donc plus simple à mettre en œuvre et avec elle la réduction de la taille des structures, la modularité ou la production des pièces en séries plus importantes. Tout cela s'accompagne d'un gain temporel, donc financier.

Des études plus poussées sont nécessaires pour mieux évaluer et préciser les gains potentiels.

3.3. Identification des choix techniques de base

Parmi les options possibles pour la conception d'un MSR répondant au contexte français, certaines options sont encore ouvertes mais d'autres sont déjà clairement identifiées comme étant les plus prometteuses par les organismes français ayant des connaissances dans les MSR.

Liste des choix de conceptions déjà identifiés :

- Spectre rapide permettant la régénération, l'incinération, la possibilité du cycle U/Pu, et la minimisation du retraitement en ligne,
- Conception « simplifiée » du circuit combustible sans structure interne avec une géométrie modulaire faite de secteurs de circulation internes à la cuve : pas de tuyauterie hors cœur pour éliminer pratiquement les risques de fuites de sel combustible, et remplacement possibles des secteurs contenant les échangeurs,

- Sels de type fluorures pour le circuit combustible, en gardant toutefois une option sur les chlorures,
- Sel du circuit intermédiaire : le sel fluoro-borate est identifié, ce qui n'empêche pas les recherches pour d'autres options,
- Pas de barres de commande, le pilotage se fait par le circuit intermédiaire,
- Aucun dispositif ou équipement solide dans la partie active du cœur : elle ne contient que du sel liquide,
- Pas de pressurisation du circuit combustible,
- Matériau pour le circuit combustible : Hastelloy-N, avec poursuite en parallèle des recherches sur d'autres matériaux (SiC, molybdène, etc.),
- Piège froid pour piégeage sélectif par concentration des isotopes à retraiter,
- Première étape du retraitement : extraction U, Np et Pu par fluoration pour réinjection rapide dans le circuit combustible.
- Cycle U/Pu (préféré au cycle Th/U) du fait de la plus grande maîtrise et des équipements déjà disponible sur le sol français, et de la possibilité d'incinération du Pu produit par les PWR du parc actuel.

Une liste non exhaustive d'options encore ouvertes :

- Densité de puissance.
- Adjonction de NaF ou RbF dans le sel combustible permettant un abaissement de la température de fonctionnement mais à valider avec le retraitement.
- Convection naturelle ou forcée du circuit combustible en fonctionnement normal.
- Présence ou non d'un réservoir de vidange d'urgence, et rôle de celui-ci.
- Couverture fertile et refroidissement de celle-ci (refroidissement interne ou externe).
- Bullage ou système de collecte des particules dans le circuit combustible.
- Deuxième étape du retraitement : séparation des lanthanides (pour les mettre aux déchets finaux) et des actinides mineurs dans le circuit combustible, ce qui offre la possibilité de les réinjecter ces derniers dans le cœur pour incinération.
- Pour le système de conversion électrique, les choix sont ouverts : eau/vapeur classique ou l'eau super-critique (voire le CO₂ super-critique s'il est un jour disponible).

3.4. Bilan des moyens disponibles

On distinguera les moyens/équipes déjà disponibles en France (assez réduits) et des moyens/équipes facilement convertibles à l'étude des MSR (plus nombreux).

3.4.1. Moyens/équipes travaillant actuellement sur la thématique

Ils répartissent sur deux plans : équipes disposant de moyens expérimentaux et ceux disposant de codes de calculs.

Sur les boucles à sel fondu et moyens expérimentaux

Des moyens importants existent à l'étranger (et en particulier en Chine au SINAP à Shanghai) mais semblent difficilement accessibles, même via des coopérations.

Au niveau Français, l'expérience actuellement disponible est essentiellement la boucle d'essais du LPSC de Grenoble (CNRS, UGA, INP) qui dispose d'une boucle à sel fondu inactif et des compétences correspondantes. Antérieurement il y a eu le four à haute température FLUORIDE dédié à l'analyse des mécanismes de corrosion des alliages à base nickel en sel fluorure, projet EDF (2005-2009, cf. [9], [10]).

L'IPN d'Orsay et le LGC à Toulouse (CNRS, université Paul Sabatier, INP) disposent de compétences et de moyens expérimentaux sur les sels fondus.

Enfin, au CEA Saclay, le service de corrosion (SCCME) disposait d'un dispositif (cf. [10][18][19]), CORSEF (CORrosion en milieux Sels Fondus) dédié à l'étude de la corrosion en milieux fluorures fondus (collaboration avec S. Delepch, CNRS - IPN d'Orsay). Le dispositif pourrait être remonté et les compétences vis-à-vis de la corrosion en milieux extrêmes étant largement implantées, une montée en compétence sur les fluorures fondus est envisageable rapidement.

Sur les codes de calcul

Le LPSC a développé plusieurs codes de calculs dédiés aux MSR (Monte-Carlo évoluant couplé à la chimie [13], couplage neutronique-thermohydraulique TFM-OpenFoam [23] et un code système en cours de développement).

Le CEA dispose de codes de neutronique et thermohydraulique utilisables, dans des conditions de couplage adaptables à des réacteurs à combustibles liquides.

3.4.2. Moyens/équipes facilement convertibles

Le tableau ci-dessous résume les équipes/moyens convertibles inventoriés les 22-23 mars 2018.

Equipe Organisme	Domaine & Spécialités	Compétences Outils existants	Possibilités pour les MSR
« Groupe Sodium DM2S » DM2S / CEA	Neutronique, thermohydraulique et mécanique Modélisation / Calcul scientifique	Couplage d'outils de calculs, Développement de codes couplés N-TH dédiés accidents/incidents RNR-Na	Développement de codes N-TH dédiés aux MSR Etudes cycle U/Pu, accidents/incidents, pilotage, benchmark
Autour de Laure Martinelli DPC / CEA	Corrosion Modélisation	Boucles Etudes du plomb	Etude de la corrosion Développement de boucles à sel fondus
« Equipe MSR » LPSC / CNRS	Expertise MSR	Codes couplé N-TH et études associées, conception	Expertise MSR
CNRS Grenoble	Sels fondus	Boucle à sel fondu	Equipements et boucle
Autour de Sylvie Delpech IPN Orsay	Electrochimie Chimie analytique Corrosion Sels fondus	Outils expérimentaux: BAG Bâtiment actif	Tests expérimentaux avec le sel combustible cycle U/Pu ou Th/U
Autour de Paul Gauthé et Frédéric Bertrand DER-SESI / CEA	Etudes des systèmes	Compétences MSR	Etudes des systèmes et des technologies liées aux MSR
Autour de Jérôme Serp DMRC / CEA	Retraitement	Pyrochimie (chimie, électrochimique) Labos chauds pour travailler sur les combustibles actifs	Etude des étapes du retraitement pour les MSR cycle U/Pu
CEA / CNRS	Design de réacteurs rapides	Sûreté, conception, design	Etude d'un « réacteur papier » de type MSR Aspect sûreté

3.5. Moyens nécessaires à court terme et axes de recherches associés : boucles, labo chauds, codes et design de « réacteur papier »

Les travaux déjà réalisés ont permis de proposer des choix de conception et de disposer d'un concept de base de travail (le MSFR) répondant aux besoins du contexte français.

