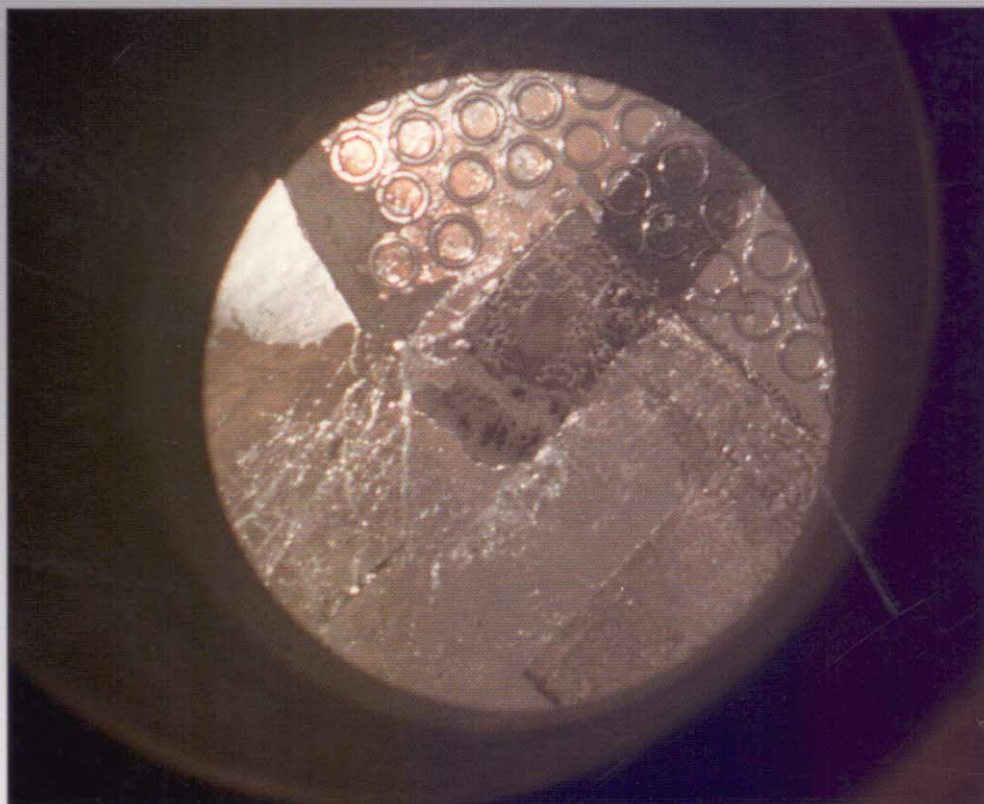


Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

e-den

Une monographie de la Direction
de l'énergie nucléaire

Les réacteurs nucléaires à caloporteur sodium



EDITIONS
LE MONITEUR



Table des matières

Préface	5
Introduction	7
Pourquoi des réacteurs rapides refroidis au sodium ?	9
Pourquoi des Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) ?	11
Neutrons rapides ou neutrons thermiques ?...	11
Plutonium et réacteurs nucléaires	12
<i>Les raisons de la limitation du recyclage du Pu dans les réacteurs à eau</i>	12
L'intérêt des réacteurs rapides	13
<i>La possibilité de multirecyclage du Pu</i>	13
<i>Possibilité d'utilisation de tout l'uranium naturel</i>	14
<i>Les conséquences sur le potentiel énergétique des ressources conventionnelles mondiales</i>	14
<i>L'optimisation des déchets nucléaires</i>	15
<i>La flexibilité des RNR dans la gestion des matières nucléaires</i>	16
Les réacteurs rapides : le complément des réacteurs à eau pour un nucléaire durable	16
Pourquoi le sodium ?...	17
Le cahier des charges d'un caloporteur* de réacteurs rapides	17
Les options possibles pour le caloporteur	18
Les propriétés physiques et chimiques du sodium	23
Un métal bien connu	23
Propriétés physiques	24
Propriétés chimiques	26
Propriétés neutroniques	27
Conception des réacteurs rapides refroidis au sodium	29
Principes généraux de conception	31
Un circuit secondaire en sodium	31
Réacteur intégré ou à boucles ?...	32
L'organisation du circuit primaire : collecteur chaud /collecteur froid	33
Sommier et platelage	34
Organisation des cuves : refroidies ? Posées ? Pendues ? Refroidissement / protection de la cuve principale	35
La dalle	36
L'organisation du circuit secondaire	36
Et l'évacuation de la puissance résiduelle ?	36
Et si on remplaçait l'eau par le gaz ?	36
La manutention des assemblages combustibles	37
La mitigation des accident graves	37
Quelle puissance ?	37
Réacteur <i>breeder</i> ou <i>burner</i> ?	38
Des choix largement liés à l'évolution des critères de sûreté	38
Conception du cœur d'un RNR	39
La physique du cœur d'un RNR	39
Les coefficients de contre-réaction	40

