

Réacteurs au **sodium** : vers de nouveaux progrès des techniques de **surveillance** et d'**inspection**

Les caractéristiques du sodium ont conduit les concepteurs des réacteurs utilisant ce caloporteur à imaginer des techniques spécifiques pour leur surveillance et leur inspection. Les réacteurs de nouvelle génération exigeront de nouveaux développements.



Le robot d'inspection MIR pour le contrôle des soudures de la cuve principale du réacteur Superphénix, ici dans l'espace compris entre cette cuve et la cuve de sécurité.

La surveillance en exploitation des centrales nucléaires, exigeant forte de l'exploitant et des autorités de sûreté, recouvre aussi bien la *surveillance* continue du réacteur en fonctionnement qu'une *inspection en service* approfondie lors des arrêts programmés. Or, le concept de **réacteur à neutrons rapides (RNR)** à **caloporteur sodium (RNR-Na)** du **Forum GEN IV**, de par la présence de **sodium** chaud (180 °C lors des arrêts), opaque et difficilement "vidangeable", présente un environnement très spécifique qui rend ces opérations délicates. Aussi, le CEA a-t-il engagé dès les années 90, en collaboration avec ses partenaires **EDF** et **Areva**, un effort de R&D spécifique sur ce thème, au-delà de la capitalisation de l'expérience acquise avec les réacteurs des générations précédentes.

Les spécificités du sodium

Le sodium présente des spécificités de plusieurs natures. D'abord, son opacité conduit à remplacer la lumière par des ondes **ultrasonores**, des ondes électromagnétiques ou des rayonnements nucléaires pour le sonder. Ensuite, son *incompatibilité à chaud avec l'oxyde du combustible*, contrairement à l'**eau légère** des réacteurs **REP**, qui peut faire évoluer une simple fissure de la **gaine** d'une **aiguille** vers une rupture franche susceptible d'entraîner un transfert de matière **fissile** vers le sodium du **circuit primaire**. Les **neutrons** différés de la fission, qui apparaissent dans des délais compatibles avec les constantes de temps liées à la circulation du sodium, permettent néanmoins une détection de rupture de gaine hors du cœur.

La **température élevée** du sodium (par rapport à l'eau légère) et son **agressivité** en termes de corrosion, en troisième lieu, ont nécessité le développement d'une instrumentation de mesure spécifique : chambres à fis-

sion⁽¹⁾, thermocouples⁽²⁾ et traducteurs à **ultrasons** à haute température (TUSHT).

Son **coefficient de vidange** susceptible d'introduire une **réactivité positive** a par ailleurs, conduit au développement de dispositifs, notamment acoustiques, de détection de l'intrusion de bulles gazeuses en mettant à profit les fluctuations dans l'atténuation des ondes ultrasonores.

Enfin, la **réactivité du sodium avec l'eau** (ou l'air), a conduit au développement de systèmes de détection d'**hydrogène** au niveau de traces autorisant un diagnostic précoce de la réaction sodium-eau.

Les exigences d'une surveillance

La surveillance en exploitation des RNR vise à en vérifier en permanence le fonctionnement sûr. Elle comprend deux volets indissociables, la *surveillance en fonctionnement* d'une part, qui permet de suivre l'état du réacteur en continu, et d'autre part l'*inspection en service*, qui recouvre l'ensemble des examens des structures importantes (principalement : bloc réacteur, circuits de sodium secondaire et échangeurs thermiques).

La surveillance du cœur

La surveillance du cœur a principalement pour but d'assurer le respect des températures maximales admissibles pour la gaine des aiguilles et pour les pastilles de combustible. Dans la plupart des réacteurs refroidis au sodium, cette fonction est

(1) chambre à fission, chambre à ionisation ou chambre de fission à ionisation : détecteur de rayonnement fondé sur l'ionisation d'un gaz par le passage de particules dans une enceinte où une différence de potentiel est appliquée entre deux électrodes qui collectent les **ions** et des **électrons** libérés. Le passage d'une particule ionisante déclenche une **avalanche électronique** dans un compteur.

(2) thermocouple : dispositif de mesure de la température (plus exactement d'une différence de température) basé sur l'**effet Seebeck** qui se traduit par l'apparition d'une différence de potentiel entre deux jonctions reliant deux fils métalliques de nature différente et dont l'une est maintenue à une température connue.

Bouchon-couvercle du cœur de Phénix, avec en partie basse la forêt des tubes de prélèvement de sodium pour la LRG et, au centre de chaque tube, le thermocouple de mesure de température en sortie de l'assemblage.



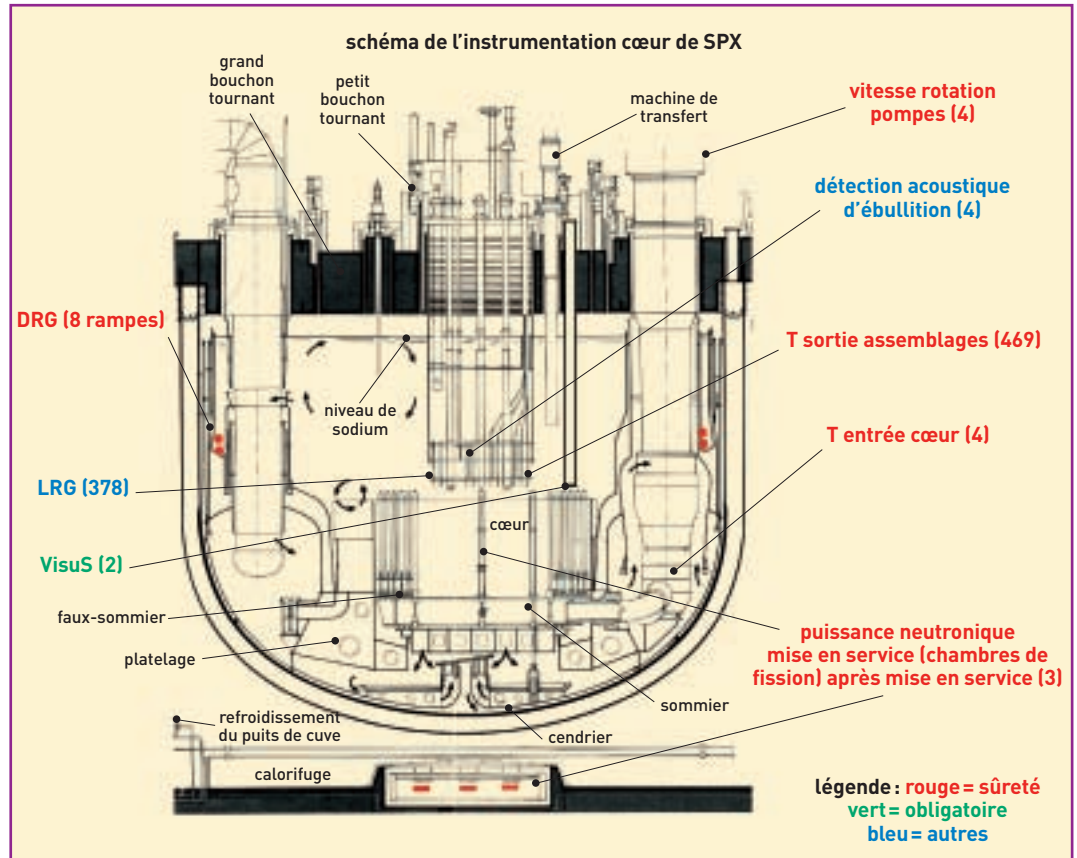


Figure 1. Instrumentation du cœur d'un réacteur à neutrons rapides sodium (exemple de Superphénix).

assurée d'une part par des mesures globales (puissance du cœur, débits ou vitesses des pompes, échauffement du sodium à la traversée du cœur) et d'autre part par des mesures individuelles de température à la sortie des assemblages. Ces dernières ont pour but de protéger le réacteur contre des incidents locaux, comme une réduction de débit d'un **assemblage** par un bouchage plus ou moins complet ou une extraction intempestive d'une **barre de commande**.

Les appareils de mesure utilisés sont des thermocouples (traitement rapide des températures du cœur), des débitmètres électromagnétiques (loi de Faraday⁽³⁾, le sodium étant conducteur de l'électricité) et des chambres neutroniques pour la puissance. Pour ces dernières, les contraintes de température et de sensibilité au flux neutronique ont conduit, par le passé, à utiliser plusieurs types de chambres – à ionisation ou à fission – pour couvrir toute la dynamique de fonctionnement (mesure de la puissance entre 1 watt et plusieurs milliers de mégawatts, soit une dizaine de décades). Ces chambres ont été placées en dehors de la zone de fortes températures du cœur et des dispositions constructives particulières ont été prises ("guides de neutrons" pour Superphénix, par exemple) pour avoir un flux neutronique suffisant. À l'avenir, il est envisagé d'utiliser des chambres à fission de grande dynamique capables de tenir à haute température afin d'en limiter le nombre et de permettre leur implantation dans la cuve du réacteur.

Cernant les mesures de température, il est nécessaire de prévoir le remplacement des thermocouples en cas de défaillance, voire de dérive. Il faut aussi pren-

dre en compte l'hydraulique au-dessus du cœur, afin de pouvoir garantir la représentativité des mesures.

La détection de rupture de gaine

Un système de mesure supplémentaire, appelé "détection de ruptures de gaines" (DRG), intervient si une gaine a subi un dommage. Même une petite fissure va permettre au sodium d'entrer en contact avec le combustible et, par conséquent, d'entraîner à l'extérieur certains **atomes radioactifs** qui peuvent émettre des neutrons lors de leur **décroissance** radioactive. Ces atomes seront entraînés par le sodium dans tout le circuit primaire, ce qui permettra leur détection par comptage neutronique. La sensibilité de ce dispositif permettra d'arrêter le réacteur avant que le dommage au combustible ne conduise à une perte significative de matière **fissile**. Le système "classique" consiste à aspirer un peu de sodium dans un endroit judicieusement choisi dans le collecteur chaud du circuit primaire et à le faire passer devant des compteurs. Une alternative envisagée prévoit de plonger des chambres à fission directement dans le sodium, afin d'économiser le circuit de prélèvement et de gagner sur le temps de réaction du système. Le même dispositif permettrait de détecter des détériorations plus graves, dans lesquelles la matière fissile serait susceptible d'être relâchée en quantité significative. L'arrêt d'urgence du réacteur serait alors déclenché automatiquement.

Les systèmes d'aide à l'exploitation

Tous ces systèmes ont un rôle de sûreté. Ils sont reliés au système d'arrêt d'urgence du réacteur. Il existe, de plus, des systèmes qui ne provoquent pas d'arrêt et dont la vocation est de protéger l'investissement ou de réduire les coûts d'exploitation. C'est le cas du système

(3) Loi de Faraday : un champ magnétique qui varie peut induire un champ électrique à l'origine d'un courant électrique dont la tension est fonction du taux de changement du champ.

de localisation des ruptures de gaines (LRG), qui permet de savoir quel est l'assemblage qui présenterait une fissure. Le principe est identique à celui de la DRG, mais ici, un petit débit de sodium est prélevé directement à la sortie de chaque assemblage. Un autre système d'aide à l'exploitation, le VisuS (visualisation en sodium) est une version simplifiée de ce qui est envisagé pour l'inspection en service. Il permet, par une technique d'impulsion-écho ultrasonore, de détecter la présence inopinée de liaisons mécaniques entre les bouchons tournants et le cœur, au moment de les tourner. Les versions opérationnelles utilisent des transducteurs à ultrasons placés à des températures modestes (40 °C), et des guides d'ondes liquides, remplis de NaK (mélange de sodium et de potassium liquide à 40 °C). Le tout reste en place, même quand le réacteur est à pleine puissance. Le CEA a développé des transducteurs à ultrasons à haute température (TUSHT) résistant à plus de 550 °C, qu'il est envisagé d'utiliser à même le sodium.