Pour aller vers une possible industrialisation à moyen terme, il est nécessaire de passer d'une activité de recherche théorique à une démarche de R&D plus appliquée afin d'acquérir des savoir-faire, des compétences et des résultats plus approfondis.

Les axes de recherche prioritaires à courts termes semblent :

- Procédé d'extraction du zirconium : il est nécessaire mais il n'y a actuellement pas de procédé identifié,
- Mise au point des procédés et des étapes de retraitement en ligne,

- Etude technique d'un piège froid,
- Mise au point des dispositifs d'exploitation et d'instrumentation du réacteur,
- Etude de la corrosion des matériaux et des méthodes pour l'endiguer,
- Etude des effets dus à l'irradiation sur des durées prolongées,
- Mise au point des composants (pompes, échangeurs, etc.),
- Etude de fonctionnement en convection naturelle du circuit combustible dans l'ensemble des conditions de fonctionnement possibles (normal, démarrage, en situation d'arrêt, incident, etc.).
- Etude de prospective économique permettant d'avoir plus d'éléments sur l'impact des caractéristiques propres des MSR et d'options de conception telle que la modularité ou des réacteurs de types SMR.

Une telle démarche repose dans un premier temps, sur quatre types de moyens/équipes complémentaires et interdépendants :

- 1- Des moyens expérimentaux permettant d'avoir des connaissances et une maîtrise concrète sur les procédés chimiques et les matériaux,
- 2- Des moyens expérimentaux permettant de faire de la R&D technologique,
- 3- Des codes de calculs pour faire des études,
- 4- Le design approfondi d'un « réacteur papier » intégrant notamment le REX d'exploitants pour aller plus loin que le « concept MSFR » et permettre de poser des choix et des directions claires.

La *Figure 41* schématise ces axes de R&D interdépendants.

Moyens expérimentaux pour la chimie et pour la R&D technologique :

Les moyens expérimentaux sont nécessaires à plusieurs titres suivant deux axes : la chimie et le développement technologique.

Pour la chimie :

- La recherche et la mise au point de procédés liés à la chimie des sels,
- Etude des matériaux (notamment de la corrosion),
- Etude du combustible et de sa préparation,
- Etude des étapes du retraitement,
- Compréhension des phénomènes physiques (tenue des matériaux, solubilité chimique, etc.),

Pour le développement et la maîtrise des techniques des sels fondus :

- La recherche et la mise au point des dispositifs et d'équipements technologiques (vannes, thermocouples, débitmètres, etc.),
- La démonstration de faisabilité et la qualification des systèmes,
- La mise en place de tests liés à la sûreté.

Ces moyens doivent d'abord être développés en inactif quand c'est possible.

Ils permettent de baser les études réalisées via les outils de calculs sur des données tangibles et fondées.

En plus des aspects « connaissances » et objets technologiques, ces travaux permettent une montée en compétences des personnels sur la maîtrise et la manipulation des sels.

Outils de calculs dédiés et études numériques associées :

En parallèle des travaux sur les sels et les matériaux, il sera nécessaire de développer des outils couplés spécifiques à l'étude des MSR au CEA, afin de mener notamment des études et des benchmarks avec les outils déjà existants au CNRS.

Ces programmes de simulations ont pour objectif d'évaluer :

- Les bilans matières en cœur en prenant en compte les procédés chimiques de l'unité de retraitement,
- Le comportement thermohydraulique du sel combustible en cœur,
- Les aspects neutroniques (réactivité, puissance, etc.) et le pilotage du réacteur,
- Le couplage thermohydraulique/neutronique du réacteur en intégrant le transport des précurseurs neutroniques (ce point spécifique aux MSR rend indispensable la conception d'un outil couplé),
- Le comportement des espèces chimiques en cœur par couplage avec des codes de chimie,
- La radioprotection,
- L'implantation de l'instrumentation.

La réalisation de codes de calculs permet de monter les équipes en compétences sur le sujet et les études. Notons que sans données expérimentales, les options dégagées par des études purement numériques restent sujet à caution quant à leur faisabilité et leur réalisme.

Design d'un « réacteur papier » de type MSFR :

Les systèmes du MSFR ont été conçus et leurs interactions ont été analysées. Mais ils n'ont, pour l'instant, pas encore été dimensionnés.

En s'appuyant sur des calculs numériques, des résultats expérimentaux et le savoir-faire d'exploitants de réacteur, l'objectif de l'approfondissement du design d'un réacteur de type MSFR est de permettre :

- De valider la conception initialement proposée et/ou de la faire évoluer si nécessaire,
- D'approfondir les modes de fonctionnements normaux et accidentels,
- D'effectuer une pré-analyse de sûreté,
- De vérifier que la prise en compte de tous les paramètres n'entraîne pas une complexification trop importante du schéma initial et permet de conserver les caractéristiques innovantes des MSR par rapport à un réacteur à combustible solide,
- D'explorer des démarches de type SMR (Small Modular Reactor) qui sont intéressantes pour les MSR.

