

Enjeux de sûreté des réacteurs à sels fondus

Stéphane BEILS

Chef de Section Sûreté RNR

Atelier MSFR, NEEDS - Lyon, le 2 février 2017

Objectif de la présentation

- ▶ **Présenter une synthèse d'échanges récents sur la sûreté du concept de MSFR, en mettant en avant des propositions d'axes de travail**
 - ◆ **Contexte des échanges : NEEDS, SAMOFAR, GCFS, RSWG**
 - ◆ **La configuration MSFR : sel combustible fluorure en spectre rapide (et cycle $^{233}\text{U}/\text{Th}$)**
 - ◆ **Principalement les aspects réacteur à ce stade, hors unité de traitement du sel**

Plan de la présentation

- ▶ Démarche de sûreté
- ▶ Fonctions fondamentales de sûreté
 - ◆ Contrôle de la réactivité
 - ◆ Évacuation de la puissance résiduelle
 - ◆ Confinement
- ▶ Evènements internes / Agressions
- ▶ Autres considérations

Démarche de sûreté (1/5)

- ▶ L'approche de sûreté des MSR, tout en reprenant les fondamentaux de la sûreté nucléaire des réacteurs, doit tenir compte des spécificités de ce concept
- ▶ Le principe fondamental de sûreté reste la défense en profondeur
- ▶ Sur les réacteurs avec un cœur solide, un accident grave (la fusion généralisée du cœur), qui met en jeu des phénomènes énergétiques voire rapides pouvant endommager le confinement et par la suite provoquer des rejets importants, est défini. Il structure la démarche de sûreté en termes de prévention et de mitigation requises
- ▶ Sur les MSR, les phénomènes physiques/risques caractéristiques du concept susceptibles de conduire à des rejets radiologiques importants doivent être identifiés et évalués (notion d'effet falaise en termes de rejets)

Démarche de sûreté (2/5)

LA DEFENSE EN PROFONDEUR :

- ▶ Prendre en compte de façon systématique des défaillances techniques, humaines et organisationnelles
- ▶ Considérer ces défaillances à « tous les stade de la vie de l'installation »
- ▶ S'en prémunir par des « lignes de défense » successives suffisamment fiables et aussi indépendantes que possible
- ▶ Le nombre et la qualité des « lignes de défense » dépend des conséquences potentielles de la défaillance

Démarche de sûreté (3/5)

La défense en profondeur (telle que formalisée par WENRA)

Levels of defence in depth	Objective	Essential means	Radiological consequences	Associated plant condition categories
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design and high quality in construction and operation, control of main plant parameters inside defined limits	No off-site radiological impact (bounded by regulatory operating limits for discharge)	Normal operation
Level 2	Control of abnormal operation and failures	Control and limiting systems and other surveillance features		Anticipated operational occurrences
Level 3 (¹)	3.a Control of accident to limit radiological releases and prevent escalation to core melt conditions (²)	Reactor protection system, safety systems, accident procedures	No off-site radiological impact or only minor radiological impact (⁴)	Postulated single initiating events
	3.b	Additional safety features(³), accident procedures		Postulated multiple failure events
Level 4	Control of accidents with core melt to limit off-site releases	Complementary safety features(³) to mitigate core melt, Management of accidents with core melt (severe accidents)	Off-site radiological impact may imply limited protective measures in area and time	Postulated core melt accidents (short and long term)
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive material	Off-site emergency response Intervention levels	Off site radiological impact necessitating protective measures(⁵)	-

Démarche de sûreté (4/5)

- ▶ Une orientation de conception forte pour les MSR est de chercher à ce qu'intrinsèquement ils ne présentent pas de potentiel d'agression significatif du confinement (qui pourraient par la suite provoquer des rejets importants)
- ▶ Dans le cas contraire, en complément des dispositions de prévention, des moyens dédiés pour gérer le ou les accidents associés sont à prévoir
 - ◆ Peut conduire le cas échéant à la définition d'accident(s) grave(s)
 - ◆ Pas de situation de ce type clairement identifiée à ce stade pour les MSR → analyses à poursuivre, en considérant notamment la gestion sur le long terme
 - ◆ Objectif de pouvoir gérer tous les accidents qui seraient ainsi identifiés, de sorte qu'il ne serait pas nécessaire de mettre en place de démonstration « d'élimination pratique »

