

Jean-Claude Francastel

INGÉNIERIE DE LA MAINTENANCE

**De la conception
à l'exploitation d'un bien**

2^e édition

L'USINENOUVELLE

DUNOD

*À ma femme et à mes enfants
à l'égard desquels ma disponibilité aurait pu être meilleure
si j'avais adopté plus tôt les principes de cet ouvrage.*

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2003, 2009
ISBN 978-2-10-054619-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Le coût de la maintenance et son rôle stratégique pour un grand nombre d'activités sont des composantes à la fois indissociables et antagonistes de cette fonction. Les arbitrages entre les performances de la maintenance (en terme de sécurité et de rendements de production) et son coût global constituent probablement les choix parmi les plus difficiles et les plus lourds qui relèvent de la responsabilité de l'industriel.

L'art de l'homme de maintenance est d'optimiser l'allocation des moyens en regard des objectifs recherchés. Seule l'ingénierie de maintenance permet de trouver l'équilibre (fragile) entre les moyens disponibles et les résultats attendus. Il s'agit d'un processus qui apporte les réponses méthodologiques à chaque situation, qui permet d'arbitrer et d'aider à décider, selon des critères techniques et économiques, des opérations à mettre en œuvre. L'objectif est d'atteindre l'optimum coût/performance de fonctionnement d'un équipement ou d'une usine, tout en intégrant ses choix dans une perspective de long terme !

Jean-Claude Francastel, homme de terrain, en sait quelque chose, lui qui a fait ses armes et une grande partie de sa carrière dans les secteurs pétroliers et pétrochimiques. Ces industries, qui combinent les contraintes d'exploitation et d'environnement parmi les plus importantes qui soient, constituent les meilleures écoles d'application de l'ingénierie de maintenance, et ce, dans un contexte de pressions constantes sur les budgets. Fort de son expérience opérationnelle, ainsi qu'en tant que conseil aux grands donneurs d'ordres, enfin aidé par une abondante bibliographie, l'auteur nous propose ici un précis de l'ingénierie de maintenance.

Cet ouvrage présente l'état de l'art de l'ingénierie de maintenance en synthétisant la somme des connaissances et des travaux les plus récents qui permettent de décrire tout le déroulement d'un processus de maintenance, étape par étape, en phase avec le cycle de vie de l'équipement, de sa conception amont à son exploitation. Sa contribution s'intègre dans une démarche plus globale que l'on appelle le *soutien logistique intégré* (SLI), employé de longue date dans un nombre de domaines encore malheureusement trop restreint.

C'est probablement dans les domaines militaires et aéronautiques que l'ingénierie de maintenance est la plus spectaculaire pour des raisons bien compréhensibles : la disponibilité maximale (voire totale) est un impératif pour les matériels et les équipements. Il s'agit là plus précisément de la mise en œuvre d'une démarche d'ingénierie de maintenance qui concerne la bonne utilisation des matériels mis sur le marché (avions, fusées, chars, etc.). Mais qu'en est-il réellement de la diffusion

des méthodes de l'ingénierie de maintenance appliquée aux machines (capital immobilisé) dans l'industrie ?

L'expérience accumulée par l'Association française des ingénieurs et responsables de maintenance (AFIM) et par les enquêtes réalisées auprès des industriels, en partenariat avec le BIPE, montre que ces concepts, s'ils sont parfaitement connus, sont en fait utilisés de manière parcellaire à l'échelle de l'industrie tout entière. Seuls quelques groupes et sites industriels font exception à la règle.

Gageons que cet ouvrage, judicieusement éclairé d'exemples très précis et de situations très concrètes, réalisé de manière didactique, permettra de vulgariser la pratique de l'ingénierie de maintenance et d'en diffuser l'usage dans l'industrie.

Christian Duchemin
Daniel Dunet
BIPE

TABLE DES MATIÈRES

Préface	V
Avant-propos	1
Introduction	5

A

La phase stratégique de l'ingénierie de maintenance

1 • Concepts et définitions	11
1.1 La fonction maintenance	12
1.1.1 La performance requise	12
1.1.2 Le cycle de vie	13
1.1.3 Notion de « coût global »	15
1.1.4 Les méthodes de maintenance	17
1.2 L'ingénierie de maintenance	17
1.2.1 Définitions normalisées	18
1.2.2 Les aptitudes requises	19
1.2.3 L'ingénierie de maintenance en phase projet	19
1.2.4 L'ingénierie de maintenance en phase d'exploitation	19
1.3 Analyse séquentielle de l'ingénierie de maintenance (IM)	20
1.3.1 Le projet d'investissement	20
1.3.2 La chronologie des actions d'IM	23
1.4 Analyse fonctionnelle de l'IM	25
1.4.1 Principes généraux de l'analyse fonctionnelle	25
1.4.2 Avant-projet ou définition des politiques et stratégies	26
1.4.3 Développement de l'IM	29
1.4.4 Mise en œuvre	31

