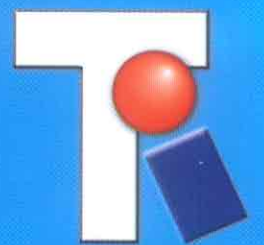
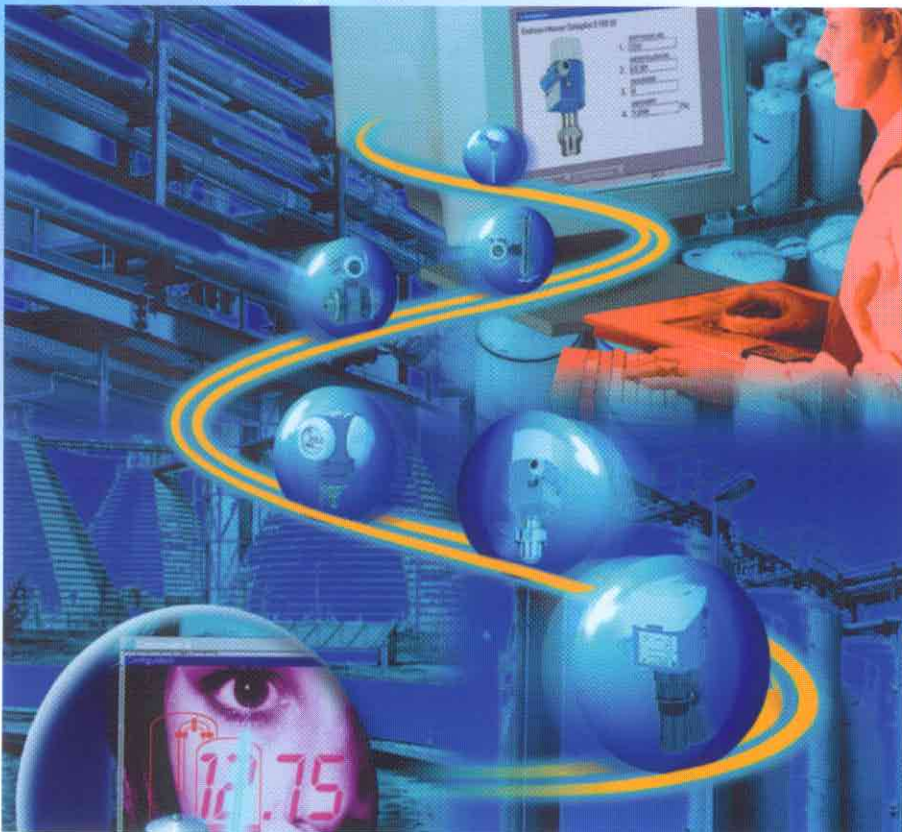
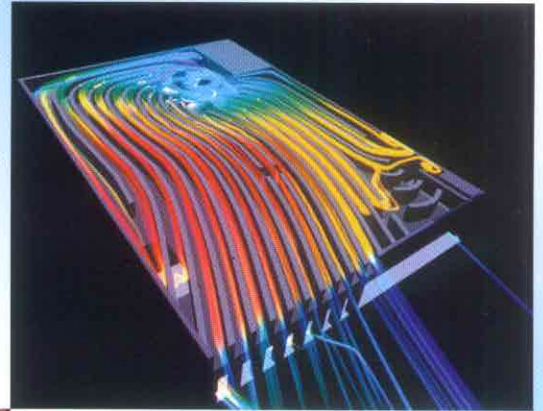


# TECHNIQUES

*de l'ingénieur*

**Extrait  
de la collection**



[www. techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)

# PLAN THÉMATIQUE DE LA COLLECTION

## SCIENCES FONDAMENTALES (AF)

**AF 1 à AF 6 : mathématiques** (sous la responsabilité de D. LINO et B. RANDÉ), **physique** (sous la responsabilité de P. HERVÉ), **chimie** (sous la responsabilité de A. RASSAT) et **mécanique** (sous la responsabilité de P. BROSSARD)

## L'ENTREPRISE INDUSTRIELLE (AG)

**AG 1 à AG 6 : management de l'entreprise** (sous la responsabilité de J. QUIBEL) **conception de produits** (sous la responsabilité de P.-H. DEJEAN), **industrialisation et méthodes de production** (sous la responsabilité de J.P. DAL PONT), **gestion des flux** (sous la responsabilité de D. ESTAMPE), **emballage/conditionnement** (sous la responsabilité de J.P. POTHET), **manutention/stockage** (sous la responsabilité de M. BATON et G. SCHEMM) et **transports** (sous la responsabilité de M. SAVY)

## PLASTIQUES ET COMPOSITES (AM)

**AM 1 à AM 5 : plastochimie** (sous la responsabilité de G. VILLOUTREIX), **plasturgie** (sous la responsabilité de J.F. AGASSANT et M.-F. LACRAMPE) et **composites** (sous la responsabilité de Y. CHEVALIER, P. KRAWCZAK et C. BINÉTRUY)

## GÉNIE ÉNERGÉTIQUE (BE)

**BE 1 à BE 6 : sciences de base** (sous la responsabilité de A. LALLEMAND), **sources d'énergie et chaudières** (sous la responsabilité de A. LALLEMAND), **énergie, chauffage et froid industriels** (sous la responsabilité de T. VIDIL), **génie climatique et thermique de l'habitat** (sous la responsabilité de G. GUARRACINO)

## GÉNIE NUCLÉAIRE (BN)

Conseiller éditorial : P. BACHER  
**BN 1 à BN 3 : réacteurs nucléaires** (sous la responsabilité de P. BOIRON), **instrumentation et contrôle-commande** (sous la responsabilité de H. FANET), **matière et matériaux** (sous la responsabilité de J. LEFEVRE), **sûreté et protection** (sous la responsabilité de M. LIVOLANT)

## GÉNIE MÉCANIQUE (BM)

**BL 1 à BL 4 : machines hydrauliques et thermiques** (sous la responsabilité de A. LALLEMAND)  
**BD 1 à BD 5 : fonctions et composants mécaniques** (sous la responsabilité de R. BOUDET)  
**BT 1 à BT 3 : travail des matériaux et assemblage** (sous la responsabilité de E. FELDER)

## CONSTRUCTION (C)

Conseiller éditorial : G. LACOMBE  
**C 1 à C 10 : organisation, matériels et matériaux, résistance des matériaux et maçonnerie, béton armé, programmes et techniques de génie civil** (sous la responsabilité de G. LACOMBE), **géotechnique, mécanique des sols et des roches** (sous la responsabilité de J.P. MAGNAN), **béton hydraulique** (sous la responsabilité de P. ACKER), **constructions métalliques** (sous la responsabilité de J. BROZZETTI), **bâtiment** (sous la responsabilité de J.R. KRAMER)

## GÉNIE ÉLECTRIQUE (D)

**D 1 à D 12 : électrotechnique générale** (sous la responsabilité de J.-C. VANNIER), **normalisation, mesures, essais, matériaux, gaz isolants et plasmas** (sous la responsabilité de F. MAZALEYRAT), **électronique de puissance** (sous la responsabilité de B. ALLARD), **générateurs électrochimiques et machines électriques tournantes** (sous la responsabilité de F. BERNOT et A. MIRAOU), **applications électromécaniques** (sous la responsabilité de J. BONAL), **traction électrique** (sous la responsabilité de P. CHAPAS), **réseaux électriques et électrothermie industrielle** (sous la responsabilité de C. DBERLIN)

## ÉLECTRONIQUE (E)

**E 1 à E 6 : concepts électroniques de base** (sous la responsabilité de A. PACAUD), **CEM, hyperfréquences et antennes** (sous la responsabilité de F. GAUTIER), **dispositifs passifs** (sous la responsabilité de J.P. GANNE), **dispositifs actifs** (sous la responsabilité de J.P. DUCHEMIN), **assemblage, connectique et environnement** (sous la responsabilité de T. LEMOINE), **électronique de puissance** (sous la responsabilité de F. BERNOT), **optoélectronique** (sous la responsabilité de J.L. MEYZONNETTE)

## AGROALIMENTAIRE (F)

Conseillers éditoriaux : J.L. BOUTONNIER et S. ROUSTEL  
**F 1 et F 2 : apport du génie des procédés, alimentation humaine, gestion des risques sanitaires des aliments, ingénierie agroalimentaire, matériaux pour contact alimentaire, problématique environnementale, procédés physiques, chimiques et biochimiques, additifs alimentaires, filières de production**

