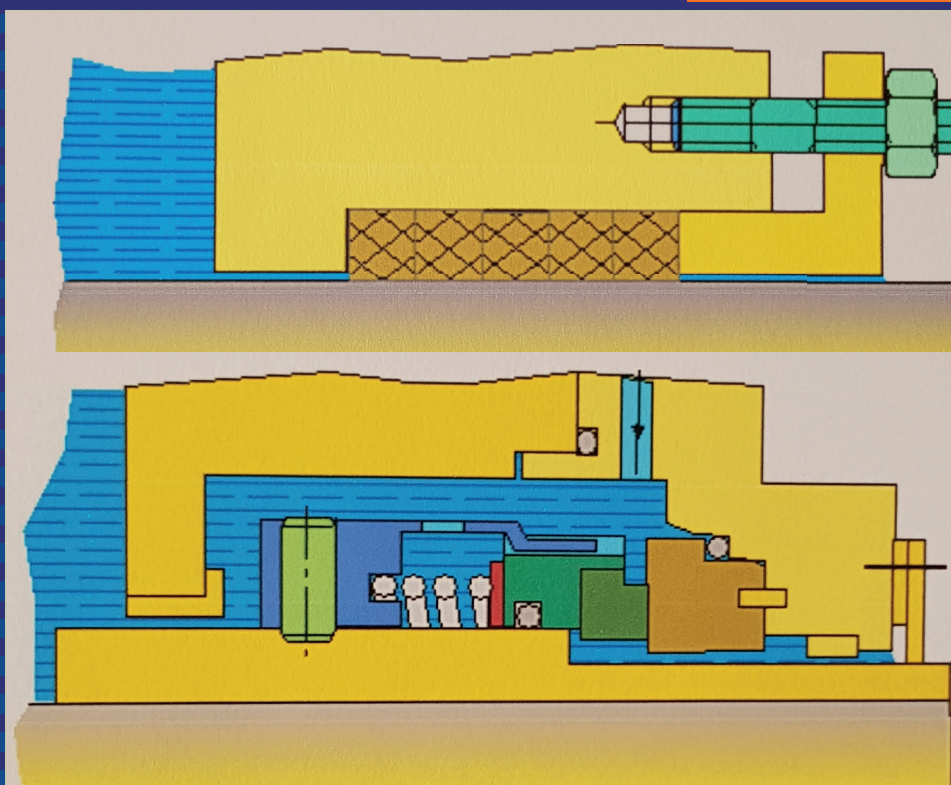


# Confinement des turbomachines

Léon Joseph Randrianarivo



# **Confinement des turbomachines**

## **Dans la collection EDF R&D**

*Efficacité énergétique – Des principes aux réalités*

P. Baudry, 2016

*Les nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique*

D. Noël, 2014

*Guide international du comptage intelligent*

F. Toledo, 2012

*Numériser le travail – Théories, méthodes, expérimentations*

S. Lahlou, V. Nosulenko, E. Samoylenko, 2012

*L'énergie hydraulique, 2<sup>e</sup> édition*

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2012

*Le système nerveux du réseau français de transport d'électricité (1946-2006) :  
60 années de contrôle électrique*

J. Lecouturier, 2012

*La physique des réacteurs nucléaires*

S. Marguet, 2011

*Marketing critique : le consommateur collaborateur en question*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, A. Bonnemaizon, 2010

*Graphes et algorithmes*

M. Gondran, M. Minoux, 2009

*Gestion de la complexité dans les études quantitatives de sûreté de fonctionnement  
des systèmes*

M. Bouissou, 2008

*Calcul de champ électromagnétique : exemples d'application*

J.-C. Vérité, J.-P. Ducreux, G. Tanneau, P. Baraton, B. Paya, 2007

*Les télécommunications au cœur du système électrique français (1946-2000)*

A. Giandou, C. Leclère, J. Lecouturier, J.-M. Spetebroodt, H. Thibert, A. Vilatte, 2007

*Innover en marketing, 15 tendances en mouvement*

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, 2006

*Éléments finis pour l'ingénieur : grands principes et petites recettes*

P. Thomas, 2006

*Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel*

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

## **Dans la collection Socio-économie de l'énergie**

*Énergie et transformations sociales – Enquête sur les interfaces énergétiques*

J. Cihuelo, A. Jobert, C. Grandclément, 2015

# Confinement des turbomachines

**Léon Joseph RANDRIANARIVO**

Ingénieur de l'Ecole nationale supérieure d'Arts et Métiers  
Ingénieur Chercheur Expert en retraite du Département Mécaniques des Fluides,  
Énergies et Environnement d'EDF Lab – Chatou

**L***avoisier*  
**TEC & DOC**

[editions.lavoisier.fr](http://editions.lavoisier.fr)

*Direction éditoriale* : Emmanuel Leclerc  
*Édition* : Emmanuel Leclerc  
*Mise en pages* : Patrick Leleux PAO, Caen (14)

*À mon épouse Fara*

## *Remerciements*

J'ai commencé à rédiger cet ouvrage vers la fin de ma carrière au centre R & D d'EDF à Chatou, carrière au cours de laquelle j'ai eu la chance de consacrer une bonne partie sur les systèmes de confinement des principaux groupes de pompage des centrales thermiques classiques et nucléaires. Dans cette aventure, j'ai été épaulé par mon formidable collègue Louis Mougey, éminent spécialiste EDF sur les étanchéités, à qui j'adresse toute ma reconnaissance la plus sincère pour tout ce qu'il m'a appris dans le domaine. Ma reconnaissance va également à mes autres collègues Denis Buchdahl, Gérard Morel et Jean Luc Rivière pour les échanges très fructueux que j'ai pu avoir avec eux sur les étanchéités.

Par ailleurs, je remercie infiniment Michel Lépine, Ingénieur produit joints d'arbre d'Areva NP Ets de Jeumont, que j'ai beaucoup côtoyé au cours de ma carrière à EDF, et qui a pris gentiment le temps, malgré son planning chargé, de décortiquer cet ouvrage pour me communiquer ses précieuses remarques en tant que spécialiste dans le domaine.

Enfin, mes remerciements vont également à Patrice Rahon, Ingénieur technico-commercial de la société EagleBurgmann France, que j'ai également beaucoup côtoyé au cours de ma carrière, pour les conseils et remarques qu'il m'a prodigués tout au long de l'écriture de cet ouvrage notamment sur les aspects innovation.