1.4.5	Mise en exploitation	32
1.5	Les acteurs de l'IM	33
1.5.1	L'équilibrage de l'ouvrage	33
1.5.2	Les interfaces exploitants/concepteurs	35
1.5.3	La valeur ajoutée cachée	35
1.6	Analyse de la valeur de l'IM	38
2 •	L'interface maintenance/projet d'investissement	41
2.1	Définir une politique et une stratégie d'entreprise	42
2.1.1	La politique d'investissement	45
2.1.2	Le contexte et ses contraintes	46
2.2	Définir la politique d'exploitation et de maintenance	49
2.3	Établir les règles de sûreté de fonctionnement	50
2.3.1	La technologie des composants à maintenir	51
2.3.2	Les règles de standardisation	52
2.3.3	Les grandes options d'exploitation	53
2.3.4	La maintenabilité	53
2.3.5	La validation des choix technologiques	58
3 •	Stratégies et méthodes de maintenance	65
3.1	Évaluer la situation de départ	67
3.1.1	La situation intrinsèque	67
3.1.2	L'organisation existante	67
3.1.3	La situation extrinsèque	69
3.2	Préciser la stratégie de maintenance	70
3.2.1	Les technologies	72
3.2.2	Les lois et la réglementation	73
3.3	Choisir parmi les options de ressources humaines	78
3.4	Explorer les méthodologies de maintenance	81
3.5	Étudier les choix logistiques possibles	83
3.6	Quelle est la « bonne stratégie » ?	83

B

Les hommes et leurs outils

4 •	L'organisation générale	89
4.1	Les fonctions élémentaires de maintenance	89
4.1.1	La fonction de management de la maintenance	93

4.1.2	La fonction « méthodes »	93
4.1.3	La fonction « préparation »	94
4.1.4	La fonction « ordonnancement »	94
4.1.5	La fonction « qualité »	94
4.1.6	La fonction « gestion »	95
4.1.7	La fonction « coordination/supervision »	95
4.1.8	La fonction « hygiène et sécurité »	96
4.1.9	La fonction « intervention »	97
4.1.10	Les interfaces d'exploitation	97
4.2	Préparer le recours aux services extérieurs	98
4.2.1	L'évolution de la maintenance contractée	98
4.2.2	La relation contractuelle	102
4.2.3	Le choix des entreprises de maintenance	106
4.2.4	Les services après-vente	108
4.2.5	Externaliser l'ingénierie de maintenance (IM)	114
4.2.6	Définir les ressources internes	117
4.2.7	La répartition des responsabilités	118
5	La mise en œuvre des structures	121
5.1	L'organisation de la maintenance	122
5.1.1	La note d'organisation	122
5.1.2	Les organigrammes	125
5.1.3	Les fiches de fonction	130
5.1.4	Les interfaces	146
5.2	Les systèmes de communication/information	152
5.2.1	La GMAO	152
5.2.2	La documentation	152
5.2.3	Les réunions de travail	154
5.2.4	Rapports et comptes rendus (ou retour d'expérience)	154
5.3	La mobilisation des moyens en personnel	155
5.3.1	Le recrutement interne	156
5.3.2	Les contrats d'externalisation	163
5.3.3	La formation interne	164
5.3.4	La formation externe	166
6	Les méthodes de maintenance	167
6.1	Le tronc commun des méthodes de maintenance	168
6.1.1	Le projet d'entreprise	168
6.1.2	La collecte des informations de base	170

6.1.3	Constituer la documentation	174
6.1.4	Recueillir les préconisations des constructeurs	175
6.2	Évaluer les risques de défaillance	176
6.2.1	Les étapes d'une étude de risques	178
6.2.2	Les caractéristiques du risque	179
6.2.3	La fiabilité humaine	184
6.2.4	Les responsabilités devant les risques	184
6.3	Faire des choix parmi les démarches analytiques	186
6.3.1	L'analyse préliminaire des risques (APR)	189
6.3.2	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)	190
6.3.3	L'analyse par arbre des événements (AAE)	194
6.3.4	L'analyse par arbre des défauts (ADD)	199
6.3.5	Prendre des décisions devant les risques	202
6.4	Faire des choix parmi les méthodes stratégiques	208
6.4.1	La MBF (Maintenance basée sur la fiabilité) ou RCM (Reliability centered maintenance)	209
6.4.2	Le RBI (<i>risk based inspection</i>)	223
6.4.3	La TPM (<i>total productive maintenance</i>)	237
6.4.4	Le lean manufacturing	243
6.4.5	Les « Cinq S »	244
6.5	Mise en œuvre des méthodes	244
6.5.1	Les manuels d'exploitation et de maintenance	244
6.5.2	Les méthodes d'intervention	245
6.5.3	Le programme de maintenance préventive systématique	247
6.5.4	Les grandes opérations de maintenance	251
6.6	Assurer la qualité du service de maintenance	264
6.6.1	Le contenu d'un plan assurance qualité spécifique (PAQS)	265
6.6.2	Procédures spécifiques	265
6.6.3	Système de contrôle de la qualité	265
6.7	Assurer la sécurité des travaux de maintenance	273
6.7.1	Hygiène et sécurité - Évolution de la législation et documents applicables	274
6.7.2	Principales vérifications réglementaires au titre de la sécurité	274
6.7.3	Traçabilité des vérifications techniques	276
6.7.4	Le plan prévention	276
6.7.5	L'évaluation des risques	277
6.7.5	La préparation des autorisations de travaux	277

6.8	Préparer l'ordonnancement des travaux de maintenance	278
6.8.1	L'initiation du travail	278
6.8.2	L'ordre de travail (OT)	278