## ENVIRONNEMENT (G)

**G 1 et G 2 : aspects économiques et juridiques**, (sous la responsabilité de Y. PITOUN), **eau** (sous la responsabilité de J.-C. BOEGLIN) et **air** (sous la responsabilité de P. LE CLOIREC), **déchets** (sous la responsabilité de A. NAVARRO), **sols** (sous la responsabilité de J. JOUHANEAU), **odeurs** (sous la responsabilité de L. POURTIER), **outils de gestion** (sous la responsabilité de P. ROUSSEAU)

## INFORMATIQUE (H)

Conseiller éditorial : J.-P. FIGER  
**H 1 à H 4 : technologie des composants, systèmes d'exploitation et architecture des systèmes informatiques** (sous la responsabilité de R.J. CHEVANCE), **langages de programmation, techniques de production du logiciel et langages d'application** (sous la responsabilité de B. ROBINET), **gestion des données et méthodes** (sous la responsabilité de G. ZURFLUH), **documents numériques** (sous la responsabilité de J. ANDRÉ et G. DUPOIRIER)

## GÉNIE DES PROCÉDÉS (J)

**J 1 à J 6 : bases théoriques** (sous la responsabilité de J.C. CHARPENTIER), **génie de la formulation** (sous la responsabilité de J.M. AUBRY et G. SCHORSCH), **opérations unitaires** (sous la responsabilité de J.P. DAL PONT et P. MICHEL), **hygiène industrielle et environnement, réacteurs et procédés industriels et fiches produit** (sous la responsabilité de L. BADGUERAHANIAN, J. BOUSQUET et J.-P. EUZEN), **biotechnologies** (sous la responsabilité de J.-L. SIMON)

## CONSTANTES PHYSICO-CHIMIQUES (K)

Conseiller éditorial : J. RIGAUDY  
**K 1 à K 4 : généralités, atomistique, chimie organique, constantes thermiques** (sous la responsabilité de J. RIGAUDY), **constantes thermodynamiques** (sous la responsabilité de P. PERROT), **chimie minérale** (sous la responsabilité de P. CHAMPION), **constantes spectrométriques** (sous la responsabilité de N. PLATZER), **constantes électrochimiques appliquées** (sous la responsabilité de A. JARDY), et **constantes électriques** (sous la responsabilité de R. BONNEFILLE)

## LEXIQUES (L)

**L 1 à L 3 : sciences fondamentales, l'entreprise industrielle, plastiques et composites, génie énergétique, génie mécanique, construction, génie électrique, électronique, télécoms, informatique, génie des procédés, constantes physico-chimiques, matériaux métalliques, analyse et caractérisation, mesures et contrôles, informatique industrielle**

## MATÉRIAUX MÉTALLIQUES (M)

**MB 1 à MB 5 : études et propriétés des métaux** (sous la responsabilité de B. JOUFFREY et G. MURRY)  
**MC 1 à MC 3 : mise en forme des métaux et fonderie** (sous la responsabilité de E. FELDER et P. CUENIN)  
**MD 1 et MD 3 : traitements des métaux** (sous la responsabilité de Y. DESALOS et J. PAGETTI)  
**ME 1 à ME 3 : élaboration et recyclage des métaux** (sous la responsabilité de J. ASTIER et A. MARCÉ)

## ANALYSE ET CARACTÉRISATION (P)

Conseiller éditorial : C. GENTY  
**P 1 à P 5 : génie analytique et spectrométries, microscopies, études de structure** (sous la responsabilité de N. BROLL), **méthodes thermiques** (sous la responsabilité de P. CLAUDY), **chromatographie et techniques séparatives** (sous la responsabilité de F. PELLERIN), **méthodes électrochimiques et méthodes cinétiques** (sous la responsabilité de G. DURAND), **méthodes nucléaires** (sous la responsabilité de G. REVEL), **analyses de surface** (sous la responsabilité de TRAN MINH DUC), **applications spécifiques**

## MESURES ET CONTRÔLE (R)

**R 1 à R 7 : organisation, méthodes et techniques de mesures** (sous la responsabilité de A. MAMOUNI), **grandeurs thermiques** (sous la responsabilité de G. BONNIER), **grandeurs électriques** (sous la responsabilité de L. ERARD), **mesures dimensionnelles et contrôle non destructif** (sous la responsabilité de M. PRIEL), **volume, masse et temps, grandeurs hydrauliques et pneumatiques** (sous la responsabilité de J. VEAU), **grandeurs mécaniques** (sous la responsabilité de M. PRIEL), **acoustique et vibrations** (sous la responsabilité de J.C. PASCAL), **optique** (sous la responsabilité de J.-L. MEYZONNETTE)

## INFORMATIQUE INDUSTRIELLE (S)

Conseiller éditorial : P. VIDAL  
**S 1 à S 3 : automatique (régulation, systèmes asservis), informatique temps réel, robotique**

## TÉLÉCOMS (TE)

**TE 1 à TE 4 : multimédia** (sous la responsabilité de G. BALESTRAT et de J. JOUHANEAU), **traitement du signal** (sous la responsabilité de G. BALESTRAT et de F. LE CHEVALIER), **réalité virtuelle** (sous la responsabilité de Simon RICHIR), **radiocommunications et radiodétection** (sous la responsabilité de F. LE CHEVALIER), **réseaux et télécommunications** (sous la responsabilité de L. TOUTAIN et de G. MARTINEAU)



TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

S.A. au capital de 1 000 000 €  
Membre de **Weka Business Information**

**Directeur de la publication** : Christian ROBERT  
**Directeur** : Jérôme CLAIR  
**Directeur de la rédaction** : Marc CHABREUIL

**SIÈGE SOCIAL, LA RÉDACTION ET PUBLICITÉ**  
249, rue de Crimée  
75925 PARIS Cedex 19  
Standard : 01 53 35 20 00  
Télécopie : 01 53 35 20 10  
www.techniques-ingenieur.fr

**RÉDACTION**  
**Directeur de la rédaction** : Marc CHABREUIL (20.36)  
(marc.chabreuil@teching.com)

**Responsable d'édition marketing** :  
Maud BUISINE (20.26)  
(maud.buisine@teching.com)  
Informatique  
Télécoms  
Projets électroniques

Anne-Marie GAULIER (20.34)  
(anne-marie.gaulier@teching.com)  
Analyse et Caractérisation  
Électronique : composants et systèmes  
Mesures et Contrôle  
Informatique industrielle

Françoise HURTAUD (20.28)  
(francoise.hurtaud@teching.com)  
Constantes physico-chimiques  
Matériaux métalliques  
Sciences fondamentales  
Travail des matériaux - Assemblage

Cécile-Anne NAUDIN (20.31)  
(cecile-anne.naudin@teching.com)  
Agroalimentaire  
Génie électrique  
Génie des procédés  
Plastiques et Composites

Laurence ROSSET (20.32)  
(laurence.rosset@teching.com)  
L'entreprise industrielle  
Environnement  
Revue « *Instantané Techniques* »

Catherine SOUNY (20.29)  
(catherine.souny@teching.com)  
Construction  
Génie énergétique  
Génie mécanique  
Génie nucléaire

**Responsables d'édition techniques** :  
Josette BOUCHERON, Régine CANTACUZÈNE,  
Liliane DEMAY, Caroline JULLIN, Christine LÉGER,  
Ariane MIZRAH

**FABRICATION**  
**Chef de fabrication** : Jean-Luc LOUAT (20.19)  
(jean-luc.louat@teching.com)  
assisté de Patricia JORIS (20.24)  
(patricia.joris@teching.com)  
Correction : François CERUTTI (20.17) Jean François TREUTENS

**ÉDITION ÉLECTRONIQUE**  
**Chef de projet** : Isabelle PIERRET (20.27)  
(isabelle.pierret@teching.com)

**MARKETING**  
**Responsable marketing** : Marie-Emmanuelle EYRAUD (20.06)  
(marie-emmanuelle.eyraud@teching.com)  
assistée de Stéphanie PLAN (20.03)  
(stephanie.plan@teching.com)