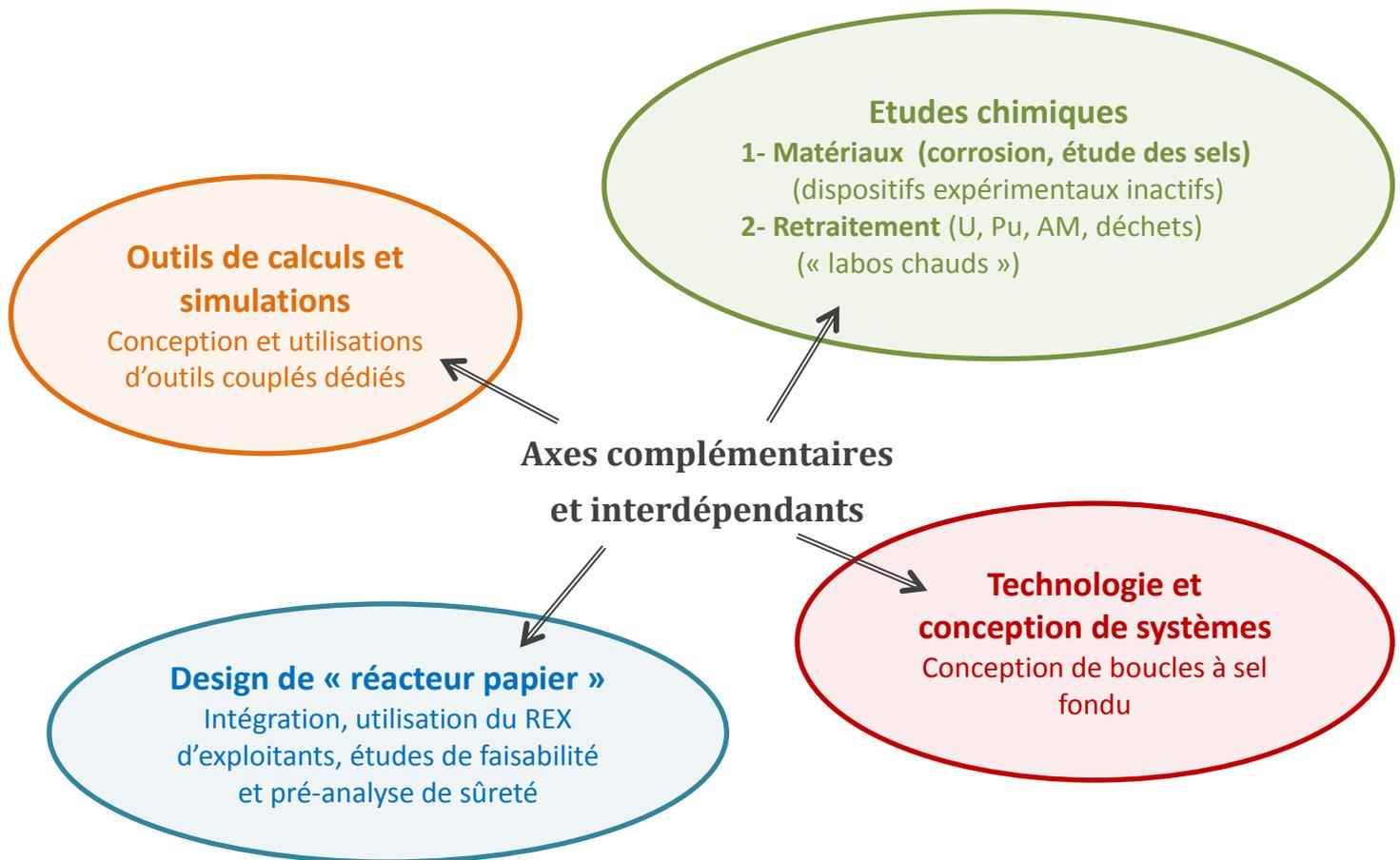


Figure 41 : Schéma des 4 axes interdépendants pour développer les MSR

3.6. Conclusion

L'objectif général du rapport est de faire un bilan scientifique de nos connaissances sur les MSR et de leurs potentialités, et non de définir précisément un programme de développement.

Toutefois, cette troisième partie permet de rappeler les avantages potentiels de cette filière, justifiant a priori certains efforts de R&D.

Dans ce sens, un certain nombre d'axes de développement sont proposés, dont le premier but est d'approfondir et de conforter l'intérêt de cette filière, par des calculs et simulations, et surtout par des validations expérimentales sur les matériaux et le retraitement (points fondamentaux à consolider)). Enfin, des études de pré-dimensionnement d'un « réacteur papier » associées à des analyses de sûreté sont aussi proposées pour conforter les gains potentiels d'un combustible liquide ainsi que consolider la faisabilité.

L'ensemble des travaux proposés a pour but de faire progresser l'expertise et les savoir-faire disponibles, condition indispensable à une montée en compétences, mais aussi condition nécessaire pour disposer d'un avis fondé sur les avantages du combustible liquide.

A moyen terme, et si ces premiers résultats confortent les possibilités de cette filière, il sera utile de définir des cahiers des charges de boucles d'essais, d'abord en inactif, ainsi qu'un cahier des charges d'un démonstrateur de faible puissance nécessaire à l'amorce industrielle de toute filière (comme Rapsodie pour les RNR-Na).

Quatrième partie /

Conclusion générale

Le concept d'un réacteur à combustible liquide est très innovant et représente à de nombreux égards un concept en rupture par rapport aux autres réacteurs qui reposent tous sur l'utilisation d'un combustible solide avec fluide d'extraction de puissance et des matériaux de structure (gaine, assemblages, etc.). Ce concept avait été relativement délaissé après le fonctionnement des prototypes ARE et MSRE, et l'abandon du projet MSBR dans les années 1970.

Récemment, l'émergence d'un grand nombre de start-up nord-américaines proposant ce concept et l'effort important effectué en Chine ont relancé un nouvel intérêt dans le monde pour l'étude de cette filière qui présente un certain nombre d'avantages, réels et potentiels, par rapport à l'utilisation du combustible solide, notamment en termes d'incinération, de suivi de charge, de sûreté intrinsèque (donc d'acceptabilité) et enfin en termes de coût économique du fait de la simplification de la conception par rapport à un réacteur à combustible solide.

L'ensemble de ces éléments a motivé l'organisation de ces journées de Massy les 22/23 mars 2018 sur le concept MSR, afin d'effectuer un bilan des connaissances et des inconnues pour ce type de réacteur, mais aussi un début de recensement des ressources déjà disponibles et facilement convertibles à l'étude des MSR. Ce bilan a été effectué au niveau français avec tous les organismes impliqués : CNRS, CEA, EDF, FRAMATOME, IRSN, ...

Le présent rapport, est basé sur les présentations des différents intervenants, sur des ateliers de travail organisés et sur les relectures successives des co-auteurs. Il permet d'avoir une vue scientifique d'ensemble des réacteurs à sels fondus, du REX existant, des différents concepts à l'étude dans le monde, des potentialités du concept, ainsi que des difficultés techniques principales restant à étudier et à résoudre dans le futur. Il dresse également tableau des travaux à mettre en œuvre à court terme afin de monter en compétences et permettre ainsi un développement de l'expertise et des savoir-faire.

Nul doute que ce document restera dans les années à venir une référence scientifique incontournable sur la filière des réacteurs à sels fondus, et servira de base de réflexion pour tous les développements ultérieurs.

