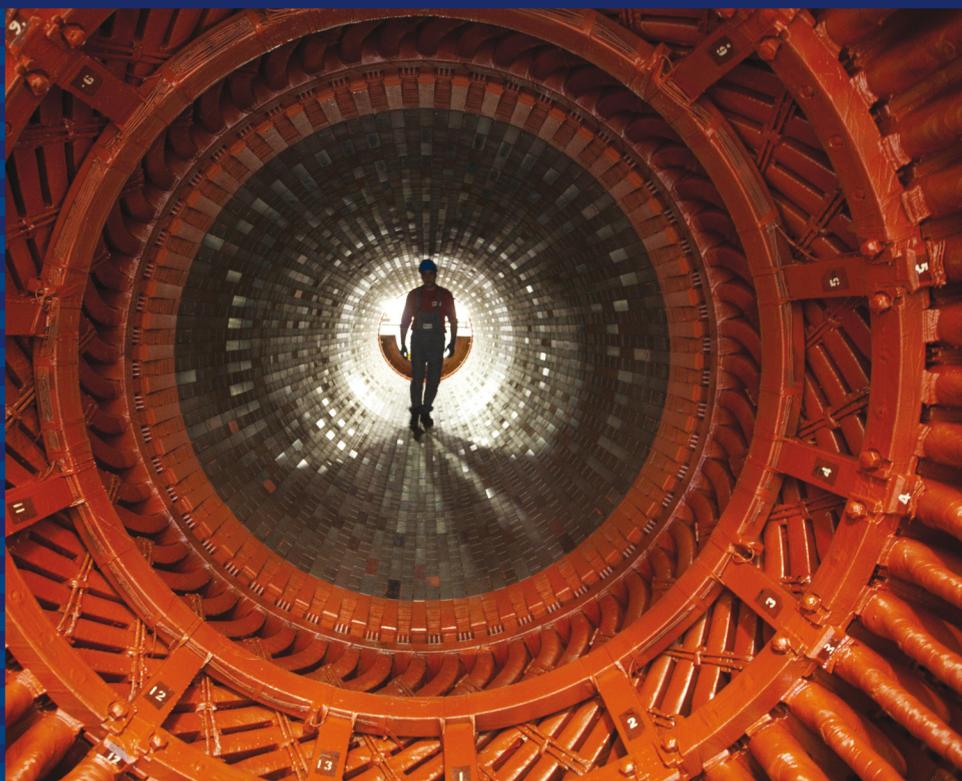


# La maintenance des centrales nucléaires

**Jean-Pierre Hutin**



# **La maintenance des centrales nucléaires**

## **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

# La maintenance des centrales nucléaires

**Jean-Pierre Hutin**

Ancien directeur technique  
du Parc nucléaire EDF

Préface de Dominique Minière

  
**TEC & DOC**

editions.lavoisier.fr

*Direction éditoriale* : Emmanuel Leclerc  
*Édition* : Mélanie Kucharczyk  
*Mise en pages* : Patrick Leleux PAO, Caen (14)  
*Fabrication* : Estelle Perez  
*Couverture* : Patrick Leleux PAO, Caen (14)

*Photo de couverture* : © EDF, Bruno Conty

*Je dédie ce livre à toutes celles et tous ceux qui, au quotidien,  
exploitent et maintiennent les centrales nucléaires avec rigueur  
et professionnalisme, produisant ainsi une électricité sûre,  
propre et compétitive, au bénéfice de la collectivité.*

« C'est un flux et reflux d'ineffable puissance  
Où tout s'emprunte et rend l'inépuisable essence  
Où tout rayon remonte à ce foyer commun  
Où l'œuvre et l'ouvrier sont deux et ne sont qu'un ! »

Lamartine (*La chute d'un ange*, 1838)

« L'expérience de chacun est le trésor de tous »

Gérard de Nerval (*La Bohème galante,  
Promenades et souvenirs*, 1854)

# Préface

Si l'on parle beaucoup du nucléaire, du poids qu'il occupe dans l'industrie, de sa part dans la production d'électricité, de la construction de réacteurs et des contrats qui vont avec, de la stratégie des acteurs, on oublie souvent que le nucléaire repose d'abord et avant tout sur une exploitation sûre des centrales existantes.

Beaucoup d'études et d'écrits se sont, dès l'origine, intéressés à l'exploitation et plus particulièrement à l'interface homme-machine après le premier accident grave de l'industrie nucléaire, à Three Miles Island en 1979. Mais le lien entre sûreté et maintenance, y compris sous l'angle des facteurs organisationnels et humains, n'a été vraiment traité qu'à la fin des années 1980. Et finalement, peu d'ouvrages ont couvert le sujet « Maintenance » sous les trois angles de la fiabilité que constituent les hommes, les organisations et les matériels.

Je remercie sincèrement Jean-Pierre pour sa contribution en la matière. Il a eu le parcours professionnel quasi idéal pour réaliser un tel ouvrage. Parcours qui lui a permis de balayer tous les aspects de la maintenance et de la fiabilité sous leurs différents angles. Et qui l'a mené jusqu'à être de fait, par ses compétences, le directeur technique du parc nucléaire d'EDF. Parcours qu'il a prolongé ensuite à la Recherche et Développement, nourrissant ainsi la R&D de toute son expérience passée.

Un tel ouvrage, s'il a bénéficié de plusieurs collaborations, n'a d'intérêt que s'il a son propre caractère, son propre sel. Jean-Pierre a du caractère et les lecteurs même peu attentifs découvriront qu'il est largement reflété dans cet ouvrage... Ce n'est donc pas un livre d'EDF sur la maintenance des centrales nucléaires, mais un livre de Jean-Pierre, sa vision, son expérience, ses prismes de lecture, et c'est très bien ainsi.

Bien sûr, il y a de la technique dans ce livre, et même de la science, car Jean-Pierre sait bien – par expérience – qu'on ne peut résoudre durablement un problème qu'après l'avoir vraiment compris, en profondeur. Mais il y a aussi du « vécu », des histoires, presque des aventures : on y perçoit, entre les lignes, l'enthousiasme de faire progresser la maintenance et la sûreté mais aussi parfois, l'amertume quand le problème que l'on croyait avoir réglé revient quelques années plus tard...

Ce livre, c'est beaucoup d'humilité face à la nature qui, de toute façon, a toujours raison. Et quelques coups de gueule, par exemple lorsque Jean-Pierre s'emporte contre la mauvaise image injustement attachée à la sous-traitance, tant il est convaincu que l'on a besoin de tout le monde pour que ça marche... Et quand il affirme que le vieillissement est bien maîtrisé et que les centrales sont de plus en plus sûres, ce n'est pas par conviction partisane, c'est parce qu'il a collecté, analysé et soigneusement pesé les éléments objectifs qui permettent de se prononcer. Ce livre doit permettre au lecteur de suivre le même chemin.

Je vous en souhaite une bonne lecture qui, j'en suis certain, vous interpellera par moments, mais... n'est-ce pas le seul type de livre dont on se rappelle ?

Dominique Minière<sup>1</sup>

*EDF, Directeur de la Production Nucléaire et Thermique*

---

1. Dominique Minière, Ingénieur Civil des Mines de Paris, a rejoint le groupe EDF en 1982 au Service de la Production Thermique. En 1986, il intègre la centrale nucléaire de Golfech en tant qu'ingénieur, puis devient chef de service maintenance. Après une année comme Directeur adjoint de l'Agence de Maintenance Thermique Nord, Dominique Minière est conseiller pour la mise en place de la maintenance au sein de la centrale nucléaire de Daya Bay (Chine). De 1997 à 2002, il assure successivement, à la centrale nucléaire de Cattenom, les fonctions de directeur adjoint en charge de la Production, puis de directeur. Il occupe ensuite le poste de directeur adjoint «Technique» de la Division Production Nucléaire, dont il devient le directeur en 2010. Il est actuellement Directeur de la Production Nucléaire et Thermique.

# *Avant-propos*

## L'objet de ce livre

L'objet de ce livre est de décrire la maintenance des centrales nucléaires, en insistant sur ce qu'elle a de spécifique par rapport à la maintenance d'autres installations industrielles. Décrire le « quoi », le « qui », le « comment » et surtout le « pourquoi ». J'ai voulu aborder tous les aspects de la question, techniques, industriels, humains, organisationnels, tant l'expérience nous enseigne que ces aspects sont étroitement liés. Je me suis attaché à replacer les choses dans leur contexte historique pour faire percevoir et comprendre comment et pourquoi elles ont évolué depuis le démarrage des premières centrales. De nombreux exemples sont racontés, tels qu'ils ont été vécus. « Racontés » parce qu'au-delà de la dimension technique, chaque problème rencontré dans l'entretien de ces installations est une vraie « histoire ».

Le public visé ? Les élèves de lycées, d'IUT, d'universités, d'écoles d'ingénieurs, les jeunes embauchés dans le nucléaire (EDF, fournisseurs, prestataires), le personnel de maintenance en formation ou déjà en activité ainsi que tout citoyen intéressé à mieux comprendre le nucléaire.