L'idée "d'écouter" les sons émis par certains événements incidentels conduit à développer actuellement des systèmes de "détection acoustique". Sont ainsi visées l'ébullition du sodium dans le cœur, la réaction entre le sodium et l'eau en cas de défaut de tube(s) de générateurs de vapeur et les défaillances mécaniques conduisant à des chocs. On envisage aussi de mettre à profit l'atténuation des ultrasons par la présence de bulles dans le sodium pour détecter une intrusion de gaz. Enfin, un système de détection d'hydrogène est capable de détecter des traces d'hydrogène issu d'une réaction sodium-eau. Le capteur traditionnel, constitué d'une membrane de nickel qui sépare le sodium d'un espace où un appareil mesure le débit d'hydrogène

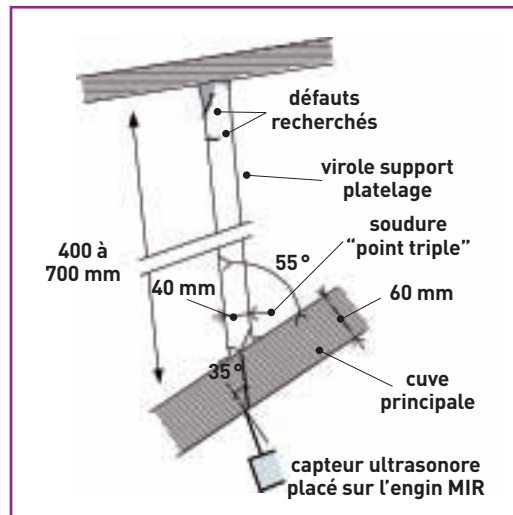


Figure 2. Contrôle de la virole support platelage de Superphénix.

qui arrive, met à profit le fait que l'hydrogène diffuse facilement à travers le nickel. Un système de sonde électrochimique, en cours de développement, peut offrir une alternative.

Les critères de l'inspection en service

Effectuée lors des arrêts du réacteur, l'inspection en service comprend des contrôles globaux (mesures télémétriques) et locaux (contrôle non destructif de soudures). Ayant historiquement débuté par l'examen des soudures de la cuve principale de Superphénix, l'inspection en service des RNR s'est étendue à bien d'autres structures du bloc réacteur (figure 1) et au-delà de ce dernier.

Réacteur "intégré" et réacteur "à boucles" : des conditions de maintenance équivalentes

Un des paramètres importants qui conditionnent les possibilités de maintenance du bloc réacteur est l'accessibilité des structures. Existe-t-il, de ce point de vue, une grande différence entre les deux grandes configurations de **RNR-Na, réacteur intégré ou réacteur à boucles** ?

À première vue, le fait que dans ce dernier le **circuit primaire** circule au-delà de la cuve principale rend son accès plus facile pour la maintenance. Cependant, ce circuit véhiculant en fonctionnement du sodium **actif** et étant potentiellement contaminé en cas d'accident, il est impératif d'en assurer un confinement adéquat, ce qui limite d'autant l'accès aux structures internes. L'utilisation de liaisons soudées accentue encore ce phénomène.

Dans un réacteur à boucles, les structures du circuit primaire doivent, de plus, faire l'objet d'une surveillance accrue car leur défaillance aurait des conséquences plus importantes que si elles se trouvaient confinées en cuve. Cela se traduit notamment par l'augmentation des longueurs de soudures à inspecter mais aussi par l'utilisation de tuyauteries double enveloppe pour le circuit primaire. En effet, la sûreté impose que l'enveloppe externe soit capable de reprendre les fonctions de confinement de l'enveloppe interne ; elle doit donc être, de fait, parfaitement étanche. Les possibilités d'inspection et de main-

tenance de l'enveloppe interne en sont réduites d'autant.

En revanche, la maintenance des pompes primaires et des échangeurs intermédiaires semble facilitée dans le cas d'un réacteur à boucles car ces composants sont placés dans des cuves annexes plus petites que la cuve principale du concept intégré. Les aménagements facilitant la maintenance (augmentation du diamètre de l'ouverture supérieure, accès latéral...) sont plus aisés à mettre en œuvre dans le cas d'une cuve annexe de taille réduite. Pour ce qui concerne la cuve principale, ses internes et les composants du système de conversion d'énergie, les problématiques d'inspection et de maintenance sont assez similaires dans les deux types de réacteurs. En effet, l'optimisation de la cuve principale conduit à réduire au maximum son diamètre, ce qui ne simplifie pas la maintenance. En conclusion, les modalités de maintenance des deux concepts sont assez similaires : l'avantage acquis pour les pompes et échangeurs du système à boucles est modéré par l'existence des tuyauteries externes à double enveloppe du circuit primaire, les cuves primaires présentant des possibilités de maintenance équivalentes.

> **Olivier Descombin**

Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Cadarache

La procédure recense pour chaque organe les modes de défaillance envisagés (fissuration, rupture, déformation progressive, etc.) et définit deux seuils de déformation particuliers; un *seuil* d'alarme, dit "*de notation*", rendant compte d'une défaillance non critique et, un *seuil* maximal, dit "*d'acceptabilité*", associé au niveau A des Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires RNR (RCC-MR). Pour chaque structure, le dommage potentiel calculé est ensuite associé à la gravité du risque de sa défaillance vis-à-vis de sa fonction de sûreté. Peuvent être ainsi cernés les éléments névralgiques du réacteur pour lesquels la R&D devra démontrer la faisabilité des procédés qui, une fois industrialisés et mis en œuvre sur site, permettront de mesurer les seuils de notation et d'acceptabilité.

L'inspection des structures par le contrôle non destructif

Il a fallu développer des techniques pour l'inspection volumique (au sein de la matière) des structures internes immergées dans le sodium. Un robot a ainsi été en son temps développé pour le contrôle depuis l'intercuve, c'est-à-dire hors du milieu sodium, des soudures de la cuve principale de Superphénix. Les capteurs ultrasonores utilisés (appelés *traducteurs*), en matériau composite, voient leur focalisation directement assurée par une mise en forme d'une pastille piézo-électrique. Leurs performances en détection et en dimensionnement dépendent de leur sensibilité et de leur amortissement. Un outil d'aide à l'analyse des résultats modélise les échos liés au profil des soudures, évalue l'influence de la géométrie locale sur la réponse d'un défaut et prend en compte la structure **anisotrope** et hétérogène des soudures.

Figure 3. Traducteur multi-éléments pour le contrôle des soudures bord à bord de la cuve principale.

Vers un contrôle *in situ* des structures internes de cuve

Pour les structures internes de la cuve, baignées par le sodium liquide, aucun contrôle non destructif *in situ*

n'existe à ce jour. Leur développement constitue la prochaine étape: il s'agit notamment de trouver des matériaux adaptés à la fois au sodium et aux ultrasons. Le contrôle d'une paroi métallique immergée dans le sodium liquide est d'ores et déjà possible, la tôle inspectée jouant le rôle de guide des ondes ultrasonores (figure 2). Le contrôle de la virole conique de Phénix, en 2000, a ainsi pu être réalisé avec succès. Piste de progrès importante, l'utilisation de traducteurs multi-éléments pour le contrôle des soudures de la cuve permet de modifier les paramètres de focalisation du faisceau selon la géométrie ou l'épaisseur à contrôler. Cette optimisation du traducteur à chaque configuration permet d'améliorer la caractérisation et le dimensionnement des défauts et de réduire les effets perturbateurs de la géométrie. Un traducteur a été conçu et réalisé sur cette base (figure 3): en adaptant les lois de retard de chacun de ses 32 éléments ultrasonores, il est possible d'obtenir différents angles d'incidence (45 ou 70 °) et des profondeurs de focalisation variables.

D'autres méthodes sont envisagées, comme le contrôle de la cuve principale fondé sur la détection du **radioisotope** ^{24}Na – présent dans le sodium primaire – par spectrométrie gamma.

Les techniques d'inspection en sodium

Des travaux de R&D ont été engagés dans le but de développer les moyens nécessaires à une inspection volumique des structures internes en sodium.

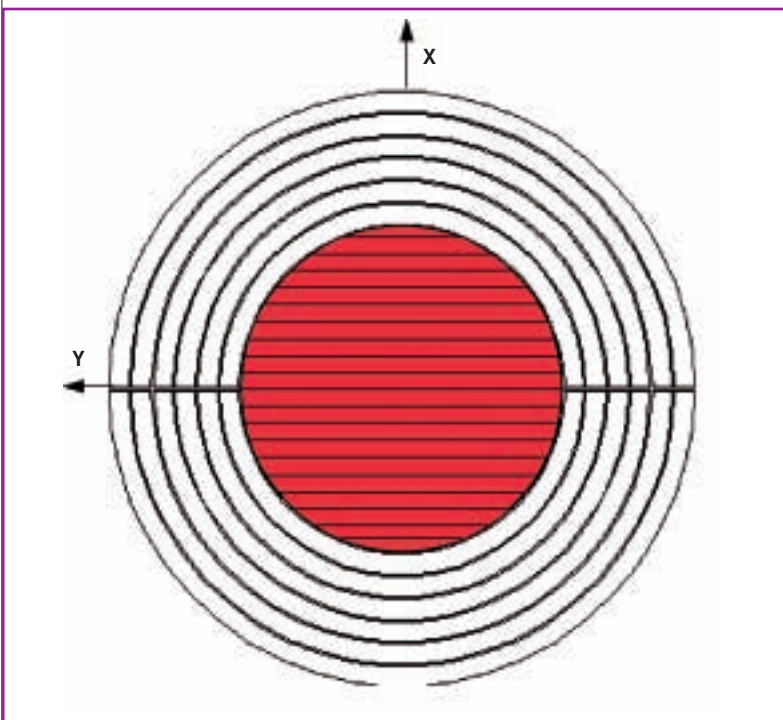
Deux méthodes de contrôle non destructif ont été envisagées. La première, électromagnétique, utilise des traducteurs EMAT (*Electro-Magnetic Acoustic Transducers*) qui doivent permettre de générer des ultrasons dans le sodium par courants de Foucault⁽⁴⁾. La deuxième méthode utilise des traducteurs piézo-électriques en matériau composite. Il s'agit d'en développer qui soient chimiquement et acoustiquement compatibles avec le sodium. Une méthode utilisant des traducteurs multi-éléments est également en cours de développement. L'objectif? Mettre au point une méthode qui permette de sonder tout le volume à inspecter lorsque les possibilités de translation du traducteur sont limitées.

Visualisation par ultrasons en sodium

La visualisation dans le sodium répond à trois nécessités: aider un porteur d'appareillages d'inspection à se positionner dans le réacteur, déterminer si un objet manque (et le rechercher) et réaliser des métrologies à distance.