<i>L'effet Doppler</i>	40
<i>L'effet de vidange du sodium</i>	40
<i>Les effets mécaniques de dilatation/compaction du cœur</i>	41
Pilotage d'un cœur de réacteur rapide	42
<i>La proportion de neutrons retardés (ou bêta effectif)</i>	42
<i>La perte de réactivité et le contrôle du cœur</i>	42
L'architecture d'un cœur rapide	43
<i>Le choix du combustible</i>	43
<i>Définition de l'assemblage combustible</i>	43
<i>Définition des assemblages fertiles (ou transmutateurs)</i>	43
<i>Protection neutroniques latérales et stockages internes</i>	43
<i>Bilan de l'architecture globale d'un cœur rapide</i>	43

Historique et bilan de fonctionnement des RNR-Na

Historique des RNR-Na	47
La trilogie française	47
<i>RAPSODIE</i>	47
<i>PHÉNIX : La première période de fonctionnement</i>	48
<i>SUPERPHÉNIX</i>	49
<i>L'après SUPERPHÉNIX</i>	51
<i>Fonctionnement final de PHÉNIX</i>	51
Les réacteurs rapides sodium dans le monde	52
Le bilan de fonctionnement des RNR-Na dans le monde	55
BN 350	55
PFR	55
MONJU	55
PHÉNIX	56
<i>Fonctionnement du réacteur PHÉNIX de 1974 à 1990</i>	56
<i>Fonctionnement du réacteur de 2004 à 2009</i>	56
SUPERPHÉNIX	57
BN 600	59
<i>Comparaison des taux de disponibilité de BN 600 et du réacteur à eau de Tricastin I</i>	59
Un bilan global mitigé	59
Bilan des incidents survenus sur les RNR sodium	61
Les incidents sur les réacteurs rapides : une information très partagée à l'international	61
Les principaux incidents survenus et le retour d'expérience correspondant	61
<i>Fonctionnement des générateurs de vapeur (réactions sodium-eau)</i>	61
<i>Fonctionnement des composants primaires (pompes et échangeurs)</i>	63
<i>Le fonctionnement de la manutention</i>	63
<i>Les fuites ou transferts intempestifs de sodium</i>	63
<i>Les entrées d'air ou d'impuretés</i>	64
<i>Les expériences sur le combustible et les ruptures de gaines</i>	65
<i>Fonctionnement et pilotage neutronique/ variation de réactivité</i>	65
<i>Problèmes de matériaux</i>	66
<i>Les aérosols sodium</i>	66
<i>Le bouchage d'assemblage combustible</i>	66
Un retour d'expérience précieux	67
L'expérience de démantèlement des réacteurs rapides sodium	69
Les spécificités du démantèlement d'un réacteur rapide sodium	69
<i>Le lavage des assemblages</i>	69
<i>Le lavage/démontage des composants</i>	69
<i>Le traitement du sodium des circuits et du sodium résiduel</i>	69
<i>Le traitement de l'ensemble des circuits ayant contenu du sodium</i>	70
<i>Les dispositions pour les pièges contenant des produits actifs</i>	70

Le point sur le démantèlement d'un certain nombre de réacteurs	70
<i>Les réacteurs américains : EBR1, EBR2, FFTF...</i>	70
<i>Les réacteurs anglais : PFR et DFR</i>	71
<i>Les réacteurs russes : BOR 10 et BN350</i>	71
<i>Le réacteur allemand KNK II</i>	72
Le cas du réacteur SUPERPHÉNIX I	72
Une expérience partagée	75

Sûreté et Environnement

La sûreté des RNR-Na	79
<i>L'évacuation de la puissance résiduelle</i>	79
<i>L'évacuation de la puissance résiduelle sur SUPERPHÉNIX</i>	80
Mécanique dynamique du cœur, sensibilité au gerbage	81
L'effet de vidange sodium	81
Les fuites de sodium	82
La réaction sodium-eau	83
La détection de la réaction sodium-eau	84
La sûreté : un défi pour les réacteurs rapides sodium du futur	85
Les avantages environnementaux des RNR-Na	87
La dosimétrie	87
Les rejets gazeux	87
La production de tritium	88
Les rejets liquides	89
Les déchets solides	90
L'eau de refroidissement	90
<i>L'impact chimique</i>	90
<i>L'impact thermique</i>	90
Le cycle du combustible et déchets nucléaires	90
Un bilan favorable pour les réacteurs rapides sodium	90