C

La préparation des aides aux décisions

7 •	Les budgets de maintenance	291
7.1	Structurer le budget de maintenance	291
7.1.1	Le budget d'ingénierie de maintenance	291
7.1.2	Le budget de fonctionnement de la maintenance	292
7.1.3	Le budget de maintenance courante	295
7.1.4	Le budget des grandes opérations	295
7.1.5	Le budget d'améliorations/modifications	296
7.1.6	L'assistance à l'exploitant	296
7.2	Évaluer et simuler le budget de maintenance	296
7.2.1	Coûts de maintenance de référence (année 20xx)	298
7.2.2	Coûts de main-d'œuvre de maintenance de référence (année 20xx)	300
7.2.3	Validation du budget MCE par comparaison à des ratios	300
7.2.4	Ratios de main-d'œuvre	306
7.2.5	Exemple de répartition d'un budget de maintenance	306
7.2.6	Exemple de structure budgétaire d'une entreprise sous-traitante	306
8 •	La GMAO	313
8.1	Définition et but de la GMAO	314
8.2	L'évolution de la GMAO	315
8.3	Sélectionner un progiciel de GMAO	316
8.3.1	Allouer un budget	317
8.3.2	Énoncer les objectifs et contraintes	319
8.3.3	Analyser l'existant	319
8.3.4	Étudier et exprimer les besoins (rédiger le cahier des charges fonctionnel ou CdCF)	320
8.3.5	Évaluer le poids des fonctions élémentaires du CdCF	322
8.3.6	Inventorier les progiciels du marché susceptibles de répondre au CdCF	325
8.3.7	Consulter les fournisseurs, valider les offres	325
8.3.8	Faire un choix et le valider (analyse de la valeur)	326

8.3.9	Choisir les outils complémentaires	327
8.3.10	Assurer la formation des utilisateurs	327
8.3.11	Résoudre les phénomènes induits	329
8.3.12	Analyser les gains potentiels	330
8.4	La GMAO : outil de prévention et de gestion des risques	331
9 •	La documentation	333
9.1	Collecter et gérer la documentation	333
9.1.1	Principes généraux	333
9.1.2	Analyser les besoins et les contraintes	335
9.1.3	Exemple de développement d'une GED	338
9.1.4	Produire la documentation	340
9.2	Spécifier les échanges d'informations électroniques	347
9.2.1	Définir la nature de l'information à saisir	347
9.2.2	Définir la composition documentaire	348
9.2.3	Identifier les fichiers et définir les modalités d'échange	349
9.2.4	Valider les fournitures	350
10 •	La surveillance numérique des équipements	351
10.1	Adopter une architecture	351
10.2	Assurer les fonctions essentielles	353
10.3	Les avantages des systèmes numériques pour la fonction maintenance	356
10.3.1	La communication	356
10.3.2	La fiabilisation des mesures	357
10.3.3	Le traitement des alarmes	357
10.3.4	Le diagnostic en ligne	357
10.3.5	Le traitement du contrôle qualité des produits	357
10.3.6	L'interface avec la GMAO	358
10.3.7	Les risques potentiels	358
10.3.8	Les retombées de la surveillance numérique	358
11 •	Les aides aux diagnostics	361
11.1	Rappel des principes de la maintenance conditionnelle	361
11.1.1	Les paramètres de surveillance	362
11.1.2	L'organisation de la maintenance conditionnelle	363
11.2	Les contrôles non destructifs (CND) des appareils statiques	364
11.2.1	Adopter une démarche de contrôle non destructif	364
11.2.2	Concevoir les capacités métalliques sous pression	365
11.2.3	Identifier les risques de dégradation	368
11.2.4	Préparer les CND	370

11.2.5	Appliquer la réglementation	371
11.2.6	Choisir les méthodes et outils de CND	372
11.3	Les contrôles des équipements dynamiques	393
11.3.1	La surveillance vibratoire des machines tournantes	393
11.3.2	Établir un budget d'acquisition des moyens de surveillance vibratoire	400
11.3.3	Les analyses d'huile	402
11.4	Les systèmes « experts »	405

D

L'intégration de la logistique

12 •	Le stock de pièces de rechange	409
12.1	Le stock de pièces de rechange et ses principes	409
12.1.1	Rappel des principes comptables	409
12.1.2	Les principes de gestion d'un stock de pièces de rechange	410
12.2	Le processus de constitution d'un stock de rechanges	410
12.2.1	Distinguer les modes de réapprovisionnement	411
12.2.2	Adopter une stratégie générale	412
12.2.3	Constituer des réserves de démarrage	414
12.2.4	Sélectionner les « rechanges lourdes »	414
12.2.5	Sélectionner les rechanges d'une dotation initiale	414
12.2.6	Choisir les pièces de rechange à stocker	418
12.3	Mettre en œuvre le stock de pièces de rechange	431
12.3.1	Étudier les différentes prestations externes	431
12.3.2	Lancer les achats	432
12.3.3	Réceptionner la fourniture	432
12.3.4	Stocker (ou magasiner)	434
12.4	Le stock consignment	434
12.4.1	Le choix stratégique	434
12.4.2	Les principales règles	436
12.5	L'organisation de la gestion des pièces de rechange	437
13 •	Les locaux de la maintenance	447
13.1	Le magasin de pièces de rechange	447
13.1.1	Les principes de stockage des pièces de rechange	448
13.1.2	Les moyens de manutention	453
13.2	Les ateliers et aires de travail	454

13.2.1	Les machines-outils	455
13.2.2	Les établis	457
13.2.3	L'atelier de chaudronnerie	457
13.2.4	L'atelier d'électricité	458
13.2.5	L'atelier d'instrumentation	459
13.2.6	Le magasin d'outillage	460
13.2.7	Les moyens de levage et manutention communs	462
13.2.8	Les ateliers sectoriels	462
13.2.9	Les zones extérieures	462
13.2.10	Les utilités et effluents	463
13.3	Les bureaux	464
13.4	La réception des locaux et équipements	465
13.4.1	La réception des ateliers, bureaux et magasins	465
13.4.2	La réception des équipements d'ateliers et outillages	466