Pour "voir l'invisible", les ultrasons (fréquence de l'ordre du MHz) sont bien adaptés avec un coefficient d'atténuation d'environ 0,1 dB/m. Dans sa version la plus simple, un sonar⁽⁵⁾ actif comporte un seul traducteur qui émet une

Traducteurs multi-éléments piézoélectriques en composites.



onde, la reçoit après réflexion sur les structures et délivre enfin un signal électrique. La "réflexion" sur une structure métallique comporte en réalité trois composantes qui s'ajoutent pour constituer le signal reçu (figure 4). Ce sont, par ordre décroissant d'amplitude, trois types d'échos. L'écho spéculaire avec un délai par rapport à l'émission, ne dépend, en première approche, que de la distance entre le traducteur et le point de la structure le plus proche. L'écho de diffraction de bord de structure permet, comme son nom l'indique, d'en localiser les arêtes. L'écho rétrodiffusé, enfin, est généré par chaque point de la structure, à condition que la rugosité locale ne soit pas trop petite devant la longueur d'onde.

Dans la vision par ultrasons, on cherche à utiliser l'énergie acoustique rétrodiffusée pour localiser et voir en trois dimensions les objets (Il existait déjà, dans Phénix et Superphénix, les systèmes VisuS utilisant l'écho spéculaire: voir plus haut).

Un système de vision sous sodium a été conçu, qui comporte deux "antennes" perpendiculaires, l'une émettrice, l'autre réceptrice (figure 5). Leurs zones focales sont approximativement deux lignes, respectivement horizontale et verticale, à l'intersection desquelles se situe le point de l'espace sondé par le système. Pour pouvoir déplacer ce point dans les trois dimensions de l'espace, les antennes sont découpées en éléments, équipés chacun d'une électronique permettant une focalisation dynamique et on joue sur les lois de retard entre éléments.

Des calculs d'ordre de grandeur du rapport entre l'écho rétrodiffusé et l'écho spéculaire, pour ce type de système et pour des hauteurs d'aspérités attendues de l'ordre de 10 μ m, ont indiqué que la séparation entre ces échos est possible mais malaisée. Pour confirmer ce point et savoir si les faibles échos de diffusion "sortent" du bruit électronique, des essais en eau ont été réalisés dans le bac à ultrasons Navire (figure 6). L'émission est faite avec une grande antenne mono-élément permettant de générer une ligne de focalisation à la distance typique de 2 m. La figure 7 présente l'image "B-scan" donnée par le système dans le cas d'une plaque plane de 700 mm de côté, placée à cette distance des antennes.

Les antennes émettrice et réceptrice devront être adaptées aux contraintes d'environnement dues au sodium et les électroniques d'émission et de réception, à focalisation dynamique, adaptées à la configuration "orthogonale" choisie. Le traitement des images pourra aussi être amélioré, afin de réduire les défauts dus au scintillement et aider ainsi à la reconnaissance et à la métrologie des objets.

L'inspection du ciel de pile par télémétrie laser

Là où le sodium liquide est surmonté d'un gaz neutre (argon en général), il est possible de réaliser des

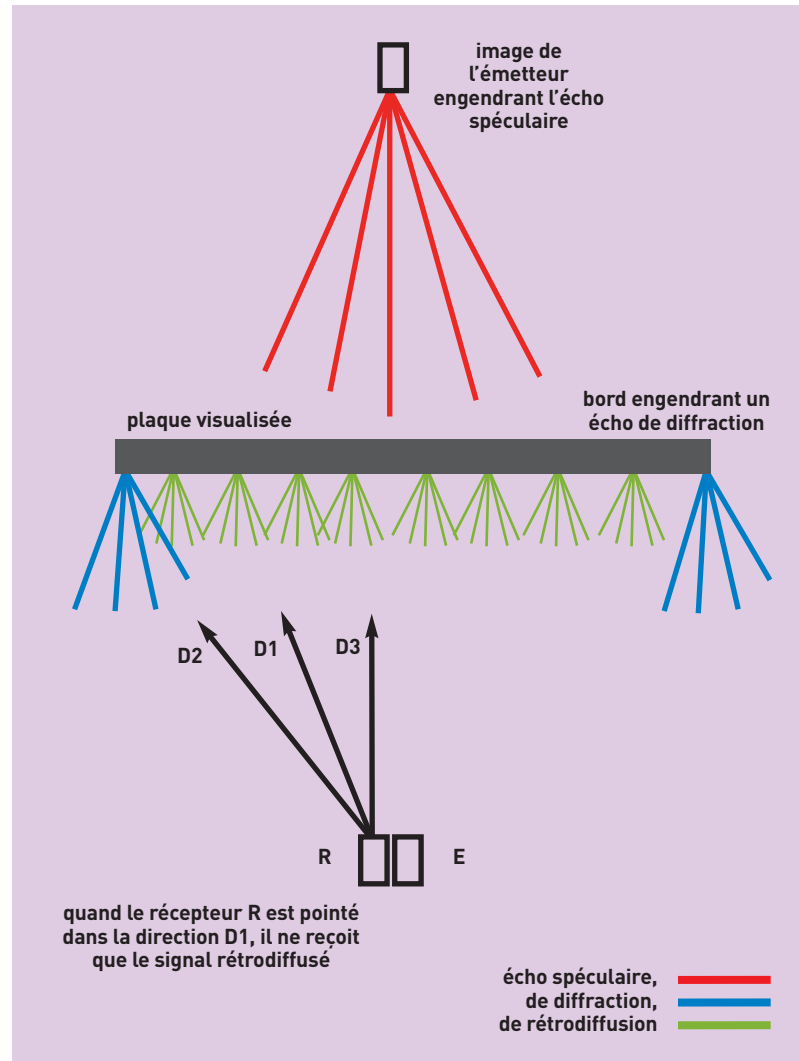


Figure 4. Échos ultrasonores. La "réflexion" sur une structure métallique comporte en réalité trois composantes qui s'ajoutent pour constituer le signal reçu.

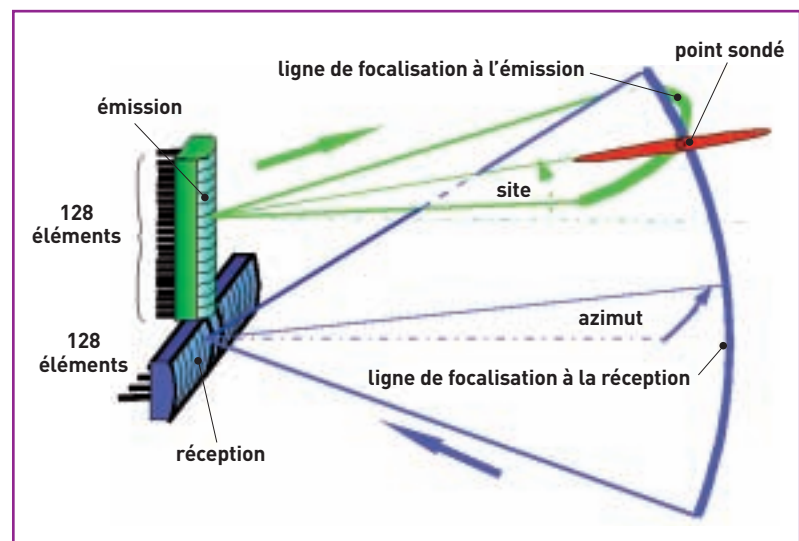


Figure 5. Imagerie ultrasonore orthogonale. Les caractéristiques d'une telle "caméra" pourraient être les suivantes : L = 500 mm ; nombre d'éléments par antenne = 128 ; ouverture de l'image = 30°, soit 1020 mm à 2 m de distance ; fréquence 1,6 MHz ($\lambda = 1,5$ mm) ; résolution longitudinale $r = 4$ mm et résolution angulaire $\theta = 0,33^\circ$ (soit $y = 11$ mm à 2 m de distance) ; temps d'acquisition d'une image [solution analogique] sectorielle (= une tranche) $t = 65$ ms ; complète (= 64 images sectorielles) $64 t = 4$ s.

(4) courants de Foucault: courants induits qui prennent par exemple naissance dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique constant ou dans un solide métallique immobile soumis à une variation de champ magnétique. Entre autres applications, ils sont utilisés dans le contrôle non destructif des surfaces conductrices, permettant en particulier d'évaluer des discontinuités sur ou sous la surface, la densité et l'épaisseur d'une paroi.

(5) sonar: acronyme de *Sound Navigation and Ranging*, appareil de localisation des objets qui utilise la propagation des ondes sonores et leur réflexion par ces objets.

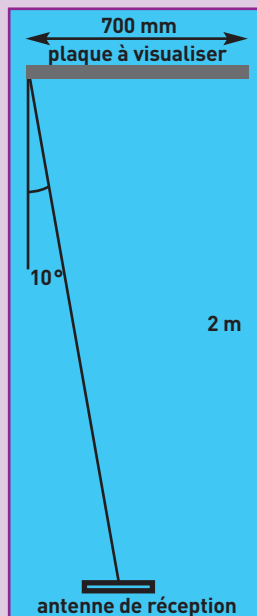
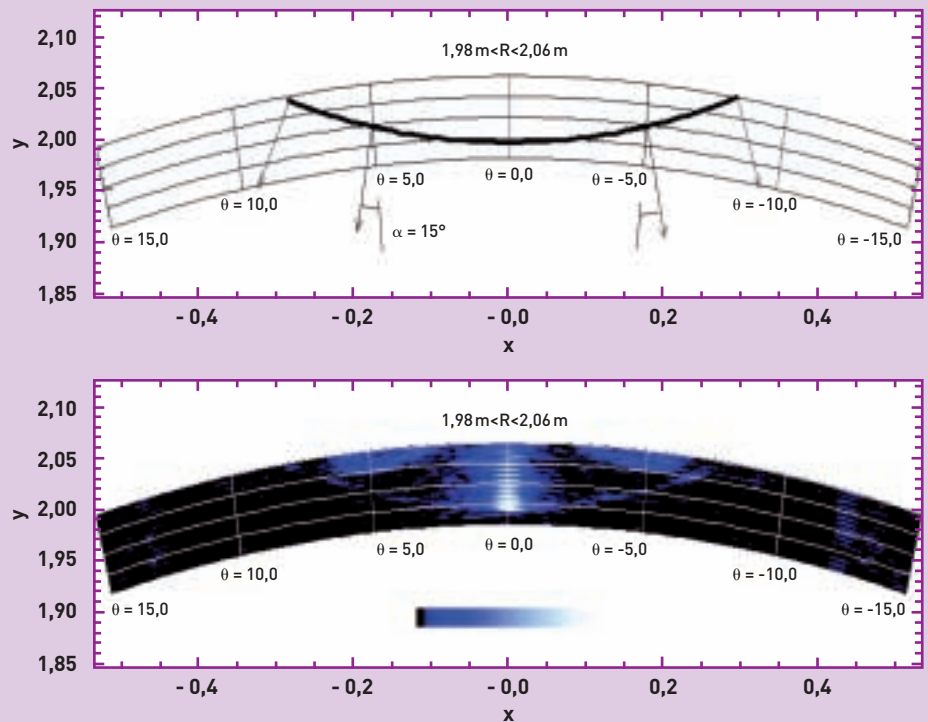


Figure 6. À gauche. Bac à ultrasons en eau Navire.

Figure 7. À droite. Image B-scan obtenue en eau dans Navire. Tous les points de la plaque sont visibles, avec un éblouissement dû à l'écho spéculaire au point le plus proche des antennes (ici, le centre de la plaque) et une surintensité au bord de la plaque, due aux échos de diffraction de bord.



contrôles. Plusieurs procédés peuvent être utilisés pour réaliser des mesures de distance dans les ciels⁽⁶⁾ de RNR lors des arrêts. La télémétrie laser constitue *a priori* la technique la plus précise et la plus simple à mettre en œuvre. Il convient toutefois d'évaluer les incertitudes associées à cette mesure et de définir une méthodologie d'inspection. En effet, plusieurs phénomènes peu-

(6) ciel de pile: partie supérieure du circuit primaire du réacteur située entre le niveau libre de sodium et la dalle de fermeture de la cuve, cet espace de 1 à 2 mètres de hauteur étant rempli d'un gaz neutre (argon).