# Sigles

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| <b>Areva NP<br/>Ets de Jeumont</b> | Areva NP Établissement de Jeumont fabrique et assure la maintenance en centrale et en atelier chaud des composants mobiles de la boucle primaire des réacteurs nucléaires : les Groupes Motopompes Primaires et les Mécanismes de Commande de Grappes   |
| <b>CPP</b>                         | Circuit Primaire Principal  |
| <b>EPR</b>                         | Initialement <i>European Pressurized water Reactor puis Evolutionary Power Reactor</i> . La première centrale nucléaire française de ce type est Flamanville 3, elle est dimensionnée pour 1 630 MWe net  |
| <b>GM</b>                          | Garniture Mécanique   |
| <b>GMPP</b>                        | Groupe Motopompe Primaire. Les GMPP sont les pompes qui assurent la circulation de l'eau dans le CPP et donc le refroidissement du cœur   |
| <b>GV</b>                          | Générateur de Vapeur  |
| <b>PTFE</b>                        | PolyTétraFluoroÉthylène connu sous le nom de Téflon dans le langage courant (étymologiquement : Téflon est un clin d'œil à TÉtra-FLuoroéthylène la terminaison « on » est en rapport avec les matières plastiques)  |
| <b>RCV</b>                         | Réacteur contrôle Chimique et Volumétrique. Le système RCV assure le contrôle et le maintien de la quantité de fluide nécessaire dans le CPP, permet de contrôler la réactivité du cœur, assure le contrôle chimique du CPP et fournit l'eau froide d'injection nécessaire au fonctionnement des joints d'arbres des GMPP à basse température (pour cette fonction, il est en redondance avec le système RRI) |
| <b>REP</b>                         | Réacteur à Eau Pressurisée. Dans une centrale nucléaire de la filière REP, les calories produites dans le réacteur sont transportées vers les générateurs de vapeur (GV) par une eau pressurisée (environ 155 bar – 300 °C) <i>via</i> les pompes primaires (GMPP) »  |
| <b>RPE</b>                         | Réacteur Purges Events et exhaures nucléaires. Le système RPE a pour fonction de collecter sélectivement les effluents liquides et gazeux qui peuvent présenter une contamination radioactive   |

- RRI** Réacteur Réfrigération Intermédiaire. Le système RRI a une double fonction :  
1/ assurer dans tous les cas le fonctionnement du réacteur, la réfrigération de tous les circuits auxiliaires y compris les circuits de sauvegarde et ; 2/ fournir à tous les systèmes de la centrale une eau de réfrigération traitée qui garantit leur bon fonctionnement en toutes circonstances. Il fournit notamment le réfrigérant de la barrière thermique des joints d'arbre des GMPP (en redondance avec l'injection RCV) et du système RRA qui assure le Refroidissement du Réacteur à l'Arrêt. Le RRI est lui-même refroidi par un circuit dit « d'eau brute » secourue dénommé SEC.
- TPA** Turbo Pompe Alimentaire. Les TPA servent à alimenter en eau dégazée les générateurs de vapeur du côté de l'îlot conventionnel d'une centrale nucléaire

# Notations

## Les presse-étoupe (Chapitre 1)

|            |      |   |
|------------|------|---|
| $\mu$      | –    | Coefficient de frottement   |
| $\omega$   | rd/s | Vitesse angulaire   |
| $\mu_a$    | –    | Coefficient de frottement en statique entre les tresses et la chemise         |
| $\mu_b$    | –    | Coefficient de frottement en statique entre les tresses et le boitard         |
| $\sigma_D$ | Pa   | Pression de serrage du fouloir  |
| $\sigma_k$ | Pa   | Contrainte axiale en fond de boitard  |
| $\sigma_x$ | Pa   | Contrainte axiale dans les tresses à la distance $x$ du fouloir               |
| $cf(x)$    |      | Couple de frottement tresses/arbre pour un élément de tresse de longueur $dx$ |
| $Ct_f(L)$  | mN   | Couple de frottement de l'ensemble des tresses de longueur $L$ sur l'arbre    |
| $D$        | m    | Diamètre du boitard   |
| $d$        | m    | Diamètre de l'arbre   |
| $F$        | N    | Effort axial exercé par le fouloir sur l'empilage de tresses                  |
| $f_a$      | N    | Effort de frottement dans le contact tresses/arbre                            |
| $f_b$      | N    | Effort de frottement dans le contact tresses/boitard                          |
| $h$        | m    | Hauteur des anneaux de tresses dans leur boitard                              |
| $J$        | m    | Jeu radial arbre/boitard  |
| $K$        |      | Coefficient de pression latérale : rapport entre $q_x$ et $\sigma_x$          |
| $K_l$      |      | Coefficient de pression latérale côté arbre                                   |
| $K_o$      |      | Coefficient de pression latérale côté stator                                  |
| $L$        | m    | Longueur totale des tresses   |

|          |               |   |
|----------|---------------|---|
| $N$      | tr/min        | Vitesse de rotation   |
| $p_{1x}$ | Pa            | Pression radiale dans l'interface tresses/chemises d'arbre (ou tige de manœuvre de vannes) à la distance $x$ du fouloir |
| $q_{ax}$ | Pa            | Pression latérale dans le contact tresses/chemises à la distance $x$ du fouloir   |
| $q_{bx}$ | Pa            | Pression latérale dans le contact tresses/boitard à la distance $x$ du fouloir  |
| $Q_x$    | N             | Effort de cisaillement radial à la distance $x$ de la base du fouloir   |
| $Ra$     | $\mu\text{m}$ | Rugosité (écart moyen arithmétique par rapport à la ligne moyenne de rugosité)  |
| $V$      | m/s           | Vitesse   |

### Les joints hydrostatiques (Chapitre 2)

|                    |                   |   |
|--------------------|-------------------|---|
| $\alpha$           | rd                | Angle de conicité de l'interface d'étanchéité   |
| $\mu$              | kg/(s.m)          | Viscosité dynamique   |
| $\rho$             | kg/m <sup>3</sup> | Masse volumique   |
| $\eta$             |                   | Paramètre qui gère le sens de la force de frottement dans le contact bague/douille en fonction du sens d'évolution de la pression : $\eta$ : - 1 à « $P$ » croissante, 0 à « $P$ » stabilisée, + 1 à « $P$ » décroissante |
| $HP$               | Pa                | Haute pression relative   |
| $BP$               | Pa                | Basse pression relative   |
| $\Delta P$         | Pa                | Différence de pression aux bornes du joint  |
| $P(r)$             | Pa                | Champ de pression dans l'interface du joint selon $r$   |
| $Rd$               | m                 | Rayon de la douille de glissement de la partie flottante du joint n° 1  |
| $Re$               | m                 | Rayon extérieur des glaces  |
| $Ri$               | m                 | Rayon intérieur des glaces  |
| $h$                | m                 | Écartement de l'interface au rayon intérieur du joint   |
| $z$                | m                 | Écartement de l'interface au rayon « $r$ »  |
| $lb$               | m                 | Largeur de la bague de glissement   |
| $\vec{v}$          | m/s               | Vecteur vitesse   |
| $V_r$              | m/s               | Composante de la vitesse selon « $r$ »  |
| $F_{r, \theta, z}$ | N                 | Force de volume   |
| $f$                |                   | Coefficient de frottement   |
| $Fh$               | N                 | Poussée d'Archimède   |
| $PJ$               | kg                | Poids du joint n° 1 flottant  |
| $Ff$               | N                 | Force de frottement   |
| $FHP$              | N                 | Force de pression amont   |
| $FBP$              | N                 | Force de pression aval  |

|       |         |                          |
|-------|---------|--------------------------|
| $FA$  | N       | Force d'assise           |
| $FS$  | N       | Force de soulèvement     |
| $Q$   | $m^3/s$ | Débit de fuite volumique |
| $Q_m$ | kg/s    | Débit de fuite massique  |
| $t$   | s       | Temps                    |
| $T$   | °C      | Température              |