**PUBLICITÉ**  
**Responsable de publicité** : Claudie MARCHAND (20.11)  
(claudie.marchand@teching.com)

**COMMERCIAL France Export**  
249, rue de Crimée  
75925 PARIS Cedex 19

**Directeur commercial**  
Daniel BONVALOT (20.08)  
(daniel.bonvalot@teching.com)

**Export** : Cécile RIDEAU (20.39)  
Téléphone : 33.1.53.35.20.39  
Télécopie : 01.53.35.20.04

**Informations clients** Tél. : 01 53 35 20 20  
**Comptabilité abonnements** Tél. : 01 53 35 20 40  
**Comptabilité vente d'ouvrages** Tél. : 01 53 35 20 30  
**Télécopie** 01 53 35 20 10

# Le caloporteur sodium

par **Gilles RODRIGUEZ**

Ingénieur en génie des procédés

Département d'études des réacteurs du Commissariat à l'Énergie Atomique

<b>1. Structure atomique et caractéristiques du sodium</b> .....	BN 3 680 - 2
1.1 Structures atomiques.....	— 2
1.2 Caractéristiques générales.....	— 2
1.3 Fabrication.....	— 2
<b>2. Impacts du sodium sur la technologie des RNR</b> .....	— 2
2.1 Avantages du sodium .....	— 2
2.2 Inconvénients du sodium.....	— 3
2.3 Impacts technologiques .....	— 3
<b>3. Propriétés chimiques du sodium et ses conséquences</b> .....	— 4
3.1 Réaction du sodium à l'air. Feux sodium .....	— 4
3.2 Réaction du sodium avec l'eau.....	— 5
3.3 Détection et localisation des fuites sodium.....	— 5
3.4 Corrosion des structures par le sodium liquide.....	— 6
<b>4. Contrôle de la qualité du sodium dans un réacteur nucléaire</b> ...	— 6
4.1 Sources de pollution .....	— 6
4.2 Techniques de mesure et contrôle de la qualité du sodium .....	— 7
4.3 Purification du sodium .....	— 8
<b>5. Traitement du sodium</b> .....	— 8
5.1 Traitement du sodium des circuits primaire et intermédiaires.....	— 8
5.2 Traitement du sodium résiduel retenu sur les composants d'un réacteur	— 9
5.3 Traitement <i>in situ</i> .....	— 9
<b>6. Conclusions</b> .....	— 9
<b>Références bibliographiques</b> .....	— 9

**L**e concept d'un **réacteur à neutrons rapides (RNR)** nécessite l'emploi d'un fluide caloporteur non modérateur de neutrons ce qui explique de facto l'élimination de l'eau. Les autres critères également nécessaires pour un fluide caloporteur de cette filière sont :

- une faible section efficace de capture neutronique ;
- une capacité d'extraire une puissance volumique élevée ;
- un bon comportement aux radiations, une corrosion réduite des circuits ;
- une nocivité réduite voire nulle ;
- une grande disponibilité industrielle et un faible coût.

Pour remplir ces critères, le sodium apparaît comme un excellent candidat. Cela explique sa très forte émergence dans la filière rapide lors de la construction dans le monde des réacteurs expérimentaux, et son choix exclusif lors de la construction des réacteurs de démonstration ou des réacteurs prototypes.

D'un point de vue chimique, le sodium est un réducteur très puissant ce qui implique notamment une grande réactivité à l'air et une réaction très vive avec l'eau. Le développement des RNR actuels est donc intimement lié à la technologie spécifique du sodium. Ainsi, les particularités et les concepts technologiques de cette filière sont souvent les conséquences directes des propriétés physico-chimiques du sodium et de son usage comme caloporteur.

# 1. Structure atomique et caractéristiques du sodium

## 1.1 Structures atomiques

Le sodium est un métal qui fait partie de la famille des alcalins constituée des éléments suivants : lithium (Li), sodium (Na), potassium (K), rubidium (Rb), césium (Cs) et francium (Fr). Le symbole Na vient de l'allemand natrium. La configuration électronique des alcalins présente un électron singulet sur la dernière couche électronique. La configuration électronique la plus stable se réalise par la perte de cet électron ce qui conduit à la forme cationique ( $\text{Na}^+$ ). L'atome de sodium possède onze protons, douze neutrons et onze électrons. C'est le seul isotope naturel ; cependant il possède plusieurs isotopes artificiels (§ 2.1).

## 1.2 Caractéristiques générales

À l'état naturel, le sodium occupe le sixième rang quant à son abondance dans la croûte terrestre. Il existe uniquement sous la forme d'ion sodium ( $\text{Na}^+$ ) notamment sous forme de sels dans les océans (chlorure de sodium, bromure de sodium, iodure de sodium). Le sodium existe aussi sous forme de nombreux minéraux dont le sel gemme et les carbonates de sodium. Il est nécessaire d'employer des méthodes chimiques ou électrochimiques pour pouvoir obtenir du sodium métallique. Son obtention date de 1807 et sa première production industrielle de 1895.

À température ambiante et sous atmosphère inerte, le sodium se présente sous la forme d'un solide mou possédant un éclat métallique rappelant l'argent. La découpe de ce métal peut se faire manuellement par une lame de couteau (figure 1). Sa résistance à la coupe est semblable au beurre froid. Liquide, l'aspect du sodium pur sous atmosphère inerte est très proche du mercure. Il présente une couleur argentée (effet de miroir) (figure 2), est totalement opaque, sa fluidité est semblable à celle de l'eau et il ne mouille bien les structures métalliques qu'après avoir été porté à une température supérieure à 300 °C pendant au moins 8 h.



Figure 1 – Sodium solide découpé à l'air libre



Figure 2 – Ampoule de sodium sous atmosphère inerte

## 1.3 Fabrication

Le sodium métallique est obtenu à partir de l'électrolyse d'un bain de chlorure de sodium et de chlorure de calcium à 600 °C. Le chlorure de sodium provient du raffinage du sel marin pour obtenir un chlorure de sodium de grande pureté. Le chlore est récupéré à l'anode en graphite et le sodium est récupéré sous forme liquide à la cathode. Le chlorure de calcium est ajouté pour abaisser le point de fusion du bain électrolytique. Le sodium récupéré subit ensuite une série de purifications pour éliminer les impuretés présentes, notamment le calcium séparé par filtration à basse température. Pour l'industrie nucléaire, il est nécessaire de prendre un sodium de très grande qualité dit « sodium raffiné » ou « sodium de qualité nucléaire », notamment pour éviter l'activation des impuretés. Ce sodium possède en particulier une concentration en calcium inférieure à 2 p.p.m. (1 p.p.m. = 1 mg/kg), contre 300 à 400 p.p.m. pour du sodium standard, cela afin d'éviter des phénomènes de précipitation intempestifs lors de l'exploitation des installations.

# 2. Impacts du sodium sur la technologie des RNR

## 2.1 Avantages du sodium

Le sodium présente des caractéristiques physiques remarquables qui en font un fluide caloporteur bien adapté à l'utilisation dans un RNR (tableau 1), avec notamment une large plage de température à l'état liquide ce qui permet une utilisation à la pression atmosphérique normale, une très bonne conductibilité thermique (100 fois celle de l'eau), une viscosité et une masse volumique à 400 °C voisines de celles de l'eau à 20 °C. Cette équivalence permet d'effectuer des simulations hydrauliques du sodium liquide avec des maquettes en eau. La tension de vapeur est faible : dans les conditions normales d'exploitation la production d'aérosols est donc très limitée. En plus de la chaleur, le sodium véhicule aussi très bien les ondes sonores et ultrasonores et l'électricité. Il possède aussi des propriétés paramagnétiques.

Sous flux neutronique, le sodium s'active pour fournir les isotopes artificiels présentés dans le tableau 2. Les produits d'activation du sodium ont une période relativement courte. Après l'arrêt d'un réacteur, seul le  $^{22}\text{Na}$  sera décelable au bout de quelques jours.