La technologie des RNR-Na

La technologie des RNR-Na	93
La système de conversion d'énergie des RNR-Na	95
Les circuits intermédiaires	95
Le générateur de vapeur	96
<i>Classification par la conception des tubes d'échange</i>	96
<i>Classification selon la taille des appareils</i>	96
<i>Classification selon le choix du matériau des tubes</i>	97
<i>Classification des générateurs de vapeur à corps séparés ou non</i>	98
<i>Approches et stratégies vis à vis du risque de réaction sodium-eau dans un générateur de vapeur</i>	98
<i>Conséquences d'une réaction sodium-eau dans un générateur de vapeur</i>	98
<i>Objectifs de sûreté vis à vis de la réaction sodium-eau dans un générateur de vapeur</i>	99
<i>Prévention d'une réaction sodium-eau</i>	100
<i>Détection d'une réaction sodium-eau dans un générateur de vapeur</i>	100
<i>Mitigation d'une réaction sodium-eau dans un générateur de vapeur</i>	100
<i>Retour d'expérience d'incidents de réaction sodium-eau</i>	101
<i>Le générateur de vapeur : un composant de conception délicate</i>	101
Le système de conversion d'énergie sodium-gaz : une alternative au système de conversion d'énergie eau-vapeur	102
Les composants principaux des réacteurs rapides sodium	105
Les pompes mécaniques primaires et secondaires	105
Les échangeurs intermédiaires	106
Le bouchon couvercle cœur	106
Les barres de commande	108
Les autres composants	108
Des composants dont la conception peut encore évoluer...	109

La chimie du sodium	111
Les outils de mesure dédiés à la chimie	111
Les indicateurs de bouchage	111
Les dispositifs de mesure de la teneur en hydrogène dans le sodium secondaire	112
Oxygène-mètres, tritium-mètres	112
Les systèmes de prélèvement	113
La purification du sodium : les pièges froids	113
Phénomènes chimiques en jeu et retour d'expérience	115
L'activation du sodium primaire	115
Le piégeage du tritium	116
Corrosion et transferts de masse	116
La pollution du sodium primaire à la suite des ruptures de gaine	116
Vers une meilleure maîtrise de la chimie du sodium dans les réacteurs rapides	116
La technologie sodium	119
La détection de fuites sodium	119
Mesure des températures, débits et niveaux	120
Les mesures de température	120
Les mesures de débit	120
Les mesures de niveaux	121
L'instrumentation chimique et radiochimique	121
La détection hydrogène	122
La robinetterie sodium	122
Le lavage / décontamination	123
Lavage	123
Décontamination	123
Les problèmes causés par les transferts de sodium en phase gaz	124
La formation d'aérosols	124
Les problèmes créés par les dépôts d'aérosols	124
Les thermosiphons dans les traversées	124
Les systèmes de séparation du sodium	124
La purification du gaz par barboteur NaK	125
La tribologie sodium	125
Une technologie sodium à maintenir pour le futur	125
Les progrès de l'inspection en service	127
La spécificité des techniques et procédés utilisés pour inspecter les RNR-Na	
Une comparaison avec les dispositifs utilisés sur les réacteurs à eau	127
Méthodologie et définition de l'inspection en service nécessaire	128
La surveillance continue	128
Les réseaux de Bragg pour l'instrumentation des réacteurs RNR-Na	130
Les contrôles périodiques	132
Les matériaux du réacteur rapide sodium	135
Composants, conditions de service et matériaux	135
Structures hors cœur	135
Structures de cœur	136
Comportement des matériaux de structures hors cœur	137
Propriétés de fluage, fatigue et fatigue-relaxation	137
Compatibilité physico-chimique avec le sodium	138
Comportement des matériaux de cœur	139
Historique de la R&D développée en France sur les matériaux de cœur rapide ayant abouti à l'actuel AIM1 et préparé l'émergence d'une nouvelle R&D	139
Matériaux avancés pour cœurs fillère: les aciers ODS	141