### **Focalisé « centrales nucléaires françaises »**

L'ouvrage est focalisé sur les centrales nucléaires françaises produisant de l'électricité (aujourd'hui toutes exploitées par EDF). Il s'agit de centrales dont la partie nucléaire est un Réacteur à Eau sous Pression (un REP). Cela dit, beaucoup de choses sont applicables à toute installation nucléaire électrogène. À chaque fois que cela sera utile, des indications seront données sur les autres types de réacteurs, sur ce que font les autres exploitants, sur les contextes particuliers aux autres pays.

Le sujet étant la maintenance, il ne sera question que des centrales *en exploitation* au moment où ce livre est écrit.

## Maintenance au sens large

Le mot « maintenance » est pris dans un sens très large, couvrant « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ». La maintenance inclut donc la surveillance, la maintenance préventive, qu'elle soit systématique ou conditionnelle, la maintenance corrective, les rénovations, les remplacements, etc. Et les actions ne se limitent pas à la « technique », elles concernent aussi les hommes et les organisations. Enfin, cette définition ne fixe pas de borne au temps : il n'y a pas de rupture entre « maintenance » et « gestion de la durée de vie » d'un matériel, d'une centrale ou du patrimoine industriel que constitue le parc nucléaire français.

Le livre se concentre sur ce que la maintenance a de particulier lorsqu'il s'agit de centrales nucléaires. Pour les concepts, les méthodes, les outils de la maintenance en général, le lecteur pourra se référer aux ouvrages génériques qui en traitent.

## Un livre d'histoires, pas un livre d'Histoire

Dans ce livre sont évoqués des événements, des problèmes, des affaires, des projets qui ont jalonné la vie du Parc nucléaire. J'essaye d'en montrer les origines, le déroulement et l'aboutissement. Sur tel ou tel sujet, certains argueront que les choses ne se sont pas passées exactement comme cela... Certes. Cela peut être volontaire de ma part car dans un tel ouvrage, il faut user de raccourcis pour dire en peu de mots ce qui a mis des mois, des années à émerger. Mais cela peut aussi être le reflet du fait que chacun vit les choses à sa manière et je n'échappe pas à la règle, avec ce que cela a de subjectif. Comme nous le verrons tout au long de l'ouvrage, rien, dans la maintenance du Parc nucléaire, n'était écrit d'avance, rien n'est sorti d'un chapeau, tout a été construit petit à petit, à coup d'expériences, d'analyses, d'actions, d'échecs et de succès. Pour chacun des exemples, l'important était surtout d'être juste quant aux causes profondes, aux solutions apportées, aux leçons tirées.

## Donner le sens

Quel niveau de détail adopter ? Ni trop, ni trop peu, évidemment. Sur un sujet donné, l'expert me trouvera superficiel, imprécis, il n'apprendra rien, il en sait plus que moi. Quant à celui dont l'activité est sans rapport avec le sujet, il trouvera au contraire que les explications sont trop approfondies. Entre ces deux extrêmes, j'ai cherché à me situer au niveau qui permet de comprendre le sens, l'idée, le « pourquoi » des choses.

De la même façon, j'ai fait de mon mieux pour être rigoureux mais aussi pour être compris, dans les limites du volume de l'ouvrage. Or, vulgariser c'est toujours simplifier, être réducteur et donc inexact aux yeux du spécialiste. Par

exemple, les valeurs indiquées pour certaines caractéristiques sont des valeurs arrondies (éventuellement moyennées), le but étant de fournir un **ordre de grandeur**. Je ne pense pas que cela soit grave car ce livre n'est pas un recueil de données ou de recettes, il a pour seule prétention de dire comment tel ou tel problème a été traité, quelle solution innovante a été imaginée. Au lecteur de s'approprier ces façons de faire, ces façons de penser, puis de voir en quoi elles peuvent l'aider dans ses propres activités, pour optimiser sa maintenance, fiabiliser son installation, améliorer la qualité de son travail, se faciliter la vie. Car les réponses apportées face à une difficulté peuvent aussi servir pour répondre à d'autres : mes années passées dans le monde de la recherche m'ont appris qu'il y avait autant de mérite à « détourner » qu'à inventer !

## Transparence

Expliquer le pourquoi de la maintenance, c'est forcément parler d'avaries, de dégradations, de défaillances de matériels. Je le fais en toute transparence, conscient du fait que l'accumulation de tant de problèmes exposés dans un même ouvrage peut donner l'impression que, dans le nucléaire, « tout se déglingue ». La réalité, facilement vérifiable, c'est que la plupart des équipements, bien exploités et bien entretenus, assurent leur fonction sans jamais faire parler d'eux. Si ce n'était pas le cas, les centrales nucléaires n'assureraient pas, depuis plusieurs décennies, 80 % de la production d'électricité française, sans rejet ni accident dommageable pour l'homme ou l'environnement. Qui plus est, sur ce type de centrale, la plupart des avaries sont immédiatement compensées par les redondances, les systèmes de secours, les automatismes qui prennent le relais. Il n'empêche qu'elles doivent être traitées, c'est là tout l'objet de la maintenance et la raison pour laquelle j'en parle.

Cette transparence, je sais aussi qu'elle peut donner à des gens de mauvaise foi l'occasion de faire des effets de manche : certains saisiront un mot par-ci, un mot par-là (dégradation, fuite, fissure) et les brandiront comme des épouvantails pour « hurler au loup ». Ceux-là, je ne chercherai pas à les convaincre : s'ils ne prennent pas la peine de lire les explications sur la façon dont les problèmes ont été maîtrisés, c'est que la vérité ne les intéresse pas. Heureusement, je crois que mes concitoyens sont raisonnables, qu'ils savent faire preuve d'esprit critique, tant vis-à-vis des propos lénifiants du genre « circulez, il n'y a rien à voir » que vis-à-vis des discours démagogiques sur le prétendu danger des « centrales vieillissantes ». Bref, je crois que les citoyens sont capables de comprendre les choses, pour peu qu'on les leur explique clairement. Telle est mon ambition.

## Structure de l'ouvrage

La maintenance présente de nombreux aspects extrêmement imbriqués et peut s'examiner sous des angles très différents. L'ensemble des connaissances à exposer forme une sorte de matrice à N dimensions, mais pour faire un livre, il faut

en choisir une puis découper les choses le long de cette ligne unique, ce qui soulève une infinité d'interrogations : faut-il segmenter entre « partie nucléaire » et « partie non nucléaire » alors que pour bien des « petits » matériels, ce que l'on a à dire est quasiment la même chose ? Faut-il évoquer les prestataires dans différents chapitres, quand on parle des acteurs de la maintenance, des arrêts de tranche, de la politique industrielle, etc. ? Ou faut-il leur consacrer un chapitre particulier et s'abstenir d'en parler dans les autres, qui risquent alors de paraître incomplets ? Et avoir un chapitre « radioprotection » dispenserait-il d'y revenir quand on explique la préparation des interventions, ce qui ne manquerait pas de surprendre ?

J'ai choisi une solution mixte : décrire l'essentiel d'un sujet dans un paragraphe particulier, mais aussi le ré-évoquer à chaque fois que cela semble utile. Et pour les sujets qui pouvaient légitimement être développés à plusieurs endroits, j'ai fait un choix – forcément subjectif – en essayant de me baser sur les préoccupations d'un homme de maintenance et sur la façon dont il aborde les problèmes. Une solution consistait à ne pas choisir et à rassembler dans des chapitres « Divers » les sujets que je ne savais pas classer. Mais cela eut été un bien mauvais exemple pour les lecteurs dont le métier est, ou sera, justement de prendre des décisions !

Le livre commence par un aperçu un peu global de la conception et de l'exploitation d'une centrale nucléaire de façon à bien caractériser « l'objet » que l'on veut maintenir. Viennent ensuite des chapitres consacrés aux aspects humains et organisationnels : les acteurs, le déroulement des interventions, leur mise en œuvre quand la centrale fonctionne et quand elle est à l'arrêt, les activités « supports », la politique industrielle. Une transition par les méthodes et les techniques mène ensuite le lecteur vers une série de chapitres consacrés aux matériels (ou familles de matériels) avec, à chaque fois, des éléments sur la conception, la fabrication, le retour d'expérience et enfin les programmes et stratégies de maintenance. Un chapitre sur la durée de fonctionnement des centrales clôt le corps du texte. Les paragraphes relatifs aux matériels évoquent souvent les mécanismes de dégradation qui peuvent les affecter : une annexe est donc consacrée à ces mécanismes de telle façon que le lecteur puisse s'y référer et en savoir assez pour comprendre les choix de maintenance.

### **Avertissement concernant les aspects réglementaires**

Le respect des lois et des règlements est une obligation pour tout le monde et donc pour l'exploitant d'une centrale nucléaire. Dans ce domaine, comprendre « l'esprit » est important mais ne dispense pas de s'attacher à « la lettre » puisque c'est souvent sur la conformité à la lettre que l'on est jugé. Paraphraser les textes serait donc extrêmement imprudent et il ne faudrait pas qu'un lecteur s'imagine que la connaissance de cet ouvrage vaut connaissance de la réglementation ! La prudence s'impose d'autant plus que le corpus réglementaire est en perpétuelle

évolution. C'est pourquoi je ne me suis pas livré à une description systématique et détaillée des textes officiels (qui auront sûrement changé entre temps), me limitant à évoquer les principales exigences en vigueur au moment où j'écris. Et surtout, j'ai essayé d'en expliquer le sens, par exemple en les replaçant dans leur contexte historique.