Tableau 1 – Principales propriétés physiques du sodium (liquide)

Propriétés	Température (en °C)			
	100	200	400	600
Masse volumique $\rho$ .....(kg/m <sup>3</sup> )	926,9	903,6	856,2	808,2
Capacité thermique massique $C_p$ .....[J/(kg · K)]	1 383	1 339	1 279	1 255
Conductivité thermique $\lambda$ .....[W/(m · K)]	87,3	81,8	71,6	62,3
Viscosité dynamique $\mu$ .....(en 10 <sup>-4</sup> Pa · s)	6,846	4,568	2,791	2,066
Résistivité électrique $\rho_e$ .....(en 10 <sup>-7</sup> $\Omega$ · m)	0,971 9	1,351	2,214	3,282
Tension superficielle $\sigma$ .....(N/m)	0,196 7	0,186 7	0,166 7	0,146 7
Température de fusion $\theta_f$ à 1 atm (1,01325 bar).....(°C)	97,8			
Température d'ébullition $\theta_v$ à 1 atm (1,01325 bar).....(°C)	881,4			
Coefficient de dilatation volumique $\Delta V$ .....(%)	+ 2,7			

Tableau 2 – Réactions neutroniques avec le sodium 23

Réaction avec <sup>23</sup> Na	Produit formé	Période	Principaux rayonnements émis	Énergie (MeV)
(n, $\gamma$ )	<sup>24</sup> Na	15 h	$\gamma$ $\gamma$	1,37 2,78
(n, p)	<sup>23</sup> Ne	38 s	$\gamma$ $\gamma$	0,44 1,65
(n, 2n)	<sup>22</sup> Na	2,58 ans	$\gamma$	1,28
(n, $\alpha$ )	<sup>20</sup> F	11 s	$\gamma$ $\beta$	1,63 5,4

## 2.2 Inconvénients du sodium

Le sodium métallique est un très fort réducteur (passage de l'état Na à Na<sup>+</sup>). Cette instabilité chimique se caractérise notamment par son inflammation spontanée au contact de l'air ou de l'oxygène à partir de 130 °C et par sa vigoureuse réactivité chimique au contact de l'eau suivant une réaction exothermique produisant de la soude et de l'hydrogène.

Lorsqu'il contient de l'oxygène dissous, le sodium devient corrosif vis-à-vis des aciers austénitiques et ferritiques. Pour limiter ces phénomènes, une purification continue est nécessaire. Enfin, le sodium est complètement opaque. Une inspection des structures sous sodium ne peut donc pas se faire par des méthodes optiques classiques.

## 2.3 Impacts technologiques

Les spécificités du sodium ont conditionné de nombreux choix technologiques sur les RNR, notamment pour répondre en matière de sûreté aux exigences requises.

■ La **réactivité du sodium vis-à-vis de l'eau** implique la conception de circuits intermédiaires entre le circuit primaire du réacteur et les circuits de génération de vapeur d'eau. Ces circuits intermédiaires, appelés aussi circuits secondaires, permettent d'éviter, en cas de perte d'étanchéité, tout risque de contact entre le sodium radioactif du circuit primaire et de la vapeur d'eau sous pression. Au niveau

des générateurs de vapeur (échangeurs de chaleur entre les circuits secondaires et l'eau), des mesures sensibles d'hydrogène dans le sodium permettent de détecter au plus tôt toute fuite.

■ La **réactivité du sodium vis-à-vis de l'air** implique que tous les circuits soient sous atmosphère inerte d'argon ou éventuellement d'azote. Il est également nécessaire de pouvoir détecter toute fuite de sodium, le plus tôt possible, pour intervenir rapidement et limiter ses conséquences.

■ La **corrosion induite par le sodium lorsqu'il est impur** impose de maintenir une qualité constante du sodium. Il est donc nécessaire de prévoir tout au long de l'exploitation d'un réacteur des dispositifs de purification du sodium. Les différentes opérations de maintenance devront en outre se faire en respectant des critères très rigoureux de propreté et d'étanchéité.

■ L'**opacité du sodium** implique de mettre en œuvre des moyens de contrôle et de visualisation alternatifs aux systèmes optiques pour réaliser les opérations de maintenance, d'inspection et de réparation : les ultrasons.

■ Le sodium étant **solide à température ambiante**, il est nécessaire de préchauffer toutes les structures, les tuyauteries et les réservoirs pour pouvoir le maintenir à l'état liquide et de calorifuger toutes les structures.

■ L'**instrumentation et la technologie des circuits sodium** sont très spécifiques. Les propriétés métalliques et paramagnétiques du sodium sont utilisées pour la conception d'une technologie spécifique, par exemple pour les pompes électromagnétiques, les débitmètres ou les sondes de niveau.

■ La **présence d'aérosols** nécessite la mise en place de dispositifs de piégeage, évitant des dépôts ou des risques de blocage des pièces tournantes.

## 3. Propriétés chimiques du sodium et ses conséquences

Ce sont les particularités chimiques du sodium qui ont édicté la plupart des axes de recherche établissant des technologies sûres et fiables pour maîtriser ce caloporteur et l'exploiter en toute sécurité.

Les principaux axes de recherches se sont donc orientés vers les domaines présentés dans les paragraphes suivants.

### 3.1 Réaction du sodium à l'air. Feux sodium

Les réactions et la réactivité du sodium au contact de l'air dépendent de nombreux paramètres tels que la température du sodium, son état de dispersion, le taux d'humidité de l'air.

Du sodium solide fraîchement coupé à l'air libre se ternit très rapidement. Sa coloration en surface passe de gris argenté à gris terne. Dans le temps, cette coloration grise peut virer au blanc ou se recouvrir d'un film liquide. Le changement immédiat de teinte du sodium s'explique par une oxydation surfacique passant de la forme Na à la forme Na<sub>2</sub>O (oxyde de sodium) suivant la réaction :



Dans le temps et en fonction du taux d'humidité de l'air, le sodium peut réagir avec la vapeur d'eau pour former de la soude et de l'hydrogène suivant la réaction :



Par la suite, plusieurs réactions sont en compétition : la poursuite de la réaction sodium/eau, l'hydratation de la soude et la carbonatation de la soude au contact du CO<sub>2</sub> de l'air. La température du sodium et surtout le taux d'humidité de l'air influent sur la prépondérance de ces réactions. Dans un air humide (point de rosée au-delà de +5 °C), le sodium continue de réagir avec l'eau et se recouvrira en surface de soude liquide. Des petites bulles apparaîtront en une dizaine de minutes. Dans un air sec (point de rosée en deçà de -5 °C), le sodium se recouvre d'une pellicule solide et blanche de carbonates de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et NaHCO<sub>3</sub>).

Lorsque le sodium est liquide, il est susceptible de s'autoenflammer entre 25 et 30 °C au-dessus de son point de fusion. Avec une nappe de sodium calme, le sodium ne s'enflamme pas en dessous de 200 °C. L'inflammation du sodium se caractérise par l'apparition en surface de nodules. La flamme de sodium est généralement localisée sur ces nodules et ne dépasse pas la hauteur d'un centimètre. La décroissance de la température au-dessus de la zone de flamme est très rapide : la température ne dépasse pas la centaine de degrés à un mètre au-dessus du foyer, ce qui permet de s'en approcher très près, d'autant plus que les aérosols produits absorbent une grande partie du rayonnement. En combustion, le sodium reste à l'état liquide et sa température se stabilise entre 650 °C et 800 °C sans jamais atteindre la température d'ébullition (880 °C). Le taux de combus-

tion du sodium en nappe est de l'ordre de la trentaine de kg/(m<sup>2</sup> · h). La flamme de sodium est d'une couleur jaune-orangée très caractéristique (correspond à la raie d'émission du sodium de longueur d'onde allant de 565 à 610 nm). La température au cœur de la flamme peut atteindre 1 340 °C. Les aérosols produits sont constitués d'un mélange d'oxyde de sodium (Na<sub>2</sub>O), de peroxyde de sodium (Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), de soude (NaOH) et de carbonates de sodium (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> et NaHCO<sub>3</sub>) en proportions variables selon que l'air est plus ou moins humide et plus ou moins chargé de dioxyde de carbone. La production d'aérosols lors d'un feu sodium constitue la principale difficulté rencontrée par les intervenants en cas de feu : ils réduisent considérablement la visibilité et il convient de se protéger contre leur nocivité chimique (irritation des muqueuses des voies respiratoires provoquant des difficultés respiratoires).