E

L'exploitation du bien

14 •	La mise en exploitation	469
14.1	L'approbation des documents de conception du bien	469
14.1.1	L'échéancier de construction/livraison	470
14.1.2	Les schémas de procédé et d'instrumentation (P&I)	470
14.1.3	Les listes d'équipements	470
14.1.4	Les listes de pièces de rechange	470
14.1.5	Les préconisations d'exploitation et maintenance	471
14.1.6	Les certificats de conformité	471
14.1.7	Les documents d'engineering du projet	471
14.2	Les contrôles qualité avant livraison	472
14.2.1	La conformité technologique	472
14.2.2	L'assurance de la qualité	472
14.2.3	Les pièces de rechange	472
14.2.4	Le contrôle budgétaire	473
14.3	Le commissionning	473
14.3.1	Les mises en sécurité	475
14.3.2	L'application du plan de lubrification	478
14.3.3	Les contrôles statiques (ou précommissionning)	478
14.3.4	Les contrôles dynamiques	482

14.4	La réception	482
14.4.1	La réception provisoire ou transfert de propriété	482
14.4.2	La réception définitive	484
14.4.3	Les procédures de démarrage	484
14.4.4	La marche industrielle (ou productive ou opérationnelle)	484
14.4.5	La réception définitive	486
14.4.6	Le recours aux garanties et assurances	486
15 •	La gestion du cycle de vie	489
15.1	La maîtrise de la sûreté de fonctionnement	490
15.1.1	La mesure de la fiabilité	490
15.1.2	La mesure de la disponibilité	492
15.1.3	La mesure de la maintenabilité	493
15.1.4	La mesure de la sécurité	494
15.2	La maîtrise du coût global	497
15.2.1	Les paramètres	498
15.2.2	Le calcul du coût global (CG) ou <i>life cycle cost</i> (LCC)	500
15.2.3	L'âge optimal de remplacement	500
15.3	La justification des choix	502
15.3.1	La méthode	503
15.3.2	Le plan de travail	505
15.3.3	L'analyse fonctionnelle de la maintenance	507
15.3.4	L'analyse de la valeur en maintenance	509
Annexe : Cahier des charges d'ingénierie de maintenance et inspection		515
1.	Objet	515
2.	Termes contractuels	515
3.	Équipements concernés	516
4.	Documents contractuels de base	516
4.	Descriptif de l'étude	517
5.	Documents à fournir par l'EIM	517
Conclusion		521
Bibliographie		525
Index		529

AVANT-PROPOS

« Ne réfléchissez jamais : ruminez, anticipez, improvisez.
Puisque l'échec est enrichissant, continuez à vous enrichir. »

Dominique Chalvin

Comment échouer à coup sûr dans sa vie professionnelle, lois 1 et 7

Le praticien de la maintenance, généralement homme d'expérience, instruit ou ayant découvert par lui-même les principes de son art, trouvera prétentieux de vouloir traiter de l'ingénierie de maintenance en un modeste volume, tant le sujet est vaste et dense. Il existe de nombreux et excellents développements dont on trouvera les références des principaux dans une annexe bibliographique ; nous y avons eu recours et les avons souvent cités au fil de l'eau. Notre propos n'est donc pas d'offrir ici une encyclopédie de la maintenance ou quelque médiocre compilation de ce qui existe déjà : les 5 000 pages du Référentiel Dunod *Pratique de la maintenance industrielle* constituent, par exemple, un recueil de méthodologies et d'exemples concrets d'applications utiles, voire indispensables ; nous nous sommes permis d'y faire quelques emprunts.

Cependant, face à un patrimoine industriel ou immobilier, les exploitants du bien sont généralement confrontés à des choix qu'ils n'ont pas faits eux-mêmes ou auxquels ils n'ont pu suffisamment participer dès la conception de l'ouvrage à exploiter et à maintenir. Il leur est alors extrêmement difficile de respecter les objectifs imposés pour chacune des phases d'utilisation, modifiés au gré des conjonctures capricieuses et des évolutions de l'état du matériel lui-même, tout au long d'un cycle de vie allant de l'acquisition au démantèlement de nombreuses années plus tard.

Le lecteur trouvera ici des éclairages suffisants des différents concepts de maintenance. Loin d'être exhaustif, chacun des sujets méritera un recours à des documents spécialisés pour en approfondir les détails. Le présent ouvrage privilégie le *processus* de mise en œuvre. Il bénéficie d'une longue expérience d'accompagnement de projets industriels et immobiliers. Une participation anticipée, suffisamment tôt à la conception des équipements, nous a souvent autorisé des options en fonction de critères de sûreté de fonctionnement réalistes : la sécurité des personnes et la protection de l'environnement ont pris une place de plus en plus déterminante ; la disponibilité du bien, corollaire de la fiabilité et de la maintenabilité, a pu être exprimée de façon à constituer des objectifs suffisamment précis pour orienter les choix technologiques. Lorsque ces conditions proches de l'idéal n'ont pu être remplies, il a fallu, de façon plus tardive, improviser des interventions curatives, « au pied levé », avec

une pression telle que, dans la logique du « faire face » à la défaillance en cours d'exploitation, les solutions sont rarement durables et restent globalement médiocres. Ces expériences négatives ont aussi été mises à profit pour améliorer le processus et progressivement tendre vers une méthodologie qui, si elle n'a pas encore la prétention d'être parfaite, doit résoudre une grande majorité de cas.

