

Concevoir, produire et commercialiser sont des fonctions « naturelles » facilement identifiables et rarement négligées. Par contre, la maintenance n'est qu'un soutien à la production. C'est donc une fonction « masquée », agissant comme prestataire de service interne et, de plus, fortement évolutive.

Définitions AFNOR et CEN de la maintenance (Définitions AFNOR X 60-000 (mai 2002))

Définition

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Différentes formes de maintenances : définitions (Vocabulaire (FD X 60-000))

Maintenance préventive : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :

- 1- **Maintenance conditionnelle** : Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.

Remarque La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue. »

- 2- **Maintenance prévisionnelle** : Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.
- 3- **Maintenance systématique** : Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

Maintenance corrective : (anciennement curative) : Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. »

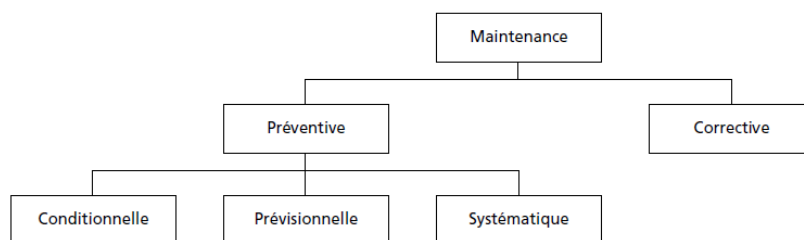


Figure 1.3 – Les différentes formes de maintenance normalisées selon FDX60.000

Autres termes non normalisés caractérisant des formes de maintenance

Les termes étudiés dans ce paragraphe concernent des applications non normalisées du mot « maintenance », ou peu utilisées ou très spécifiques ou étrangères.

La **maintenance réparatrice** est la forme ancienne et universelle de la maintenance corrective, déclenchée par une défaillance. Mais elle ne contient pas la dimension « saisie pour analyse ultérieure », caractéristique de la maintenance corrective : corriger, c'est améliorer.

La **maintenance palliative** caractérise les actions de dépannage : remise en état provisoire. La maintenance corrective caractérise les actions de réparation au sens de « guérir ».

La **maintenance d'amélioration** est à nos yeux un pléonasme : par nature, la maintenance s'inscrit dans une démarche de progrès. Toute l'organisation tend à favoriser le diagnostic, générateur d'améliorations par rupture avec l'entretien traditionnel. Rappelons que, pour le CEN, « l'amélioration est l'ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise ».

La **maintenance ab initio** se rapporte aux actions effectuées en amont de la mise en service d'un équipement et destinées à faciliter la maintenance ultérieure. Ces actions ont lieu dès la conception (prise en compte de la maintenabilité, construction de la fiabilité), au niveau des « travaux neufs » ou de la négociation d'investissement (éléments de soutien, documentation, etc.).

La **maintenance proactive** ou *déetective* (terme émergent) repose sur l'exploitation du retour d'expérience et sur l'analyse approfondie des phénomènes pathologiques à l'origine des défaillances.

La **maintenance rationnelle** est un terme défini par J. Maxer comme « l'ensemble des actions et des réflexions permettant de rétablir et d'améliorer la qualité et la fiabilité des biens et des services ».

Télémaintenance : maintenance exécutée à distance sans accès physique du personnel au bien.

Maintenance en ligne : maintenance exécutée alors que le bien est en fonctionnement.

Les formes de maintenance dans les autres pays industrialisés

La **maintenance productive** est la forme de maintenance américaine ayant servi de base, dans les années 1970-1980, à la TPM.

La *maintenance productive totale*, ou TPM, est une marque déposée par JMA (Japan Management Association). Elle a été un vecteur du succès japonais des années 1980. Remarquons que la TPM a été « réimportée » aux États-Unis pour contrer l'importation massive des produits japonais. C'est vers 1982 que des groupes américains implantés en France ont cherché à adapter les concepts de la TPM à nos entreprises.

La **topomaintenance** est une francisation de la TPM, marque déposée par SOLLAC (sidérurgie) à Fos vers 1975. Elle s'inscrit dans une démarche de qualité totale, tous les acteurs étant concernés par le rendement maximal des équipements tout au long de leur cycle de vie. La *logistique*, concept américain, est une approche économique impliquant la maintenance et reposant sur l'optimisation du LCC *life cycle cost* (coût du cycle de vie) d'un équipement.

La **térotechnologie** est une forme anglaise de la maintenance : c'est la maintenance préventive plus la maintenance proactive.

Les outils de la maintenance conditionnelle

Principaux outils spécifiques

Les trois principaux outils spécifiques sont les suivants.

- 1- **Mesureurs et analyseurs de vibrations**

Adaptés à la maintenance conditionnelle des machines tournantes (pompes, alternateurs, ventilateurs, centrifugeuses, etc.), mais aussi de certains processus continus (machines à papier, coulée continue, etc.) et de machines à mouvements alternatifs (moteurs thermiques, compresseurs, etc.).

2- Analyses d'huiles

Proposé par les groupes pétroliers fournisseurs de lubrifiants, et adaptés à la maintenance des moteurs Diesel, des circuits hydrauliques et des systèmes mécaniques pour lesquels la qualité de l'huile est prédominante pour la durée de vie (gros réducteurs par exemple).