En se rapportant aux seuls paramètres de combustion et nonobstant la présence des aérosols opaques et nocifs, l'incendie de sodium paraît plus facilement maîtrisable qu'un feu d'hydrocarbure (tableau 3). Il reste à définir un moyen d'extinction de ces feux sodium pour lesquels l'eau est évidemment bannie. Un système passif d'extinction consiste à disposer de bacs étouffoirs : ces systèmes métalliques permettent de limiter les conséquences d'une fuite de sodium en contribuant à diviser la nappe de sodium dans plusieurs compartiments indépendants et à isoler l'oxygène de l'air du métal enflammé.

Comme méthode d'extinction active des feux de sodium, une poudre extinctrice du nom de *Marcalina* a été mise au point. Cette poudre contient des carbonates alcalins et du graphite. Non corrosifs, ces composants ne réagissent pas avec le sodium et ne forment à son contact aucun produit nocif. À haute température, cette poudre forme à la surface du sodium un film pâteux étanche isolant la surface du métal de l'air. Cette poudre permet d'éteindre les feux de sodium, quelles que soient leurs températures. L'extinction se réalise par épandage de la poudre sur le feu pour réaliser son étouffement (figure 3). Dans la *Marcalina*, le graphite joue à la fois le rôle d'agent d'extinction et de fluidifiant permettant à la poudre de mieux s'écouler.

Compte tenu de la nocivité des aérosols produits et de la très grande réactivité du sodium, l'extinction d'un feu se réalisera avec des équipements de protection individuelle adaptés comportant : gants, lunettes enveloppantes, vêtements ignifugés résistants au sodium (de type NOMEX), bottes en cuir et appareil de respiration autonome (figure 4).

Les études de feux sodium ont concerné la phénoménologie de la combustion du sodium, ainsi que les caractéristiques et les conséquences des différents feux considérés comme enveloppes de situations incidentelles : les feux en nappe, les feux pulvérisés, et les feux mixtes. Ces études ont permis de valider les moyens et les stratégies pour contrôler leur impact.

Tableau 3 – Combustion comparée du sodium et de l'essence en nappe

Caractéristiques	Sodium	Essence
Taux de combustion .....[kg/(m <sup>2</sup> · h)]	de 25 à 50	120
Pouvoir calorifique..... (kJ/kg)	10 000	44 000
Chaleur latente (ou enthalpie) de vaporisation ..... (kJ/kg)	3 800	350
Hauteur de flamme .....	Moins de 1 cm	Plusieurs mètres
Température à 80 cm au-dessus de la surface ..... (°C)	Moins de 100	800
Quantité d'air consommé..... (m <sup>3</sup> /kg)	1	10



Figure 3 – Feu de sodium en laboratoire (quelques grammes)

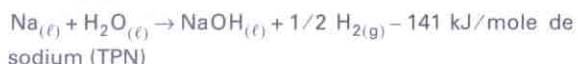


Figure 4 – Extinction d'un feu de sodium de plusieurs kilogrammes

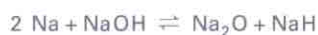
## 3.2 Réaction du sodium avec l'eau

Dans un réacteur nucléaire, les causes possibles de réaction sodium/eau se situent principalement au niveau du générateur de vapeur où il peut y avoir introduction d'eau sous pression dans le sodium du circuit intermédiaire. La réaction chimique entre le sodium et l'eau est vigoureuse et très exothermique. Trois principales réactions peuvent avoir lieu, selon les conditions de température et de pression :

– réaction principale :



– réactions secondaires :



(TPN : température et pression normales)

Tableau 4 – Prépondérance des produits de la réaction sodium/eau en fonction des conditions

Domaine de température	Excès d'eau	Excès de sodium
$T < 300 \text{ } ^\circ\text{C}$	NaOH, H <sub>2</sub> , NaH	Na <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> , NaH
$300 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 430 \text{ } ^\circ\text{C}$	Na <sub>2</sub> O, NaH, H <sub>2</sub> , NaOH	Na <sub>2</sub> O, NaH, H <sub>2</sub>
$430 \text{ } ^\circ\text{C} < T$	NaOH, H <sub>2</sub>	NaOH, H <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O

Les produits de réaction sont différents selon les conditions initiales de température et de concentration des réactants. Dans le tableau 4, sont indiqués les divers produits rencontrés suite à une réaction sodium/eau.

*Nota* : les produits cités sont classés par ordre décroissant des quantités obtenues.

Les effets de la réaction sodium/eau dépendent fortement du niveau d'importance de la fuite et de sa localisation. Toutefois, le caractère fortement exothermique de la réaction associé à un dégagement d'hydrogène chaud (1 000 à 1 200 °C) peut entraîner des effets de pression et de température et une formation de produits corrosifs susceptibles de créer des dommages importants dans le générateur de vapeur lui-même et les circuits intermédiaires associés.

L'hydrogène issu de la décomposition de l'hydruide peut entraîner une fragilisation des matériaux par pénétration intergranulaire. Pour prévenir cette série d'événements, plusieurs systèmes de détection d'hydrogène et de protection existent (cf. [B 3 170] *Réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium*).

## 3.3 Détection et localisation des fuites sodium

Compte tenu de la réactivité du sodium, la détection et la localisation des éventuelles fuites d'un circuit est un dispositif important mis en œuvre pour la sûreté des RNR. Les détecteurs de fuite doivent fournir des indications rapidement après le début de l'écoulement du sodium afin que les risques d'aggravation de l'état du matériel concerné, par corrosion ou propagation du défaut, soient minimaux pour les fuites mineures ou pour prévenir du risque d'un feu de sodium pour des fuites importantes. Les détecteurs doivent fournir par ailleurs des indications fiables et permettre une certaine localisation de la fuite. Les grosses fuites (débit supérieur à 1 000 cm<sup>3</sup>/min) ont des effets marqués et rapides qui permettent de les détecter aisément par des détecteurs d'ambiance (fumées, aérosols). Les petites et moyennes fuites (de 10 à 1 000 cm<sup>3</sup>/min) sont détectables par des systèmes localisés, situés sur les tuyauteries et les composants.

Deux types de détection sont mis en œuvre : la détection locale et la détection d'ambiance.

Les **moyens de détection locale** font appel à des dispositifs électriques qui exploitent la bonne conductibilité du sodium. Ils sont placés sur ou au voisinage immédiat des structures à surveiller avec une certaine distribution spatiale. Tous ces détecteurs sont constitués d'une électrode métallique isolée électriquement d'une autre partie métallique très proche, portée au potentiel de terre. L'électrode isolée est alimentée par un générateur de tension continue. L'arrivée du sodium liquide au niveau de ce dispositif permet, lorsque le sodium touche les deux parties, l'apparition d'un courant électrique synonyme de présence de sodium, donc de fuite. Suivant ce principe existent :

- les **détecteurs par bougies** sur les appareils, dans les bacs de rétention ou dans des gouttières placées sous les tuyauteries ;
- les **détecteurs par cordons** sur toutes les tuyauteries et les réservoirs sodium ;

— les **détecteurs de type sandwich** pour la surveillance des fuites au niveau des soudures circulaires ou longitudinales (coudes).

Les **moyens de détection d'ambiance** ont pour principe de détecter la présence d'aérosols de sodium dans l'air ambiant prélevé et analysé par spectrophotométrie de flamme. La limite de détection de ce type de détecteur est de 0,1 µg de sodium par litre d'air.

### 3.4 Corrosion des structures par le sodium liquide

Le phénomène de corrosion dominant est la dissolution des éléments constitutifs de l'acier (Fe, Cr, Ni, Mn, C) dans les zones chaudes et la redéposition de ces éléments dans les zones froides, responsable de la contamination du circuit primaire du réacteur. Le sodium sert d'agent de transfert. Ce phénomène de corrosion est mineur avec du sodium propre. Par contre, lorsque le sodium contient de l'oxygène dissous (au-delà du p.p.m.), cette cinétique de corrosion par dissolution s'accroît selon la réaction :



où M représente le fer ou le chrome, le nickel n'étant pas concerné.

#### ■ Lois de cinétique de corrosion

● **En dessous de 5 p.p.m. d'oxygène** dissous dans le sodium (condition habituelle de fonctionnement), le modèle de Baque est employé pour l'acier inoxydable pour une vitesse inférieure à 10 m/s :

— si la température est inférieure à 544 °C, le taux de corrosion est nul ;

— si la température est supérieure à 544 °C, la perte de masse  $\Delta \ell$  globale (en mg/cm<sup>2</sup>) à la fin de la première année de corrosion est évaluée comme suit :

$$\Delta \ell = 7,8V^{0,435} [\text{O}_{\text{ppm}}] \exp [-150/(T-544)]$$

avec  $V$  la vitesse d'écoulement du fluide en m/s,  
 $[\text{O}]$  la concentration d'oxygène dissous en p.p.m.,  
 $T$  la température en °C.