## Questions de mot

En matière de vocabulaire, ma priorité est d'être compris, même si j'utilise souvent le langage courant de l'exploitant (toujours en l'expliquant) pour que le lecteur puisse, le cas échéant, parler avec lui.

À la fin du livre figure un glossaire définissant quelques termes et expressions spécifiques du nucléaire (signalés dans le texte par une astérisque, au moins à leur première occurrence), ainsi que les innombrables sigles et acronymes désignant aussi bien des objets techniques que des méthodes ou des organismes. Mais pour la rédaction de cet ouvrage, il a fallu aussi adopter certaines conventions touchant au vocabulaire ou à l'orthographe qui peuvent traduire des différences de sens immédiatement compréhensibles par les initiés mais totalement obscures pour les néophytes. J'ai donc choisi de faire figurer, dès après cette introduction, un « prélude lexicologique et sémantique » qui explique quelques particularités du langage quotidien des exploitants nucléaires, particularités que j'ai reprises en écrivant le livre pour que le lecteur se familiarise avec le jargon de la profession. Y consacrer quelques minutes devrait faciliter la lecture de la suite.

Et si je passe du « je » dans cette introduction au « nous » dans le corps de l'ouvrage, il faut y voir une façon d'associer tous ceux qui ont contribué et tous ceux qui contribuent encore à cette aventure technique et humaine qu'est la maintenance des centrales nucléaires.



# *Prélude lexicologique et sémantique*

## **Vocabulaire**

J'ai essayé, autant que faire se peut, de m'en tenir à la langue française. Je me suis abstenu de tous les barbarismes à la mode, quitte à apparaître un peu ringard : je ne solutionne donc pas de problématiques mais je résous des problèmes, je n'adresse pas des sujets mais je les traite et je n'utilise pas de méthodologies là où une méthode me suffit. J'ai quand même utilisé quelques mots anglais qui sont devenus monnaie courante dans la profession pour que le lecteur puisse comprendre ses interlocuteurs du métier.

À l'intérieur même du secteur nucléaire, l'innovation en matière de vocabulaire est permanente. Chaque nouveau développement, chaque nouvel outil, chaque nouveau règlement débarque avec sa terminologie propre, comme pour bien montrer que « les choses changent ». Avec une forte tendance à choisir des mots peu explicites, voire à contresens. Tenter de coller à tous ces lexiques à la fois eut été vain, ils ne sont pas cohérents entre eux. Et s'attacher à l'un (fût-il réglementaire) n'aurait apporté aucune garantie, il ne sera peut-être plus d'actualité lorsque vous lirez ce livre. J'ai donc essayé d'utiliser le vocabulaire ayant, comme les réalités techniques, une certaine pérennité. Au lecteur plongé dans la vie professionnelle de s'adapter au jargon à la mode chez ses interlocuteurs !

## **Abréviations**

Comme dans beaucoup de domaines, les gens du nucléaire ont pris l'habitude d'utiliser des raccourcis ou des abréviations pour désigner certaines choses. Il y a bien sûr les sigles (ASN pour Autorité de Sûreté Nucléaire), les acronymes (GV pour générateurs de vapeur ou EPS pour étude probabiliste de sûreté) ainsi que les

truncations (plus souvent par apocope que par aphérèse : transfo pour transformateur). L'explication de ces abréviations sera fournie dès leur première occurrence dans le texte et la plupart sont reprises dans le glossaire. Mais je souhaite attirer l'attention sur les locutions nominales formées de mots (souvent des substantifs) simplement juxtaposés, là où le sens exigerait des mots de liaison qui ont disparu. Ainsi, le « bâtiment réacteur » est le bâtiment qui abrite le réacteur et une « épreuve enceinte » est une épreuve effectuée sur l'enceinte de confinement. De la même façon, une « tranche 900 » désigne une tranche ayant une puissance de 900 MWe, le « palier 1300 » est l'ensemble des tranches ayant une puissance de 1300 MWe et une « turbine N4 » est une turbine équipant les tranches du palier N4. Dernier exemple : un « assemblage combustible » n'est pas un assemblage qui *est* combustible (adjectif) mais qui *contient* du combustible (substantif). Dans ces conditions, les mots qui constituent la locution ne s'accordent pas nécessairement, tout dépend des mots de liaison qui sont sous-entendus. Ainsi, on écrira au pluriel les « assemblages combustible » puisque ce sont *des* assemblages qui contiennent *du* combustible.

## Genre

Si le genre masculin est utilisé pour désigner des personnes en général, c'est par souci d'alléger le texte conformément à l'usage, étant entendu qu'il désigne autant les femmes que les hommes.

Profitons de cette remarque pour évoquer le genre d'EDF (Électricité de France) qui est souvent considéré comme féminin soit à cause du mot « électricité », soit parce qu'il s'agit d'une entreprise, d'une société. Mais dans cet ouvrage, le sigle EDF est surtout utilisé pour désigner l'exploitant des centrales nucléaires françaises, le producteur d'électricité. C'est donc en référence à ce métier que j'ai retenu d'utiliser le masculin (masculin à caractère générique et non pas contestation qu'une femme puisse être une bonne exploitante, au contraire !).

## Majuscules

Certains mots ou certaines expressions, tout en gardant globalement le sens commun, peuvent désigner un objet particulier lorsqu'ils commencent par une majuscule. Ainsi, on imagine bien que l'exploitation obéit à des règles dont certaines peuvent être qualifiées de générales ; mais l'expression Règles Générales d'Exploitation avec des majuscules désignent précisément le corpus de celles qui sont imposées par la sûreté\* et d'application obligatoire. De même, un matériel peut faire l'objet d'essais périodiques au sens ordinaire du terme mais la locution Essais Périodiques avec un E et un P majuscules désigne ceux qui sont imposés par les Règles Générales d'Exploitation. Et quand une tranche fonctionne, on dit qu'elle est « en marche » mais les activités réalisées dans cette période sont organisées sous forme d'un projet dont l'appellation Tranche En Marche avec

des majuscules permet de le distinguer du sens courant. Cet usage spécifique des majuscules sera explicité à chaque première occurrence.

Terminons par le mot Parc (sous-entendu « nucléaire ») qui sera abondamment utilisé : avec une majuscule, il désigne l'ensemble des centrales nucléaires exploitées en France. Du coup, on parle d'un « événement Parc » (sous-entendu « de niveau Parc ») pour évoquer un événement qui concerne toutes les centrales françaises. Par extension, le mot Parc désigne souvent l'entité d'EDF chargée de les exploiter (la Division Production Nucléaire). Une « décision Parc » est alors une décision prise par la direction de cette Division, applicable dans toutes les centrales.

## Maintenance préventive ou corrective

Puisque nous parlons de mots, précisons celui qui est au cœur du sujet : la maintenance. Dans l'introduction, j'ai repris une définition normalisée qui me semble pertinente. Mais l'habitude veut qu'on distingue ensuite les maintenances préventive et corrective, la préventive étant celle que l'on fait avant la défaillance pour en réduire la probabilité. Pour un composant simple n'assurant qu'une fonction, on voit à peu près ce que cela signifie. Mais quid d'un générateur de vapeur avec ses 3 000 tubes d'échange ? En bouchant un tube endommagé avant qu'il n'éclate, fait-on du préventif ou du correctif ? On devine que, pour les matériels complexes, la réponse dépend du niveau de découpage auquel on se situe ainsi que des critères qui conduisent à déclarer qu'un composant n'assure plus sa fonction comme il convient. Ces questions donnent lieu à des débats qui passionnent les théoriciens de la maintenance mais qui n'ont que peu d'intérêt dans la pratique. Dans le cas du GV, l'important est de savoir s'il faut ou non boucher le tube, peu importe comment on qualifie cette action. D'ailleurs, la distinction entre préventif et correctif est rarement utilisée *a priori* comme déterminant choisi d'une politique de maintenance ; elle sert surtout après coup pour présenter des résultats et, le moment venu, chacun choisit la définition qui l'arrange.

La maintenance préventive (quelle qu'en soit la définition) peut être systématique ou conditionnelle. Si elle est systématique, le déclenchement des interventions est lié au calendrier ou aux durées de fonctionnement. La maintenance conditionnelle, elle, consiste à ne déclencher une intervention que lorsqu'un ou plusieurs indicateurs atteignent une valeur limite. Ces indicateurs sont supposés représenter l'état (la « santé ») du matériel et caractériser la « distance » qui sépare la situation actuelle de celle que l'on ne veut pas rencontrer. On parle de « surveillance » pour évoquer le suivi (permanent ou périodique) de ces indicateurs. Et si l'on est capable de faire une prévision sur le délai dans lequel un indicateur atteindra sa valeur limite, on parle de maintenance conditionnelle prédictive.