Cinquième partie /

ANNEXES

Les annexes comportent plusieurs parties :

- 1- **Propos sur les MSR : innovation de rupture (et conséquences),**
- 2- **La liste des participants (CNRS, CEA, IRSN, EDF, FRAMATOME, ORANO, ...),**
- 3- **Le programme détaillé des journées de Massy - 22/23 mars 2018,**
- 4- **Les références citées dans le texte,**
- 5- **Les éléments bibliographiques sur les MSR,**
- 6- **La liste des figures.**

5.1. Propos sur les MSR : innovation de rupture (et conséquences)

Pour un organisme de recherche publique, la question de la perspective est centrale et cette question est intrinsèquement liée au cadre dans lequel on évolue. En effet, penser les possibilités, à court ou moyen termes, se fait à partir des outils dont on dispose, des structures où l'on évolue, des usages et des habitudes en vigueur, des repères partagés (souvent implicites) et aussi des manières de raisonner et de poser les problématiques. Un cadre est totalement nécessaire pour progresser, mais s'il n'est pas explicité il risque de devenir implicite, et alors faute de l'intégrer dans les processus il peut finir par contraindre les manières de poser les problématiques, et ainsi fermer les perspectives en les conformant au cadre préexistant⁸.

Penser l'innovation est une manière d'aborder latéralement le cadre, donc de l'explicitier sans pour autant brusquer les usages en vigueur. Cette approche transverse permet ainsi de sortir de l'unique position de « *l'analyse technique* » pour pouvoir mener conjointement « *une analyse de la technique* », analyse qui est la clé de nouvelles perspectives possibles.

Evidemment, l'innovation dont on parle n'a rien à voir avec le marketing ! Il s'agit d'un ensemble de théories qui étudient comment progressent les techniques et les objets qui nous entourent ; et ce avec un objectif clair : comprendre les ressorts des avancées technologiques qui façonnent notre monde pour nous aider à son développement ; le REX utilisé étant généralement l'ensemble de l'ère industrielle.

Deux notions sont essentielles : les notions de « dominant design » et d'« innovation ».

⁸ Spinoza disait que si les ronds avaient eu à se créer un dieu, ils auraient inventé le « Grand Rond » ; c'est dire si cette question du cadre ne date pas d'hier...

La notion de « dominant design » désigne tout ce qui définit un objet technologique : son architecture (composants, matériaux, modèles d'affaires, etc.), les performances de l'objet et les compétences nécessaires à sa production (identifiées, structurées, problématiques majeures sont posées, etc.).

Par exemple : le dominant design du smartphone comporte ses dimensions, des composants (écran tactile, batterie, etc.), les fonctionnalités (appel, messagerie,...), l'itinérance, l'accès à internet, les réseaux de production, la taille du marché, les limitations et les compétences nécessaires à sa fabrication (électronique, informatique, etc.).

La notion « d'innovation » désigne les processus d'évolution des dominants design : par amélioration, par création d'un nouveau procédé technologique, par un nouvel assemblage de composants déjà existants, par un changement d'organisation, etc.

Notons deux choses : primo : il y a deux types d'innovation : l'innovation dite « de soutien » et l'innovation dite « de rupture » ; et secundo : une erreur largement répandue dans les milieux scientifiques consiste à lier l'innovation à une découverte technique/scientifique majeure, ce qui n'est pas vrai : une innovation majeure peut apparaître sans qu'aucune découverte technique révolutionnaire ne la sous-tende.

L'innovation « de soutien » consiste en une amélioration à la marge d'un dominant design déjà existant ; soit en améliorant l'objet en lui-même, soit en améliorant sa production.

Par exemple : l'ajout d'un appareil photo à un smartphone ou la direction assistée sur les voitures. Et dans le nucléaire, cela pourrait être l'amélioration de l'efficacité des barres de contrôle des REP ou un meilleur algorithme d'optimisation du rechargement d'un cœur.

L'innovation « de rupture » quant à elle consiste en la création d'un nouveau dominant design ou la modification profonde d'un design déjà existant. Très rarement, il a pour base une découverte scientifique majeure, et on repère une innovation de rupture, non pas son contenu propre, mais par les effets collatéraux qu'elle provoque : modifications des usages, nouvelles normes, nouvelles possibilités et perspectives, nouveaux outils, nouveaux circuits d'exploitation, transformations importantes et adaptation des structures, modification des coûts, etc.

Par exemple : la photographie numérique (qui a entraîné la disparition de l'acteur historique Kodak, pourtant leader mondial, du fait de son incapacité à prendre ce virage).

Ces deux types d'innovation sont discernables par plusieurs facteurs ; entre autres :

- Le positionnement des évolutions qu'ils apportent (à la marge ou au cœur d'un dominant design),
- L'impact sur les acteurs « déjà existants » et « nouveaux entrants »,
- La temporalité de leurs efforts et de leur production, cf. *Figure 42*.
- L'évolution de leur performance (en productivité, en efficacité, gains financiers, etc.), cf. *Figure 44*.

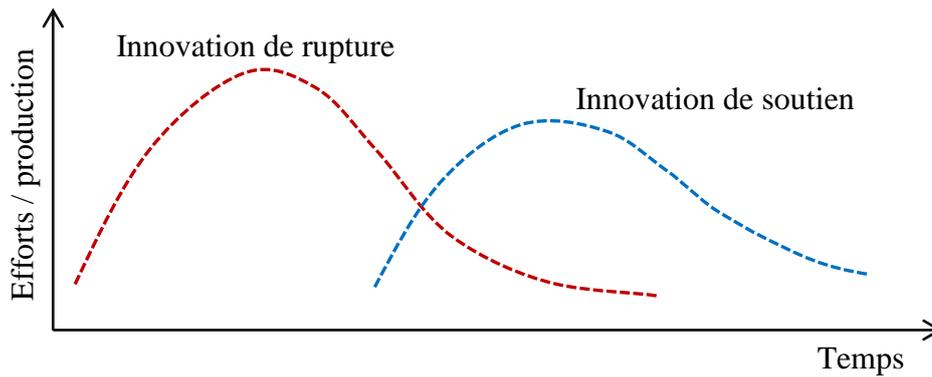
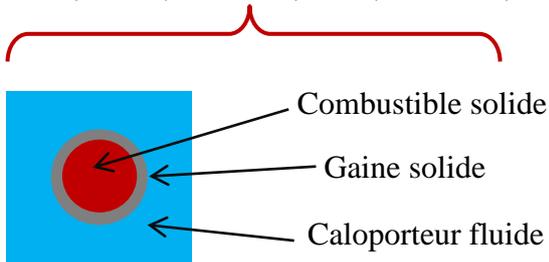


Figure 42 : Différence de temporalité des efforts et de production entre innovation « de rupture » et innovation « de soutien ».

Les MSR et le dominant design dans le nucléaire

Dans l'industrie nucléaire civile, le dominant design repose sur un trio : combustible solide + matériau de gainage solide + caloporteur fluide (liquide ou gazeux), cf. Figure 43.

PWR, BWR, RNR-Na, HTR, CANDU, etc.



MSR
Modification profonde
du dominant design

Combustible +
Caloporteur fluides
(pas de matériaux de gaine)

Figure 43 : Modification du dominant design du nucléaire apportée par les MSR

Dans ce cadre, les MSR représentent une innovation majeure, puisque ce trio est remplacé par un design où il y a simplement un fluide qui est à la fois combustible et caloporteur, et où il n'y a plus de matériaux solides.