(7) aérosol: suspension dans un gaz (ou un mélange de gaz) de particules liquides ou solides très fines.

vent perturber la propagation du faisceau lumineux: gradients et fluctuations thermiques d'une part, dépôts et aérosols⁽⁷⁾ de sodium d'autre part.

La démarche retenue consiste à modéliser indépendamment les facteurs d'origine thermique et l'influence de la présence d'aérosols. L'étude de l'influence de dépôts de sodium sur les surfaces visées fait uniquement l'objet d'expériences. Des tests en boîte à gants ont permis de définir les conditions possibles de mesures sur des surfaces recouvertes de sodium (gouttelettes, film), selon leur état (rugosité) et selon les angles d'incidence du faisceau laser.

Des essais sur l'installation Fructidor de Cadarache ont permis d'observer les effets de la présence d'aérosols de sodium sur la propagation du rayon lumineux. La synthèse de ces résultats permet d'établir la spécification du matériel de télémétrie et de préciser la méthodologie de son exploitation.

Les perspectives de la R&D pour la Génération IV

Depuis quinze ans, la R&D sur l'inspection a permis de répondre aux besoins concrets des RNR existants. Désormais, la prise en compte de "l'inspectabilité" dès la phase de conception des réacteurs de nouvelle génération va permettre d'optimiser les contrôles en cherchant une meilleure accessibilité aux zones à inspecter et une meilleure "démontabilité" des composants. Le développement de capteurs et de méthodes toujours plus performants laisse augurer la possibilité d'inspecter au sein même du caloporteur sodium liquide.

► **François Baqué, Jean-Luc Berton et Marc Vanier**
 Direction de l'énergie nucléaire
 CEA Centre de Cadarache

Deux types de traducteurs à ultrasons à haute température (TUSHT).



H-mètre pour la détection de l'hydrogène. L'hydrogène éventuellement contenu dans le sodium qui circule dans les quatre tubes en nickel diffuse à travers ce métal et se retrouve dans l'espace sous vide autour des tubes où un spectromètre mesure sa concentration.



Les éléments d'un système nucléaire

Un **système nucléaire** est formé par un **réacteur nucléaire** et le **cycle du combustible** associé. Il est optimisé globalement dans sa mise en œuvre industrielle, de la matière première au déchet. Dans un tel système dont il est le pivot, le réacteur est rendu apte à **recycler** le combustible afin de valoriser les matières **fissiles** (**uranium**, **plutonium**), voire **fertiles** (**uranium**, **thorium**) et à minimiser, par **transmutation**, la production de déchets à **vie longue** en **incinérant** en grande partie ses propres déchets, en l'occurrence les **actinides mineurs (AM)**. Certains systèmes peuvent aussi inclure des unités de **traitement** en ligne.

Le réacteur proprement dit, quelle que soit la **filière** à laquelle il appartient (Mémo B, *Filières, générations et spec-*

tissent les neutrons par *diffusions élastiques*. Il doit être peu **capturant** afin de ne pas les "gaspiller" et suffisamment dense pour assurer un ralentissement efficace. Les réacteurs à **spectre thermique** (Mémo B) en ont besoin, contrairement aux réacteurs à **spectre rapide** (qui doivent en revanche compenser la faible probabilité de fissions induites par les **neutrons rapides** par une forte augmentation du nombre des dits neutrons, afin de ralentir les neutrons après la fission dont ils sont issus). Ils sont ainsi amenés à la vitesse optimale pour assurer à leur tour de nouvelles fissions. Un exemple de modérateur est le graphite, utilisé dès la première "pile" atomique, en 1942 en association avec un fluide **caloporteur** gazeux.

Le fluide caloporteur évacue du cœur l'énergie thermique dégagée par les fissions et transporte les calories vers les systèmes qui mettront cette énergie sous une forme utilisable, en général l'électricité. Le caloporteur est soit l'eau⁽¹⁾ dans les "réacteurs à eau" (celle-ci y joue également le rôle de modérateur), soit un métal liquide (sodium ou plomb), soit un gaz (historiquement le gaz carbonique, puis l'hélium, dans les **réacteurs à caloporteur gaz (RCG)** ou encore des **sels fondus**). Dans ce dernier cas, combustible et caloporteur forment un fluide unique, qui offre la possibilité de pouvoir **retirer** en continu les matières nucléaires puisque les actinides y seraient dissous.

Le choix d'une filière à des répercussions majeures sur le choix des matériaux (Mémo E, *Les grandes familles de matériaux nucléaires*, p. 76). Ainsi, le cœur des réacteurs à neutrons rapides ne doit pas comporter d'éléments modérateurs des neutrons (eau, graphite) et leur caloporteur doit être transparent à ces mêmes neutrons.

Des dispositifs de contrôle (d'une part des **barres de commande**, **barres de contrôle** ou **barres de pilotage** et d'arrêt constituée de matériaux absorbeurs de neutrons [bore, cadmium...], et d'autre part des "**poisons**" **neutroniques**) permet-

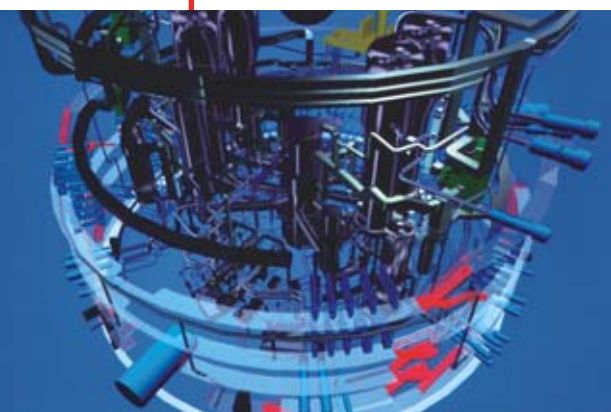
tent de réguler la population des neutrons et, par là même, en influant sur sa **réactivité**, de maintenir la puissance du réacteur au niveau désiré, voire d'arrêter la réaction en chaîne. Les barres, ensemble de tiges solidaires mobiles (appelées **grappes**) sont introduites plus ou moins profondément dans le cœur. Les poisons sont, pour leur part, ajustables en concentration dans le circuit de refroidissement.

Un **circuit primaire** fermé et étanche contient le cœur et véhicule (au moyen de **circulateurs**, pompes ou compresseurs) le caloporteur qui transfère sa chaleur à un **circuit secondaire** via un **échangeur de chaleur** qui peut être un **générateur de vapeur** (c'est le cas aussi bien dans un réacteur à eau sous pression que dans le circuit secondaire d'un **réacteur à neutrons rapides** comme Phénix). La **cuve**, récipient contenant le cœur d'un réacteur baigné par son fluide caloporteur, constitue, lorsqu'elle existe, la partie centrale de ce circuit primaire.

Le circuit secondaire sort de "l'îlot nucléaire" pour faire fonctionner *via* une turbine un turboalternateur ou alimenter un réseau de chaleur. Dans les réacteurs à **eau lourde**⁽¹⁾ et dans certains réacteurs à gaz, la chaleur est transmise du gaz à l'eau dans des échangeurs de chaleur classiques.

Un **circuit tertiaire** évacue la chaleur inutilisée *via* un **condenseur** vers une source froide (eau d'un fleuve ou de la mer) ou air dans une tour de refroidissement ou encore un autre dispositif thermique (par exemple pour la production d'hydrogène).

D'autres éléments n'interviennent que dans une filière donnée, comme le **pressuriseur des réacteurs à eau sous pression (REP)** où la pressurisation maintient l'eau à l'état liquide en l'empêchant de bouillir. L'ébullition est en revanche mise à profit dans les **réacteurs à eau bouillante (REB)**, l'autre filière de **réacteurs à eau légère (REL)**, où l'eau du circuit primaire entre en ébullition et entraîne directement la turbine.



Areva NP

Image virtuelle en 3D des composants et circuits d'un réacteur de type REP.

tres neutroniques, p. 14) comprend les mêmes éléments principaux (du moins dans le domaine de la **fission**, les réacteurs à **fusion** mettant en jeu des processus nucléaires totalement différents). Le **cœur**, région où sont entretenues les **réactions en chaîne**, reçoit le **combustible** qui contient les matières fissiles énergétiques (**noyaux lourds**) ainsi que des matières fertiles qui, sous l'action des **neutrons**, se transformeront partiellement en matières fissiles. Le combustible peut prendre différentes formes (**pastilles**, boulets, particules) et les **éléments combustibles** peuvent être rassemblés en **crayons**, en **aiguilles** ou en plaques, eux-mêmes réunis en **assemblages**, ce qui est notamment le cas dans les réacteurs à eau.

Le **modérateur** joue, lorsqu'il est nécessaire, un rôle essentiel. C'est un matériau formé de **noyaux légers** qui ralenti-

(1) L'*eau lourde*, dans laquelle le **deutérium** tient la place de l'**hydrogène** de l'eau ordinaire, a été la première forme de modérateur utilisée pour les concepts de réacteurs qui imposent de très faibles absorptions des neutrons. L'*eau légère* s'est imposée pour les réacteurs opérationnels de deuxième génération. Dans l'avenir, l'*eau supercritique*, dont les propriétés thermodynamiques et de transport changent lors du passage du point critique (température de 374 °C pour une pression supérieure à 22 MPa (221 bars, soit environ 200 fois la pression atmosphérique) pourrait être mise en œuvre afin d'améliorer le **rendement de Carnot** du réacteur (Mémo C, *Cycles thermodynamiques et conversion d'énergie*, p. 23).

Filières, générations et spectres neutroniques

Les filières de réacteurs nucléaires correspondent aux nombreuses combinaisons de trois éléments fondamentaux : un **caloporteur**, un **modérateur** (lorsque nécessaire) et un **combustible**, presque toujours l'**uranium**, éventuellement mélangé à du **plutonium** (voir Mémo A, *Les éléments d'un système nucléaire*, p. 10).

De très nombreuses formules ont été expérimentées depuis les débuts de l'ère nucléaire industrielle dans les années 1950, et seulement un petit nombre d'entre elles ont été sélectionnées pour les différentes générations de réacteurs opérationnels électrogènes.

On appelle ainsi **filière** une voie possible de réalisation de réacteurs nucléaires capables de fonctionner dans des conditions de sécurité et de rentabilité satisfaisantes, définie essentiellement par la nature du combustible, l'énergie des **neutrons** impliqués dans la **réaction en chaîne**, la nature du modérateur et celle du caloporteur.

Elle mérite ce nom dans la mesure où elle est à l'origine d'une série de réacteurs présentant une continuité technologique. Se rattachent plus ou moins directement à telle ou telle filière les réacteurs de recherche et d'essais, rarement construits en série.