## *Remerciements*

La rédaction de ce livre a nécessité la compilation de très nombreux documents : analyses, notes d'étude, synthèses, compte-rendu, doctrines, etc. La plupart de ces documents sont internes à EDF et ne sont pas accessibles au public. Mais je souhaiterais quand même remercier toutes les personnes qui les ont produits et plus particulièrement ceux dont les travaux, mêmes s'ils sont anciens, constituent de véritables références, riches en informations et en illustrations :

Jean-Claude Barral, Claude Bastian, Patrick Bénéfice, P-G. Beyraud, Patrick Bordes, René Boudot, Odile de Bouvier, François Cattant, Didier Chambon, C. Coladant, Armand Colas, Denis Dallery, Patrick Dall'Olmo, Jean-Louis Drommi, Jacques Économou, Michel Guivarch, François Hédin, François Hervier, Christian Heydon, Michel Le Bars, Emmanuel Lemaire, Philippe Neau, Dominique Pinier, Patrice Pitner, Cédric Pokor, Jean-Luc Provost, François Rizzoli, Nicolas Roy, Raymond Serres, Serge Sighicelli, Jean-Michel Stephan, Patrice Thérond, Emmanuel Visse, M. Yven.

Je tiens à souligner l'apport considérable qu'ont représenté les supports d'enseignement utilisés par les formateurs de l'UFPI\*, supports remarquables tant par leur qualité de synthèse que par leur iconographie.

Un merci tout spécial à Pierre Eymond qui a accepté avec enthousiasme de fournir des textes écrits spécialement pour ce livre avec l'authenticité du « vécu », sur des sujets qu'il a connus « de l'intérieur » : son nom figure donc comme co-auteur des chapitres concernés. Les contributions particulières de Gérard Cordier et Luc Paulhiac sont reconnues de la même façon.

Une fois les chapitres rédigés, j'ai eu la chance que les meilleurs experts d'EDF acceptent de relire les passages du livre traitant de leur spécialité et y apportent corrections et compléments. Nombre d'entre eux ont mis à ma disposition leurs

propres documents et ont bien voulu donner de leur temps pour des échanges approfondis. Qu'ils en soient ici tous remerciés et plus particulièrement :

Philippe Brancaz, Rémi Briolat, Jean-Pierre Cailleaux, Laurent Capponi, François Champigny, Gérard Cordier, Jean-François Coste, Thierry Couvant, Jacques Dechelotte, Patrick Dugué, Jean-Marie Fageon, Bernard Fourest, Erwann Galenne, Jacques Giffard, Marc Kuntz, Régis Lacroix, Sophie Maingot, Jean-Paul Massoud, Éric Massoutier, Nathalie Monteil, Philippe Neau, Claude Pagès, Luc Paulhiac, Joseph Potoczek, Cyprien Poulain, Nicolas Robert, Dominique Savoldelli, Éric Terrailon, Patrick Todeschini, François Vaillant.

L'iconographie ne serait pas ce qu'elle est sans les photothèques d'entreprises et je tiens à remercier les personnes qui m'en ont ouvert les portes : Bruno Conty et Graziella Dumont (EDF), Denis Lecocq et Ghislaine Schmitt (Areva), Stéphane Le Corre et Éric Lamperti (Alstom), Michel Dupiech, François Billon et Gwenaëlle Goze (ONET Technologies).

Je me dois d'adresser des remerciements tout particuliers à ceux qui ont accepté la tâche ingrate de relire la totalité du manuscrit, apportant leur lumière sur le texte lui-même et sur la structure générale de l'ouvrage : Évelyne Leret, Étienne Duthéil, François Leniaud et surtout Serge Massart qui, dans sa carrière, a exercé à peu près toutes les fonctions touchant à la maintenance, y compris celle de patron du Parc Nucléaire, et qui aurait donc été encore plus légitime que moi pour écrire ce livre !

Et comment ne pas exprimer ma gratitude envers ceux qui m'ont appris le « métier » et ceux qui m'ont fait confiance quand il s'agissait d'affronter de nouvelles difficultés ou d'explorer de nouvelles pistes pour « construire » la maintenance du Parc : Marcel Auclair, Louis Chanudet, Jean-Pierre Mercier, Robert Noël, René Cordier, Raymond Godin, Louis Aye, Jacques Leclercq, Lucien Bertron, Pierre Daurès, Pierre Carlier, Bernard Dupraz, Laurent Stricker, Serge Massart et tous les collègues et collaborateurs qui ont accompagné mon parcours.

Merci à Philippe Sasseigne, directeur actuel du Parc Nucléaire, qui m'a encouragé à aller jusqu'au bout de ce projet devenu réalité, grâce aux Éditions Lavoisier. À ce propos, je veux souligner le professionnalisme et la rigueur bienveillante de Mélanie Kucharczyk et Delphine Hausser qui m'ont aidé à maintenir le cap.

Et par un juste retour des choses dont la nature a le secret, je terminerai par le début : tous mes remerciements à Dominique Minière, directeur de la Production Nucléaire et Thermique d'EDF, qui a bien voulu rédiger la préface de ce livre et toute mon admiration au même Dominique, jeune ingénieur que je me souviens d'avoir embauché un jour de 1982 !

Enfin, je remercie par avance tous les lecteurs qui voudront bien me faire part de leurs remarques sur le présent ouvrage : commentaires, compléments, corrections, précisions sont les bienvenus !

# Table des matières

Préface .....	VII
Avant-propos .....	IX
Prélude lexicologique et sémantique .....	XV
Remerciements .....	XIX

## *Partie 1*

### **L'objet à entretenir : une centrale nucléaire**

#### *Chapitre 1*

<b>Conception et construction d'une centrale nucléaire, principes de sûreté.</b> .....	3
1. Quelques précisions de vocabulaire .....	3
1.1. Une centrale, une tranche, un site. ....	4
1.2. Exploitation, conduite, maintenance .....	5
1.3. Systèmes, circuits, matériels .....	6
2. Description générale d'une tranche nucléaire et de son fonctionnement	6
2.1. Le principe .....	6
2.2. La chaudière .....	7
2.3. Le circuit secondaire et la production d'électricité. ....	11
2.4. Le circuit tertiaire .....	11
2.5. Les infrastructures de génie civil .....	12
2.6. Le « reste » .....	13

3.	Conception des systèmes nucléaires et principes de sûreté . . . . .	13
3.1.	Les objectifs de sûreté nucléaire . . . . .	16
3.2.	La défense en profondeur . . . . .	18
3.3.	Les redondances . . . . .	18
3.4.	Les trois barrières . . . . .	20
3.5.	La qualification des matériels aux conditions accidentelles . . . . .	21
3.6.	Les Études Probabilistes de Sûreté (EPS) . . . . .	23
3.7.	La notion « d’incidents » . . . . .	24
4.	Conception, dimensionnement et fabrication des systèmes et des matériels . . . . .	26
4.1.	Le cadre et les acteurs . . . . .	26
4.2.	Les matériels de la chaudière . . . . .	27
4.3.	Les matériels hors chaudière . . . . .	35

*Chapitre 2*

<b>L’exploitation d’une tranche nucléaire et sa maintenance . . . . .</b>	<b>37</b>	
1.	La vie d’une tranche nucléaire en exploitation . . . . .	37
2.	Politique de maintenance . . . . .	40
2.1.	Objectifs généraux . . . . .	40
2.2.	Principes . . . . .	41
2.3.	Les enjeux . . . . .	42
3.	Tranche en marche : des possibilités limitées pour la maintenance . . . . .	46
3.1.	Surveillance en fonctionnement . . . . .	46
3.2.	Mise hors-service pour maintenance . . . . .	48
3.3.	Comment faire davantage de maintenance « tranche en marche » ? . . . . .	50
4.	L’arrêt de tranche . . . . .	52
4.1.	La notion de cycle combustible . . . . .	52
4.2.	La planification des arrêts de tranche . . . . .	53
4.3.	La durée des arrêts . . . . .	57
4.4.	Pendant l’arrêt, une installation toujours en fonctionnement . . . . .	58
5.	Quelques spécificités de l’exploitation d’une tranche nucléaire . . . . .	59
5.1.	Rayonnements ionisants et radioprotection . . . . .	59
5.2.	Qualité et culture sûreté . . . . .	66
5.3.	Réglementation et Autorité de Contrôle . . . . .	74

*Partie 2*

**Les hommes, les organisations, les méthodes**

*Chapitre 3*

<b>Les acteurs de la maintenance . . . . .</b>	<b>87</b>	
1.	L’exploitant (EDF) . . . . .	87
1.1.	Le Parc nucléaire . . . . .	87

1.2.	Une centrale . . . . .	91
1.3.	Les entités communes au niveau « Parc » . . . . .	98
2.	Les fournisseurs de composants . . . . .	108
2.1.	Les chaudiéristes . . . . .	108
2.2.	Les fournisseurs de groupes turbo-alternateurs . . . . .	110
2.3.	Les autres fournisseurs de matériels . . . . .	111
3.	Les fournisseurs de service . . . . .	112
3.1.	Préambule . . . . .	112
3.2.	Les constructeurs d'origine . . . . .	113
3.3.	Les entreprises spécialisées à couverture nationale . . . . .	113
3.4.	Les entreprises locales . . . . .	115
3.5.	Les groupements professionnels . . . . .	115
4.	Les autorités de contrôle et leurs appuis . . . . .	116
4.1.	L'Autorité de Sûreté Nucléaire française . . . . .	116
4.2.	L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) . . . . .	120
4.3.	Les Autorités de Sûreté à l'étranger . . . . .	121
5.	Les organismes de référence . . . . .	123
5.1.	L'AFCEN . . . . .	123
5.2.	Le CEFRI . . . . .	125
5.3.	La COFREND . . . . .	125
6.	Les organismes de formation et de recherche . . . . .	126
6.1.	Les organismes de formation . . . . .	126
6.2.	Les organismes de recherche et développement . . . . .	128
7.	La société civile . . . . .	130
8.	Les organismes internationaux . . . . .	131
8.1.	L'AIEA . . . . .	131
8.2.	L'Association mondiale des exploitants nucléaires (WANO) . . . . .	133
8.3.	L'Association des Autorités de Sûreté Nucléaire des pays d'Europe de l'Ouest (WENRA) . . . . .	134
8.4.	Autres organismes internationaux . . . . .	134