Dans cette situation, la cinétique de corrosion du sodium est très faible et la seule conséquence notable est son impact sur la contamination des circuits et notamment les parties froides des échangeurs intermédiaires.

● **Au-delà de 5 p.p.m. d'oxygène** dissous dans le sodium, le modèle de Thorley est employé :

— si  $V \leq 4$  m/s :

$$\Delta \ell = (V/4)^{0,435} \times 10^{4,724 + 1,106 \lg [\text{O}_{\text{ppm}}] - [3 \ 913/(T+273)]}$$

— si  $V > 4$  m/s :

$$\Delta \ell = 10^{4,724 + 1,106 \lg [\text{O}_{\text{ppm}}] - [3 \ 913/(T+273)]}$$

● La masse corrodée pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$  (en année), pour chaque élément métallique X se calcule alors suivant la relation :

$$\Delta M_X = C_X \Delta \ell \Delta t$$

avec  $C_X$  la composition de l'élément concerné dans l'alliage.

Les règles générales d'exploitation des RNR définissent une pureté du sodium vis-à-vis de l'oxygène en deçà de 3 p.p.m. Une pollution au-delà de 5 p.p.m. implique l'arrêt immédiat du réacteur.

■ **En situation incidentelle** (perte d'étanchéité d'un circuit sodium), en cas de réaction sodium/eau au niveau des générateurs de vapeur ou lors des interventions sur les circuits après travaux, les problèmes posés sont de toute autre nature. Il s'agit alors de mécanismes de fissuration par corrosion sous contrainte en milieu caustique. Pour des aciers austénitiques et pour des teneurs supérieures à 1 % de soude, le mécanisme de corrosion présente les caractéristiques suivantes :

— corrosion fissurante dont le faciès intergranulaire, transgranulaire ou mixte évolue avec la concentration de la solution caustique ;

— existence d'un seuil de contrainte au-dessous duquel seule une oxydation superficielle se développe ;

— mécanisme de corrosion généralisée fortement dépendant de la température n'intervenant que dans le domaine de stabilité de la soude dans le sodium c'est-à-dire entre 320 et 410 °C.

■ Des **phénomènes de corrosion par la soude** aqueuse peuvent aussi intervenir lors de la mise sous air ou lors du lavage d'un composant. À partir de 80 °C pour les aciers ferritiques et 110 °C pour les aciers austénitiques, une fissuration essentiellement de type transgranulaire peut être induite. De telles températures sont atteintes lors des phases de préchauffage des installations. Il est donc nécessaire de s'assurer parfaitement de l'absence de soude aqueuse sur les composants avant leur remise en réacteur (rinçage approfondi et séchage poussé).

## 4. Contrôle de la qualité du sodium dans un réacteur nucléaire

### 4.1 Sources de pollution

Sur un réacteur nucléaire, les sources de pollution sont inévitables et de plusieurs natures (encadré 1), les plus caractéristiques sont :

— la désorption d'oxygène et d'hydrogène depuis les surfaces métalliques neuves introduites dans le réacteur (nouveau composant, nouvel assemblage combustible) ;

— la décomposition des oxydes métalliques présents en surface par le sodium réducteur ;

— la diffusion d'hydrogène des générateurs de vapeur vers le sodium secondaire, du fait de la corrosion des tubes côté eau et de la décomposition thermique de l'hydrazine ajoutée en excès à l'eau pour limiter la corrosion ;

— la production de tritium et d'hydrogène au niveau du cœur par fission ternaire du combustible (<sup>239</sup>Pu et <sup>235</sup>U) et par activation du bore contenu dans les barres de commande sous la forme B<sub>4</sub>C (carbure de bore) ;

— la génération de produits d'activation soit par activation du sodium (<sup>22</sup>Na, <sup>24</sup>Na), soit par activation des éléments constitutifs de l'acier, dissolution de ces éléments et redéposition en partie froide (<sup>54</sup>Mn, <sup>60</sup>Co, <sup>58</sup>Co, <sup>51</sup>Cr) ;

— la pollution externe des gaines des assemblages par du combustible lors de leur fabrication, qui pourra produire des produits de fission ;

— la pollution par des produits de fission (<sup>134</sup>Cs et <sup>137</sup>Cs) en cas de rupture de gaine fortuite ou volontaire dans le cas de tests. Possibilité d'une présence de combustible solide (particules) en cas de rupture franche au niveau du combustible ;



— la pollution par du carbone en cas d'introduction de produits organiques, notamment en situation accidentelle lors de fuite d'huile de pompe par exemple.

#### Encadré 1 – Sources de pollution du sodium

##### 1. Au démarrage

- Hydrogène et oxygène dissous
- Impuretés dans le sodium
- Gaz adsorbé sur les structures métalliques
- Qualité du gaz d'inertage

##### 2. Situation opérationnelle

###### 2.1 Réacteur en fonctionnement

- Hydrogène
- Oxygène
- Corrosion des aciers
- Activation des produits de corrosion
- Produits de fission dus à la pollution des gaines

###### 2.2 Réacteur en maintenance

- Hydrogène et oxygène
- Eau
- Autres pollutions

##### 3. Situation accidentelle

- Oxygène (air)
- Eau (fuite générateurs de vapeur)
- Rupture de gaine de combustible
- Autres produits (huile)

## 4.2 Techniques de mesure et contrôle de la qualité du sodium

Deux principes complémentaires de mesure de la qualité du sodium existent : les mesures en ligne (données continues) et les mesures par prélèvements qui fournissent une estimation de la qualité du sodium à un instant donné.

■ La principale mesure en ligne consiste à évaluer la pureté du sodium vis-à-vis de l'oxygène et de l'hydrogène au moyen d'un indicateur de bouchage. Un indicateur de bouchage prélève un débit

donné de sodium (200 L/h pour Phénix, 50 ou 180 L/h pour Superphénix) et lui fait subir un cycle thermique de refroidissement puis de réchauffement dans une canalisation, à perte de charge constante. Le refroidissement est progressif jusqu'à atteindre la température de saturation des impuretés oxygène et hydrogène. À ce point, les impuretés vont cristalliser sur une pastille créant une perte de charge et provoquant la chute du débit de circulation (**bouchage**). Le temps nécessaire au bouchage de cette canalisation pour atteindre 50 % du débit nominal est appelé le **palier bas de température**. Lors de la remontée en température du sodium, ces impuretés vont se dissoudre et permettre de retrouver le débit initial (**débouchage**). Les mesures en continu de cette chute de débit de circulation, puis de cette remontée de débit, corrélées aux températures respectives où elles se sont produites, ainsi que la durée du palier bas permettent d'estimer en ligne la qualité du sodium. On parle donc de « **température de bouchage** », de « **température de débouchage** » et de « **durée de palier** » pour définir un niveau de pureté de sodium sur réacteur (figure 5). Cette technique de mesure est très spécifique à la technologie du sodium. Elle fournit une indication de la teneur en impuretés susceptibles de cristalliser sur les parois froides.

Les autres techniques de mesure en ligne sont plus classiques bien qu'elles doivent être adaptées pour tenir aux températures et au contact du sodium liquide. Il s'agit d'hydrogénomètre en phase gaz et en phase sodium. Des oxygénomètres spécifiques au sodium ont été employés à titre expérimental. La chromatographie est employée sur le gaz de couverture.

■ Les mesures en ligne ne permettent pas de suivre des pollutions autres que l'oxygène et l'hydrogène. Pour cela, un **prélèvement de sodium** est nécessaire. Le prélèvement est réalisé au moyen d'un pot en nickel pur qui permet de récupérer 10 à 12 g de sodium. Le sodium recueilli est ensuite hydrolysé et les différentes mesures sont faites sur la soude aqueuse produite. Les techniques de mesure analytique mises en œuvre peuvent être :

— la spectrométrie de masse et la spectrophotométrie à absorption atomique pour les impuretés chimiques (Fe, Cr, Mn, Co, Cu, Zn, Ca, K, Si, B) ;

— la spectrométrie gamma pour les produits d'activation du sodium et de ses impuretés, les produits d'activation des éléments métalliques issus de la corrosion des structures, et les produits de fission ;

— la scintillation liquide pour le tritium et les autres émetteurs bêta ( $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ) ;

— la spectrométrie alpha pour l'uranium, le plutonium et leurs isotopes.