Nous pouvons par ailleurs affirmer, pour l'avoir vérifié, que les principes sont applicables, en tout ou partie, quels que soient les secteurs concernés, patrimoines immobiliers comme industriels. Les bancs d'essais qui nous ont été offerts pour leur mise en œuvre ont été aussi divers que l'industrie pétrolière, le raffinage, la chimie et la pétrochimie, l'énergie nucléaire, l'agroalimentaire, la sidérurgie, les mines, les cimenteries, etc. Nous avons aussi souvent exploré les méthodes adoptées par les technologies dites « de pointe » comme l'aéronautique et l'aérospatiale qui bénéficient d'approches sécuritaires encore plus sévères que tout autre secteur industriel et qui, en matière de méthodologies, visant la sûreté de fonctionnement optimale, constituent des modèles à imiter.

Aucun équipement, isolé ou intégré à un système complexe, n'échappe à la fonction maintenance. Suffisamment explorée et normalisée, il faut admettre que celle-ci se décline de façon « standard », quelles que soient les technologies mises en œuvre. Les modalités d'application diffèrent par les objectifs que l'on donne à chacun de leurs composants (« l'état requis » pour reprendre l'expression normalisée) et donc à la « valeur » à attribuer aux fonctions élémentaires de maintenance qui participent à l'obtention de l'optimum de l'usage qui doit être fait de l'ensemble industriel ou immobilier.

Nous avons matérialisé ce processus par un schéma qui nous sert de « fil conducteur » et de « plan de circulation de l'information » tout au long de l'ouvrage. À chaque chapitre, nous nous focalisons sur la partie du schéma dont il est question pour permettre au lecteur de jalonner le processus par rapport à une chronologie idéale faisant référence aux séquences de conception, élaboration ou construction du bien d'équipement. Lorsque ces échéances n'ont pu être respectées, il faut souligner que le processus doit être repris, tôt ou tard, dans l'ordre ou dans le désordre, mais certainement avec un coût et une dépense d'énergie très supérieurs à ceux qui auraient été suffisants si la démarche avait suivi la logique que nous proposons. De plus, l'adoption de dispositions au coup par coup, en fonction de budgets parcimonieux (et toujours en dépassement), d'informations incomplètes et peu fiables, de situations exigeant un traitement dans « l'urgence », peu favorables à la réflexion sur des solutions de fond, ne peut qu'allonger les délais de mise en œuvre et rendre les effets attendus très aléatoires.

Nous ne devons cependant pas conclure hâtivement qu'un tel processus ne peut être appliqué tardivement, au-delà de certaines échéances. L'ingénierie de maintenance est un processus continu qui concerne tout le cycle de vie de l'équipement ; les lacunes seront toujours pénalisantes, mais devront à un moment ou à un autre être comblées, le retard rattrapé dans les meilleurs délais et à un coût mal maîtrisé. Nous avons, chaque fois que nous en avons trouvé l'opportunité, rappelé que l'anticipation était la règle et que l'accompagnement d'un projet d'investissement par une démarche d'ingénierie de maintenance devait être entrepris dans les premières heures de la définition de l'ouvrage. Son évaluation budgétaire comparée aux risques

de privation du bien est suffisamment convaincante pour éviter de se trouver des alibis, pseudo-fatalités de défaillances ou autres « aléas techniques » ultérieurs et s'exonérer d'une démarche très en amont de la mise en exploitation, bien avant que les choix technologiques ne deviennent irréversibles.

Après avoir proposé des choix stratégiques, méthodologiques, technologiques et logistiques, nous porterons une attention particulière au « coût global » dont l'optimum doit constituer l'objectif de tout exploitant/propriétaire de patrimoine, immobilier ou industriel. Son expression suivant des lois complexes, comportant des paramètres en perpétuelle évolution et n'étant valable que dans une situation donnée, il paraît inconcevable de se contenter de visions de court terme, de se satisfaire de considérations « budgéo-comptables » et ne pas avoir un plan de progrès permanent s'appuyant sur les principes de l'ingénierie de maintenance.

Connaissant l'avidité des acteurs concernés pour les cas concrets, nous avons cherché à illustrer nos propos par des exemples vécus. Dans les échantillons sectoriels et structurels présentés, l'acteur de maintenance trouvera des analogies aux problèmes auxquels il est confronté de façon précoce ou tardive, qu'il soit maître d'ouvrage, maître d'œuvre ou prestataire d'un service ponctuel ou durable. Puissent mes collègues trouver dans ce « retour d'expérience » non seulement matière à entreprendre, consolider, optimiser leurs organisations d'exploitation et de maintenance, mais aussi à convaincre leurs échelons de décision d'adopter un processus prétendu onéreux mais maîtrisable. C'est une alternative à l'acceptation de devoir faire face à des situations à risques, ingérables en termes de dépenses directes conséquentes et d'indisponibilité hautement pénalisante du bien qui leur est confié.

Dans cette nouvelle édition, nous avons surtout mis à jour les données statistiques (Observatoire BIPE-AFIM¹) et les informations relatives à la sécurité, à la santé et aux conditions de travail en maintenance, activité qui se révèle comme la plus dangereuse et ceux qui la pratiquent sont les plus exposés aux risques. Nous avons également attiré l'attention sur les évolutions principales de la réglementation spécifique, nationale et européenne et sur les études de l'AFIM en la matière.