#### *Chapitre 4*

<b>L'organisation d'une intervention de maintenance . . . . .</b>	<b>137</b>
1. Les grandes étapes de la vie d'une opération de maintenance . . . . .	137
1.1. La préparation . . . . .	138
1.2. Le calage de l'intervention . . . . .	139
1.3. La réalisation . . . . .	140
1.4. Le contrôle . . . . .	145
1.5. Le repli du chantier . . . . .	145
1.6. La requalification . . . . .	146
2. Qualité et Sûreté . . . . .	147
3. L'organisation et la mise en œuvre de la radioprotection . . . . .	149
3.1. Responsabilités en matière de radioprotection . . . . .	149
3.2. Organisation du site en zones radiologiques . . . . .	150
3.3. Préparation et réalisation des interventions . . . . .	151

3.4.	Le suivi dosimétrique . . . . .	153
3.5.	Démarches de progrès . . . . .	155
4.	Les opérations de « maintenance nationale » . . . . .	156
4.1.	L'historique et le concept . . . . .	156
4.2.	Le développement et la préparation . . . . .	157
4.3.	Des activités très encadrées . . . . .	158
4.4.	La mise en œuvre . . . . .	159

*Chapitre 5*

<b>Maintenance Tranche En Marche et Arrêt de Tranche . . . . .</b>	<b>161</b>
1. Maintenance tranche en marche et gestion du fortuit . . . . .	161
1.1. Surveillance des matériels en fonctionnement . . . . .	161
1.2. Maintenance et projet « Tranche en Marche » . . . . .	165
1.3. La gestion du fortuit . . . . .	166
2. La maintenance en arrêt de tranche . . . . .	169
2.1. Introduction . . . . .	169
2.2. Les trois types d'arrêt : ASR, VP et VD . . . . .	170
2.3. Une suite dense et ininterrompue d'activités interdépendantes . .	173
2.4. Le déroulement d'un arrêt de tranche . . . . .	180
2.5. La préparation de l'arrêt de tranche . . . . .	187
2.6. L'organisation du Projet d'Arrêt . . . . .	193
3. Le pilotage des arrêts au niveau Parc . . . . .	199
4. Conclusions . . . . .	200

*Chapitre 6*

<b>Les activités amont et aval . . . . .</b>	<b>203</b>
1. L'élaboration des programmes de maintenance préventive . . . . .	203
1.1. Les premières années . . . . .	203
1.2. L'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité . . . . .	204
1.3. La méthode AP913 . . . . .	206
1.4. Les bénéfices de « l'effet Parc » . . . . .	207
1.5. Niveau local ou niveau national ? . . . . .	208
1.6. Les pratiques à l'étranger . . . . .	209
2. Choix d'une stratégie face à un problème matériel . . . . .	210
2.1. Les méthodes et les données . . . . .	210
2.2. Le cas particulier des modifications . . . . .	211
2.3. Gestion globale du patrimoine industriel . . . . .	212
3. La documentation . . . . .	215
3.1. La documentation générale interne . . . . .	215
3.2. La documentation d'origine externe . . . . .	217
3.3. La documentation qui accompagne une activité . . . . .	219
3.4. Papier ou écran ? . . . . .	220
4. Les pièces de rechange et leur gestion . . . . .	221
4.1. Acheter la bonne pièce de rechange . . . . .	221
4.2. Acheter d'avance, ni trop ni trop peu . . . . .	222

4.3. Les produits consommables et les PMUC . . . . .	225
4.4. Les stocks, leur gestion et la logistique associée à EDF . . . . .	226
5. Le système d'information . . . . .	229
5.1. Un Système d'Information : quoi et pourquoi ? . . . . .	229
5.2. Un peu d'histoire . . . . .	230
5.3. Le SdIN, nouveau SI . . . . .	230
6. La formation et les compétences . . . . .	232
6.1. Les principes . . . . .	232
6.2. Les moyens . . . . .	234
6.3. Les prestataires . . . . .	234
7. Le Retour d'Expérience (ou REX) . . . . .	235
7.1. Quel retour d'expérience ? . . . . .	235
7.2. L'organisation du REX . . . . .	236

### Chapitre 7

<b>Politique industrielle et relations entre exploitant et prestataires</b> . . . . .	<b>239</b>
1. Approvisionnement . . . . .	239
1.1. Une mise en concurrence parfois difficile . . . . .	239
1.2. La position privilégiée du chaudiériste . . . . .	240
1.3. Une diversification limitée . . . . .	242
2. Relations avec les prestataires : l'histoire . . . . .	242
2.1. Des relations « historiques » . . . . .	242
2.2. La crise . . . . .	243
2.3. La démarche et la charte prestataires . . . . .	244
2.4. Les évolutions de la charte . . . . .	245
3. La politique industrielle aujourd'hui . . . . .	246
3.1. Des objectifs précis . . . . .	246
3.2. Modalité de choix des prestataires, systèmes de qualification . . . . .	249
3.3. Formation des prestataires . . . . .	253
4. Les formes de contractualisation . . . . .	254
4.1. Les appels d'offre . . . . .	254
4.2. « Mieux-disant » plutôt que « moins-disant » . . . . .	255
4.3. Des marchés pluriannuels . . . . .	255
4.4. La rémunération . . . . .	255
4.5. Les prestations intégrées . . . . .	256
5. Conditions d'intervention et radioprotection des intervenants . . . . .	257
5.1. Une volonté de partenariat . . . . .	257
5.2. Suivi médical et protection radiologique . . . . .	258
6. Surveillance des activités sous-traitées . . . . .	259
7. La situation à l'étranger . . . . .	260

### Chapitre 8

<b>Les méthodes et les techniques</b> . . . . .	<b>263</b>
1. Surveillance en fonctionnement . . . . .	263
1.1. La surveillance des fuites . . . . .	263

1.2.	La surveillance vibratoire . . . . .	264
1.3.	La surveillance des caractéristiques physico-chimiques des fluides . . .	265
1.4.	La surveillance à des fins d'expertise . . . . .	266
1.5.	Le développement de la maintenance conditionnelle . . . . .	267
2.	Examens non destructifs (END) . . . . .	269
2.1.	Généralités . . . . .	269
2.2.	Examens visuels . . . . .	270
2.3.	Ressuage . . . . .	271
2.4.	Magnétoscopie . . . . .	271
2.5.	Radiographie . . . . .	273
2.6.	Examens par ultrasons . . . . .	276
2.7.	Examens par courants de Foucault . . . . .	278
2.8.	Méthodes de détection de fuite à l'arrêt . . . . .	281
2.9.	Thermographie infrarouge . . . . .	281
2.10.	Autres méthodes et techniques d'expertise . . . . .	282
2.11.	Qualification des méthodes d'examen non destructif . . . . .	286
3.	Le traitement des défauts détectés sur les matériels . . . . .	288
3.1.	Démarche générale . . . . .	288
3.2.	Recherche de l'origine du défaut . . . . .	289
3.3.	Évaluation de la nocivité du défaut et de ses conséquences potentielles . . . . .	290
3.4.	Étude de réparabilité . . . . .	291
4.	Réparation, mitigation, remplacement . . . . .	291
4.1.	Élimination des défauts dans les matériaux métalliques . . . . .	291
4.2.	Grippage de vis et réparation de taraudages . . . . .	292
4.3.	Mitigation . . . . .	293
4.4.	Remplacement des gros composants . . . . .	294
5.	Radioprotection . . . . .	296
5.1.	Réduction de la contamination des matériels et des circuits . . . . .	296
5.2.	Optimisation des doses reçues et réduction des risques de contamination pour les personnes . . . . .	298
6.	Robotique et nouvelles technologies . . . . .	300
6.1.	Porteurs d'outils . . . . .	300
6.2.	Procédés automatisés . . . . .	301
6.3.	Prudence de l'exploitant . . . . .	301
6.4.	L'usage des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) . . . . .	302

*Partie 3*

**Les matériels et leur maintenance**

*Chapitre 9*

<b>Les assemblages combustible</b> . . . . .	<b>307</b>
1. Conception et fabrication . . . . .	307

2.	Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	311
2.1.	Endommagement par corps migrants . . . . .	311
2.2.	Usure par vibration . . . . .	312
2.3.	Dégradation des gaines « de l'intérieur » . . . . .	312
2.4.	Corrosion par le fluide primaire . . . . .	313
2.5.	Déformation globale des assemblages . . . . .	313
2.6.	Endommagement lors de la manutention . . . . .	314
2.7.	Résultats globaux . . . . .	314
3.	Surveillance et maintenance . . . . .	315
3.1.	Surveillance de l'activité du primaire . . . . .	315
3.2.	Inspection des assemblages . . . . .	315