### Les garnitures mécaniques (Chapitre 3)

|                 |         |  |
|-----------------|---------|--|
| $\mu$           | Pa. s   | Viscosité dynamique du fluide à étancher   |
| $\gamma$        | rd      | Angle de mésalignement   |
| $\Delta P$      | Pa      | Différentiel de pression aux bornes des faces d'étanchéité                                   |
| $FS$            | N       | Composante déviationnelle de la force d'ouverture selon Etsion                               |
| $\overline{FS}$ | –       | Expression adimensionnelle de « $FS$ » selon Etsion  |
| $Q$             | $m^3/s$ | Débit de fuite   |
| $\overline{Q}$  | –       | Débit adimensionnel selon Etsion $\overline{Q} = \frac{6 Q}{\pi(P_1 - P_2)h^3}$              |
| $\overline{Ri}$ | –       | Rayon adimensionnel qui s'exprime par $\overline{Ri} = Ri / Re$                              |
| $\overline{Rm}$ | –       | Rayon moyen adimensionnel qui s'exprime par $\overline{Rm} = (Re + Ri) / 2Re$                |
| $API$           |         | American Petroleum Institute   |
| $b$             | m       | Largeur des faces de frottement  |
| $De$            | m       | Diamètre extérieur des faces   |
| $Dm$            | m       | Diamètre moyen des faces   |
| $FH$            | N       | Force hydraulique de fermeture   |
| $Fjg$           | N       | Force de frottement du joint glissant. <i>Nota</i> : En régime stationnaire, $Fjg$ est nulle |
| $FO$            | N       | Force d'ouverture dans l'interface de frottement   |
| $FOets$         | N       | Force d'ouverture dans l'interface de frottement selon Etsion                                |
| $FR$            | N       | Force exercée par le ou les ressorts   |
| $Frésf$         | N       | Force résiduelle de fermeture  |
| $Ft$            | N       | Force totale de fermeture  |
| $G$             | –       | Paramètre de lubrification (nombre sans dimension)   |
| $h$             | m       | Ecartement équivalent des faces (calculé sur la base de la rugosité)                         |
| $k$             | –       | Coefficient de compensation  |
| $Mg$            | N.m     | Moment de frottement   |
| $N$             | (tr/mn) | Vitesse de rotation de l'arbre   |
| $P(r)$          | Pa      | Champ de pression dans l'interface   |
| $P1$            | Pa      | Pression à étancher  |

## XIV ■ Confinement des turbomachines

---

|                  |                   |  |
|------------------|-------------------|--|
| $P_2$            | Pa                | Pression extérieure  |
| $P_3$            | Pa                | Pression de barrage  |
| $P_g$            | Pa                | Pression de frottement autrement dit le rapport de la force résiduelle de fermeture Frésc sur la surface de frottement « $SF$ ».                                 |
| $P_R$            | Pa                | Pression exercée par les ressorts sur les faces de frottement  |
| $P_{sat}$        | Pa abs            | Pression de saturation   |
| $P_{ud}$         | W                 | Puissance dissipée   |
| $P_{uf}$         | W                 | Puissance dissipée par la turbulence autour de la garniture mécanique  |
| $Q$              | m <sup>3</sup> /s | Débit de fuite   |
| $r$              | m                 | Rayon  |
| $R_{a1}$         | μm                | Rugosité moyenne de la face de frottement 1  |
| $R_{a2}$         | μm                | Rugosité moyenne de la face de frottement 2  |
| $Re$             | m                 | Rayon extérieur de la face d'étanchéité  |
| $Res$            | m                 | Rayon extérieur d'un soufflet métallique pour une garniture mécanique à soufflet   |
| $R_i$            | m                 | Rayon intérieur de la face d'étanchéité  |
| $R_{is}$         | m                 | Rayon intérieur d'un soufflet métallique pour une garniture mécanique à soufflet   |
| $\overline{R_i}$ | –                 | Rayon adimensionnel qui s'exprime par $\overline{R_i} = R_i / Re$  |
| $\overline{R_m}$ | –                 | Rayon moyen adimensionnel qui s'exprime par $\overline{R_m} = (Re + R_i) / 2Re$  |
| $Res$            | m                 | Rayon extérieur d'un soufflet  |
| $R_i$            | m                 | Rayon intérieur  |
| $R_m$            | m                 | Rayon moyen  |
| $R_{max}$        | μm                | Profondeur maxi de rugosité  |
| $S$              | bar/s             | Facteur d'interface (empirique) fonction de la vitesse de glissement (dans le modèle de Mayer (éq. 3.29) la pression de frottement « $P_g$ » est exprimé en bar) |
| $SF$             | m <sup>2</sup>    | Surface de frottement  |
| $SH$             | m <sup>2</sup>    | Surface soumise à la pression du fluide à étancher   |
| $V_g$            | m/s               | Vitesse de glissement au diamètre moyen des faces  |
| $x$              | –                 | Coefficient de force d'ouverture dans l'interface de frottement  |
| $z$              | m                 | Écartement des faces en fonction du rayon en présence de conicité  |
| $\alpha$         | rd                | Angle de conicité  |
| $\theta$         | rd                | Coordonnée angulaire   |

# Table des matières

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Remerciements .....      | VII   |
| Sigles .....             | IX    |
| Notations .....          | XI    |
| Table des matières ..... | XV    |
| Liste des figures .....  | XIX   |
| Liste des tableaux ..... | XXIII |
| Avant-propos .....       | 1     |

## Chapitre 1

|  |    |
|--|----|
| <b>Les presse-étoupe</b> .....   | 5  |
| 1. Introduction .....  | 5  |
| 2. Les mécanismes de répartition des pressions de contact .....                                | 8  |
| 2.1. La répartition des pressions latérales des tresses sur l'arbre<br>et sur le boitard ..... | 9  |
| 2.2. La relation entre les coefficients de pressions latérales<br>« $K_a$ » et « $K_b$ » ..... | 11 |
| 2.3. Impact de la rotation de l'arbre sur la répartition<br>des pressions latérales .....      | 13 |
| 2.4. Applications numériques .....   | 14 |
| 2.5. En résumé .....   | 16 |
| 3. La puissance dissipée dans le contact tresses/chemises .....                                | 17 |
| 3.1. La puissance dissipée dans le contact tresses/arbre .....                                 | 18 |
| 3.2. Applications numériques .....   | 19 |
| 3.3. En résumé .....   | 19 |
| 4. La conception des tresses .....   | 20 |
| 4.1. Généralité sur les matériaux des tresses .....  | 20 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2. L'imprégnation . . . . .  | 21 |
| 4.3. Les principaux matériaux des tresses et leurs limites d'utilisation . . . . . | 22 |
| 4.4. Les modes de tressage . . . . .   | 25 |
| 4.5. En résumé . . . . .   | 27 |
| 5. Les chemises d'arbre. . . . .   | 28 |
| 6. Les presse-étoupe dans la pratique . . . . .                                    | 30 |
| 6.1. Les différentes variantes de montage. . . . .                                 | 30 |
| 6.2. Le dimensionnement des tresses . . . . .                                      | 34 |
| 6.3. Le dimensionnement de l'environnement des tresses . . . . .                   | 35 |
| 6.4. Le montage et le serrage des garnitures (Servant). . . . .                    | 36 |
| 7. Connaissance des défauts . . . . .  | 38 |

