CHAPITRE 4

Les conclusions du séminaire :
quelles actions
en termes de recherche
et développement ?

Yves Bamberger

EDF

1 | Que présente ce chapitre et comment est-il organisé ?

Ce chapitre présente de façon synthétique les principales actions de R&D scientifiques et techniques liées au caloporteur qui semblent actuellement nécessaires pour les différentes filières. Suivant les cas, ces actions sont :

- soit issues de l'expérience d'exploitation d'un réacteur de cette filière (par exemple celle de Superphénix pour les réacteurs au sodium, réacteurs navals pour les réacteurs au plomb) ;
- soit parties des travaux en cours ou à venir pour préciser le design, la construction, l'exploitation, la maintenance, la sûreté, le démantèlement des réacteurs de la filière mais aussi la conception, la fabrication, le transport, le stockage des combustibles.

La complétude des actions dépend de la maturité des travaux sur la filière au niveau mondial.

À des questions spécifiques près, le plan suivi s'efforce d'être le même chaque fois pour faciliter la lecture et les comparaisons : conception, cœur et caloporteur(s), durée de vie (supérieure à 60 ans), disponibilité, exploitabilité et sûreté (pour être un réacteur de génération IV), inspectabilité et maintenance, traitement des accidents graves, manutention du combustible, démantèlement. Les actions sont présentées sous forme d'une liste (qui rassemble en fait largement des éléments des autres chapitres).

Par ailleurs, plusieurs actions-clés concernent toutes les filières et ceci fait l'objet du paragraphe 2 ci-dessous.

2 | Les actions-clés concernant toutes les filières

Trois familles d'actions concernent toutes les filières et sont relatives :

- aux matériaux et aux soudures ;
- aux corrosions des matériaux et au contrôle des processus chimiques ;
- aux simulations numériques et à l'instrumentation.

Ce sont des domaines « universels » que l'on rencontre dans toute industrie...

La connaissance approfondie des matériaux, qui est toujours un point essentiel, concerne ici à la fois le caloporteur et les matériaux avec lesquels il est en contact (cuve et internes de cuve, pompes, échangeurs de

chaleur, joints). C'est le préalable pour dimensionner « en gros » le couple taille/puissance du réacteur, pour faire un calage du cycle thermodynamique, identifier les premiers arguments pour ou contre la solution envisagée et, évidemment, pour ensuite faire toutes les études scientifiques nécessaires.

Il s'agit d'abord de connaître les caractéristiques thermiques et mécaniques du fluide caloporteur dans le domaine de fonctionnement (température et pression), y compris les caractéristiques des changements de phase éventuels, la cinétique de changement de phase (de liquide vers solide, de liquide vers gaz, en fonction des températures en fonctionnement normal, à l'arrêt ou en situation accidentelle) et de l'impact de l'irradiation (c'est-à-dire durée du cycle d'exploitation avant déchargement et rechargement, puissance thermique spécifique, gradient thermique, taux de variation, etc.) en fonction des caractéristiques du combustible envisagé.

Il s'agit ensuite de préciser les caractéristiques des interactions entre le fluide caloporteur et les parois, notamment les caractéristiques thermohydrauliques, en particulier dans les couches limites, pour pouvoir simuler les écoulements, et notamment prendre en compte la turbulence. Les écoulements ont lieu parfois dans des zones très « confinées » ou étroites dont l'étude n'est pas facile car les hypothèses phénoménologiques usuelles faites sur la turbulence ne s'appliquent pas de façon évidente. La pertinence des représentations par des champs moyens peut se poser.

Il s'agit enfin de préciser les questions de soudabilité des matériaux envisagés pour les circuits. On sait que les procédés de soudage modifient localement les matériaux (les ZAT, zones affectées thermiquement...), ce qui peut avoir des conséquences notamment sur la résistance du matériau, son vieillissement, sa fragilité, sa résistance à la corrosion, ce qui conduit à la deuxième famille d'actions-clés.