Les conséquences de cette innovation sont nombreuses : sur la neutronique et la thermohydraulique, sur l'usure des matériaux, sur la sûreté, sur l'exploitation, ou encore la fabrication du combustible et son retraitement.

Par exemple : l'insertion de sur-criticité prompte (l'un des points fondamentaux de la problématique de sûreté pour les réacteurs à combustibles solides) n'est pas un problème pour un MSR compte tenu de son combustible liquide (à ce titre, le réacteur Silène de la DAM fournit un REX expérimental), et notons aussi la fin de la problématique de l'usure des matériaux de gainage et la dégradation de la pastille combustible comme limitations pour le temps d'irradiation des assemblages.

Deux options sont alors possibles pour cette innovation :

Il s'agit d'un concept « avatar » ou « hybride » (pour illustration, on pourra se référer à l'histoire de l'automobile à ses débuts, pleine de concepts n'étant plus des chariots mais pas encore des voitures), Elle est porteuse d'une innovation de rupture, avec tout ce qui en découle (productivité, gain, performance, etc.).

La *Figure 44*, issue des travaux de Peter Schumpeter, illustre le REX sur la différence sur le niveau de performance entre une innovation de soutien et une innovation de rupture. Bien que la performance soit prise suivant différents indicateurs (rentabilité, productivité, efficacité énergétique, etc.), les deux tendances restent les mêmes et distinguent l'innovation de soutien et l'innovation de rupture. Il est intéressant de noter que le délai de croisement des deux courbes ne dépend que du niveau de R&D investi.

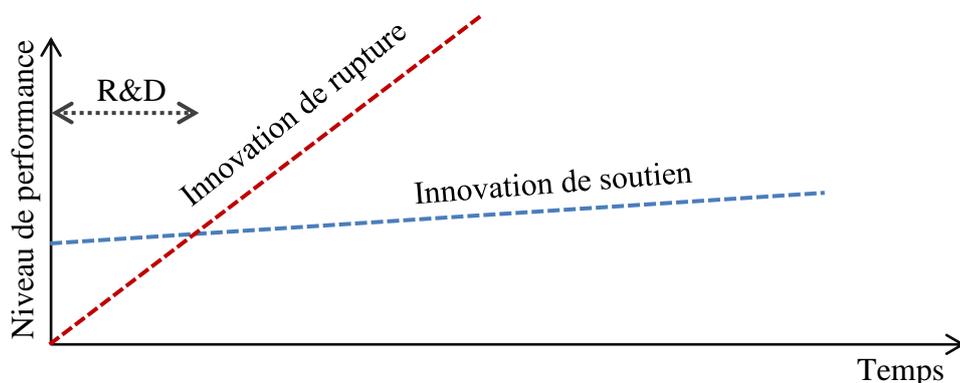


Figure 44 : Evolution structurelle de la performance (croissance, rentabilité, productivité, économie de matières, etc.) suivant l'introduction d'innovations de rupture ou de soutien (source travaux de Peter Schumpeter).

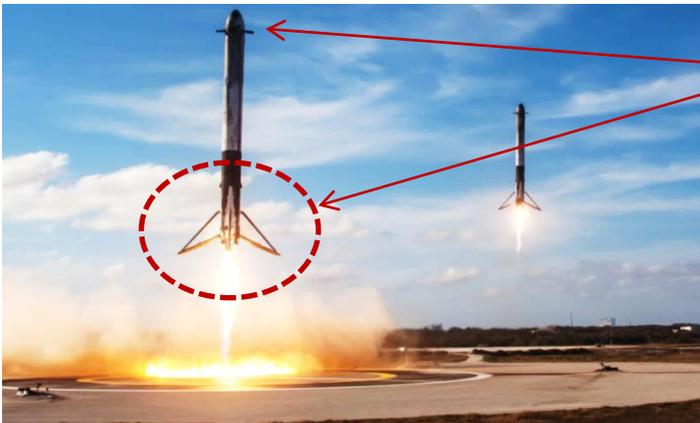
MSR et innovation de rupture ?

L'analyse des MSR doit tenir du fait que ce concept modifie profondément le dominant design des réacteurs nucléaires. De fait, les repères, outils et principes usuellement appliqués et en vigueur pour les réacteurs à combustible solide ne sont plus nécessairement opérants, et pour étudier aussi bien le concept de MSR, que la sûreté ou encore les conséquences en termes de développement de la filière, il est nécessaire de sortir des schémas liés au combustible solide pour reconstruire des outils d'analyses adaptés. Ceci est particulièrement flagrant quant à l'approche de sûreté où des notions comme « circuit primaire », matériaux de gainage ou encore accident de sur-criticité prompte qui n'existent plus.

Un exemple d'innovation : le lanceur Falcon 9 de SpaceX

Cet exemple est intéressant à plusieurs titres :

- Illustration claire que l'innovation de rupture ne repose pas nécessairement sur une découverte scientifique majeure. L'innovation de la Falcon 9 (et de tous les lanceurs qui adoptent désormais le retour sur Terre) repose sur l'assemblage de composants déjà connus : gyroscope, logiciel de pilotage en temps réel, ailerons de freinage, pieds rétractables, utilisation du méthane comme carburant, etc.
- Temps caractéristiques très courts : SpaceX a été fondée en 2002, ce qui illustre les gains en cas d'innovation de rupture (cf. courbes de la *Figure 44*). Notons que le lanceur Falcon 9 a réalisé ~50 tirs et compte 2 échecs (pour rappel : la fiabilité affichée du lanceur Ariane 5 est de 96%).
- Conséquences collatérales très importantes : chute des prix d'accès à l'espace (entre un facteur 5 à 10), très forte croissance et création d'entreprises dans le secteur spatial, développements de nouvelles technologies (« cubesat », etc.), disparition des moteurs à hydrogène, nouveaux projets de lanceurs intégrant le retour sur Terre, etc.
- Positionnement des « grands acteurs du secteur » : après une expertise très négative il y a quelques années quant à la possibilité de retour sur Terre d'un lanceur, ArianeEspace a décidé la fabrication du micro lanceur Callisto dans le but d'acquérir les compétences de retour sur Terre d'un lanceur et a modifié le carburant de son futur lanceur (remplaçant l'hydrogène par du méthane).



Eléments de l'innovation :

- Aileron de freinage
- Pieds rétractables
- Moteur (ré-allumable) au méthane

Figure 45 : Retour sur Terre des deux boosters (de type Falcon 9) lors du lancement de la Falcon Heavy (6 février 2018).