### *Chapitre 10*

<b>La cuve</b> . . . . .	317	
1.	Conception et fabrication de la cuve . . . . .	317
1.1.	Description et éléments sur la fabrication . . . . .	317
1.2.	La démonstration de sûreté prenant en compte la fragilisation de l'acier . . . . .	324
1.3.	Problèmes rencontrés en fabrication et impactant la maintenance . . . . .	332
2.	Retour d'expérience et problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	334
2.1.	La fragilisation de l'acier de la cuve . . . . .	334
2.2.	Endommagement du plan de joint, des trous taraudés et de la goujonnerie de fermeture . . . . .	335
2.3.	Adaptateurs des traversées de couvercle . . . . .	335
2.4.	Liaisons bimétalliques . . . . .	339
2.5.	Endommagement du revêtement interne . . . . .	339
2.6.	Fuites au-dessus du couvercle . . . . .	339
3.	Surveillance en fonctionnement . . . . .	341
4.	Maintenance à l'arrêt . . . . .	341
4.1.	Inspection en service . . . . .	342
4.2.	Suivi de la fragilisation due à l'irradiation . . . . .	346
4.3.	Actualisation périodique de la démonstration de sûreté . . . . .	347
4.4.	L'épreuve hydraulique . . . . .	349
5.	La situation à l'étranger . . . . .	350
5.1.	Inspection en service . . . . .	350
5.2.	Fragilisation de l'acier et ses conséquences . . . . .	351
5.3.	Zones en alliage de nickel . . . . .	352

### *Chapitre 11*

<b>Les équipements internes de la cuve</b> . . . . .	353	
1.	Conception et fabrication . . . . .	353
1.1.	Dispositions générales et fonctions . . . . .	353
1.2.	Les équipements internes inférieurs . . . . .	354
1.3.	Les équipements internes supérieurs . . . . .	357

1.4.	Le positionnement respectif des différents éléments . . . . .	360
1.5.	Fabrication . . . . .	361
2.	Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	361
2.1.	Relâchement du calage des internes . . . . .	362
2.2.	Vibrations et usure . . . . .	362
2.3.	Incidents de manutention . . . . .	364
2.4.	Corrosion sous contrainte des broches de tubes-guides . . . . .	366
2.5.	Fissuration des vis du cloisonnement . . . . .	367
2.6.	Usure des tubes-guides . . . . .	369
3.	Surveillance en fonctionnement . . . . .	370
4.	Maintenance pendant l'arrêt . . . . .	371
5.	Réparation, rénovation et remplacement . . . . .	372

*Chapitre 12*

**Les grappes de contrôle et leurs mécanismes de commande . . . . . 375**

1.	Conception et fabrication . . . . .	375
1.1.	La maîtrise de la réactivité . . . . .	375
1.2.	Les grappes de contrôle . . . . .	376
1.3.	La tige de commande et son carter . . . . .	378
1.4.	Les mécanismes de commande des grappes . . . . .	379
1.5.	Fonctionnement de l'ensemble . . . . .	380
2.	Retour d'expérience et problèmes rencontrés . . . . .	382
2.1.	Grappes de contrôle . . . . .	382
2.2.	Mécanismes de commande des grappes . . . . .	385
2.3.	Carter des tiges et des mécanismes . . . . .	387
3.	Surveillance en fonctionnement . . . . .	387
4.	Maintenance pendant les arrêts . . . . .	388
4.1.	Grappes de contrôle . . . . .	388
4.2.	Mécanismes de commande des grappes . . . . .	389
4.3.	Carter de la tige et des mécanismes . . . . .	390
4.4.	Bobines électromagnétiques . . . . .	391

*Chapitre 13*

**Les Générateurs de Vapeur (GV) . . . . . 393**

1.	Conception et fabrication . . . . .	393
1.1.	Description . . . . .	393
1.2.	Les problèmes d'accessibilité . . . . .	400
1.3.	Fonctionnement des GV . . . . .	403
2.	Retour d'expérience et problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	405
2.1.	Corrosion sous contrainte des tubes côté primaire . . . . .	406
2.2.	Les dépôts de produits de corrosion côté secondaire . . . . .	410
2.3.	Corrosion des tubes côté secondaire . . . . .	411
2.4.	Usure des tubes par frottement . . . . .	413
2.5.	Fissuration des tubes par fatigue vibratoire . . . . .	416
2.6.	Déformations de tubes . . . . .	418

2.7.	Structures de supportage du faisceau tubulaire. . . . .	419
2.8.	Structures supérieures du GV. . . . .	420
2.9.	Enveloppe secondaire sous pression . . . . .	420
2.10.	Fond primaire et plaque à tubes . . . . .	421
2.11.	Évolution de l'état général des GV français . . . . .	421
3.	Surveillance en fonctionnement. . . . .	425
3.1.	Surveillance de la chimie. . . . .	425
3.2.	Surveillance des fuites primaire-secondaire . . . . .	425
3.3.	Surveillance des performances. . . . .	426
3.4.	Surveillance acoustique . . . . .	426
4.	Inspection et entretien courant à l'arrêt . . . . .	426
4.1.	Principes généraux . . . . .	426
4.2.	Programme standard pour des GV « sans histoire ». . . . .	427
4.3.	Programmes spécifiques aux différents types de dégradation . . . . .	429
4.4.	Nettoyage du secondaire . . . . .	430
4.5.	Test d'étanchéité. . . . .	431
5.	Réparations. . . . .	432
5.1.	Bouchage des tubes . . . . .	432
5.2.	Réparation locale des tubes. . . . .	433
5.3.	Réparation des structures supérieures . . . . .	434
5.4.	Extraction d'une portion de tube . . . . .	435
6.	Mitigation, rénovation, remplacement . . . . .	435
6.1.	Mise en compression mécanique de la peau interne des ZTD. . . . .	436
6.2.	Détensionnement thermique des petits cintres . . . . .	436
6.3.	Remplacement ou repositionnement des BAV . . . . .	436
6.4.	Remplacement des générateurs de vapeur (RGV) . . . . .	436
7.	Méthodes et outils spécifiques . . . . .	439
7.1.	Méthodes et outils pour inspection. . . . .	440
7.2.	Outils pour intervention et réparation . . . . .	442
7.3.	Tapes d'obturation des tuyauteries primaires. . . . .	444
7.4.	Dispositif de mise en pression d'un tube. . . . .	445

### *Chapitre 14*

<b>Les groupes motopompes primaires . . . . .</b>	<b>447</b>
1. Conception et fabrication . . . . .	447
1.1. Dispositions générales . . . . .	447
1.2. La volute et l'hydraulique de pompe. . . . .	450
1.3. La barrière thermique. . . . .	451
1.4. Joints d'arbre et injection aux joints . . . . .	452
1.5. Assemblage et étanchéité statique . . . . .	454
1.6. Le moteur et l'arbre . . . . .	454
1.7. Maladies et modifications « de jeunesse » . . . . .	455
2. Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	456
2.1. Retour d'expérience global . . . . .	456
2.2. Problèmes liés à l'exploitation . . . . .	457

2.3.	Fatigue thermique sur les arbres . . . . .	457
2.4.	Fatigue thermique sur la barrière thermique . . . . .	459
2.5.	Dégradation des joints d'arbre et dérive des fuites . . . . .	460
2.6.	Érosion par cavitation de la roue . . . . .	461
2.7.	Défaillance du palier de pompe . . . . .	461
2.8.	Crises vibratoires et défretage de roue sur les pompes 1300. . . . .	462
2.9.	Desserrage des vis de guide d'eau . . . . .	462
2.10.	Inétanchéité aux joints de volute. . . . .	463
2.11.	Adaptation plastique des brides d'assemblage . . . . .	463
2.12.	Moteurs . . . . .	464
2.13.	Non-qualités en maintenance . . . . .	464
3.	Surveillance en fonctionnement . . . . .	465
4.	Maintenance pendant l'arrêt . . . . .	467
4.1.	Historique de l'évolution des programmes . . . . .	467
4.2.	Principes généraux . . . . .	468
4.3.	Contenu des programmes standards. . . . .	468
4.4.	Programmes spécifiques à certains problèmes. . . . .	471
5.	Rénovation et remplacement . . . . .	471
6.	Moyens industriels . . . . .	473
7.	Situation à l'étranger . . . . .	474
7.1.	Parc mondial . . . . .	474
7.2.	Pratiques de maintenance . . . . .	475

*Chapitre 15*

<b>Le pressuriseur . . . . .</b>	<b>477</b>	
1.	Conception et fabrication . . . . .	477
1.1.	Description générale. . . . .	477
1.2.	Fonctionnement . . . . .	480
1.3.	Les manchettes thermiques . . . . .	480
2.	Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	481
2.1.	Un retour d'expérience globalement positif. . . . .	481
2.2.	Liaisons bimétalliques (LBM) . . . . .	482
2.3.	Débit de dose en fond de pressuriseur . . . . .	482
2.4.	Les cannes chauffantes. . . . .	483
2.5.	Les piquages d'instrumentation des pressuriseurs des tranches 1300 . . . . .	485
3.	Maintenance du pressuriseur . . . . .	486
3.1.	Surveillance en fonctionnement . . . . .	486
3.2.	Maintenance préventive à l'arrêt. . . . .	486
3.3.	Réparations . . . . .	488
3.4.	Rénovation, remplacement . . . . .	489
4.	Soupapes de sûreté du CPP . . . . .	489
4.1.	Historique . . . . .	490
4.2.	Conception de la « solution » SEBIM . . . . .	491
4.3.	REX . . . . .	493
4.4.	Maintenance des soupapes SEBIM. . . . .	493