*Chapitre 2*

|  |    |
|--|----|
| <b>Les joints hydrostatiques.</b> . . . . .              | 41 |
| 1. Introduction . . . . .                                | 41 |
| 2. Modélisation du joint en solide indéformable. . . . . | 45 |
| 2.1. Joint modèle . . . . .                              | 45 |
| 2.2. Les équations de Navier-Stokes . . . . .            | 46 |
| 2.3. La vitesse d'écoulement . . . . .                   | 48 |
| 2.4. Champ de pression dans l'interface. . . . .         | 49 |
| 2.5. Débit de fuite . . . . .                            | 51 |
| 3. Mécanismes d'équilibre du joint. . . . .              | 52 |
| 3.1. Force de soulèvement « <b>FS</b> » . . . . .        | 53 |
| 3.2. Force d'assise « <b>FA</b> » . . . . .              | 54 |
| 3.3. Organigramme de calcul. . . . .                     | 55 |
| 3.4. Applications numériques . . . . .                   | 56 |
| 4. Modélisation en solide déformable . . . . .           | 60 |
| 4.1. Applications numériques . . . . .                   | 62 |
| 4.2. Retombées pratiques de la démarche . . . . .        | 62 |
| 5. En résumé . . . . .                                   | 63 |

*Chapitre 3*

|  |    |
|--|----|
| <b>Les garnitures mécaniques</b> . . . . .                         | 67 |
| 1. Introduction . . . . .  | 67 |
| 2. La technologie des garnitures mécaniques . . . . .              | 72 |
| 2.1. Les principaux composants. . . . .                            | 72 |
| 2.2. Revue des variantes. . . . .                                  | 74 |
| 2.3. En résumé . . . . .   | 78 |
| 3. Mécanismes de fonctionnement des garnitures mécaniques. . . . . | 79 |
| 3.1. Garniture mécanique modèle . . . . .                          | 80 |
| 3.2. Bilan des forces en présence. . . . .                         | 80 |
| 3.3. Régimes de lubrification des faces. . . . .                   | 81 |
| 3.4. La compensation . . . . .                                     | 83 |
| 3.5. Force hydraulique <b>FH</b> . . . . .                         | 84 |
| 3.6. Force d'ouverture <b>FO</b> . . . . .                         | 84 |



|                      |  |            |
|----------------------|--|------------|
| 3.7.                 | Pression de contact « <i>P<sub>g</sub></i> »                                   | 89         |
| 3.8.                 | Force d'ouverture « <i>FOets</i> » selon le modèle Etsion et Sharoni           | 91         |
| 3.9.                 | Les garnitures mécaniques à soufflet   | 93         |
| 3.10.                | Les garnitures mécaniques élasto-thermo-hydrodynamique                         | 94         |
| 3.11.                | En résumé  | 95         |
| 4.                   | Appréciation de la fuite d'une garniture mécanique                             | 98         |
| 4.1.                 | Démarche   | 98         |
| 4.2.                 | Fuite en régime de lubrification en frottement limite                          | 98         |
| 4.3.                 | Fuite théorique  | 99         |
| 4.4.                 | En résumé  | 104        |
| 5.                   | Évaluation de la puissance dissipée  | 105        |
| 5.1.                 | Estimation de la puissance dissipée dans la pratique                           | 105        |
| 5.2.                 | Application numérique  | 106        |
| 5.3.                 | En résumé  | 107        |
| 6.                   | Les matériaux utilisés pour les faces d'étanchéité                             | 107        |
| 6.1.                 | Considération générale   | 107        |
| 6.2.                 | Le facteur de charge   | 108        |
| 6.3.                 | Les matériaux durs   | 109        |
| 6.4.                 | Les matériaux innovants  | 112        |
| 6.5.                 | En résumé  | 115        |
| 7.                   | Les joints secondaires et les matériaux associés                               | 116        |
| 7.1.                 | Les différentes technologies des joints secondaires                            | 116        |
| 7.2.                 | Les élastomères à base de caoutchouc   | 117        |
| 8.                   | Les plans de balayage des garnitures mécaniques                                | 121        |
| 8.1.                 | Les différentes dispositions de montage des garnitures mécaniques              | 121        |
| 8.2.                 | Désignation  | 123        |
| 8.3.                 | Spécificités des différents plans de montage                                   | 124        |
| 9.                   | Connaissance des défauts   | 139        |
| 9.1.                 | Défauts des faces d'étanchéité   | 140        |
| 9.2.                 | Les joints secondaires   | 150        |
| 9.3.                 | Les soufflets  | 151        |
| 9.4.                 | En résumé  | 152        |
| 10.                  | Aperçu sur les règles de montage et de maintenance des garnitures mécaniques   | 152        |
| 10.1.                | Les règles de stockage avant montage   | 152        |
| 10.2.                | Les règles de déballage des GM   | 153        |
| 10.3.                | Les vérifications avant montage  | 153        |
| 10.4.                | Les précautions avant montage  | 153        |
| 10.5.                | Les règles de montage  | 154        |
| 10.6.                | La maintenance des garnitures mécaniques                                       | 155        |
| 10.7.                | En résumé  | 156        |
| 11.                  | Aperçu sur un cahier des charges types pour le choix des garnitures mécaniques | 156        |
| <b>Bibliographie</b> |  | <b>159</b> |



## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 0.1.</b> Pompe primaire à rotor noyé de la centrale à eau pressurisée de Chooz A. . . . .      | 2  |
| <b>Figure 0.2.</b> Accouplement magnétique. . . . .  | 2  |
| <b>Figure 1.1.</b> Principe de l'étanchéité par presse-étoupe. . . . .                                   | 6  |
| <b>Figure 1.2.</b> Schéma d'une pompe centrifuge équipée de presse-étoupe. . . . .                       | 7  |
| <b>Figure 1.3.</b> Modélisation des tresses. . . . .   | 10 |
| <b>Figure 1.4.</b> Charges appliquées sur un élément de tresse de longueur $dx$ . . . . .                | 11 |
| <b>Figure 1.5.</b> Impact de la rotation sur la répartition des pressions latérales. . . . .             | 13 |
| <b>Figure 1.6.</b> Répartitions des pressions latérales dans les contacts. . . . .                       | 15 |
| <b>Figure 1.7.</b> Répartition de l'usure sur l'arbre. . . . .   | 15 |
| <b>Figure 1.8.</b> Influence du coefficient de frottement sur la pression latérale sur l'arbre. . . . .  | 16 |
| <b>Figure 1.9.</b> Comparaison des profils « AK » ( <i>EagleBurgmann</i> ) et « traditionnel ». . . . .  | 27 |
| <b>Figure 1.10.</b> Chemise d'arbres pour presse-étoupe. . . . .   | 29 |
| <b>Figure 1.11.</b> Montage classique d'un presse-étoupe. . . . .  | 30 |
| <b>Figure 1.12.</b> Montage classique d'un presse-étoupe avec rondelles « Belleville ». . . . .          | 31 |
| <b>Figure 1.13.</b> Montage d'un presse-étoupe avec une lanterne. . . . .                                | 31 |
| <b>Figure 1.14.</b> Montage d'un presse-étoupe avec ressort intégré. . . . .                             | 32 |
| <b>Figure 1.15.</b> Montage d'un presse-étoupe avec lanterne pour « P » à étancher < Patm. . . . .       | 32 |
| <b>Figure 1.16.</b> Montage d'un presse-étoupe avec anneau de refroidissement ou de réchauffage. . . . . | 33 |
| <b>Figure 1.17.</b> Montage pour fluide toxique et dangereux. . . . .                                    | 33 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1.18.</b> Montage avec apport de graisse. . . . .   | 34 |
| <b>Figure 1.19.</b> Sections des tresses en fonction du diamètre de l'arbre. . . . .                          | 34 |
| <b>Figure 1.20.</b> Nombre de tresses en fonction de la pression à étancher. . . . .                          | 35 |
| <b>Figure 1.21.</b> Dimensionnement de l'environnement des tresses. . . . .                                   | 35 |
| <b>Figure 1.22.</b> Découpe des tresses. . . . .  | 37 |
| <b>Figure 1.23.</b> Technique de montage des tresses. . . . .   | 37 |
| <br>  |    |
| <b>Figure 2.1.</b> Les groupes motopompes primaires dans leur environnement. . . . .                          | 42 |
| <b>Figure 2.2.</b> Principe du joint hydrostatique des pompes primaires. . . . .                              | 43 |
| <b>Figure 2.3.</b> Configuration du « joint modèle ». . . . .   | 45 |
| <b>Figure 2.4.</b> Exemples de profil de pression. . . . .  | 50 |
| <b>Figure 2.5.</b> Débit en fonction de l'écartement « $h$ » pour trois exemples de conicité. . . . .         | 52 |
| <b>Figure 2.6.</b> Sollicitations d'un joint hydrostatique. . . . .   | 53 |
| <b>Figure 2.7.</b> Organigramme de calcul des conditions d'équilibre du joint en solide indéformable. . . . . | 55 |
| <b>Figure 2.8.</b> Forces de soulèvement « $FS$ » et d'assise « $FA$ » – Équilibre du joint. . . . .          | 56 |
| <b>Figure 2.9.</b> Phénomène d'hystérésis du Joint 1. . . . .   | 58 |
| <b>Figure 2.10.</b> Organigramme de calcul des conditions d'équilibre en solide déformable. . . . .           | 61 |
| <br>  |    |
| <b>Figure 3.1.</b> Configuration basique d'une garniture mécanique. . . . .                                   | 68 |
| <b>Figure 3.2.</b> Exemple de montage d'une garniture mécanique dans une pompe. . . . .                       | 69 |
| <b>Figure 3.3.</b> Concept de garniture mécanique radiale. . . . .  | 70 |
| <b>Figure 3.4.</b> garniture mécanique tournante en montage intérieur. . . . .                                | 74 |
| <b>Figure 3.5.</b> Montage intérieur. . . . .   | 74 |
| <b>Figure 3.6.</b> Montage extérieur. . . . .   | 75 |
| <b>Figure 3.7.</b> Garniture mécanique tournante. . . . .   | 75 |
| <b>Figure 3.8.</b> Garniture mécanique stationnaire. . . . .  | 76 |
| <b>Figure 3.9.</b> Élément élastique monoressort. . . . .   | 76 |
| <b>Figure 3.10.</b> Élément élastique multiressorts. . . . .  | 76 |
| <b>Figure 3.11.</b> Élément élastique à soufflet soudé. . . . .   | 77 |
| <b>Figure 3.12.</b> Élément élastique à soufflet hydroformé. . . . .  | 77 |
| <b>Figure 3.13.</b> Élément élastique de type rondelle « Belleville ». . . . .                                | 77 |
| <b>Figure 3.14.</b> Élément élastique à soufflet élastomère. . . . .  | 78 |
| <b>Figure 3.15.</b> Forces appliquées à une garniture mécanique à joint glissant. . . . .                     | 81 |
| <b>Figure 3.16.</b> Courbe de Stribeck. . . . .   | 82 |
| <b>Figure 3.17.</b> Garniture mécanique non compensée. . . . .  | 83 |
| <b>Figure 3.18.</b> Garniture mécanique compensée. . . . .  | 83 |
| <b>Figure 3.19.</b> Géométries possibles de l'interface d'étanchéité. . . . .                                 | 85 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figure 3.20.</b> Géométrie possible de l'interface d'étanchéité. . . . .                                      | 85  |
| <b>Figure 3.21.</b> Profil de pression dans l'interface en fonction de l'angle d'ouverture $\alpha$ . . . . .    | 86  |
| <b>Figure 3.22.</b> Profil de pression à conicité nulle à partir des modèles (éq. 3.8) et (éq. 3.9). . . . .     | 87  |
| <b>Figure 3.23.</b> Faces d'étanchéité en présence de conicité et de mésalignement. . . . .                      | 92  |
| <b>Figure 3.24.</b> Forces appliquées à une garniture mécanique à soufflet. . . . .                              | 94  |
| <b>Figure 3.25.</b> Garniture mécanique élasto-thermo-hydrodynamiques. . . . .                                   | 95  |
| <b>Figure 3.26.</b> Facteur d'interface « $S$ » = $f(Vg)$ (EM72). . . . .  | 99  |
| <b>Figure 3.27.</b> Interface d'étanchéité. . . . .  | 100 |
| <b>Figure 3.28.</b> Modélisation des faces d'étanchéité. . . . .   | 101 |
| <b>Figure 3.29.</b> Impact de la conicité et/ou du mésalignement. . . . .  | 102 |
| <b>Figure 3.30.</b> Délimitation de la fuite entre les régimes de lubrification limite et hydrostatique. . . . . | 103 |
| <b>Figure 3.31.</b> Exemple d'évolution de la puissance dissipée pratique d'une garniture mécanique. . . . .     | 107 |
| <b>Figure 3.32.</b> Coefficients de frottement comparés en contact lubrifié. . . . .                             | 114 |
| <b>Figure 3.33.</b> Coefficients de frottement comparés en frottement sec. . . . .                               | 114 |
| <b>Figure 3.34.</b> Différents types de joints statiques. . . . .  | 117 |
| <b>Figure 3.35.</b> Les trois principales dispositions de montage des garnitures mécaniques. . . . .             | 121 |
| <b>Figure 3.36.</b> Plan de balayage 01. . . . .   | 124 |
| <b>Figure 3.37.</b> Plan de balayage 02. . . . .   | 124 |
| <b>Figure 3.38.</b> Plan de balayage 11. . . . .   | 125 |
| <b>Figure 3.39.</b> Plan de balayage 12. . . . .   | 126 |
| <b>Figure 3.40.</b> Plan de balayage 13. . . . .   | 126 |
| <b>Figure 3.41.</b> Plan de balayage 14. . . . .   | 127 |
| <b>Figure 3.42.</b> Plan de balayage 21. . . . .   | 128 |
| <b>Figure 3.43.</b> Plan de balayage 22. . . . .   | 128 |
| <b>Figure 3.44.</b> Plan de balayage 23. . . . .   | 129 |
| <b>Figure 3.45.</b> Plan de balayage 31. . . . .   | 130 |
| <b>Figure 3.46.</b> Plan de balayage 32. . . . .   | 131 |
| <b>Figure 3.47.</b> Plan de balayage 41. . . . .   | 131 |
| <b>Figure 3.48.</b> Plan de balayage 52. . . . .   | 132 |
| <b>Figure 3.49.</b> Plan de balayage 53A. . . . .  | 133 |
| <b>Figure 3.50.</b> Plan de balayage 53B. . . . .  | 133 |
| <b>Figure 3.51.</b> Plan de balayage 53C. . . . .  | 134 |
| <b>Figure 3.52.</b> Plan de balayage 54. . . . .   | 135 |
| <b>Figure 3.53.</b> Plan de balayage 62. . . . .   | 135 |
| <b>Figure 3.54.</b> Plan de balayage 65. . . . .   | 136 |
| <b>Figure 3.55.</b> Plan de balayage 72. . . . .   | 137 |