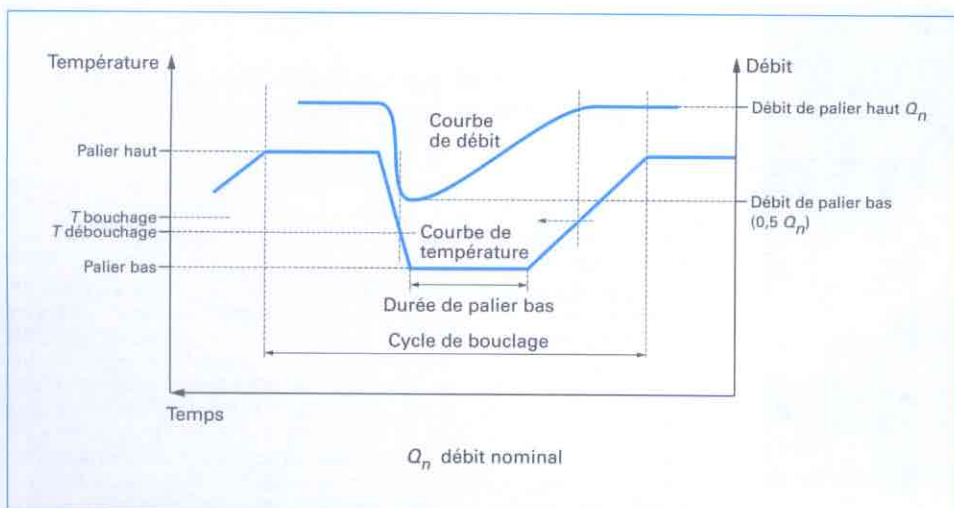


Figure 5 - Enregistrement d'un cycle de bouchage

### 4.3 Purification du sodium

Le contrôle et le maintien d'un état de propreté du sodium est impératif. Cette politique de qualité permanente du sodium est maintenue pour les deux principales impuretés dissoutes dans le sodium : l'oxygène et l'hydrogène. La solubilité de ces deux constituants est donnée par la loi de Noden pour l'oxygène et la loi de Whittingham pour l'hydrogène :

$$\lg[\text{O}_{\text{ppm}}] = 6,25 - 2\,444,5/T \text{ (avec } T \text{ en K)}$$

$$\lg[\text{H}_{\text{ppm}}] = 6,467 - 3\,023/T \text{ (avec } T \text{ en K)}$$

Ces impuretés peuvent :

- induire des risques de bouchage en zone froide (précipitation d'oxyde et d'hydrure de sodium) ;
- accentuer les cinétiques de corrosion pour ce qui concerne l'oxygène ;
- perturber le système de détection de réaction entre le sodium et l'eau au niveau des générateurs de vapeur (élévation de la teneur en hydrogène).

Le sodium est donc purifié en permanence au moyen d'unités de purification spécifiques appelées **pièges froids** et disposées sur les circuits primaire et intermédiaires. Une fraction du débit sodium du circuit est dérivée vers le piège froid. Le fonctionnement d'un piège froid consiste à abaisser la température du sodium pour qu'il atteigne le domaine de sursaturation de ses impuretés. Ce refroidissement se réalise au moyen d'un échangeur sodium/sodium externe puis d'un échangeur sodium/sodium intégré au piège et d'un système de refroidissement externe. Les impuretés présentes en excès cristallisent alors pour donner de l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) et de l'hydrure de sodium ( $\text{NaH}$ ). Ces cristaux se forment et grossissent sur un support métallique de laine d'acier (figure 6). Le sodium purifié et refroidi passe ensuite dans l'échangeur sodium/sodium puis dans le circuit. Le niveau de pureté recommandé est de moins de 1,5 p.p.m. en oxygène et moins de 0,1 p.p.m. en hydrogène. Toutefois une concentration inférieure à 3 p.p.m. est jugée acceptable. Les pièges froids fonctionnent à une température de point froid (limite de température de refroidissement du sodium liquide) comprise entre 110 et 120 °C (figure 7).

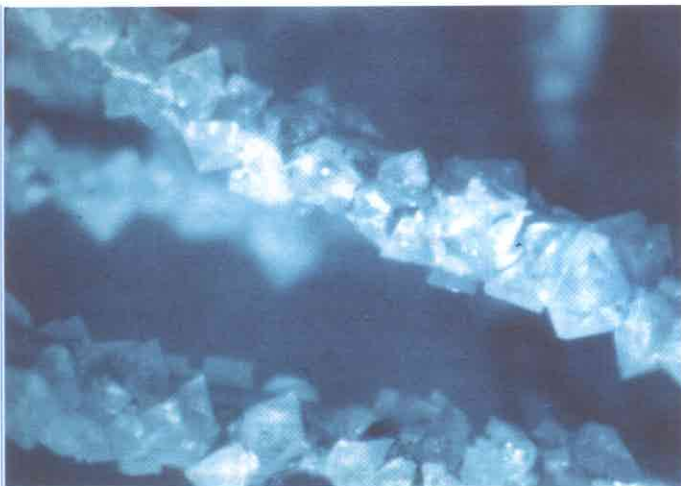


Figure 6 - Cristaux d'oxyde de sodium

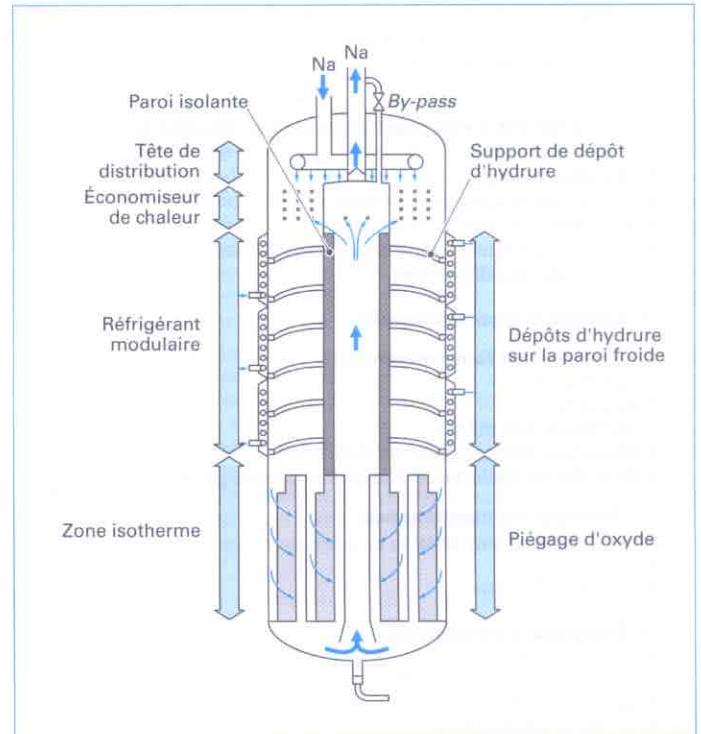


Figure 7 - Vue en coupe d'un piège froid secondaire de Superphénix, Document CEA

## 5. Traitement du sodium

En fin de vie d'un RNR, le caloporteur sodium est considéré comme un déchet nucléaire. Toutefois, compte tenu de la réactivité du sodium avec l'eau et l'air, toute pièce en contact avec du sodium métallique ou tout sodium de réacteur ne pourra être considéré comme un déchet nucléaire standard. Pour le déclasser des RNR intervient donc une étape spécifique de traitement du sodium et des déchets sodium. Elle consiste à transformer le sodium métallique potentiellement réactif en un composé chimiquement stable : dans une première étape de la soude ou du carbonate de sodium, et ensuite éventuellement un conditionnement approprié.

### 5.1 Traitement du sodium des circuits primaire et intermédiaires

Le traitement du sodium des circuits primaire et intermédiaires nécessite, compte tenu des quantités mises en jeu (plus de 5 500 t pour Superphénix), un procédé de traitement industriel et continu, tel que le **procédé NOAH** (figure 8).