Ces filières sont classées en deux grandes familles, selon le **spectre neutronique** choisi : **thermique** ou **rapide** (une plage recouvrant en partie les deux domaines est possible



M. Brigauf / EDF Médiathèque

Les quatre tranches REP de la centrale EDF d'Avoine, près de Chinon, appartiennent à la deuxième génération de réacteurs nucléaires.

pour des réacteurs de recherche), suivant qu'on laisse les neutrons qui s'échappent directement lors de la **fission** conserver leur vitesse de quelque 20 000 km à la seconde ou qu'on les ralentit afin de les mettre en équilibre thermique (les **thermaliser**) avec la matière dans laquelle ils diffusent. Le spectre neutronique, distribution en énergie de la population des neutrons présents dans le **cœur** d'un réacteur, est ainsi le **spectre thermique** dans la quasi-totalité des réacteurs en service dans le monde, notamment en France, dans les 58 **REP (réacteurs à eau sous pression)** du parc **EDF**. Dans ces réacteurs fonctionnant à l'**uranium enrichi** et éventuellement au **plutonium**, la chaleur

est transférée du cœur à des **échangeurs de chaleur** par de l'eau maintenue sous une pression élevée dans le **circuit primaire**.

Avec les REB (réacteurs à eau bouillante) dans lesquels l'ébullition de l'eau se fait directement dans le cœur, les REP constituent la grande famille des **réacteurs à eau légère (REL)** dans lesquels l'eau ordinaire joue à la fois le rôle de caloporteur et de modérateur.

La mise en œuvre du **spectre rapide** est, actuellement, limitée à un petit nombre de réacteurs à vocation essentiellement expérimentale, comme Phénix en France, Monju et Joyo au Japon ou BOR-60 en Russie. Dans ces **RNR (réacteurs à neutrons rapides)** sans

modérateur, la majorité des **fissions** sont produites par des neutrons présentant des énergies du même ordre de grandeur que celle qu'ils possèdent lors de leur production par fission. Quelques réacteurs de ce type ont été réalisés avec une vocation de production industrielle (Superphénix en France, BN 600 en Russie) ou étudiés dans cette optique (principalement **EFR** au niveau européen dans les années 80-90, BN 800 en Russie, CEFR en Chine et PFBR en Inde).

Les réacteurs électrogènes sont regroupés en quatre générations. La **première génération** comprend les réacteurs, développés dans les années 50/70, qui ont permis le décollage de la production électronucléaire dans les différents pays développés, en particulier de la filière **UNGG (Uranium Naturel Graphite Gaz)** modérés au graphite et refroidis au gaz carbonique en France, de la filière **Magnox** au Royaume-Uni et, aux États-Unis, le premier réacteur terrestre⁽¹⁾ à eau sous pression (**PWR**, Pressurized Water Reactor) construit à Shippingport.

Bien que comparable par certains côtés à des réacteurs de première génération, la filière soviétique **RBMK** (celle des réacteurs de Tchernobyl) est classée dans la seconde génération du fait en particulier de sa période de mise en service. Les RBMK, modérés au graphite et refroidis à l'eau ordinaire bouillante dans des tubes de force, ont été définitivement disqualifiés par l'accident de Tchernobyl en 1986.

(1) Aux États-Unis comme en France, les premiers réacteurs à eau sous pression ont été des réacteurs destinés à la propulsion navale (sous-marins).

La **deuxième génération** est celle des réacteurs, actuellement en service, entrés en fonctionnement entre les années 70 à 90. Exclusivement à vocation électrogène, la plupart (87 % du parc mondial) sont des réacteurs à eau, à l'exception notable des **AGR** (Advanced Gas Reactor) britanniques. Leur combustible standard est formé de **pastilles frittées d'oxyde d'uranium enrichi** aux environs de 4 % en uranium 235, empilées dans des tubes étanches (**crayons**) qui, réunis en faisceaux, forment des **assemblages**. Les PWR (REP en français) dominent le marché, représentant 3 réacteurs nucléaires sur 5 dans le monde. En font partie les différents "paliers" de réacteurs REP réalisés en France pour EDF par Framatome (aujourd'hui **Areva NP**). Les réacteurs russes de la série **VVER** 1000 sont comparables aux REP occidentaux. Bien que moins nombreux que les REP, les **BWR** (Boiling Water Reactor) ou **REB** (réacteurs à eau bouillante) se trouvent notamment aux États-Unis, au Japon ou en Allemagne. Enfin les réacteurs à uranium naturel de type **Candu**, de conception canadienne, et leurs équivalents indiens se maintiennent activement. Ce sont également des réacteurs à eau sous pression, mais utilisant l'**eau lourde** (D₂O) comme modérateur et caloporteur d'où le nom **PHWR** (Pressurised Heavy Water Reactor) donné à cette filière. La **troisième génération** correspond à des installations qui commencent à être mises en chantier en vue d'une mise en service à partir de 2010 environ. Elle comprend en particulier l'**EPR** franco-allemand conçu par Areva NP (Framatome et Siemens à l'origine),

qui propose également un réacteur à eau bouillante, le SWR 1000 et qui s'est récemment rapproché du Japonais Mitsubishi Heavy Industries. Elle comporte aussi les AP1000 et AP600 de Westinghouse, société dont Toshiba a pris le contrôle, l'ESBWR et l'ABWR II de General Electric, qui s'associe à Hitachi, les ACR canadiens et l'AES 92 russe, ainsi que des projets de petits réacteurs intégrés. Les projets de **réacteurs à haute température** modulaires du type GT-MHR (projet international) ou PBMR (du Sud-Africain Eskom) appartiennent à la troisième mais peuvent préfigurer des réacteurs de **quatrième génération**.

La quatrième génération en cours d'étude, attendue vers 2040 sur un plan industriel, pourrait théoriquement faire appel à l'un ou l'autre des six concepts retenus par le **Forum international Génération IV** (voir l'encadré de *Les enjeux d'une production durable d'énergie*, p. 6). En dehors de l'utilisation électrogène, les réacteurs de cette génération pourraient être aptes à la **cogénération** d'électricité et de chaleur, voire présenter pour certains d'entre eux une vocation exclusivement calogène, en vue d'obtenir, soit une chaleur "basse température" (vers 200 °C) pour le chauffage urbain, soit une chaleur "moyenne température" (entre 500 et 800 °C) pour des applications industrielles dont le dessalement d'eau de mer n'est qu'une possibilité parmi d'autres, soit encore une chaleur "haute – voire très haute – température" (entre 1000 et 1200 °C), pour des applications spécifiques comme la production d'**hydrogène**, la gazéification de la **biomasse** ou le craquage d'**hydrocarbures**.

Cycles thermodynamiques et conversion d'énergie

Pour convertir à grande échelle de la chaleur en électricité, il faut mettre en œuvre un **cycle thermodynamique**. Le rendement η de la conversion est toujours inférieur au **rendement de Carnot** :

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

où T_c est la température de la source chaude et T_f la température de la source froide.

D'une manière générale, on distingue en matière de conversion d'énergie le **cycle direct**, dans lequel le fluide issu de la source chaude actionne directement le dispositif utilisateur (turbo-alternateur par exemple) et, par opposition, le **cycle indirect** où le circuit caloporteur est distinct de celui qui effectue la conversion proprement dite de l'énergie. Le **cycle indirect combiné** peut ajouter à ce schéma une turbine à gaz et, par l'intermédiaire d'un générateur de vapeur, une turbine à vapeur.

Tout système construit autour d'un réacteur nucléaire est une machine thermique mettant en œuvre ces principes de la thermodynamique. Comme les centrales thermiques classiques brûlant des combustibles fossiles (charbon, fioul), les centrales nucléaires utilisent la chaleur provenant d'une "chaudière", en l'occurrence délivrée par les **éléments combustibles** où se déroulent les **fissions**. Cette chaleur est transformée en énergie électrique

en faisant subir à un fluide (de l'eau dans la plupart des réacteurs actuellement en service) un **cycle thermodynamique indirect**, dit de **Rankine** (ou de **Hirn-Rankine**), qui consiste en une vaporisation de l'eau à pression constante au niveau de la source chaude, une détente de la vapeur dans une turbine, une condensation de la vapeur sortant à basse pression de la turbine, et une compression de l'eau condensée afin de ramener cette eau à la pression initiale. Dans ce schéma, le circuit d'eau qui circule dans le cœur (**circuit primaire**, voir Mémo A : **Les éléments d'un système nucléaire**) est distinct de celui qui effectue la conversion proprement dite de l'énergie. Avec une température maximale de vapeur de quelque 280 °C et une pression de 7 MPa, le rendement énergétique net (ratio de la puissance électrique produite sur la puissance thermique dégagée par le cœur du réacteur) est de l'ordre d'un tiers pour un réacteur à eau sous pression de 2^e génération. Celui-ci peut passer à 36-38 % pour un REP de 3^e génération comme l'**EPR**, en augmentant la température, car l'équation de Carnot montre bien l'intérêt de produire de la chaleur à haute température pour obtenir un rendement élevé. De fait, augmenter la température en sortie de cœur d'une centaine de degrés permet un gain en rendement de plusieurs points.

Les propriétés thermodynamiques d'un gaz caloporteur comme l'hélium permettent d'aller plus loin, et de viser une température d'au moins 850 °C en sortie de cœur. Pour en profiter pleinement, il est théoriquement préférable d'utiliser un cycle direct de conversion d'énergie, le **cycle de Joule-Brayton**, où le fluide sortant du réacteur (ou de tout autre "chaudière") est envoyé directement dans la turbine qui entraîne l'alternateur, comme c'est le cas dans les centrales électrogènes au gaz naturel et à **cycle combiné** ou encore dans un réacteur d'avion. Avec ce cycle, il est même possible de porter le rendement de production d'électricité de 51,5 % à 56 % en faisant passer T_1 de 850 °C à 1 000 °C.

En effet, depuis un demi-siècle, l'utilisation du gaz naturel comme combustible a conduit au développement spectaculaire des turbines à gaz (TAG) qui peuvent fonctionner à des très hautes températures, supérieures au millier de °C. C'est ce type de conversion d'énergie qui constitue, pour les réacteurs nucléaires du futur, une alternative séduisante aux turbines à vapeur.

Les cycles thermodynamiques des TAG sont très largement utilisés, qu'il s'agisse des systèmes de propulsion ou des grandes centrales électrogènes à combustible fossile. Ces cycles, nommés **cycles de Brayton** (figure), consistent simplement à aspirer et comprimer de l'air pour l'injecter dans une chambre de combustion (1→2), brûler le mélange air-combustible dans la chambre de combustion (2→3), détendre les gaz brûlés dans une turbine (3→4). À la sortie de la turbine, les gaz brûlés sont relâchés dans l'atmosphère (c'est la source froide), ce cycle est donc qualifié d'**ouvert**. Si la source chaude est un réacteur nucléaire, il devient très difficile de fonctionner en cycle ouvert avec de l'air (ne serait-ce que parce qu'il faut respecter le principe des trois barrières de confinement entre le combustible nucléaire et l'environnement). Pour *fermer* le cycle, il suffit d'ajouter un échangeur en sortie de turbine, pour refroidir le gaz (via un échangeur vers la source froide) avant de le ré-injecter dans le compresseur. La nature du gaz n'est alors plus imposée par la combustion.