**Figure 3.56.** Plan de balayage 74. . . . . 137  
**Figure 3.57.** Plan de balayage 75. . . . . 138  
**Figure 3.58.** Plan de balayage 76. . . . . 139  
**Figure 3.59.** Sens de montage des GM avec entraînement de bague  
    tournante par le ressort. . . . . 154  
**Figure 3.60.** Vis de pompage intégrée – Sens de circulation. . . . . 155

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1.1.</b> Coefficients de pression latérale : comparaison calcul/essai. . . .                                      | 13 |
| <b>Tableau 1.2.</b> Exemple de données caractéristiques des garnitures à tresses. . . . .                                    | 14 |
| <b>Tableau 1.3.</b> Caractéristiques du coton. . . . .   | 22 |
| <b>Tableau 1.4.</b> Caractéristiques du lin. . . . .   | 22 |
| <b>Tableau 1.5.</b> Caractéristiques du chanvre. . . . .   | 23 |
| <b>Tableau 1.6.</b> Caractéristiques de la ramie. . . . .  | 23 |
| <b>Tableau 1.7.</b> Caractéristiques du PTFE. . . . .  | 23 |
| <b>Tableau 1.8.</b> Caractéristiques des aramides. . . . .   | 24 |
| <b>Tableau 1.9.</b> Caractéristiques du graphite. . . . .  | 24 |
| <b>Tableau 1.10.</b> Caractéristiques des fibres de verre. . . . .   | 24 |
| <b>Tableau 1.11 :</b> Caractéristiques des matériaux métalliques. . . . .  | 25 |
| <b>Tableau 1.12.</b> Évolution des limites d'utilisation des tresses. . . . .  | 25 |
| <b>Tableau 1.13 :</b> Différents modes d'élaboration des tresses. . . . .  | 26 |
| <b>Tableau 1.14 :</b> <i>Troubleshooting</i> des presse-étoupe. . . . .  | 38 |
|  |    |
| <b>Tableau 2.1.</b> Caractéristiques du joint modèle. . . . .  | 46 |
| <b>Tableau 2.2.</b> Conditions aux bornes du joint. . . . .  | 46 |
| <b>Tableau 2.3.</b> Débit de fuite pour différents rayons de douille « $Rd$ » et de conicités « $\alpha$ ». . . . .          | 57 |
| <b>Tableau 2.4.</b> Exemple d'application de la démarche de diagnostic d'une dégradation des contacts bague/douille. . . . . | 60 |
| <b>Tableau 2.5.</b> Calculs en solide indéformable. . . . .  | 62 |
| <b>Tableau 2.6.</b> Calculs en solide déformable. . . . .  | 62 |
| <b>Tableau 2.7.</b> Scénarii de défauts et solutions palliatives possibles. . . . .  | 63 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tableau 3.1.</b> Plage d'utilisation des garnitures mécaniques.....  | 69  |
| <b>Tableau 3.2.</b> Caractéristiques de notre garniture mécanique modèle compensées ou non.....                       | 80  |
| <b>Tableau 3.3.</b> Données de simulation pour les calculs.....   | 86  |
| <b>Tableau 3.4.</b> Calculs comparés de la force d'ouverture.....   | 89  |
| <b>Tableau 3.5.</b> Modèles de garnitures mécaniques compensées ou non – Données.....                                 | 90  |
| <b>Tableau 3.6.</b> Garnitures mécaniques compensées ou non – Sollicitations.....                                     | 91  |
| <b>Tableau 3.7.</b> Force d'ouverture – Comparaison EDF/Etsion/modèle approché ( $h$ au $Di$ . $1 \mu\text{m}$ )..... | 93  |
| <b>Tableau 3.8.</b> Comparaison des fuites selon (éq. 3.33) et (éq. 3.34).....  | 101 |
| <b>Tableau 3.9.</b> Données des calculs de fuite.....   | 103 |
| <b>Tableau 3.10.</b> Modèles de garnitures mécaniques compensées ou non – Données.....                                | 106 |
| <b>Tableau 3.11.</b> Garnitures mécaniques compensées ou non – Sollicitations.....                                    | 106 |
| <b>Tableau 3.12.</b> Facteurs de charges.....   | 109 |
| <b>Tableau 3.13.</b> Comparaison des propriétés du DLC et du revêtement <i>DiamondFaces</i> ®.....                    | 113 |
| <b>Tableau 3.14.</b> Principales familles d'élastomères.....  | 118 |
| <b>Tableau 3.15.</b> Domaines d'utilisation des élastomères.....  | 119 |
| <b>Tableau 3.16.</b> Références des PLANS par type de garniture.....  | 122 |
| <b>Tableau 3.17.</b> DÉFAUT D1 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 141 |
| <b>Tableau 3.18.</b> DÉFAUT D2 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 141 |
| <b>Tableau 3.19.</b> DÉFAUT D3 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 142 |
| <b>Tableau 3.20.</b> DÉFAUT D4 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 143 |
| <b>Tableau 3.21.</b> DÉFAUT D5 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 143 |
| <b>Tableau 3.22.</b> DÉFAUT D6 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 144 |
| <b>Tableau 3.23.</b> DÉFAUT D7 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 145 |
| <b>Tableau 3.24.</b> DÉFAUT D8 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 145 |
| <b>Tableau 3.25.</b> DÉFAUT D9 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                    | 146 |
| <b>Tableau 3.26.</b> DÉFAUT D10 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                   | 146 |
| <b>Tableau 3.27.</b> DÉFAUT D11 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                   | 147 |
| <b>Tableau 3.28.</b> DÉFAUT D12 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                   | 147 |
| <b>Tableau 3.29.</b> DÉFAUT D13 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                   | 148 |
| <b>Tableau 3.30.</b> DÉFAUT D14 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                   | 148 |
| <b>Tableau 3.31.</b> DÉFAUT D15 – Faces d'étanchéité – Expertises et solutions.....                                   | 149 |
| <b>Tableau 3.32.</b> DÉFAUT D16 – Joint secondaire – Expertises et solutions.....                                     | 150 |
| <b>Tableau 3.33.</b> DÉFAUT D17 – Joint secondaire – Expertises et solutions.....                                     | 150 |
| <b>Tableau 3.34.</b> DÉFAUT D18 – Joint secondaire – Expertises et solutions.....                                     | 150 |
| <b>Tableau 3.35.</b> DÉFAUT D19 – Joint secondaire – Expertises et solutions.....                                     | 151 |
| <b>Tableau 3.36.</b> DÉFAUT D20 – Joint secondaire – Expertises et solutions.....                                     | 151 |