Même si la confirmation ne pourra être sûre que dans quelques années, l'ensemble de ces éléments montrent dès à présent qu'il s'agit très certainement d'une innovation de rupture.

5.2. Liste des participants (CNRS, CEA, IRSN, EDF, FRAMATOME, ORANO, ...)

Nom	Prénom	Organisme	email
Alibert	Michel	CNRS	mallibert@orange.fr
Aniel-Buchheit	Sylvie	CEA	sylvie.aniel@cea.fr
Beils	Stéphane	FRAMATOME	stephane.beils@areva.com
Bidaud	Adrien	LPSC	-
Bertrand	Frédéric	CEA	frederic.bertrand@cea.fr
Blat-Yrieix	Martine	EDF	martine.blat@edf.fr
Borel	Pascal	EDF	pascal-externe.borel@edf.fr
Bourg	Stéphane	CEA	stephane.bourg@cea.fr
Brovchenko	Mariya	IRSN	mariya.brovchenko@irsn.fr
Buche	Nicolas	AREVA	nicolas.buche@areva.com
Campioni	Guillaume	CEA	guillaume.campioni@cea.fr
Carluéc	Bernard	FRAMATOME	bernard.carluéc@areva.com
Chamelot	Pierre	Univ. Tlse	chamelot@chimie.ups-tlse.fr
Chupin	Antoine	EDF	antoine-externe.chupin@edf.fr
Delpech	Sylvie	CNRS	delpech@ipno.in2p3.fr
Delpech	Marc	CEA	marc.delpech@cea.fr
Demilly	Jean-Pierre	Académie des sciences	Jean-pierre.demilly@univ-grenoble-alpes.fr
Deneufbourg	Joseph	EDF	joseph-externe.deneufbourg@edf.fr
Duplessy	jean Claude	CNE	Jean-Claude.Duplessy@lsce.ipsl.fr
Duran Klie	Gabriela	CNRS/IPNO	gduan@ipno.in2p3.fr
Gauthe	Paul	CEA	paul.gauthe@cea.fr
Gerardin	Delphine	CNRS	gerardin@lpsc.in2p3.fr
Gerber	Alain	FRAMATOME	alain.gerber@areva.com
Gerschenfeld	Antoine	CEA	antoine.gerschenfeld@cea.fr
Ghetta	Véronique	CNRS	ghetta@lpsc.in2p3.fr
Giot	Lydie	Subatech Nantes	-
Gorsse	Yannick	CEA	yannick.gorsse@cea.fr
Grassi	Gabriele	ORANO	gabriele.grassi@orano.group
Guidez	Joel	CEA	joel.guidez@cea.fr
Guillaumont	Robert	CNE	robert.guillaumont0663@orange.fr
Heuer	Daniel	CNRS	heuer@lpsc.in2p3.fr
Ivanov	Evgeny	IRSN	evgeny.ivanov@irsn.fr
Lafitte	Olivier	Université Paris 13	olaf1@wanadoo.fr
Laureau	Axel	CNRS	laureau.axel@gmail.com
Lecarpentier	David	EDF	david-n.lecarpentier@edf.fr
Leroy	Maurice	CNE	mjf.leroy@gmail.com
Marchix	Anthony	CEA	anthony.marchix@cea.fr

Martinet	Johann	CNRS	martinet@lpsc.in2p3.fr
Merle	Elsa	PHELMA	elsa.merle-lucotte@phelma.grenoble-inp.fr
Patricot	Cyril	CEA	cyril.patricot@cea.fr
Plewinski	François	DAES	francois.plewinski@daes.pro
Pommeret	Stanislas	CNE	Stanislas.Pommeret@cne2.fr
Rodrigues	Davide	CNRS/IPNO	rodrigues@ipno.in2p3.fr
Rousselle	Jacky	Centrale Energie	jackyrousselle@orange.fr
Rubiolo	Pablo	CNRS	pablo.rubiolo@lpsc.in2p3.fr
Serp	Jerome	CEA	Jerome.serp@cea.fr
Storrer	François	CEA	francois.storrer@cea.fr
Tiberi	Vincenzo	IRSN	vincenzo.tiberi@irsn.fr
Serond	Ana-Paula	ORANO	-
Mayeul	Phelip	DGEC ou MENRT	-
Bernard	Franck	IRSN	-

5.3. Programme des journées de Massy – 22/23 mars 2018

Jeudi 22 mars 2018

08h45 Accueil des participants

09h30 Introduction de ces journées scientifiques

Cadre et organisation / MSR : Propos sur l'innovation **Guillaume Campioni (CEA)**

Session 1 : Les MSR dans le monde

Joel Guidez (CEA)

09h45 La place des MSR dans les réacteurs de IVème génération

Joel Guidez (CEA)

10h 15 Quelle motivations à examiner les MSR ?

Bernard Carluéc (FRAMATOME)

Elsa Merle (CNRS)

10h45 Analyse des différents choix technologiques

Jerome Serp (CEA)

Stephane Beils (FRAMATOME)

11h15 Pause

11h30 Présentation du programme MSR Chinois

Jerome Serp (CEA)

12h00 REX du MSRE aux USA

Yannick Gorsse (CEA)

12h30 Cocktail déjeunatoire

Session 2 : Point sur le projet MSFR du CNRS

Elsa Merle (CNRS)

13h30 Les grands choix techniques du MSFR

Elsa Merle (CNRS)

14h00 Point sur les matériaux disponibles ou en recherche

Michel Allibert (CNRS)

14h30 Point sur les concepts de retraitement

Jerome Serp (CEA)

S. Delpech (CNRS) / Pierre Chamelot (LGC Toulouse)

15h00 Effet d'échelle / SMR et MSR / Quel réacteur prototype ?

Johan Martinet (CNRS)

15H30 Pause

Session 3 : Problèmes techniques et R&D

Bernard Carluéc (Framatome)

16h00 Le Pilotage d'un MSR/ Suivi de réseau

Axel Laureau (CNRS/EPL)

16h30 Capacités d'incinération d'un MSR

Daniel Heuer (CNRS)

17h00 Quelle analyse de sureté pour un MSR ?

Delphine Gerardin (CNRS)

Stephane Beils (FRAMATOME), Vincenzo Tiberi (IRSN), Paul Gauthé (CEA)

17h30 Bilan des acquis du programme SAMOFAR en cours

Elsa Merle (CNRS)

+ FRAMATOME / EDF

18h15 Table ronde (CNRS/CEA/FRAMATOME/EDF/IRSN) : point technique de la première journée et point de nos compétences / moyens et objectifs. **IRSN / EDF / CEA / CNRS / FRAMATOME**

19h30 Repas sous forme de cocktail dinatoire

Vendredi 23 Mars 2018

09h15 Accueil des participants

Session 5 : Deux ateliers en parallèle de 9h30 à 10h 45

Atelier Simulation/Pilotage : point sur les codes de calculs existants et disponibles/ Point des développements possibles ou des possibilités de calculs applicatifs/ Nécessité de couplages ?/ Conséquences sur le design d'un réacteur virtuel/ Etc...