Par ailleurs, même si nous avons recommandé l'application d'un processus avec une logique de déroulement, cette 2^e édition essaye de favoriser les lecteurs pressés (la maintenance en compte malheureusement de trop nombreux, par nécessité, mais aussi souvent par manque d'organisation) ; on trouvera donc, en tête de chaque chapitre, la problématique qui le justifie et permet de choisir un ordre de lecture en fonction des intérêts du moment des lecteurs, sachant qu'à un moment ou à un autre ils devront reprendre les fonctionnalités dans l'ordre préconisé. Mais s'il n'est jamais trop tard, plus la démarche sera tardive, plus la pénalité, en termes économiques, sera importante ; on aura donc tout intérêt à engager le processus avec le maximum d'anticipation et avec une logique la plus proche possible du synoptique proposé.

1. Voir : <http://www.afim.asso.fr/benchmarking/observatoire/omi.asp>.

Pour accompagner ce discours et le rendre plus digeste, nous avons parallèlement écrit un modeste ouvrage qui s'était assigné pour but de vulgariser l'approche globale du processus d'Ingénierie de maintenance¹ : se lisant comme un roman, le lecteur pourra prendre comme une récréation la lecture du *fond de la baignoire* (Éditions Dunod, 2002).

Jean-Claude Francastel

1. *Le fond de la baignoire, le tour de la maintenance en 80 jours*, Éditions Dunod, 2002.

INTRODUCTION

« Savoir pour prévoir ; prévoir pour agir. »

Auguste Comte

Ingénierie de maintenance, ingénierie intégrée, soutien logistique intégré, maintenance engineering... sont autant de vocables, définis par des normes (AFNOR, ISO, US Military standard...) qui, dans la pratique, désignent des concepts très proches. Il s'agit en effet d'un processus d'accompagnement d'un bien industriel ou immobilier durant toutes les phases de son cycle de vie, depuis sa conception jusqu'à son démantèlement, pour que son exploitation et sa maintenance puissent se dérouler dans les meilleures conditions de sûreté de fonctionnement, pour un coût global (*life cycle cost*) optimal. Idéalement la mise en œuvre doit être entreprise dès la conception de l'ouvrage. Que serait aujourd'hui un aéronef ou une fusée spatiale qui n'auraient pas bénéficié d'études approfondies aux premières heures de leur gestation ? L'engin aurait certainement du mal à arriver sur le « tarmac » ou sur le « pas de tir ».

Nos équipements industriels ou patrimoines immobiliers sont loin de bénéficier des mêmes principes sécuritaires, difficiles à égaler mais qui peuvent être affichés comme modèles à imiter. Il est vrai qu'une hiérarchie s'établit sur la base de l'investissement consenti à la sûreté de fonctionnement, plus particulièrement à la sécurité des personnes et à la protection de l'environnement. La valeur de l'équipement et les conséquences de son indisponibilité (ou de sa perte) interviennent aussi, le rang supérieur pouvant, là encore, être attribué à la fusée spatiale, suivie de près par l'aéronautique, la première pour le coût qu'elle représente et le marché qu'elle doit satisfaire, la seconde pour les effets évidents sur la sécurité des passagers. Les risques que présentent l'énergie nucléaire, les industries lourdes et potentiellement polluantes (pétrole, chimie, pétrochimie, sidérurgie...), les situent aussi à des rangs très élevés. L'industrie agroalimentaire dont les défaillances sont lourdes de conséquences pour la santé des consommateurs ne sont pas en reste. Malheureusement les biens d'équipement sont trop souvent livrés à un propriétaire/utilisateur sans que ni celui-ci ni son fournisseur n'ait pris le temps de faire les analyses indispensables à la garantie d'une réelle adéquation du bien aux performances et de la sûreté qu'on est en droit d'attendre sur la totalité du cycle de vie, souvent multi-décennal. Il s'ensuit des mises en exploitation longues, coûteuses et douloureuses, des positions d'équilibristes sans filet, des risques permanents obligeant à des improvisations, des dépannages, des colmatages... pour, de toute façon, arriver un jour ou l'autre à la défaillance majeure, perçue comme une fatalité au moment où elle survient. C'est l'heure des

comptes : arithmétiquement la somme des coûts directs des solutions curatives et, plus difficiles à évaluer, les coûts indirects d'indisponibilité du bien, de pertes de production, de clientèle, d'image de marque, d'effets médiatiques, etc. Le manager honnête avec son entreprise comparera cette addition au coût direct (et seulement direct) d'une démarche d'ingénierie de maintenance structurée s'il l'avait entreprise très tôt dans l'investissement industriel du bien acquis. Si ce bien n'est pas à l'heure de la remise en cause, il allongera l'addition d'autant pour enfin concevoir un outil fiable, « maintenable », disponible au gré des exigences du marché qu'il convoite et doué des qualités indispensables au respect de la sécurité des hommes et de son environnement. Il n'en fera jamais l'économie. Il retardera la dépense en prenant (ou, pire, en faisant prendre à son environnement) d'énormes risques qu'il ne saura gérer. Que ne l'entreprend-il pas plus tôt ?

La démarche doit donc être entreprise dès qu'un projet d'investissement sort de ses cartons, dirons-nous. Elle se heurte d'emblée à des difficultés majeures : relationnelles, technologiques, méthodologiques, économiques, financières, de capitalisation des expériences... Les différents paramètres font intervenir des intérêts divergents : bailleurs de licences, constructeurs, fournisseurs, services après-vente, exploitants, acteurs d'exploitation et de maintenance, prestataires de services... Si la mise en équation est impossible, des principes peuvent être édictés et leur application anticipée, gérée, mesurée, contrôlée. De la précocité de leur application dépend le résultat, sachant que ce qui n'est pas réalisé avant la mise en exploitation devra l'être, tôt ou tard, pour un coût supérieur et dans un système turbulent de plus en plus difficile à maîtriser. La recherche anticipée des causes de défaillances, de leurs impacts sur le système lui-même et son environnement, sur les coûts induits, est une approche proactive. Elle est destinée soit à éradiquer les dégradations à leur source par des recherches de solutions techniques, technologiques, scientifiques, soit à admettre une probabilité d'occurrence et adopter des méthodes préventives, prédictives ou conditionnelles pour en limiter les effets, soit encore à considérer que les risques et les redressements curatifs sont économiquement acceptables et d'en accepter les effets.