---

|  |     |
|--|-----|
| <b>Tableau 3.37.</b> DÉFAUT D21 – Soufflet ou membrane – Expertises<br>et solutions. . . . .         | 151 |
| <b>Tableau 3.38.</b> Tolérances de montage. . . . .  | 153 |
| <b>Tableau 3.39.</b> Exemple type d'un cahier des charges pour<br>la détermination d'une GM. . . . . | 157 |



# *Avant-propos*

De tout temps l'industrie est confrontée aux problèmes d'étanchéité des turbomachines dans la zone des traversées d'arbres. Le challenge est de taille car il s'agit de préserver la pression du fluide à véhiculer et de contenir la fuite vers l'extérieur pour des raisons de sécurité mais également économiques. Ce challenge a nécessité le développement de dispositifs d'étanchéité rotodynamiques dont les premiers balbutiements remontent au début du XIX<sup>e</sup> siècle. Ces dispositifs n'ont cessé de progresser depuis d'une façon exponentielle au gré des besoins de plus en plus contraignants de l'industrie.

Il est cependant intéressant de noter que des solutions isolées faisant abstraction de dispositifs d'étanchéité rotodynamiques ont été développées et mises en œuvre notamment dans l'industrie nucléaire, dans les sous-marins à propulsion nucléaire et dans l'industrie chimique. Citons l'exemple typique de la pompe primaire de la première centrale nucléaire française à vocation commerciale de la filière REP de Chooz A (305 MWe – mise en service en 1967 et fermée en 1991). La particularité technologique de cette pompe est d'inclure le moteur d'entraînement au sein même de l'enceinte sous pression, les étanchéités sont alors purement statiques. La Figure 0.1 donne une idée de la technologie adoptée.

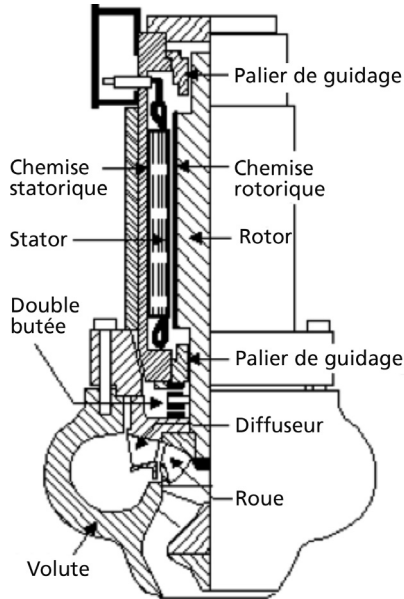


Figure 0.1. Pompe primaire à rotor noyé de la centrale à eau pressurisée de Chooz A.

Au gré de l'augmentation des puissances des réacteurs (de 900 MWe pour les premiers paliers à 1 630 MWe pour l'EPR), les moteurs des pompes primaires ont dû être sortis de l'enceinte sous pression pour que l'on puisse inclure un volant d'inertie destiné à assurer un temps d'arrêt suffisant des pompes en cas de perte accidentelle des sources électriques. Cette contrainte a nécessité l'intégration d'un dispositif d'étanchéité rotodynamique très évolué dont un des principaux composants fait ici l'objet du Chapitre 2.

Une autre idée de solution sans l'apport d'un dispositif d'étanchéité rotodynamique est l'utilisation d'un accouplement magnétique qui permet d'isoler complètement l'arbre moteur de l'arbre récepteur côté enceinte sous pression. Cette solution est décrite dans son principe dans la Figure 0.2.

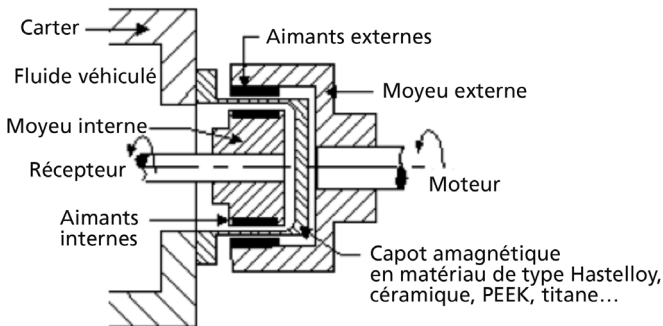


Figure 0.2. Accouplement magnétique.

Comme le montre cette figure, l'accouplement magnétique, ici à flux radial et à aimants permanents, se compose principalement de :

- un moyeu interne solidaire de l'arbre récepteur équipé d'aimants permanents ;
- un capot amagnétique fermant l'enceinte sous pression ;
- un moyeu externe solidaire de l'arbre moteur et également équipés d'aimants permanents.

Notons qu'il existe également des solutions à flux axial via des plateaux en vis-à-vis et des dispositifs à induction.

Dans les faits, les dispositifs d'étanchéité rotodynamiques comportent plusieurs variantes en fonction des applications que nous caractérisons ici à l'aide d'un descripteur dédié noté produit PV (pression à étancher x vitesses de glissement). Pour ne citer que les principales d'entre elles, notons (J. Martin) :

- les joints radiaux de type : O-Ring en élastomère (PV : 10 bar.m/s), des joints à lèvres associant un élément primaire en élastomère et une armature en acier (PV : 15 bar.m/s), des joints composites associant un O-Ring en élastomère et une bague de glissement à base de PTFE (PV : 20 bar.m/s), les anneaux associant carbone et bronze (PV : 25 bar.m/s) ;
- les joints axiaux de type : joint en V en élastomère (PV : 10 bar.m/s).