Rapporteurs/Animateurs : Marc Delpech (CEA)/ Axel Laureau (CNRS)

Atelier Chimie : Corrosion/Matériaux /Bilan des connaissances/ R&D en cours/ Suivi de composition du sel/ retraits en ligne/maintenance et décontamination/ Possibilités de démantèlement/ etc. **Rapporteurs/Animateurs : Michel Allibert (CNRS) / Stéphane bourg (CEA)**

10H45 Pause

Session 6 : Deux ateliers en parallèle de 11h à 12h 30

Atelier Sureté : définition des barrières/ définition de l'accident grave/ Application de l'élimination pratique/ Etat sûr de repli/ etc. Conséquences sur le design possible d'un réacteur

Rapporteurs/animateurs Stephane Beils (FRAMATOME) / Paul Gauthé (CEA)

Atelier Technologie : Instrumentation/ température/ Niveaux/Débits /mesures neutroniques/ mesures en ligne/Composants /pompes/Echangeurs/Etc. Ce qui est nécessaire/ Ce qui est disponible/ ce qu'il faut développer/ maintenance

Rapporteurs/Animateurs : Bernard Carlucc (Framatome)/ Joel Guidez (CEA)

12h30 Buffet

13h30 Débriefing des quatre ateliers par les rapporteurs et conclusion.

14h30 Clôture des journées MSR 2018

5.4. Références cités dans le texte

- [1] Experience with the molten salt reactor experiment - P.H.Haubenreich, J.R.Engel - Nuclear applications & Technology, vol.8, February 1970
- [2] ORNL/ER-341. Program management plan for the Molten Salt Reactor Experiment remediation project at Oak ridge National Laboratory
- [3] STJ-02MSRE-D992 - Molten Salt Reactor Experiment Engineering Evaluation and Extended Life Study, URS | CH2M Oak Ridge LLC, Oak Ridge, Tennessee
- [4] DOE/OR/01-2496&D1 - Engineering Evaluation of Options for Molten Salt Reactor Experiment Defueled Coolant Salts, Oak Ridge, Tennessee
- [5] David LECARPENTIER, *“Le concept AMSTER, aspects physiques et sûreté”*, EDF and CNAM, Paris, France (2001)
- [6] P. Rubiolo, M. Tano Retamales, V. Ghetta and J. Giraud, J. Blanco, O. Doche, N. Capellan, *“Design of close and open channel experiments to study molten salt flows”*, 2018 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 18).
- [7] Pablo Rubiolo, Mauricio Tanoa, Julien Giraudb, Véronique Ghettab, Juan Blancoa, Olivier Dochea, Nicolas Capellana *« Design of close and open channel experiments to study molten salt flows LPSC, Univ. Grenoble Alpes, Grenoble INP, 53 rue des Martyrs, F-38026 Grenoble, France.*
- [8] Thèse de Boris Aviv Hombourger : *“Conceptual design of a sustainable waste-burning molten salt reactor”*, PSI-EPFL - 2018
- [9] Thèse de R. Cury : *“Etude métallurgique des alliages Ni-W et Ni-W-CR : relation entre ordre à courte distance et durcissement”*, université paris XII – 2007
- [10] Thèse de Stéphanie Fabre le 25 septembre 2009 à l’université de Toulouse - Titre : *« Comportement de métaux et alliages en milieux fluorures fondus »*
- [11] S. Fabre, Note Technique interne EDF-R&D, H-T29-2009-00638-FR, Etude bibliographique de la corrosion des alliages à base nickel en milieux fluorures fondus (2009)
- [12] J.W. Koger, Fluoride salt corrosion and masse transfer in high temperature dynamic systems, *Corrosion*, 29, p.115 (1973)
- [13] Thèse de Delphine Gérardin – *« développement d’outils numériques et réalisation d’études pour le pilotage et la sûreté du réacteur à sels fondus MSFR »*, Université Grenoble-Alpes - 2017
- [14] J. Giraud, V. Ghetta, P. Rubiolo, M. Tano-Retamales, *“Development and Test of a Cold Plug Valve with Fluoride Salt”*, 12th International Topical Meeting on Reactor Thermal-Hydraulics,

- Operation, and Safety (NUTHOS-12) will take place in Qingdao City, Shandong Province, China, on October 14-18, 2018.
- [15] Thèse de Xavier DOLIGEZ, "Influence du retraitement physico-chimique du sel combustible sur le comportement du MSFR et sur le dimensionnement de son unité de retraitement", PhD Thesis, Grenoble Institute of Technology and EDF, France (2010)
- [16] Molten salt reactor chemistry – W.R.Grimes – Nuclear Applications & technology, vol.8, February 1970
- [17] Assessment of properties of candidate liquid salt coolants for the AHTR – D.F.Williams, L.M.Toth, K.T.Clarno, C.W.Forsberg – ORNL/GEN4/LTR-05-001, June 30 2005
- [18] C. Cabet, RT-SCCME 558 (Janvier 2001) Tenue à la corrosion des matériaux métalliques dans les réacteurs a sels fondus
- [19] C. Cabet, Pontaud D., Charpentier F., Hennerick A., S. Delpech, Livrable L23-2006 Note de synthèse sur le programme d'étude de l'effet fragilisant du tellure en milieu sels fondus, RT DPC/SCCME 07-751-A

5.5. Eléments bibliographiques sur les MSR

- [20] Documentation MSRE (Oak Ridge) : <http://energyfromthorium.com/pdf/>
- [21] Documentation sur le MSFR : <http://psc.in2p3.fr/index.php/fr/groupe-de-physique/enjeux-sociaux/msfr/rsf-reacteurs-a-sels-fondus/lang-fr-msfr-bibliographie-lang-lang-en-msfr-bibliography-lang>
- [22] Gabriela DURAN, "Étude du comportement de l'uranium et de l'iode dans le mélange de fluorures fondus LiF-ThF₄ à 650°C", PhD Thesis, Université Paris Saclay, France (2017)
- [23] Axel LAUREAU, "Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs", PhD Thesis, Grenoble Alpes University, France (2015)
- [24] Davide RODRIGUES, "Solvatation du thorium par les fluorures en milieu sel fondu à haute température : application au procédé d'extraction réductrice pour le concept MSFR", PhD Thesis, Paris Sud University (2015)
- [25] Mariya BROVCHENKO, "Etudes préliminaires de sûreté du réacteur à sels fondus MSFR", PhD Thesis, Grenoble Institute of Technology, France (2013)
- [26] Elsa MERLE-LUCOTTE, "Le cycle Thorium en réacteurs à sels fondus peut-il être une solution au problème énergétique du XXIème siècle ? Le concept de TMSR-NM", Habilitation à Diriger les Recherches, Grenoble INP, France (2008)