Deuxième famille d'actions-clés : la recherche sur les corrosions ou les érosions des matériaux en interaction avec le caloporteur (et les produits qu'il transporte soit en raison des corrosions de diverses parties du circuit, soit pour assurer certaines régulations du système), avec la chimie éventuellement agressive qu'elle constitue. Son complément évident est l'étude de la chimie du fluide – modifiée par les produits de corrosion – et le contrôle de cette chimie. Il s'agit de préciser les paramètres permettant d'une part l'étude globale du fonctionnement thermohydraulique et chimique du circuit, mais aussi les phénomènes locaux tels les dépôts avec leurs lots de conséquences potentiellement nocives (ralentissements, bouchages). Ces travaux de recherche doivent concerner aussi bien le fonctionnement normal que le fonctionnement en cas de fuite, voire de brèche.

Une troisième famille d'actions de recherche concerne la simulation numérique *temps réel*. Certes les codes scientifiques progressent sans cesse tant

grâce aux progrès des connaissances scientifiques qu'aux progrès des ordinateurs. La question que l'on peut se poser pour les travaux sur les réacteurs de la génération IV est celle d'une simulation temps réel de leur fonctionnement, régulièrement recalée par des mesures – ce qui pose aussi la question de l'instrumentation. Un tel challenge n'est probablement pas inaccessible à l'horizon 2050. Il pourrait permettre de progresser en termes de qualité d'exploitation et de sûreté.

Une telle démarche est à articuler avec les besoins d'instrumentation innovante (dans et hors cœur, fibres optiques et spectroscopie laser, thermomètres ultrasonores, etc.) en fonctionnement normal pour faciliter la conduite et renforcer la sûreté et recalculer des simulations temps réel. La recherche sur de l'instrumentation post-accidentelle concerne aussi toutes les filières.

3 | Les réacteurs au sodium à neutrons rapides

C'est la famille de réacteurs rapides pour laquelle l'expérience d'exploitation mondiale est la plus forte (400 ans), mais sans les spécificités génération IV.

Conception, cœur et caloporteur

- Design du cœur pour la maîtrise de la réactivité,
- capacité à détecter des bulles de gaz,
- capacité de détection rapide d'interactions sodium/eau/air,
- choix des caloporteurs secondaires et conception des échangeurs intermédiaires et des générateurs de vapeur pour transférer de manière robuste l'énergie à la turbine¹.

Disponibilité, exploitabilité, sûreté

- Choix des aciers et matériaux de structures résistants à la fragilisation et à la corrosion sous contraintes mécaniques et thermiques au contact du sodium,

¹ Il y a aussi à prendre en compte les questions de vibrations et de stabilité des structures. En particulier sous gradient thermique puisque la qualité des échanges thermiques et les coûts poussent vers des structures minces, alors qu'une faible épaisseur est favorable à des vibrations et des instabilités. On a à faire face à une contradiction dans les stratégies qui, comme toujours dans ce cas dans les conceptions d'ingénierie, conduit à des compromis.

- conception des joints et des étanchéités pour prévenir les fuites,
- mitigation de l'activation du sodium (sodium-22...) et purification du fluide primaire (et secondaire).

Inspectabilité, maintenance

- Instrumentation dans le sodium et imagerie (ultrasons, rayons X),
- nouveaux outils de détection de fissures dans les soudures,
- nouvelles méthodes de détection des fuites de sodium, maîtrise des aérosols et des feux de sodium,
- conception de boucles d'essais sur les problématiques spécifiques du sodium.

Prévention et traitement des accidents graves

- Traitement des risques globaux et locaux de solidification du sodium et diversification
- des outils de maîtrise de la chaleur (passifs et actifs),
- choix des matériaux sacrificiels pour le cendrier de corium.

Manutention du combustible

- Recherche de nouveaux process plus simples dans le contexte du sodium.

4 | Les réacteurs au plomb

Des réacteurs de cette famille ont été construits pour les sous-marins nucléaires.

Conception, cœur et caloporteur

- Conception d'un design compact pour gérer le poids élevé (générateur de vapeur dans la cuve),
- traitement de la problématique de la chute des grappes en raison de la poussée d'Archimède dans le plomb,
- approfondissement de la connaissance des eutectiques plomb-bismuth pour les conditions de fonctionnement, et notamment la viscosité.

Disponibilité, exploitabilité, sûreté

- Développement des matériaux de structure pour maîtriser la corrosion et les risques de synergie entre fragilisation et irradiation dans le contexte du plomb,
- contrôle des films d'oxydes aux interfaces,
- maîtrise de l'érosion des pompes par le plomb,
- conception robuste des générateurs de vapeur et détection rapide des interactions plomb/eau,
- contrôle de pureté et purification du caloporteur (polonium-210, hydrogène...).