Ou plus complexes et plus performants tels que les joints utilisés sur les pompes des centrales nucléaires :

- les joints radiaux de type presse-étoupe (PV de l'ordre de 100 bar.m/s) ou garniture mécanique radiale pour les grands diamètres ;
- les joints axiaux de type garnitures mécaniques axiales (PV pouvant dépasser 3 000 bar.m/s) ou joints hydrostatiques sans contact entre les faces d'étanchéité (PV maxi > 6 000 bar.m/s).

***Ces exemples nous conduisent aux thèmes que nous allons développer ici.*** Ils portent en effet sur les principaux dispositifs d'étanchéité rotodynamiques les plus utilisés dans des industries très variées dont, et non des moindres, les centrales de production nucléaire un peu partout dans le monde dont EDF. Il s'agit dans l'ordre :

- chapitre 1 : des garnitures à tresses également connues sous le nom de presse-étoupe qui est un clin d'œil à leur origine qui remonte au début du XIX<sup>e</sup> siècle (« presser » des « étoupes » autour de l'arbre). Malgré leur ancienneté elles continuent à être utilisées sans discontinuer grâce au progrès incessant dont elles ont bénéficié notamment dans le domaine des matériaux. Les presse-étoupe restent notamment les dispositifs d'étanchéité les plus utilisés dans la robinetterie ;
- chapitre 2 : des joints hydrostatiques qui constituent notamment le cœur de l'étanchéité rotodynamique de la plupart des pompes primaires des centrales nucléaires dans le monde. Ces joints jouent un rôle de premier ordre sur la sûreté et la disponibilité des installations ;
- chapitre 3 : des garnitures mécaniques axiales à faces frottantes, utilisées à grande échelle sur plusieurs types de turbomachines et en particulier les

pompes. C'est notamment la technologie de joints rotodynamiques la plus utilisée les pompes des centrales nucléaires, y compris les pompes primaires car ces joints viennent compléter en série les joints hydrostatiques que nous venons de citer.

Pour chacun de ces dispositifs, nous allons passer en revue les points suivants :

- le principe de fonctionnement ;
- les composants principaux ;
- les mécanismes de fonctionnement, en nous attachant à les décrire à l'aide de modèles analytiques ciblés que nous illustrerons à chaque fois avec des applications numériques pour aider à situer les ordres de grandeur ;
- les matériaux utilisés d'extrême importance car mis à part les joints hydrostatiques, qui fonctionnent sans contact (ce qui ne les empêche pas d'être équipés de matériaux mécaniquement « nobles »), ces dispositifs mettent en scène des frottements lubrifiés ou secs, en cas d'incident, au sein de l'interface d'étanchéité. Et qui dit frottement dit dégagement de chaleur qu'il faut évacuer facilement vers l'extérieur des faces, ce qui suppose une bonne conductivité thermique des matériaux ;
- la puissance ainsi dissipée doit à son tour être évacuée des chambres d'étanchéité pour maintenir la zone d'étanchéité à une température acceptable et ainsi éviter tout risque de déformations thermomécaniques excessives des composants fonctionnels et de vaporisation du fluide dans l'interface d'étanchéité. Ce refroidissement est réalisé par des apports de réfrigérants venant soit du fluide de procédé lui-même et, au besoin, refroidi, soit de l'extérieur, les surfaces d'échange et la masse des composants jouent un rôle de premier ordre dans ce processus. Des dispositions spécifiques sont ainsi prises pour garantir au mieux cette dissipation. Nous passerons en revue les différentes solutions mises en œuvre en fonction des applications ;
- pour cause de fluide de procédé dangereux ou chargé en particules, des dispositions spécifiques sont prises pour en minimiser l'impact sur l'intégrité de l'étanchéité. Nous évoquerons les différentes solutions utilisables ;
- pour les dispositifs d'étanchéité qui font intervenir des faces frottantes, des dégradations pouvant conduire à leur défaillance fonctionnelle peuvent se manifester. Nous passerons en revue les types de dégradation les plus courants et donnerons des indications sur leurs causes ainsi que sur les solutions potentiellement curatives ;
- afin de minimiser les dégradations, des précautions élémentaires doivent être prises avec notamment un cahier des charges le plus précis possible pour bien cibler la technologie qui convient le mieux à l'application et, non des moindres, le respect des procédures de montage. Ces deux aspects seront abordés dans leur principe.



**Léon Joseph Randrianarivo** est un Ingénieur Chercheur Expert en retraite du Département Mécaniques des Fluides, Energies et Environnement d'EDF Lab – Chatou. Il avait en charge des activités de R&D sur les composants mécaniques des principaux groupes de pompage des centrales nucléaires EDF. Un pan important de ses activités avait porté sur des études expérimentales et théoriques sur le comportement normal et accidentel des systèmes d'étanchéité des pompes de circulation du fluide caloporteur, dites pompes primaires, et des pompes de sauvegarde utilisées en cas d'accident.

**Le confinement des turbomachines** est réalisé avec des joints rotodynamiques. Ceux qui font l'objet de cet ouvrage sont les presse-étoupe (encore largement utilisés malgré leur ancienneté), les joints hydrostatiques (utilisés à grande échelle sur les pompes primaires des centrales nucléaires dans le monde) et les garnitures mécaniques (d'une utilisation désormais courante dans l'industrie).

L'étanchéité par presse-étoupe est réalisée par des tresses disposées dans un boîtier en sortie d'arbre et comprimées autour de ce dernier. La répartition des pressions latérales autour de l'arbre et du boîtier est décrite par des modèles analytiques. Ces modèles permettent notamment l'optimisation du nombre de tresses. Les matériaux utilisés sont présentés, ainsi que les différents types de montage, en fonction des applications. Un recueil des principaux défauts est proposé ainsi que les remèdes associés.

Les joints hydrostatiques des pompes primaires sont à très fort enjeu sûreté et disponibilité des installations. Leur perte peut en effet conduire à une brèche du circuit primaire et leur anomalie de fonctionnement en exploitation, à un arrêt fortuit de la centrale. Ils comportent une partie flottante solidaire du carter et une partie tournante solidaire de l'arbre. Ces deux parties sont écartées l'une de l'autre de 10  $\mu\text{m}$  environ. Des modèles analytiques développés à partir des équations de Navier-Stokes en solide indéformable sont proposés pour décrire leur physique de fonctionnement. Pour tenir compte de la déformabilité inévitable des composants, un algorithme d'approche inverse est proposé en s'aidant des valeurs lues en salle de contrôle. Cet algorithme permet de construire un modèle du joint en exploitation à l'état sain et d'identifier, en termes de tendance, les éventuels défauts rencontrés en fonctionnement.

Les garnitures mécaniques présentées ici sont dites axiales à faces frottantes. L'une des faces est flexible et l'autre est fixe. Les mécanismes de fonctionnement sont décrits par des modèles analytiques en fonction du mésalignement éventuel des faces. Pour évaluer la fuite, les régimes de lubrification *via* la fuite sont mis à contribution et une démarche de délimitation de la fuite est proposée. Les arrangements de montage des garnitures mécaniques en fonction des applications sont décrits. Enfin, un recueil des principaux défauts est proposé ainsi que les remèdes associés.