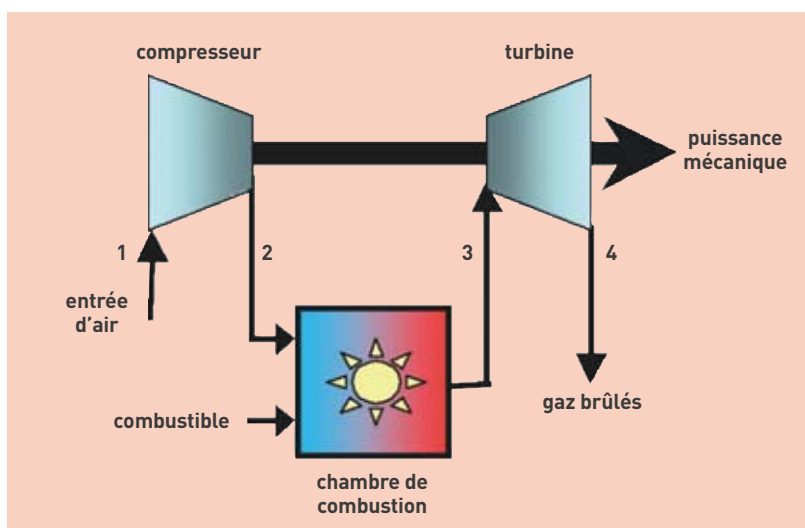


Figure. Cycle de Brayton utilisé pour une turbine à gaz à cycle ouvert.

Qu'est-ce que la modélisation multi-physique et multi-échelle ?

La modélisation **multi-physique** et **multi-échelle** est une approche de R&D relativement récente née de la nécessité de prendre en compte, dans la **modélisation** d'un système dont on cherche à prédire le comportement, tous les phénomènes, dans la pratique couplés entre eux, agissant sur (ou présents dans) ce système. C'est la forme la plus complète de modélisation d'un enchaînement de phénomènes divers et d'ordres de grandeur très différents puisqu'il en intègre toute la connaissance, théorique comme empirique, et ce à différentes échelles, dans des briques élémentaires qu'il s'agit d'assembler.

Sur le plan physique, elle prend en compte les couplages entre phénomènes élémentaires de nature différente. Dans le domaine de la physique des réacteurs, on couple par exemple la mécanique des structures, la **neutronique** et la **thermohydraulique**.

Ce type de modélisation vise aussi à donner une description des phénomènes à différentes échelles. Dans le domaine de la physique des matériaux, il s'agira par exemple de déduire les propriétés macroscopiques d'un matériau polycristallin à partir de sa description à l'échelle la plus microscopique (l'**atome**),

via des niveaux de description emboîtés (la dynamique moléculaire, la dynamique des **dislocations**). Tout le problème est de lier ces différents niveaux de description en utilisant la bonne information pour passer d'une échelle à l'autre sans discontinuité, de manipuler de façon modulaire ces lois de comportement valables à diverses échelles (figure).

C'est donc un calcul numérique composite, selon l'échelle spatiale considérée, qui fait "tourner" le modèle d'ensemble. D'autant plus composite que les chercheurs sont amenés à "enchaîner" des modèles *déterministes* et des modèles *probabilistes*, soit parce qu'ils n'ont pas la connaissance exhaustive des mécanismes élémentaires en jeu, soit parce que la résolution numérique des équations déterministes du système serait difficile ou trop lourde. D'où le recours à des méthodes comme celle de **Monte Carlo**, en particulier.

Enfin, le multi-échelle raccorde, par des techniques de superposition, des modèles numériques à des échelles différentes. Cela permet, pour conserver l'exemple des matériaux, d'effectuer des "zooms" sur des zones particulièrement sensibles aux **contraintes** comme des

fissures, des soudures ou des supports. La modélisation multi-physique et multi-échelle pose donc de façon aiguë le problème de la compatibilité et de la cohérence des **codes** de calcul qui constituent les briques élémentaires de la description. Mais les résultats sont à la hauteur de la difficulté : dans le domaine des matériaux métalliques, notamment, il est maintenant possible de mener une démarche de prévision des propriétés macroscopiques en partant des "premiers principes" de la physique atomique et de la dynamique moléculaire (voir note (1) p. 79) (méthode *ab initio*) en passant par la description physique des microstructures. Dans le nucléaire, l'étude des matériaux soumis à l'irradiation illustre bien cette approche, puisqu'il est enfin devenu possible de lancer un pont entre la connaissance des défauts à l'échelle macroscopique et la modélisation des phénomènes de création des **défauts ponctuels** à l'échelle atomique.

Si la physique constitue évidemment le premier niveau de ce type de modélisation, les deux autres sont mathématique et numérique, dans la mesure où il s'agit de raccorder entre eux des résultats de mesures ou de calculs valables à des échelles différentes, puis de mettre en œuvre les **algorithmes** élaborés. La modélisation multi-physique et multi-échelle n'est donc rendue possible que par la conjonction de deux progrès parallèles : celui de la connaissance des phénomènes élémentaires et celui de la puissance de calcul informatique.

Le CEA est l'un des rares organismes dans le monde à pouvoir développer une telle modélisation multi-physique et multi-échelle dans ses différents secteurs de recherche et de développement en concentrant un vaste ensemble d'outils de modélisation, d'expérimentation et de calcul lui permettant à la fois de démontrer la validité des théories, la pertinence des technologies et de faire progresser les études de composants, tant dans le domaine nucléaire (où s'effectuent d'ailleurs des couplages entre codes partiels CEA et EDF) que, par exemple, dans celui des nouvelles technologies de l'énergie.

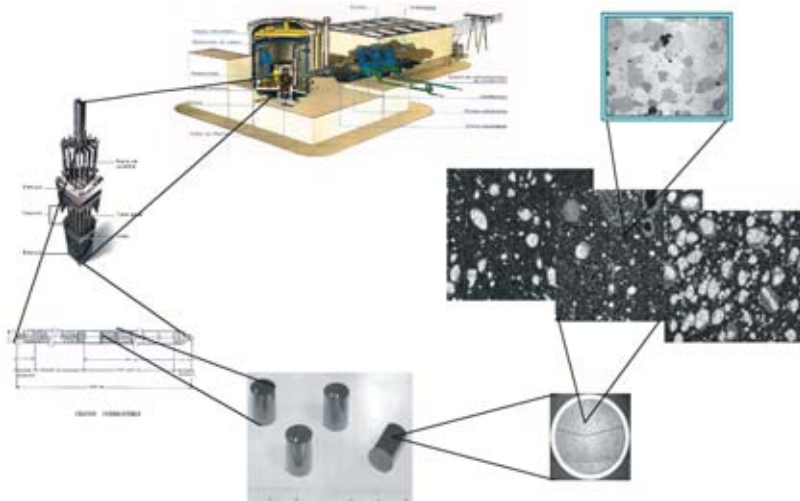


Figure. L'amélioration de la fiabilité et de la rentabilité du combustible nucléaire nécessite une modélisation fine dudit **combustible** (ici du **MOX**). Les caractéristiques microstructurales (porosité, taille et répartition des **amas**, taille de **grain**...) ont un impact direct sur le comportement du **crayon** combustible sous irradiation, et donc sur la maniabilité du réacteur ainsi que sur la durée de vie de ce crayon.

Les grandes familles de matériaux nucléaires

Les conditions spécifiques imputables aux rayonnements régnant dans les réacteurs nucléaires imposent d'avoir recours à des matériaux présentant des propriétés particulières qui peuvent être classés en deux grandes catégories : les **matériaux de gainage et de structure** d'une part, et les **matériaux combustibles** d'autre part. Pour les uns comme pour les autres, les six concepts de systèmes de quatrième génération retenus par le **Forum international GEN IV** exigent le plus souvent de privilégier des formules innovantes (tableau p.71). Les propriétés de résistance à la température, à la pression, à la fatigue, à la chaleur, à la corrosion, souvent sous contrainte, que doivent présenter d'une manière générale les matériaux impliqués dans tout *process* industriel doivent, dans le domaine nucléaire, être pour l'essentiel maintenues malgré les effets de l'irradiation, imputables en particulier au flux de **neutrons**. L'irradiation accélère ou amplifie en effet des phénomènes comme le **fluage** (**fluage d'irradiation**) ou en crée d'autres comme le **gonflement** ou la **croissance**, qui désigne une déformation **anisotrope** obtenue sous flux de neutrons en l'absence de toute autre sollicitation. Les matériaux de structure sont notamment soumis au phénomène d'**activation** par bombardement par les neutrons ou d'autres particules (**photons, électrons**). Ceux qui entrent dans la structure des combustibles (les **assemblages**, les **gaines** ou autres **plaques**) sont en outre soumis à d'autres contraintes. Enfin, le **combustible** lui-même est un matériau prenant par exemple, dans les **réacteurs à eau légère** actuels, la forme de **céramiques d'uranium** et/ou de **plutonium frittées** sous forme de pastilles.

L'**irradiation** neutronique peut provoquer une modification importante des propriétés des matériaux. Dans les métaux et leurs alliages, mais aussi dans d'autres matériaux solides comme les céramiques⁽¹⁾, ces changements sont liés à l'évolution des **défauts ponctuels** que cette irradiation produit et aux **atomes** étran-

gers produits par les réactions nucléaires et qui se substituent à l'un des atomes du réseau **cristallin**. La nature et le nombre de ces défauts dépendent à la fois du flux de neutrons et de leur énergie, mais ceux qui provoquent des évolutions structurales notables sont, dans les **réacteurs à neutrons thermiques** comme dans les **réacteurs à neutrons rapides**, les neutrons rapides.

Un cristal présente toujours des défauts, et l'irradiation peut en créer de nouveaux. Les défauts ponctuels sont de deux types : les **lacunes** (un atome est chassé de son emplacement dans le cristal), et les **interstitiels** (un atome excédentaire se place en sur-nombre entre les plans du réseau cristallin).

Les **dislocations**, qui délimitent une région où l'empilement du cristal est perturbé par un glissement localisé affectant un plan atomique, constituent pour leur part des **sources** et des **puits** pour les défauts ponctuels. Les lacunes peuvent se grouper sous forme d'**amas lacunaires**, de **boucles** ou de **cavités**, les interstitiels sous celle d'**amas d'interstitiels** ou de **boucles de dislocation**. Par ailleurs, les atomes de cuivre, de manganèse et de nickel d'un alliage d'acier de cuve, par exemple, tendent à se rassembler en **amas (clusters)** en durcissant l'acier. Enfin, les **joints de grain** sont des défauts qui délimitent deux cristaux d'orientation différente et des facteurs de fragilisation potentiels. De nombreuses propriétés du métal y sont modifiées.

Les dommages causés à ces matériaux s'expriment en **dpa** (déplacements par atome), n dpa signifiant que tous les atomes du matériau ont été déplacés n fois en moyenne pendant l'irradiation.

Les structures cristallines

Les matériaux **métalliques** ont une structure cristalline : ils sont constitués de la répétition périodique dans l'espace d'une cellule élémentaire appelée **maille** et constituée d'**atomes** dont le nombre et la position sont précisément déterminés. La répétition de ces structures leur confère des propriétés particulières. Trois de ces structures définissant la position des atomes sont importantes :

- la **structure cubique centrée** (celle à l'ambiante du fer, du chrome, du vanadium). Les matériaux présentent généralement une transition en température de comportement ductile/fragile.

- la **structure cubique à faces centrées** (nickel, aluminium, cuivre, fer haute température).
- la **structure hexagonale** (celle du zirconium ou du titane).

En fonction de la température et de la composition, le métal s'organisera en cristaux élémentaires, les **grains**, avec différentes microstructures, les **phases**. Leur arrangement a une influence importante sur les propriétés des métaux, en particulier des aciers. La **ferrite** du fer pur, à la **structure cubique centrée**, devient une **austénite**, structure **cubique à faces centrées** au-delà de 910 °C. La **martensite** est une structure particulière obtenue par une **trempe** qui la durcit suivie d'un **revenu** qui la rend moins fragile. La **bainite** est une structure intermédiaire entre la ferrite et la martensite également obtenue par trempe puis revenu. Parmi les métaux, les aciers inoxydables à forte teneur en chrome (plus de 13 %), dont la résistance à la corrosion et à l'oxydation est imputable à la formation d'une pellicule d'oxyde de chrome à leur surface, se taillent la part du lion. Si l'on considère que le critère d'inoxidabilité est la teneur en chrome qui doit être supérieure à 13 %, il existe trois catégories principales : les ferritiques, les austénitiques et les austéno-ferritiques.