Démarche de sûreté (5/5)

- ▶ **Quelques recommandations en vue de contribuer à la robustesse de la sûreté du MSFR :**
 - ◆ Recherche de caractéristiques intrinsèques favorables
 - ◆ Recherche de capacités passives, éventuellement en complément de capacités actives
 - ◆ Simplicité des solutions de conception (et d'exploitation)
- ▶ **« Qualitative safety requirements » en cours dans SAMOFAR**
- ▶ **Plus généralement, pour la France, réglementation adaptée au concept qui serait à élaborer à terme**

Fonctions fondamentales de sûreté

► Confinement

- ◆ Vis-à-vis des phénomènes thermiques : la maîtrise de la puissance (contrôle de la réactivité) et la maîtrise du refroidissement (évacuation de la puissance résiduelle) permet de les maîtriser
- ◆ Vis-à-vis des agressions mécaniques : dispositions de dimensionnement et/ou protection des barrières de confinement à mettre en œuvre
- ◆ Vis-à-vis des phénomènes physico-chimiques : à analyser

► Pour chacune de ces fonctions de sûreté, l'architecture des systèmes de sûreté à mettre en œuvre dépend des enjeux (conséquences potentielles)

Contrôle de la réactivité (1/2)

- ▶ **Combustible liquide qui devrait permettre d'assurer une sûreté intrinsèque par effet de dilatation vis-à-vis d'éventuels accidents de réactivité**
 - ◆ Cas particulier des remplissages partiels + risque de dilatation empêchée du sel combustible à évaluer
- ▶ **Potentiel du concept pour simplifier l'architecture des moyens de contrôle de la réactivité :**
 - ◆ Avantage et inconvénient en termes de sûreté d'une barre de contrôle à peser
 - ◆ Facilité d'exploitation (démarrage, arrêt avec maintien du sel dans le circuit...) à rechercher
- ▶ **Fraction en cœur de produits de fission émetteurs de neutrons différés faible et variable : caractéristique dont l'effet sur la réactivité est à apprécier dans l'étude des transitoires, incertitudes comprises**
- ▶ **Autres aspects à approfondir :**
 - ◆ Fort couplage entre neutronique et thermohydraulique (maîtrise de la distribution de la matière fissile et de la puissance dans le sel)
 - ◆ Maîtrise de la criticité lors de la divergence

Contrôle de la réactivité (2/2)

- ▶ **Risques possibles d'insertion de réactivité à recenser et évaluer dans les différents états (y compris démarrage/arrêt) :**
 - ◆ Augmentation de la quantité de sel combustible dans la cavité centrale (injection de matière fissile/fertile en excès, augmentation du volume de la cavité)
 - ◆ Augmentation de la concentration de matières fissiles / hétérogénéité (par ex. précipitation)
 - ◆ Insertion d'un matériau qui modifie le spectre et augmente les fissions
 - ◆ Arrêt du bullage
 - ◆ Choc froid

- ▶ **Risque de criticité hors circuit combustible à évaluer**
→ **maitrise de l'inventaire en sel combustible (localisation et composition)**

Evacuation de la puissance résiduelle (1/2)

- ▶ **Combustible liquide qui permet si besoin de le relocaliser pour en assurer le refroidissement**
- ▶ **Rechercher les éventuels effets falaises et les moyens de les prévenir :**
 - ◆ **Objectif de pouvoir gérer par des dispositions intrinsèques un cas de perte des circuits de refroidissement (y compris au niveau du réservoir de vidange d'urgence) et d'étalement du sel combustible**
 - ◆ **Permettrait d'envisager une architecture a priori relativement simple des systèmes de refroidissement**
 - ◆ **Sinon le caractère extrêmement improbable de la perte des systèmes de refroidissement du sel devra être démontré (avec *a minima* 2 systèmes très fiables, redondants et diversifiés entre eux, combinant des dispositions actives et des capacités passives)**

Evacuation de la puissance résiduelle (2/2)