C'est cette ingénierie d'accompagnement que nous proposons de développer dans cet ouvrage, en considérant que les choix et mises en œuvre des stratégies, méthodes et logistiques doivent suivre un processus lié à l'échéancier de conception et de réalisation du bien d'équipement. Cependant, que ceux qui ont eu la malchance (la majorité hélas !) d'hériter d'un matériel qui n'a pu bénéficier de ces principes dès sa conception se rassurent : l'entreprise sera plus longue, un peu plus complexe, plus coûteuse, mais pas désespérée. Le processus sera précédé d'un état des lieux permettant de détecter les lacunes ou insuffisances et entrepris le plus rapidement possible, avec des moyens adaptés et surtout dispensés des contingences quotidiennes exigées par un système défaillant. À partir du synoptique proposé et de la description des fonctions élémentaires qu'il schématise, il faudra faire une critique de l'organisation existante et une analyse de la valeur des solutions antérieurement adoptées comparées à celles qui devront être mises en œuvre pour redresser la situation. Ce n'est qu'à ce prix que nous pourrions parler d'optimisation du coût global sur un cycle de vie complet et ajuster la disponibilité du bien d'équipement selon les caprices des conjonctures.

Pour simplifier la tâche des lecteurs pressés, il n'en manque sûrement pas dans ce métier, nous avons reporté en complément en ligne sur le site Dunod un exemple de *cahier des charges de la fonction ingénierie de maintenance* qui pourra servir soit à définir la mission d'une structure interne du maître d'ouvrage, temporaire ou pérenne, soit à confier à un cabinet ou une entreprise extérieure un projet d'organisation et de mise en œuvre de la fonction maintenance. Ce « raccourci » n'empêchera évidemment pas le recours aux différents chapitres de l'ouvrage pour choisir, affiner, conforter les options qui se présentent tout au long du processus.

A

La phase stratégique
de l'ingénierie
de maintenance

1 • CONCEPTS ET DÉFINITIONS

A

LA PHASE STRATÉGIQUE DE L'INGÉNIERIE DE MAINTENANCE

■ Problématique générale¹

Pour introduire ce premier chapitre, nous ne pouvons résister à l'envie d'emprunter au philosophe Emmanuel Kant cet adage : « Sans intuition nos concepts sont vides, sans concepts nos intuitions sont aveugles ». Il résume en peu de mots ce que nous avons perçu durant ces trois ou quatre dernières décennies et nous oblige à le paraphraser pour nous justifier. Nous, les présumés « spécialistes », avons bonne conscience d'affirmer de grandes idées sur le métier de la maintenance. Nous admettions difficilement les contradictions, persuadés que nos intuitions étaient les meilleures, que la maintenance n'étant pas une science exacte, le « risque zéro » n'était pas de ce monde... et toutes sortes d'allégations nous dispensaient de quelconques démonstrations.

Les réunions de travail étaient passionnées et ne débouchaient que sur des ukhases de décideurs n'ayant pas toujours compris la « langue » des antagonistes, ceux-ci ayant du mal à s'entendre eux-mêmes. Ces mêmes spécialistes, frustrés, jusque-là « le nez dans le guidon » et mobilisés par les défaillances qu'ils étaient censés éviter finirent par se parler hors systèmes hiérarchisés, dans des instances où ils pouvaient enfin réfléchir et formuler des synthèses de leurs longues analyses intuitives et informelles, venant généralement de leurs échecs plus que de leurs réussites. Les initiatives se développèrent dans les milieux normatifs² et associatifs³, en temps masqué, c'est-à-dire sans comptabilisation à des fins budgétaires. Le résultat s'est longuement fait attendre, mais on peut maintenant se réjouir de son existence et d'un processus permanent d'actualisation que les normes françaises et européennes nous livrent régulièrement, grâce à ces « spécialistes » montés en grade et devenus « experts ».

Nous sommes alors en mesure de nous appuyer sur des concepts et définitions pratiques, universellement admises, et communes à l'Union Européenne. Dans cet ouvrage, nous essayons donc de ne pas manquer de citer ces travaux de normalisation et associatifs auxquels nous avons activement participé, cautionnant ainsi ce que nous pouvons aujourd'hui affirmer ou interpréter. Privilégiant l'analyse fonctionnelle pour aboutir à des analyses de valeur, notre première question est naturellement : qu'est-ce que la fonction maintenance ?

1. Au début de chaque chapitre de cette deuxième édition, nous essayons d'exprimer la problématique du thème qui y est développé.
2. AFNOR et CEN.
3. AFIM, CNMI, FFIE...

1.1 La fonction maintenance

La normalisation française nous propose, depuis les années 1980, un large panorama de définitions de la fonction maintenance. Plus récemment associée aux travaux des commissions de la normalisation européenne, auxquels participent les professionnels au travers de leurs entreprises et associations¹, elle consolide et fait évoluer les différents concepts. Le respect de la définition normalisée² de la fonction maintenance est maintenant quasi unanime.