Les familles d'aciers

Les **aciers ferritiques** à structure cristalline **cubique centrée** (F17 par exemple) ont une faible concentration de carbone (0,08 à 0,20 %) et une concentration élevée de chrome. Ne contenant en général pas de nickel, ce sont des alliages fer/chrome ou fer/chrome/molybdène dont la teneur en chrome varie de 10,5 à 28 % : ils ne manifestent pas un durcissement appréciable lors de la trempe et ne se durcissent que par écrouissage. Leur coefficient de dilatation est faible, ils sont très résistants à l'oxydation et adaptés aux températures élevées. Dans le nucléaire, l'**acier bainitique** 16MND5 à bas taux de carbone et faiblement allié (1,5 % de manganèse, 1 % de nickel et 0,5 % de molybdène) occupe une place centrale puisqu'il constitue le matériau de cuve des **REP** français, choisi pour ses qualités à une température de 290 °C et soumis à une **fluence** de $3 \cdot 10^{19} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$ pour des neutrons d'énergie supérieure au **MeV**.

Les **aciers martensitiques**, qui présentent une structure cristalline **cubique centrée**, sont des aciers ferritiques avec moins de 13 % de chrome (9 à 12 % en général) et un maxi-

(1) Les céramiques seront employées seules ou incorporées à des composites pouvant être du type **CerCer** (céramique dans une matrice également céramique) ou **CerMet** (matériau céramique intégré dans une matrice métallique). S'agissant d'un combustible nucléaire, c'est un mélange intime de produits métalliques et de composés réfractaires, les éléments fissiles étant contenus dans une seule phase ou dans les deux.



Areva NP

Virole porte-tubulure de la cuve destinée au réacteur Flamanville 3 d'EDF, le premier EPR devant être construit sur le sol français.

mum de 0,15 % de carbone qui ont subi un *recuit* : ils deviennent martensitiques au saisissement dans l'air ou dans un liquide après un chauffage dans le domaine austénitique. Ils subissent ensuite un adoucissement par traitement thermique. Ils peuvent contenir du nickel, du molybdène ainsi que d'autres éléments d'addition. Ils sont magnétiques, très rigides et résistants mais peuvent être fragiles aux chocs, notamment à basse température. Ils sont largement utilisés dans l'industrie nucléaire (visserie, robinetterie...) du fait de leur bonne résistance à la corrosion associée à des caractéristiques mécaniques élevées.

Les **aciers austénitiques**, qui se caractérisent par une structure cristalline *cubique à faces centrées*, sont composés autour de 17 à 18 % de chrome, de 8 à 12 % de nickel (qui accroît la résistance à la corrosion : la grande majorité des aciers inoxydables est austénitique), de peu de carbone, éventuellement de molybdène, de titane ou niobium, et surtout de fer. Ils présentent une **ductilité** et une **tenacité** remarquables, un coefficient de dilatation thermique élevé et un coefficient de **conductivité thermique** plus faible que les aciers ferritiques/martensitiques. Parmi les principaux (sous la désignation américaine AISI⁽²⁾ 301 à 304, 308, 316, 316L, 316LN, 316, 316Ti, 316Cb, 318, 321, 330, 347), les 304 et 316 ont eu une importance particulière dans le nucléaire avant d'être abandonnés en raison de leur gonflement excessif sous irradiation. Des dérivés (le 304L des structures internes et des embouts d'assemblages combustibles REP ou le 316Ti des gaines, par exemple) constituent des matériaux de référence. Dans les réacteurs à neutrons rapides, ils entrent notamment (acier 316L[N]) dans la fabrication des **tubes hexagonaux** (typiques des réacteurs comme Phénix), et l'acier austénitique 15/15Ti a été optimisé pour les **aiguilles** de cette filière et a été la solution de

référence pour les gaines des réacteurs RNR à **neutrons rapides**.

Les **austéno-ferritiques** à 0, 8, 20, 32, voire 50 % de ferrite présentent une bonne résistance à la corrosion et une bonne aptitude au soudage, ce qui leur vaut d'être utilisés, moulés, pour les tuyauteries entre cuves et générateurs de vapeur.

Une classe d'alliages particulièrement importante dans le nucléaire est celle des **alliages de nickel**, qui ont une structure austénitique. L'alliage 600 (Inconel 600 d'INCO), alliage de nickel (72 %), de chrome (16 %) et de fer (8 %) de cobalt et de carbone utilisé dans les générateurs de vapeur (ainsi que le 620) et les traversées de couvercle de REP, résistant mal à la corrosion sous contrainte, a été remplacé par le 690, contenant plus de chrome (30 %). Pour certaines pièces, l'Inconel 706, l'Inconel 718 pour les grilles d'assemblages du combustible REP) et l'Inconel X750 avec ajout de titane et d'aluminium ont été choisis pour leur résistance au gonflement et leur très grande résistance mécanique. Pour les générateurs de vapeur de réacteurs à neutrons rapides comme Superphénix, l'alliage 800 (35 % de nickel, 20 % de chrome et un peu moins de 50 % de fer) a été sélectionné. Les alliages 617 (Ni-Cr-Co-Mo) et 230 (Ni-Cr-W) largement utilisés dans l'industrie chimique sont évalués pour les **RTHT** à gaz.

Les **aciers ferritiques-martensitiques** (aciers F/M) sont des aciers à structure *cubique centrée*. Ils regroupent en fait la famille des aciers martensitiques et celle des aciers ferritiques. Ils allient un coefficient de dilatation thermique faible à une forte **conductivité thermique**. Des aciers martensitiques ou ferritiques avec une teneur en chrome comprise entre 9 et 18% voient leur utilisation limitée par leur résistance au fluage plus faible que les austénitiques. Les aciers martensitiques Fe9/12Cr (contenant de 9 à 12 % en masse de chrome) peuvent cependant supporter des températures élevées et sont en cours d'optimisation pour le fluage. Par exemple, l'acier Fe9Cr1Mo au molybdène pourrait convenir pour le tube hexagonal des assemblages des **RNR-Na**. Sous la dénomination d'AFMA (Aciers Ferritiques-Martensitiques Avancés), ils sont particulièrement étudiés pour les réacteurs rapides à gaz.

Les **aciers ferritiques et martensitiques à dispersion d'oxyde** (ODS, pour *Oxide Dispersion Strengthened*) ont été développés afin d'allier la résistance au gonflement

des ferritiques avec une résistance au fluage à chaud au moins égale à celle des austénitiques. Ils constituent actuellement la solution de référence pour le gainage du combustible des futurs réacteurs au sodium.

Le **matériau de gainage** des réacteurs à eau ordinaire, qui a d'abord été de l'acier inoxydable, est maintenant un **alliage de zirconium** choisi pour sa "transparence" aux neutrons dont la structure cristalline est *hexagonale compacte* à basse température et *cubique centrée* à haute température. Les alliages zirconium-fer-chrome les plus utilisés sont les **Zircaloy** à l'étain (Zircaloy-4 dans les REP, Zircaloy-2 dans les REB et ZrNb au niobium dans les VVER) pour leur excellent comportement sous rayonnement et leur aptitude au fluage à chaud.

Après avoir abaissé la teneur en étain afin d'améliorer la tenue à la corrosion, un alliage zirconium-niobium (M5[®]) pour ce gainage est en cours de déploiement.

Parmi les matériaux nucléaires, le **graphite** mérite une mention particulière ; avec l'eau lourde, il est associé aux réacteurs qui doivent fonctionner à l'**uranium naturel**. Il est un **modérateur** intéressant car il absorbe peu les neutrons.

Pour le **RNR-G**, de nouvelles céramiques et de nouveaux alliages doivent être développés, à la frontière des hautes fluences. Les chercheurs espèrent beaucoup des matériaux réfractaires sans métal.

Dans les combustibles à particules, les oxydes d'uranium et de plutonium sont enveloppés par plusieurs couches de **pyrocarbures** et/ou de **carbure** de silicium isolant (**SiC**), éventuellement sous forme fibreuses (**SiCf**). On parle alors de particules revêtues (*Coated particles*, ou CP). Si les billes de UO₂ ou de **MOX** revêtues de SiC constituent la référence, le ZrC pourrait offrir une alternative.

Par ailleurs, les classiques pastilles **frittées** d'oxyde d'uranium (et d'oxyde de plutonium dans les MOX) pourraient laisser la place à des combustibles avancés avec ou sans additifs de chrome afin d'essayer de s'affranchir des problèmes posés par l'**interaction pastille gaine**, liée à la tendance au gonflement de la pastille de céramique combustible sous irradiation.

Les oxydes pourraient être remplacés par des **nitrures** (compatibles avec le procédé de traitement **Purex**) ou par des **carbures** sous forme, par exemple, d'alliage d'uranium plutonium avec 10 % de zirconium.

■ (2) Pour American Iron and Steel Institute.

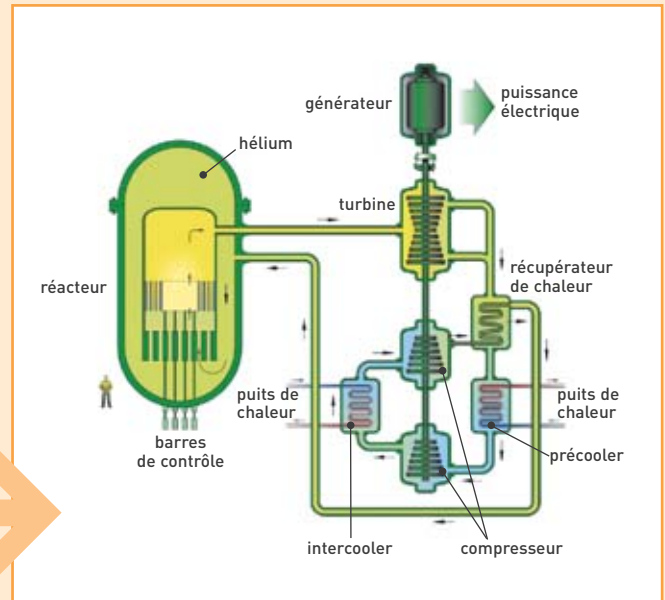
Les six concepts sélectionnés par le Forum GEN IV

Des six concepts de réacteurs sélectionnés par le **Forum international Génération IV** en fonction de leur capacité à répondre aux critères évoqués, trois, et à terme quatre, mettent en œuvre les **neutrons rapides**, les trois autres (à terme deux) les **neutrons thermiques**. Deux des six systèmes utilisent d'autre part le gaz comme **caloporteur** (ce sont donc des **RCG**, réacteurs à caloporteur gaz). Ces six concepts sont :