Le combustible des RNR-Na	143
Le système combustible des RNR-Na	143
<i>Les exigences de conception</i>	143
<i>L'assemblage</i>	143
<i>L'aiguille</i>	143
Le combustible	145
Bilan des connaissances	145
<i>Les conditions de fonctionnement d'une aiguille RNR-Na</i>	146
<i>L'oxyde</i>	146
<i>Les carbures et nitrures</i>	150
<i>Les alliages métalliques</i>	151
Oxyde ? métal ? carbure ? nitrure ? le choix est encore ouvert	152
Le cycle du combustible des réacteurs à neutrons rapides	155
Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) et leur cycle du combustible pour un nucléaire plus économe des ressources naturelles, et plus propre	155
Réacteurs à eau, réacteurs rapides et cycle du combustible : un système intégré	157
Réacteurs à neutrons rapides et cycle du combustible sont indissociables	157
Réacteurs à neutrons rapides et réacteurs à eau sont complémentaires	157
Les scénarios de déploiement de la filière « rapide »	158
Flexibilité et complémentarité	159
L'expérience de traitement des combustibles des réacteurs rapides sodium	161
L'expérience française de traitement des combustibles d'oxyde d'uranium et de plutonium des réacteurs à neutrons rapides	161
<i>L'expérience sur l'atelier AT1 de La Hague</i>	161
<i>L'expérience de retraitement à l'APM</i>	162
<i>L'expérience de retraitement dans l'usine UP2-400 de La Hague</i>	165
Bilan du retour d'expérience français sur les opérations de retraitement	165
<i>Le démantèlement des assemblages</i>	165
<i>Le cisailage des aiguilles</i>	165
<i>La dissolution du combustible</i>	165
<i>La clarification</i>	166
<i>Les cycles d'extraction</i>	166
<i>Les déchets</i>	166
<i>Un retour d'expérience unique au monde</i>	166
<i>La fabrication du combustible « rapide »</i>	167
Les alternatives au combustible oxyde mixte RNR	167
Une alternative à l'hydrométallurgie* : le retraitement des combustibles métalliques des réacteurs à neutrons rapides par pyrométallurgie*	168
Une faisabilité acquise, des variantes possibles	169
La transmutation des actinides mineurs dans les réacteurs à neutrons rapides	171
Le choix des corps à transmuter	171
La physique de la transmutation en réacteur	172
Les différents modes de transmutation	173
La qualification des concepts pour la transmutation	174
<i>Des premiers essais encourageants</i>	174
<i>Le redémarrage de PHÉNIX pour une campagne dédiée d'essais de transmutation dans un RNR</i>	174
<i>Des essais à poursuivre</i>	175
Les impacts de la transmutation sur les installations du cycle du combustible	175
La transmutation : passer de la recherche à l'industrie ?	176

Les enjeux de la 4 ^e génération de centrales nucléaires	177
Les réacteurs en construction ou en projet dans le monde	179
Les réacteurs russes BN 800, BN 1200 et MBIR	179
<i>BN 800</i>	179
<i>BN 1200</i>	180
<i>MBIR</i>	180
Les réacteurs indiens PFBR et FBR	181
Le réacteur japonais JSFR	181
Le réacteur coréen PGSFR	183
Le réacteur chinois CEFR et le projet CFR 600	184
Les petits réacteurs modulaires	184
<i>Le réacteur 4S</i>	185
<i>Le Projet SMFR</i>	185
Récapitulatif des réacteurs rapides sodium en projet ou en construction dans le monde	186
Un intérêt soutenu dans le monde	186
Le projet ASTRID (juin 2013)	189
Le cahier des charges du réacteur ASTRID	189
Les orientations de conception d'ASTRID	190
<i>La prévention de la fusion du cœur</i>	190
<i>La prise en compte d'un accident de fusion du cœur</i>	191
<i>L'inspectabilité des structures en sodium</i>	191
<i>La diminution des risques liés à l'affinité du sodium avec l'oxygène</i>	192
<i>Diminution de la durée des arrêts</i>	193
<i>La transmutation dans ASTRID</i>	193
<i>La maîtrise du coût</i>	194
L'organisation du projet ASTRID	194
Le calendrier et les principales échéances	195
L'économie des réacteurs rapides sodium	197
Le coût d'investissement d'un RNR-Na par rapport à celui d'un REL	197
Les ressources en uranium naturel	198
<i>Le cas du thorium</i>	198
<i>Prospective de consommation d'uranium dans le monde et durabilité correspondante</i>	198
<i>Evolution du prix de l'Uranium naturel à long terme et date de compétitivité des RNR</i>	199
La part du coût du plutonium sur la compétitivité des RNR	200
L'utilisation des RNR pour mieux boucler le cycle du combustible MOX	200
Gestion des déchets : le coût de la transmutation dans un RNR / le gain sur le stockage final	200
Les autres critères de développement des RNR	201
Les réacteurs rapides, voie d'avenir pour rendre le nucléaire durable	201
Conclusion	203
Des premiers réacteurs à neutrons rapides à ceux d'aujourd'hui	203
Le choix du caloporteur : du mercure au NaK puis au sodium	203
Fermer le cycle du combustible	203
Atouts et contraintes spécifiques du sodium comme caloporteur	205
Perspectives d'avenir pour les RNR sodium en France :	
projets à moyen terme et recherche à plus long terme	206
Les déploiements des RNR sodium : défis et perspectives	207
Glossaire-index	209