De nombreux ouvrages³ déclinent différemment les concepts de base avec des marges d'interprétation mais avec une certaine homogénéité. Nous n'opposerons pas ici, dans le détail, les différentes définitions proposées par les auteurs et normalisateurs, mais nous recommanderons au lecteur de s'y reporter, chaque fois que nécessaire. Presque tous évoquent de façon plus ou moins dense, la maintenance à la conception, mais pas toujours comme un processus continu. Toute la démarche d'ingénierie de maintenance, préventive par excellence, entreprise la plus en amont possible et de la façon la plus anticipée qui puisse être, est sans cesse actualisée au cours du cycle de vie ; elle s'appuie sur la définition incontournable que nous adoptons à notre tour : *ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management.* Le fait qu'il s'agisse d'une savante combinaison d'activités techniques, administratives, et de management nous convient aussi parfaitement pour la suite du propos, car l'ingénierie de maintenance nous montre bien ces différents volets. Des considérations de base sont préalablement nécessaires ; nous les évoquons ci-après.

1.1.1 La performance requise

Le mot « management » de la définition, laisse entendre qu'il s'agit de mener toutes actions permettant de garantir les performances requises (ou l'état spécifié) d'un bien durable à un coût optimal. La *sûreté de fonctionnement*, définie par la même norme, se décompose en fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité sur une période ou un cycle de vie donné. « *Maintenir ou [et/ou] rétablir* » signifie que le concept de maintenance couvre à la fois des actions préventives et/ou curatives. Ceci ne doit pas occulter la finalité du propriétaire du patrimoine à maintenir, et généralement : *satisfaire une clientèle*, avec un produit *compétitif* fabriqué de *façon profitable* pour le producteur/exploitant du bien. S'il s'agit d'un patrimoine immobilier, il faudra

1. AFIM, CNMI...

2. Norme NF X 60-020.

3. Voir la bibliographie en fin d'ouvrage. Citons particulièrement, pour mémoire :

- du même auteur, *La fonction maintenance, de l'expression à la satisfaction du besoin*, AFNOR, 1999.
- *Maintenance industrielle* (2 tomes), AFNOR, 1996.
- F. Monchy, *Maintenance – Méthodes et organisations*, Dunod, 2000.
- Y. Lavina, *Audit de la maintenance*, Les Éditions d'Organisation, 1992.
- F. Boucly et A. Ogus, *Le management de la maintenance*, AFNOR Gestion, 1987.

plutôt satisfaire une clientèle et/ou des utilisateurs pour leur offrir les *meilleures conditions de confort, de cadre d'accueil et de vie*.

Il est clair que, quels que soient le processus engagé et le bien à maintenir, il sera difficile d'énoncer, *a priori*, une performance idéale. Il s'agit, en effet, de gérer, en permanence, un compromis entre des actions chères de confort et sur-sécurisantes, et d'autres respectant un budget parcimonieux. Entre faire le strict nécessaire et faire face à des situations inconfortables, se trouvent le « juste nécessaire » et le « juste à temps », concepts nous plaçant dans des logiques floues et éloignées des sciences exactes.

Remarque

Nous ne sommes pas loin de la théorie du chaos de Lorentz suggérant qu'il devrait y avoir un lien entre le refus du temps à se reproduire et l'impuissance des météorologues (auxquels nous associons volontiers les économistes et stratèges de tous bords) à faire des prévisions..., un lien entre l'« apériodicité » et l'« imprédictibilité », ajoute-t-il¹.

L'efficacité de la maintenance s'exprime, par conséquent, selon deux familles de paramètres, se contrariant mutuellement : les coûts et l'aptitude du bien à assurer la fonction requise. Le résultat ne peut être validé que si l'exigence est pertinente : le « juste coût » par rapport à la performance requise.

1.1.2 Le cycle de vie

L'une des difficultés majeures réside dans le fait que le cycle de vie et les performances requises à chacune de ses phases n'est pas un phénomène linéaire ni répondant à des lois mathématiques dont les algorithmes nous donneraient les solutions. Les conjonctures ont une forte influence sur les exigences ; les stratégies, les méthodes employées, etc., sont fondamentalement différentes suivant les périodes considérées : à court terme, on privilégie peut-être la disponibilité requise par un programme de production prétentieux, ou une sécurité irréprochable et quel qu'en soit le coût ; à moyen terme, on recherche plutôt l'optimum disponibilité/coût d'exploitation, dont maintenance ; à long terme, on n'hésite pas à investir dans des solutions durables ou rallongeant le cycle de vie par des modifications et/ou méthodes améliorant la sûreté de fonctionnement. Viennent ensuite les signes précurseurs de l'obsolescence ; se pose alors la question du remplacement à l'identique, ou de la rénovation/réhabilitation, ou d'un nouvel investissement totalement différent.

La figure 1.1 donne une vision très schématique des « efforts » de maintenance (en termes de coûts ou de tout autre indicateur qui s'y rapporte) au cours d'un « cycle de vie » ou « *life cycle* » (LC). Après l'investissement initial (1), des mises au point et investissements complémentaires ou dépenses d'exploitation exceptionnelles (2) sont généralement nécessaires avant de trouver une période stable (3), dite de « routine », où les coûts sont maîtrisés et sensiblement constants. Après un certain temps de fonctionnement, dépendant des choix technologiques initiaux, les pertes de performances (4), dites obsolescence ou vétusté, obèrent les dépenses directes de maintenance et occasionnent des privations de fonctions vitales pour l'explo-

1. J. Gleick, *La théorie du chaos*, coll. « Champs », Flammarion.