### Chapitre 16

<b>Le Circuit Primaire Principal (CPP) et ses tuyauteries</b> . . . . .	495
1. Une définition réglementaire . . . . .	495
2. Surveillance et maintenance globale du circuit primaire principal . . . . .	496
2.1. Surveillance de la chimie du fluide primaire . . . . .	496
2.2. Surveillance des fuites . . . . .	497
2.3. Corps migrants et surveillance acoustique . . . . .	498
2.4. Comptabilisation des situations . . . . .	500
2.5. Les visites . . . . .	503
2.6. Épreuve hydraulique . . . . .	504
3. Les tuyauteries principales du CPP . . . . .	505
3.1. Conception et fabrication . . . . .	505
3.2. Retour d'expérience et problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	507
3.3. Surveillance et maintenance . . . . .	510
4. Les tuyauteries auxiliaires du CPP et les organes de robinetterie . . . . .	511
4.1. Conception et fabrication . . . . .	511
4.2. Retour d'expérience et problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	512
4.3. Surveillance et maintenance . . . . .	518
5. Dispositifs anti-débattements (DAD) et auto-bloquants (DAB) du CPP . . . . .	520
5.1. Dispositifs anti-débattement (DAD ou butées) . . . . .	521
5.2. Dispositifs auto-bloquants (ou DAB) . . . . .	522
6. Les liaisons bimétalliques du CPP . . . . .	524
7. Les zones en alliage de nickel du CPP . . . . .	526
8. Les zones singulières du CPP . . . . .	527

### Chapitre 17

<b>Le Bâtiment Réacteur (BR) et les infrastructures internes</b> . . . . .	531
1. Bâtiment réacteur . . . . .	531
1.1. Conception et construction . . . . .	531
1.2. Retour d'expérience sur le BR . . . . .	536
1.3. Surveillance en fonctionnement . . . . .	539
1.4. Maintenance pendant les arrêts pour rechargement . . . . .	540
1.5. L'épreuve enceinte . . . . .	541
1.6. Réparation, rénovation . . . . .	542
1.7. Situation des autres exploitants . . . . .	543
2. Dispositifs de manutention . . . . .	544
2.1. Le pont polaire . . . . .	544
2.2. La machine de chargement du combustible . . . . .	548

### Chapitre 18

<b>La turbine</b> . . . . .	553
1. Conception, fabrication, exploitation . . . . .	553
1.1. Dispositions générales . . . . .	553
1.2. Les rotors . . . . .	556

1.3.	Les paliers et les étanchéités . . . . .	558
1.4.	Les organes d'admission et les auxiliaires . . . . .	559
1.5.	Enjeux de la maintenance. . . . .	559
2.	Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	560
2.1.	Comportement global des turbines. . . . .	560
2.2.	Rotors BP à disques frettés. . . . .	561
2.3.	Rotors à disques soudés . . . . .	565
2.4.	Problèmes rencontrés sur les autres composants des turbines . . . . .	567
3.	Surveillance en fonctionnement. . . . .	567
4.	Maintenance à l'arrêt. . . . .	569
4.1.	Dispositions générales pour la maintenance à l'arrêt . . . . .	569
4.2.	Visite des corps HP . . . . .	570
4.3.	Visite des corps BP équipés de rotors à disques frettés . . . . .	571
4.4.	Visite des corps BP équipés de rotors à disques soudés . . . . .	572
4.5.	Maintenance autre que la visite des corps proprement dite . . . . .	574
5.	Réparation, rénovation, remplacement . . . . .	575

*Chapitre 19*

<b>L'alternateur.</b> . . . . .	579
1. Conception et construction . . . . .	579
1.1. Le stator . . . . .	580
1.2. Le rotor. . . . .	582
1.3. L'excitatrice . . . . .	583
1.4. Les paliers. . . . .	584
1.5. Les joints d'étanchéité à l'huile . . . . .	584
1.6. Refroidissement de l'alternateur . . . . .	584
2. Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	585
2.1. Rotor. . . . .	585
2.2. Stator . . . . .	587
2.3. Autres composants de l'alternateur. . . . .	590
3. Surveillance en fonctionnement. . . . .	592
4. Maintenance à l'arrêt. . . . .	592
4.1. Contenu général . . . . .	592
4.2. Différents types de visites . . . . .	593
5. Maintenance exceptionnelle et rénovation . . . . .	594

*Chapitre 20*

<b>Le condenseur.</b> . . . . .	597
1. Conception et fabrication . . . . .	597
1.1. Dispositions générales . . . . .	597
1.2. Les enjeux d'un condenseur « en bon état » . . . . .	599
1.3. La question des matériaux. . . . .	600
2. Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	601
2.1. Performances en général . . . . .	601
2.2. Faisceau tubulaire . . . . .	602

2.3. Plaque à tubes et boîte à eau . . . . .	606
2.4. Joints et compensateurs . . . . .	606
2.5. Structures internes . . . . .	607
3. Surveillance et maintenance en fonctionnement . . . . .	607
3.1. Surveillance du vide au condenseur . . . . .	607
3.2. Surveillance des paramètres physico-chimiques du fluide secondaire . . . . .	607
3.3. Suivi des performances . . . . .	608
3.4. Conditionnement du circuit de refroidissement . . . . .	608
3.5. Nettoyage en service des tubes . . . . .	609
3.6. Rondes et relevés . . . . .	609
4. Maintenance courante à l'arrêt . . . . .	609
4.1. Contrôles systématiques . . . . .	610
4.2. Contrôles adaptés . . . . .	610
4.3. Visites décennales . . . . .	612
4.4. Réparations . . . . .	612
4.5. Nettoyage . . . . .	612
5. Rénovation et remplacement . . . . .	613

### *Chapitre 21*

<b>Le poste d'eau et autres composants du circuit secondaire . . . . .</b>	<b>615</b>
1. Les réchauffeurs du poste d'eau . . . . .	615
1.1. Conception et fabrication . . . . .	615
1.2. Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	617
1.3. Surveillance en fonctionnement . . . . .	619
1.4. Maintenance courante à l'arrêt . . . . .	619
1.5. Rénovation et remplacement . . . . .	620
2. Les sècheurs-surchauffeurs . . . . .	621
2.1. Conception et fabrication . . . . .	621
2.2. Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	626
2.3. Surveillance en fonctionnement . . . . .	628
2.4. Maintenance courante à l'arrêt . . . . .	629
2.5. Rénovation et remplacement . . . . .	630
3. Les pompes du poste d'eau . . . . .	631
3.1. Pompes d'extraction . . . . .	631
3.2. Pompes alimentaires . . . . .	634
4. Les turbopompes de l'alimentation de secours des GV . . . . .	636
4.1. Conception et fabrication . . . . .	636
4.2. Retour d'expérience . . . . .	636
4.3. Surveillance et maintenance . . . . .	637

### *Chapitre 22*

<b>Les aéroréfrigérants et les matériels des circuits d'eau brute . . . . .</b>	<b>639</b>
1. Prise d'eau, station de pompage et tambours filtrants . . . . .	640
2. Tuyauteries en béton à âme tôle . . . . .	641

2.1. Conception et installation . . . . .	641
2.2. Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	642
2.3. Surveillance et maintenance préventive . . . . .	643
3. Aéroréfrigérants . . . . .	644
3.1. Dispositions générales . . . . .	644
3.2. REX, problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	646
3.3. Surveillance et maintenance . . . . .	648

*Chapitre 23*

<b>Les matériels mécaniques . . . . .</b>	<b>651</b>
1. Tuyauteries et supports . . . . .	652
1.1. Description générale . . . . .	652
1.2. Retour d'expérience et problèmes rencontrés en exploitation . . . . .	653
1.3. Surveillance et maintenance . . . . .	662
2. Appareils de robinetterie . . . . .	664
2.1. Généralités communes à tous les appareils . . . . .	664
2.2. Les robinets à commande . . . . .	671
2.3. Les clapets . . . . .	678
2.4. Les soupapes . . . . .	681
3. Pompes . . . . .	684
3.1. Dispositions générales . . . . .	684
3.2. Retour d'expérience . . . . .	686
3.3. Maintenance . . . . .	687
4. Assemblages à brides boulonnées . . . . .	688
4.1. Description . . . . .	688
4.2. Le choix du joint . . . . .	688
4.3. Le serrage . . . . .	689
4.4. Retour d'expérience et préconisations . . . . .	690

*Chapitre 24*

<b>Les matériels électriques . . . . .</b>	<b>691</b>
1. Câbles électriques . . . . .	691
1.1. Conception et fabrication . . . . .	692
1.2. Modes de dégradation et retour d'expérience . . . . .	693
1.3. Maintenance des câbles . . . . .	694
2. Tableaux électriques . . . . .	697
2.1. Dispositions générales . . . . .	697
2.2. Retour d'expérience et maintenance du tableau lui-même . . . . .	697
2.3. Retour d'expérience et maintenance des appareils associés . . . . .	699
3. Moteurs électriques haute tension . . . . .	701
3.1. Dispositions générales . . . . .	701
3.2. Retour d'expérience . . . . .	701
3.3. Maintenance . . . . .	702