Inspectabilité, maintenance

- Instrumentation dans le plomb et imagerie (ultrasons, rayons X),
- innovation pour la détection des fuites de plomb-bismuth.

Prévention et traitement des accidents graves

- Traitement des risques globaux et locaux de solidification du plomb et diversification des outils de maîtrise de la chaleur (passifs et actifs),
- connaissance et maîtrise des accidents sévères dans le contexte du plomb en raison de sa densité.

5 | Les réacteurs à sels fondus

L'expérience sur cette technologie, outre un substantiel programme de recherche en physique, en chimie, en matériaux, tant sous irradiations que dans des boucles, a été liée à l'exploitation due au *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) conduite de 1964 à 1969 au Laboratoire national d'Oak Ridge. Les équipes concernées du CNRS ont éveillé l'intérêt de la communauté internationale vers une version à neutrons rapides des réacteurs à neutrons rapides.

Conception, cœur et caloporteur

- Optimisation de la composition du sel et design correspondant du cœur,
- maîtrise effective du potentiel redox en même temps dans la zone « froide » et la zone « chaude »,

- management des produits de fission et du tritium,
- physicochimie des interfaces entre le sel et les matériaux des structures,
- problématique du fluide intermédiaire.

Disponibilité, exploitabilité, sûreté

- Conception des joints et des étanchéités pour prévenir les fuites,
- contrôle de la chimie en exploitation,
- purge du sel et retraitement,
- management des produits de fission et du tritium,
- design des générateurs de vapeur,
- maîtrise des risques de solidification du sel.

Inspectabilité, maintenance

- Méthodes de détection des fuites de sel,
- méthodes de détection d'interactions sel/eau ou sel/vapeur,
- instrumentation innovante en service et pour réparation.

Prévention et traitement des accidents graves

- Définition des accidents sévères dimensionnant.

6 | Les réacteurs à gaz

Un élément simplificateur et un autre qui complique pour cette famille de réacteurs, dont aucun projet antérieur n'a été construit : le circuit primaire est monophasique, mais la température et la pression sont élevées.

Conception, cœur et caloporteur

- Choix de la pression primaire et design du cœur pour gérer les refroidissements en exploitation normale et accidentelle,
- intégrité du fuel jusqu'à 1 600 °C,

- phénoménologie des matériaux et notamment du SiC en cas d'accident sévère.

Disponibilité, exploitabilité, sûreté

- Matériaux de structures résistants à la pression, la température et la corrosion par l'hélium et ses impuretés – notamment utilisation de céramiques compte tenu des températures et des pressions (mais, au moins, il n'y a pas de risque de diphasique dans le primaire !),
- conception redondante et diversifiée des systèmes de sûreté (convection naturelle, systèmes actifs),
- conception et fabrication du générateur de vapeur,
- conception de tests,
- management des fissures et des ruptures,
- purification de l'hélium.

Inspectabilité, maintenance

- Instrumentation et contrôle de la pureté de l'hélium,
- détection des fuites (avant rupture LBB).

7 | Au-delà des questions scientifiques et techniques

Pour aller plus loin vers des démonstrateurs, les listes précédentes de thèmes de recherche centrées sur et autour du caloporteur doivent être complétées par bien d'autres items.

Il y a à définir le cycle du combustible et à faire les recherches et les développements nécessaires.

Plus largement, s'appuyant sur des résultats scientifiques permettant d'assurer les démonstrations nécessaires pour la sûreté, innover d'une manière audacieuse sur nombre de points, notamment technologiques, sera nécessaire : cela concerne tant les choix de conception que celui des méthodes et outils de construction, de l'existence et/ou du développement d'outils adaptés à la maintenance et à l'inspection comme on l'a dit à plusieurs reprises.

Rappelons brièvement à titre d'exemple combien les réacteurs civils et militaires actuels, à divers niveaux de puissance, ont été le fruit d'innovations audacieuses qui ont fait leurs preuves ! Il reste à faire aussi bien sinon mieux pour les réacteurs rapides du futur, d'abord pour développer puis maintenir les compétences humaines nécessaires.