- [27] Ludovic MATHIEU, "Cycle Thorium et Réacteurs à Sel Fondu: Exploration du champ des Paramètres et des Contraintes définissant le Thorium Molten Salt Reactor", PhD Thesis, Grenoble Institute of Technology and EDF, France (2005)
- [28] Jorgen FINNE, "Chimie des mélanges de sels fondus - Application à l'extraction réductrice d'actinides et de lanthanides par un métal liquide", PhD Thesis, EDF-CEA-ENSCP, Paris, France (2005)
- [29] Fabien PERDU, "Contributions aux études de sûreté pour des filières innovantes de réacteurs nucléaires", PhD Thesis, Grenoble Institute of Technology, France (2003)
- [30] Alexis NUTTIN, "Potentialités du concept de réacteur à sels fondus pour une production durable d'énergie nucléaire basée sur le cycle thorium en spectre épithermique", PhD Thesis, Grenoble I University and EDF, France (2002)
- [31] P.R. Rubiolo, M. Tano Retamales, V. Ghetta and J. Giraud, "High temperature thermal hydraulics modeling of a molten salt: application to a molten salt fast reactor (MSFR)", ESAIM: Proceedings and surveys, 58, p. 98-117 (2017).
- [32] M. Tano-Retamales, P. Rubiolo and O. Doche, "Development of Data-Driven Turbulence Models in OpenFOAM Application to Liquid Fuel Nuclear Reactors", OpenFOAM, Springer (2018).
- [33] M. Tano-Retamales, P. Rubiolo and O. Doche, "Progress in modeling solidification in molten salt coolants", Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 25.7 (2017).
- [34] M. Tano-Retamales, P. Rubiolo, J. Giraud and V. Ghetta, "On the use of inverse problem methods in nuclear reactors design applications", 2018 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 18).
- [35] M. Tano-Retamales, P. Rubiolo, J. Giraud and V. Ghetta, "Multiphysics study of the draining transient in the molten salt fast reactor", 2018 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP 18).

5.6. Listes des Figures

Figure 1 : Modification du dominant design du nucléaire apportée par les MSR.....	7
Figure 2 : Evolution structurelle de la performance (croissance, rentabilité, productivité, économie de matières, etc.) suivant l'introduction d'innovations de rupture ou de soutien (source travaux de Peter Schumpeter).....	8
Figure 3 : Vue générale du MSRE	10
Figure 4 : Sel fondu	11
Figure 5 : Vue du réacteur.....	12
Figure 6 : Vue des éléments graphite du cœur MSRE	13
Figure 7 : Pompe primaire du MSRE	14
Figure 8 : Vue des échangeurs du MSRE.....	14
Figure 9 : Vue générale des opérations de récupération de l'U233.....	15
Figure 10 : Vue du projet de réacteur chinois de 168 MWe.....	17
Figure 11 : Vue du bloc réacteur	17
Figure 12 : Vue du bloc réacteur MOSART.....	18
Figure 13 : Vue en coupe du projet MOSART.....	18
Figure 14 : Vue du projet indien de 850 MWe.....	19
Figure 15 : Vue du projet Terrestrial Energy	20
Figure 16 : Vue du projet Terrapower	20
Figure 17 : Le MCSFR d'Elysium Industry	21
Figure 18 : Vue du projet Transatomic	21
Figure 19 : Vue du projet Thorcon.....	22
Figure 20 : vue du LFTR.....	22
Figure 21 : vue du concept MSFR du CNRS (LPSC - Grenoble)	23
Figure 22 : Schéma des trois circuits du concept MSFR du CNRS (LPSC - Grenoble).....	25
Figure 23 : Exemples de valeurs de solubilité des fluorures de Pu	27
Figure 24 : Composition de l'Hastelloy N en masse %	28
Figure 25 : Variation dimensionnelle du graphite en fonction de la fluence et de la température	30
Figure 26 : Bilan comparatif matériaux et sels	30
Figure 27 : Composition de l'alliage GH3535 masse %.....	31
Figure 28 : Boucle de contre-réaction des réacteurs à combustible liquide garantissant le retour à l'équilibre neutronique et permettant le pilotage de la puissance.	33
Figure 29 : Répartition du taux de fission dans une vue en coupe de deux secteurs du circuit combustible du MSFR : la zone centrale permet la réaction en chaîne du fait de la géométrie critique, dans les échangeurs la géométrie ne permet plus la réaction en chaîne.	34
Figure 30 : Carte de températures du sel dans une vue en coupe de deux secteurs du circuit combustible du MSFR : échauffement dans la zone centrale, refroidissement dans les échangeurs..	34
Figure 31 : Vue de plusieurs secteurs (échangeurs +pompes) immergés dans la cuve du MSFR.....	35
Figure 32 : Principales caractéristiques du MSFR.....	37
Figure 33 : Spectre neutronique du MSFR (courbe verte).....	37
Figure 34 : Exemple de calcul d'incinération à partir d'un chargement initial du projet EVOL	41
Figure 35 : Exemple de calcul d'incinération de l'inventaire final d'un parc de MSFR lors de son arrêt	42
Figure 36 : Schéma de principe du retraitement du sel combustible par l'unité au sein du réacteur ...	45
Figure 37 : Schéma de principe des extractions par pyrochimie	46
Figure 38 : Étapes possibles pour un retraitement du sel combustible d'un MSR.....	47
Figure 39 : Principe du procédé de séparation par électrochimie utilisé ou proposé pour les combustibles métalliques (EBR2).....	47
Figure 40 : Logique de positionnement des filières face au risque maximum et conséquences induites sur le design	58
Figure 41 : Schéma des 4 axes interdépendants pour développer les MSR.....	65
Figure 42 : Différence de temporalité des efforts et de production entre innovation « de rupture » et innovation « de soutien ».....	71
Figure 43 : Modification du dominant design du nucléaire apportée par les MSR.....	71
Figure 44 : Evolution structurelle de la performance (croissance, rentabilité, productivité, économie de matières, etc.) suivant l'introduction d'innovations de rupture ou de soutien (source travaux de Peter Schumpeter).	72
Figure 45 : Retour sur Terre des deux boosters (de type Falcon 9) lors du lancement de la Falcon Heavy (6 février 2018).	73

Document édité par le CEA - 2018

Correspondants rédaction : Joël guidez et Guillaume Campioni

Référence : [DEN/DANS/DM2S/DIR/AU/2018-62842](#)



MOLTEN SALT REACTOR
Journées Scientifiques de Massy 2018
22/23 mars