4. Batteries .....	703
4.1. Dispositions générales .....	703
4.2. Maintenance .....	704

### *Chapitre 25*

<b>L'instrumentation et le contrôle-commande</b> .....	707
1. Dispositions générales .....	707
1.1. De quoi est composé un système de contrôle-commande ? .....	707
1.2. Le classement de sûreté des systèmes .....	709
2. Les composants et les technologies .....	709
2.1. L'instrumentation .....	709
2.2. Les actionneurs .....	710
2.3. Les automates du niveau 1 .....	710
2.4. Niveau 2 : la salle de commande .....	714
2.5. Quelques commentaires sur les évolutions technologiques .....	715
3. Retour d'expérience et maintenance .....	716
3.1. Quelques considérations générales .....	716
3.2. Chaînes de mesure de la puissance neutronique .....	719
3.3. Modules électroniques analogiques du contrôle-commande principal (niveau 1) .....	724
3.4. Protection du réacteur des tranches 1300 (SPIN) .....	727
3.5. La question des logiciels .....	730
4. Stratégies long terme sur le contrôle-commande .....	733
4.1. Rénovation ou non ? .....	733
4.2. Les termes de l'analyse stratégique .....	734
4.3. La stratégie d'EDF .....	735
4.4. La situation chez les autres exploitants .....	736

### *Chapitre 26*

<b>Les transformateurs de puissance</b> .....	739
1. Conception et fabrication .....	740
1.1. Dispositions générales et principe de fonctionnement .....	740
1.2. Les trois transfos de puissance et leurs fonctions .....	742
1.3. Construction et composants d'un transfo de puissance .....	742
2. Retour d'expérience, problèmes rencontrés en exploitation .....	746
2.1. Vision globale du retour d'expérience .....	746
2.2. L'électrisation statique .....	749
2.3. La dégradation des isolants .....	750
2.4. La corrosion par certaines huiles .....	751
2.5. Les traversées .....	752
2.6. Autres avaries .....	753
3. Maintenance des transformateurs .....	753
3.1. Enjeux de la maintenance des transfos .....	753
3.2. Stratégie générale : surveillance et échange standard .....	754
3.3. Diagnostic et appréciation du risque .....	755

3.4. Programmes de maintenance. . . . .	758
3.5. Stratégies de rénovation à long terme . . . . .	759
3.6. L'interaction avec le poste d'évacuation d'énergie. . . . .	760

*Partie 4*

**Et demain ?**

*Chapitre 27*

<b>La durée de fonctionnement . . . . .</b>	<b>765</b>
1. Qu'est-ce que la « durée de fonctionnement » d'une tranche nucléaire ? . . . . .	765
2. La situation du Parc Français . . . . .	766
3. La gestion de la durée de fonctionnement . . . . .	768
3.1. L'excellence au quotidien . . . . .	768
3.2. Une anticipation suffisante en maintenance exceptionnelle . . . . .	769
3.3. Des visites complètes et des réexamens de sûreté tous les dix ans . . . . .	770
3.4. Les actions « durée de fonctionnement » . . . . .	771
3.5. Le Grand Carénage . . . . .	772
4. Les composants non remplaçables . . . . .	773
4.1. La cuve . . . . .	773
4.2. Les enceintes de confinement . . . . .	773
5. L'obsolescence industrielle et le tissu industriel en support . . . . .	774
6. L'obsolescence réglementaire et l'évolution des exigences . . . . .	774
7. Le maintien des compétences et des connaissances . . . . .	776
8. La centrale nucléaire et son environnement . . . . .	776
8.1. L'impact d'une centrale nucléaire sur son environnement . . . . .	776
8.2. L'impact de l'environnement sur une centrale nucléaire . . . . .	777
9. Les aspects économiques. . . . .	778

*Annexes*

*Annexe 1*

<b>Les mécanismes d'endommagement des matériaux. . . . .</b>	<b>785</b>
1. Comportement mécanique des matériaux et rupture . . . . .	785
1.1. Comportement sous traction d'un matériau continu. . . . .	785
1.2. Rupture des matériaux métalliques. . . . .	786
1.3. Caractérisation de la résistance à la rupture. . . . .	788
1.4. Comportement d'un matériau fissuré . . . . .	790
1.5. Le flambage. . . . .	793
2. Les mécanismes de vieillissement des matériaux métalliques . . . . .	794
2.1. Le durcissement et la fragilisation par irradiation . . . . .	794
2.2. Le gonflement . . . . .	796
2.3. Le vieillissement thermique . . . . .	796

2.4. La fragilisation par l'hydrogène . . . . .	797
3. La fatigue . . . . .	797
3.1. Généralités . . . . .	797
3.2. Les étapes d'une rupture par fatigue . . . . .	799
3.3. Facteurs aggravants . . . . .	799
3.4. La modélisation . . . . .	800
3.5. Application aux chaudières nucléaires . . . . .	803
3.6. Le cas de la fatigue thermique . . . . .	804
3.7. La maîtrise de la fatigue . . . . .	807
4. La corrosion . . . . .	807
4.1. La corrosion atmosphérique . . . . .	808
4.2. Les mécanismes de la corrosion aqueuse . . . . .	808
4.3. Les différentes formes de corrosion aqueuse . . . . .	809
4.4. La corrosion-érosion . . . . .	814
4.5. La maîtrise des phénomènes . . . . .	815
5. La corrosion sous contrainte . . . . .	817
5.1. Mécanismes et maîtrise du phénomène . . . . .	817
5.2. La corrosion sous contrainte des alliages de nickel dans le milieu primaire . . . . .	819
5.3. La corrosion sous contrainte des aciers inoxydables dans le milieu primaire . . . . .	820
6. L'usure et l'érosion . . . . .	820
6.1. Définitions . . . . .	820
6.2. Les mécanismes d'usure . . . . .	821
6.3. L'érosion . . . . .	822
7. Les mécanismes de dégradation des bétons . . . . .	824
7.1. Généralités . . . . .	824
7.2. La corrosion des armatures . . . . .	824
7.3. La lixiviation . . . . .	825
7.4. Les retraits et fluages . . . . .	825
7.5. Les réactions de gonflement . . . . .	826
8. Le vieillissement des polymères . . . . .	826
8.1. Le vieillissement physique . . . . .	826
8.2. Le vieillissement chimique . . . . .	827

### Annexe 2

<b>Centrales nucléaires citées . . . . .</b>	<b>831</b>
1. Centrales nucléaires françaises . . . . .	831
2. Centrales nucléaires non françaises . . . . .	832

### Annexe 3

<b>Glossaire . . . . .</b>	<b>835</b>
1. Acronymes, sigles et abréviations . . . . .	835
2. Termes techniques . . . . .	842
<b>Index . . . . .</b>	<b>849</b>

**Jean-Pierre Hutin** est ingénieur de l'ENSM Nantes et de Lehigh University (États-Unis). Entré au Service de la Production thermique d'EDF en 1978, il prend la tête du Département Maintenance en 1991 puis devient directeur technique du Parc nucléaire en 1995, en charge des principales affaires techniques, de leur traitement et des stratégies associées. Il est ensuite directeur de Programmes à EDF R&D et fonde le Materials Ageing Institute. Auteur de nombreux articles, il a été représentant d'EDF dans différents organismes français et internationaux, expert auprès de la Commission européenne et de l'AIEA et enseignant dans plusieurs écoles d'ingénieurs.

## La maintenance des centrales nucléaires

Pour qu'une centrale nucléaire produise de l'électricité de façon sûre, propre, compétitive et pérenne, la maintenance a un rôle clé à jouer. C'est ce que Jean-Pierre Hutin, ancien directeur technique du Parc nucléaire EDF, nous explique en ne négligeant aucune facette de la question.

Après avoir rappelé ce qu'est une centrale nucléaire, il aborde les aspects humains et organisationnels de la maintenance : les acteurs, la préparation et le déroulement des interventions, les activités en support, la politique industrielle, etc. Puis sont passés en revue tous les matériels avec leur conception, le retour d'expérience, les programmes et les stratégies de maintenance. Une annexe rappelle les connaissances de base relatives aux mécanismes d'endommagement des matériaux.

Les points forts de cet ouvrage ? Un souci constant de vulgarisation pour être simple tout en restant rigoureux ; une mise en perspective pour comprendre comment la maintenance des centrales nucléaires s'est mise en place année après année ; des informations précises sur le comportement des installations, la façon dont les problèmes ont été traités et résolus, le retour d'expérience présenté en toute transparence. L'ouvrage se focalise sur le Parc nucléaire français mais évoque également les pratiques des autres exploitants. Bref, un ouvrage technique et scientifique mais aussi un livre « d'histoires » que l'auteur a vécues et qu'il raconte avec une grande liberté de ton.

Cet ouvrage s'adresse aux techniciens et ingénieurs en formation ou en activité dans le domaine de la maintenance d'installations industrielles, nucléaires ou non. Il permettra également à toute personne intéressée de mieux comprendre les enjeux techniques du nucléaire.