Des gouttelettes de sodium et des gouttelettes d'une solution de soude à 10 mol/L sont injectées dans une enceinte fermée au moyen de deux pompes doseuses et donnent lieu à une succession de microréactions. Par ce moyen la réaction est modérée et contrôlée. L'exothermie de la réaction nécessite un refroidissement continu par un échangeur liquide/liquide. L'hydrogène produit contaminé en tritium est séché, dilué dans un gaz inerte et rejeté à l'atmosphère en accord avec les autorisations de rejet. La soude concentrée produite (10 mol/L) peut ensuite, soit être destinée à la neutralisation d'effluents actifs acides, soit être neutralisée puis enrobée dans un

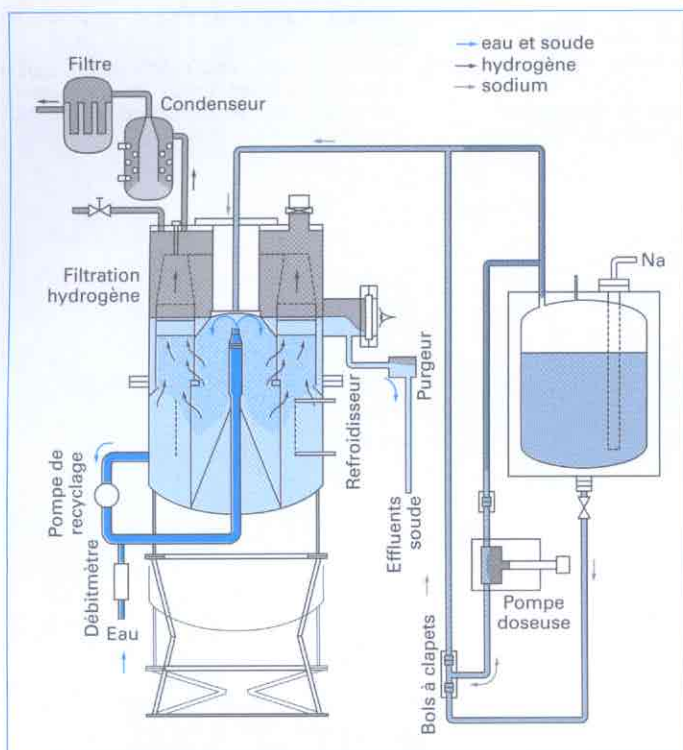


Figure 8 – Schéma du procédé NOAH, Document CEA

liant hydraulique pour constituer des colis acceptables par l'ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) pour le stockage en surface.

La validation industrielle de ce procédé s'est faite par l'élimination en trois mois des 37 t de sodium primaire du réacteur expérimental Rapsodie à un débit de traitement de 40 kg de Na/h. Une installation de plus grande capacité (120 kg/h) a été construite sur ce même principe pour le traitement des 1 300 t du sodium de PFR (réacteur britannique).

## 5.2 Traitement du sodium résiduel retenu sur les composants d'un réacteur

En exploitation normale comme en fin de vie, le sodium sous forme métallique doit être éliminé de tout composant extrait du réacteur. Même bien vidangé, il reste une épaisseur résiduelle de sodium d'au moins 30  $\mu\text{m}$  sur les parois verticales et 1 mm sur les surfaces horizontales d'un composant. Chaque RNR dispose d'installations de lavage de ses composants. Ces installations (appelées puits de lavage) sont généralement au nombre de trois :

- une pour traiter les assemblages constituant le cœur ;
- une pour traiter les petits composants extractibles (perches) ;
- une pour traiter les gros composants (pompes primaires et échangeurs intermédiaires).

Dans les **puits de lavage**, le sodium est traité progressivement par atomisation d'un brouillard constitué de gouttelettes d'eau et de dioxyde de carbone. Au contact de l'eau, le sodium se transforme en soude et en hydrogène. L'hydrogène est évacué dans les rejets gazeux. La soude produite se transforme en carbonate de sodium par contact avec le  $\text{CO}_2$ . Le procédé est maîtrisé en contrôlant la densité en eau du brouillard et en pilotant par rapport à la concentration en hydrogène des rejets gazeux ( $\text{H}_2 < 1\%$ ). En phase d'exploitation, les puits de lavage servent à nettoyer les composants et à les décontaminer en vue de leur réparation. Lors de l'arrêt définitif, ces puits participent au déclassement du réacteur en éliminant le sodium résiduel des composants extraits.

## 5.3 Traitement *in situ*

Lorsque par son volume important ou par sa géométrie, un composant souillé en sodium ne peut être lavé dans un puits de lavage, il est nécessaire de réaliser des opérations d'élimination du sodium *in situ*. Cela intervient pour les grandes structures : cuves de réacteur, réservoirs de sodium et circuits. Le procédé consiste à injecter dans l'enceinte à nettoyer un gaz inerte véhiculant une très faible quantité d'eau, le gaz restant à la limite de saturation à température ambiante.

En France, a été choisi un mélange azote/dioxyde de carbone/humidité. Ce procédé de carbonatation lente du sodium permet, avec le temps, la transformation progressive du sodium en soude anhydre puis en carbonate de sodium. Ce procédé permet de traiter en 1 000 h des épaisseurs de sodium de plus de 4 cm. Il est envisagé pour le nettoyage du sodium résiduel de la cuve primaire et des circuits intermédiaires de RNR, en vue de leur futur démantèlement.

## 6. Conclusions

La faisabilité de la filière des **réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium** a été complètement démontrée en France par le fonctionnement des réacteurs Phénix et Superphénix. À cette faisabilité, s'ajoute une démonstration de la maîtrise de l'exploitation du sodium liquide comme fluide caloporteur. Cette filière a connu une mise en veille en Allemagne, en France, au Royaume-Uni et aux États-Unis. En revanche, les études se poursuivent maintenant en Asie, par les projets de réacteurs CEFR en Chine, PFBR en Inde, Kali-mer en Corée du Sud, DFBR au Japon, et BN800 en Russie. L'exercice Génération IV mené dans un cadre international à l'initiative des États-Unis (2001-2002) a clairement identifié les RNR à sodium parmi les six filières présentant un potentiel pour la quatrième génération de réacteurs nucléaires.

Pour plus de renseignements, le lecteur pourra se reporter aux références [1] à [11].

## Références bibliographiques

- |   |  |   |
|---|--|---|
| <p>[1] PASCAL (P.). – <i>Nouveau traité de chimie minérale. Tome II – Lithium – Sodium</i>. Édition Masson et Cie.</p> <p>[2] FOUST (O.J.). – <i>Sodium-NaK engineering handbook Vol 1</i>. Ed Gordon and Breach.</p> <p>[3] PETIOT (P.) et SEILER (J.M.). – <i>Physical properties of sodium : a contribution to the esti-</i></p> | <p><i>mation of critical coordinates</i>. High Temperature – High Pressure. Vol. 16, p. 289-293 (1984).</p> <p>[4] MORITA (K.) et FISHER (E.A.). – <i>Thermodynamic properties and equations of State for fast reactors safety analysis</i>. Nuclear Engineering and Design n° 183 (1998).</p> | <p>[5] BORGSTEDT (H.U.) et MATHEWS (C.K.). – <i>Applied chemistry of the alkali metals</i>. Edition Plenum Press (1987).</p> <p>[6] SITTIG (M.). – <i>Sodium : its manufacture, properties, and uses</i>. Reinhold Publishing Corporation (1956).</p> |
|---|--|---|

- [7] ADDISON (C.C.). – *The chemistry of the liquid alkali metals*. Ed John Wiley & Sons (1984).
- [8] LUTTON (J.M.), COLBURN (R.P.) et WELCH (F.). – *Sodium removal and decontamination of LMFBR components for maintenance*. Atomic Energy Review n° 184 (1980).
- [9] IAEA. – *Status of liquid metal cooled fast reactors technology*. IAEA-TECDOC-1083, International Atomic Energy Agency, Vienna (April 1999).
- [10] IAEA. – *Technical meeting on Operational and decommissioning experience with fast reactors*. Cadarache, France (11-15 March 2002).
- [11] SUBBOTIN (V.I.), ARNOL'DOV (M.N.), KOZLOV (F.A.) et SHIMKEVICH (A.L.). – *Liquid-metal coolants for nuclear power*. Atomic Energy, Vol. 92, n° 1.2002.
-