

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^e 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 Minière¹

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

Conception et construction d'une centrale nucléaire, principes de sûreté	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

L’exploitation d’une tranche nucléaire et sa maintenance	37	
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

Les acteurs de la maintenance	87	
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

L'organisation d'une intervention de maintenance	137
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

Maintenance Tranche En Marche et Arrêt de Tranche	161
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

Les activités amont et aval	203
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

Politique industrielle et relations entre exploitant et prestataires	239
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

Les méthodes et les techniques	263
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

Les assemblages combustible	307
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

La cuve	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

Les équipements internes de la cuve	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

Les groupes motopompes primaires	447
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

Le pressuriseur	477	
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

Le Circuit Primaire Principal (CPP) et ses tuyauteries	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

Le Bâtiment Réacteur (BR) et les infrastructures internes	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

La turbine	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

L'alternateur.	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

Le condenseur.	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

Le poste d'eau et autres composants du circuit secondaire	615
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

Les aéroréfrigérants et les matériels des circuits d'eau brute	639
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

Les matériels mécaniques	651
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

Les matériels électriques	691
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

L'instrumentation et le contrôle-commande	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

Les transformateurs de puissance	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

La durée de fonctionnement	765
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

Les mécanismes d'endommagement des matériaux.	785
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

Centrales nucléaires citées	831
1. Centrales nucléaires françaises	831
2. Centrales nucléaires non françaises	832

Annexe 3

Glossaire	835
1. Acronymes, sigles et abréviations	835
2. Termes techniques	842
Index	849