Le GFR

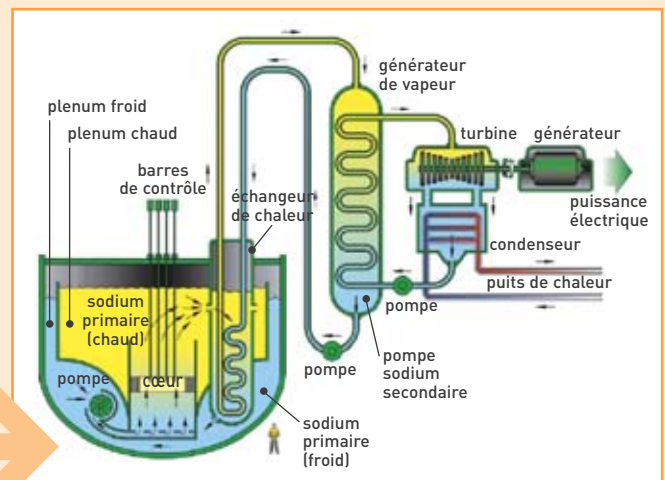
Le **GFR** (*Gas Fast Reactor*, en français **RNR-G**) est un **réacteur à haute température (RHT)** refroidi au gaz, généralement à l'hélium, à **neutrons rapides**, permettant le **recyclage homogène** ou **hétérogène** des **actinides** tout en conservant un gain de **régénération** supérieur à 1. Le concept de référence est un réacteur refroidi à l'hélium en **cycle direct** ou **indirect** avec un rendement élevé (48 %). L'évacuation de la **puissance résiduelle** en cas de dépressurisation est possible en **convection** naturelle quelques heures après l'accident. Le maintien d'une circulation forcée est nécessaire dans la première phase de l'accident. La **puissance volumique** dans le cœur est déterminée de façon à limiter la température du **combustible** à 1600 °C en **transitoire**. Le combustible, innovant, est conçu pour retenir les **produits de fission** (pour une température inférieure à la limite de 1600 °C) et éviter leur relâchement en situations accidentelles. Le recyclage du combustible usé est envisagé sur le site même du réacteur par un procédé soit **pyrochimique**, soit **hydrométallurgique**. Le GFR est un concept très performant en termes d'utilisation des ressources naturelles et de minimisation des déchets à **vie longue**. Il se situe dans la ligne technologique gaz, en complément des concepts à spectre thermique GT-MHR⁽¹⁾, PBMR⁽²⁾ et VHTR.

- (1) GT-MHR: Gas-Turbine Modular High Temperature Reactor.
 (2) PBMR: Pebble Bed Modular Reactor.



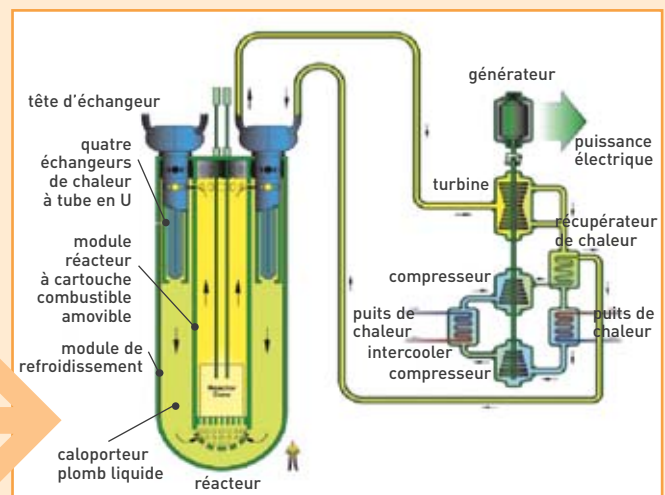
Le SFR

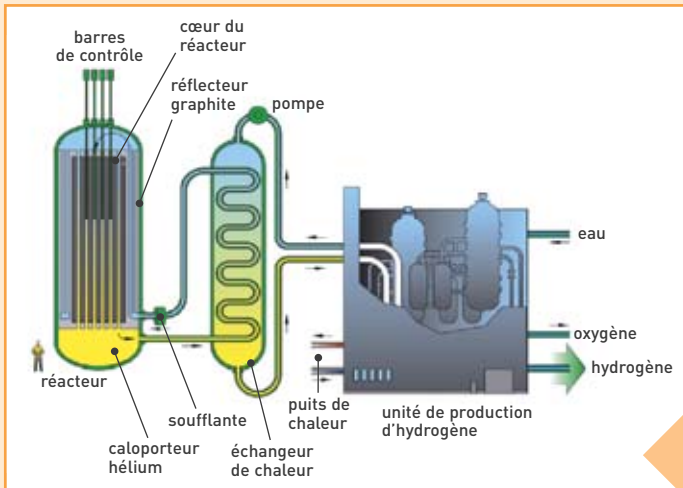
Le **SFR** (*Sodium Fast reactor*, en français **RNR-Na**) est un réacteur refroidi au **sodium** liquide, à neutrons rapides associé à un **cycle fermé** permettant le recyclage de l'ensemble des actinides et la régénération du plutonium. Du fait de la régénération de la matière fissile, ce type de réacteur peut fonctionner très longtemps sans intervention sur le **cœur**. Deux options principales sont envisagées : l'une qui, associée à un **retraitement** de combustible métallique, conduit à un réacteur de puissance unitaire intermédiaire de 150-500 MWe, l'autre, caractérisée par un retraitement **Purex** de combustible mixte d'oxydes (**MOX**), correspond à un réacteur de puissance unitaire élevée, entre 500 et 1 500 MWe. Le SFR présente de très bonnes propriétés d'utilisation des ressources naturelles et de gestion des actinides. Il a été évalué comme ayant de bonnes caractéristiques de sûreté. Plusieurs prototypes de SFR existent dans le monde, dont Joyo et Monju au Japon, BN600 en Russie et Phénix en France. Les principaux enjeux de recherche concernent le recyclage intégral des actinides (les combustibles comportant des actinides sont **radioactifs**, donc délicats à fabriquer), l'inspection en service (le sodium n'est pas transparent), la sûreté (des approches de sûreté **passive** sont à l'étude) et la réduction du coût d'investissement. Le remplacement de l'eau par du CO₂ **supercritique** comme fluide de travail dans le système de conversion est également à l'étude.



Le LFR

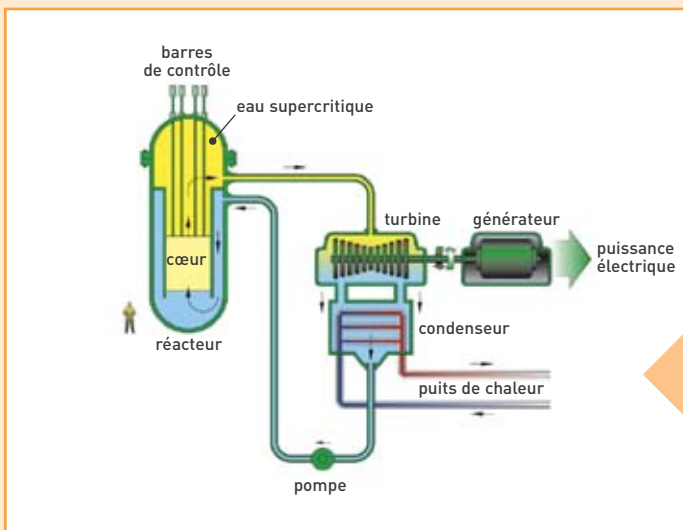
Le **LFR** (*Lead Fast Reactor*, en français **RNR-Pb**) est un réacteur refroidi au plomb (ou alliage au plomb plomb-bismuth), à neutrons rapides associé à un cycle fermé du combustible permettant une utilisation optimale de l'**uranium**. Plusieurs systèmes de référence ont été sélectionnés. Les puissances unitaires vont de 50-100 MWe, pour les concepts dits *battery* jusqu'à 1 200 MWe, incluant les concepts modulaires de 300-400 MWe. Ces concepts ont une gestion du combustible à longue durée (10 à 30 ans). Les combustibles peuvent être soit métalliques, soit de type **nitruure** et permettent le recyclage de l'ensemble des actinides.





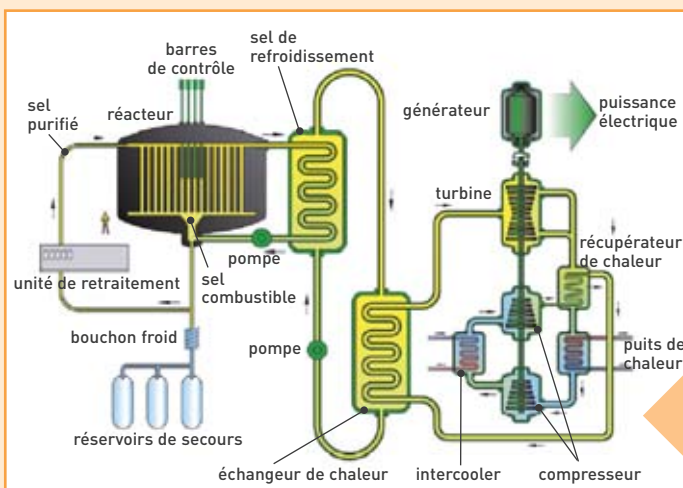
Le VHTR

Le **VHTR** (*Very High Temperature Reactor*, en français **RTHT**) est un **réacteur à très haute température** à **neutrons thermiques** refroidi au gaz hélium et initialement prévu pour fonctionner avec un **cycle** de combustible **ouvert**. Ses points forts sont l'économie et surtout la sûreté. Son aptitude au développement durable est similaire à celle d'un réacteur de troisième génération, en raison de l'utilisation d'un cycle ouvert. Il est dédié à la production d'**hydrogène**, même s'il doit aussi permettre la production d'électricité (seule ou en **cogénération**). La particularité du VHTR est son fonctionnement à très haute température (>1000 °C) pour fournir la chaleur nécessaire à des procédés de décomposition de l'eau par cycle **thermochimique** (iode/soufre) ou **électrolyse** à haute température. Le système de référence a une puissance unitaire de 600 MWth et utilise l'hélium comme caloporteur. Le cœur est constitué de blocs prismatiques ou de boulets.



Le SCWR

Le **SCWR** (*Supercritical Water Reactor*, en français **RESC**) est un réacteur refroidi à l'eau supercritique à neutrons thermiques dans une 1^{re} étape (**cycle** du combustible **ouvert**) et à neutrons rapides dans sa configuration aboutie (cycle fermé pour un recyclage de l'ensemble des **actinides**). Deux cycles de combustible correspondent à ces deux versions. Les deux options ont un point de fonctionnement en eau supercritique identique : pression de 25 MPa et température de sortie du cœur de 550 °C permettant un rendement thermodynamique de 44 %. La puissance unitaire du système de référence est de 1700 MWe. Le SCWR a été évalué comme ayant un potentiel élevé de compétitivité économique.



Le MSR

Le **MSR** (*Molten Salt Reactor*, en français **RSF**) est un réacteur à sels fondus (cœur liquide et cycle fermé par traitement continu par **pyrochimie**), à neutrons thermiques et plus précisément **épithermiques**. Son originalité est la mise en œuvre d'une solution de **sels fondus** servant à la fois de combustible (liquide) et de caloporteur. La régénération de la matière fissile est possible avec un cycle uranium-**thorium** optionnel. Le MSR intègre dans sa conception un recyclage en ligne du combustible et offre ainsi l'opportunité de regrouper sur le même site un réacteur producteur d'électricité et son usine de retraitement. Le sel retenu pour le concept de référence (puissance unitaire de 1000 MWe) est un fluorure de sodium, de zirconium et d'actinides. La **modération** de spectre est obtenue dans le cœur par la présence de blocs de graphite traversés par le sel combustible. Le MSR comprend un circuit intermédiaire en sels fluorures et un circuit tertiaire à eau ou hélium pour la production d'électricité.