- ▶ **Cas particuliers des opérations de remplissage / vidange avec un sel pouvant dégager une puissance résiduelle et une circulation forcée non opérationnelle (partie supérieure du circuit non immergée) à traiter**
- ▶ **Risque de cristallisation des sels 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)**

Confinement (1/2)

- ▶ **Le circuit combustible est non pressurisé et le sel fluoré ne présente pas de risque de réaction chimique exothermique violente**
- ▶ **Evaluation des termes sources et risques associés à mener :**
 - ◆ **Risques de réaction entre le sel combustible et d'autres fluides**
 - **Cas de l'eau notamment (risque production H₂, explosion vapeur, formation d'acide fluorhydrique)**
 - ◆ **Phénoménologie en cas de déversement de sel combustible dans un local**

Confinement (2/2)

- ▶ **Vis-à-vis du risque de fuite du circuit combustible par corrosion, développer des dispositions de prévention, détection et enfin limitation des conséquences en cas de dégradation par corrosion**
- ▶ **Objectif sur chaque accident de disposer d'au moins une barrière à l'efficacité démontrée (ne pas s'imposer trois barrières *a priori*)**
- ▶ **Analyses à mener également au niveau de l'unité de traitement du sel**
- ▶ **Supprimer les risques de bippasses éventuels, en évitant le besoin de recourir à des systèmes actifs pour cela**

Evènements internes / agressions

- ▶ **Recensement des risques et constitution d'une liste d'évènements en cours dans SAMOFAR, cf. présentation de Delphine Gérardin**
 - ◆ Souci d'exhaustivité
 - ◆ Emploi conjugué de méthodes dites « top down » et « bottom up »

- ▶ **Agressions**
 - ◆ Eviter les sources d'agression internes et les placer dans des zones où il n'y a pas d'équipement de sûreté (sinon prévoir une redondance par ailleurs)
 - ◆ Intérêt à pouvoir assurer les fonctions de sûreté sans support hors site (par ex. sans source électrique de puissance ni source froide eau)
 - ◆ Robustesse des circuits contenant le sel combustible au séisme à rechercher, en particulier les systèmes de vidange et récupération
 - ◆ Une installation de taille réduite pourrait faciliter la protection vis-à-vis de certaines agressions externes (par ex. via un enfouissement)

Autres considérations

- ▶ Développer des techniques de surveillance continue, et de réparation/remplacement des circuits de sels (y compris au niveau de l'unité de traitement)
- ▶ ESPN : concept non pressurisé → ne pas mettre des zones pressurisées (avec un terme source radiologique)
- ▶ Risques chimiques (composés fluorés) à analyser
- ▶ Limitation de l'exposition des travailleurs pendant les opérations de maintenance à prendre en compte
- ▶ 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
- ▶ Non prolifération et protection physique → à étudier pour l'ensemble de l'installation et du cycle par ailleurs

Conclusions (1/2)

- ▶ **Les spécificités fortes du MSFR doivent être prises en compte dans la définition de l'approche de sûreté, dont la déclinaison ne peut être reprise à l'identique des réacteurs à combustible solide**
- ▶ **Une orientation forte est de chercher à mettre en avant des caractéristiques intrinsèques favorables du concept, puis d'en tirer parti en termes de simplicité des options de conception**
- ▶ **Les études réalisées à ce jour montrent que le combustible liquide devrait permettre d'assurer une sûreté intrinsèque par effet de dilatation vis-à-vis d'éventuels accidents de réactivité**

Conclusions (2/2)

- ▶ **Outre le contrôle de la réactivité, de nombreux autres points méritent d'être approfondis, notamment :**
 - ◆ **La recherche de dispositions intrinsèques (sinon passives) de refroidissement du sel combustible**
 - ◆ **La mise en place de dispositions de prévention/détection/limitation vis-à-vis de la corrosion**
 - ◆ **L'évaluation des phénomènes en jeu en cas de fuite de sel, en lien avec la problématique de confinement**
 - ◆ **La maîtrise de l'inventaire en sel combustible (localisation et composition)**
 - ◆ **L'analyse des risques sur l'ensemble de l'installation (unité de traitement incluse)**
 - ◆ **L'analyse des risques durant les différents états de fonctionnement (y.c. démarrage/arrêt)**

Merci de votre attention

► Des questions ?