3- Thermographie infrarouge

Cet outil est coûteux (caméra vidéo + imagerie numérique + logiciel associé pour stockage d'images), mais il est très polyvalent. Donnant une « image thermique » d'une zone suspecte, la thermographie IR permet de détecter à distance :

- des ponts thermiques en contrôle d'isolation pour économie d'énergie,
- des points chauds en équipements électriques (bobinage moteur, conducteur sous-dimensionné, contrôle d'armoires électriques à distance...),
- des points chauds en mécanique (dégradation d'un palier),
- des points chauds en blindage de four (usure de réfractaire),
- des fuites (en canalisations enterrées).

Tous ces exemples prouvent la polyvalence de cet outil. Son utilisation spécifique en maintenance conditionnelle passe par une image de référence, puis par l'analyse comparative des images successives. Il est parfois possible d'établir une corrélation entre les températures relevées et le phénomène pathologique surveillé (exemple : corrélation entre le gradient thermique d'un four et les centimètres de réfractaire en cours d'usure).

4- Les CND (contrôles non destructifs)

Comme leur nom l'indique, les CND ont vocation à contrôler l'état de pièces en cours ou en fin de fabrication. Mais leur utilisation en maintenance conditionnelle est envisageable comme outil permettant de visualiser des défauts débouchants ou internes. Le CND choisi permet de suivre leurs évolutions jusqu'à un seuil prédéterminé correspondant à un risque à prévenir, souvent une rupture mécanique. Toute fissure est une amorce de rupture.

Application

En mécanique, les évolutions de fissures précèdent les dégradations de surfaces fonctionnelles ou les ruptures. Ces fissurations « amorces de rupture » se trouvent principalement :

- sur toute pièce, dans les zones de concentration de contraintes (pour les arbres de transmission : gorges, épaulements, etc.) ;
- sur les dents d'engrenages, en pied de denture du profil ;
- sur les surfaces de roulement ou de frottement, en cas de sur-contraintes ;

– pour les soudures, en limite de cordon.

Exemple : dégradation d'une surface soumise au roulement

La fatigue hertzienne provoque la fissuration d'une sous-couche évoluant vers un « écaillage » à prévenir

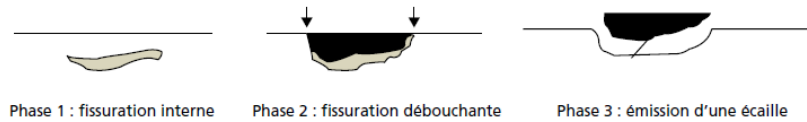


Figure 2.14 – Principe de l'écaillage d'une surface de contact

Quelques outils CND et leurs applications possibles en maintenance

– L'œil et ses « prolongements technologiques ». L'œil est le premier des CND, par observation directe de zones suspectes. Ses « accessoires » vont du microscope électronique à l'endoscope qui permet, par exemple, l'observation *in situ* des dommages d'une denture d'engrenage sans avoir à démonter le réducteur.

– Les radiographies (X, γ , neutronographie, etc.) sont adaptées aux contrôles de la « santé-matière » et le suivi de défauts internes. Mais les sources radioactives sont soumises à une stricte réglementation limitant leur usage. Certaines radiographies doivent être réalisées dans des locaux spécifiques, excluant l'utilisation *in situ* fréquente en maintenance.

– Les ultrasons couvrent le même champ d'utilisation, mais à partir de matériel plus facile à mettre en œuvre sur site. Ils sont très utilisés en contrôle de soudures, mais ils requièrent une spécialisation poussée de la part des opérateurs.

– La magnétoscopie et les courants de Foucault voient leur utilisation limitée aux seuls **matériaux ferromagnétiques** et à la recherche de défauts superficiels. – Le ressuage est très utilisé pour la mise en évidence de fissures débouchantes. Bien d'autres CND existent avec des champs d'application très spécialisés, ce qui les rend peu pratiques en maintenance « généraliste ».

La mise en œuvre de la plupart des CND présente trois **problèmes pour leur utilisation en maintenance** :

- la plupart demandent un investissement dont le temps de retour n'est pas évident à évaluer ;
- ils demandent une spécialisation des techniciens chargés de leur mise en œuvre, d'où un recours fréquent à de la prestation de service ;
- ils demandent une bonne connaissance préalable des pathologies à prévenir (nature et localisation). Il faut savoir que l'on ne trouvera, avec un outil CND, que ce que l'on cherche !

Analyses qualitatives de défaillances et leurs enjeux

Comprendre les phénomènes pathologiques :

Les défaillances : la raison d'être de la maintenance

Les défaillances sont à la maintenance ce que les pathologies humaines sont à la médecine : leur raison d'exister. Or, toute défaillance est le résultat d'un mécanisme pathologique rationnel et explicable, dû à une ou plusieurs causes à identifier.

Quelques définitions normalisées utiles

Défaillance : « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise ». Après une défaillance, le bien est en **panne**. Termes proches ou synonymes, mais non normalisés :

failure en anglais, dysfonctionnement, défaut, faute, panne, avarie, dégradation, anomalie, dommage, erreur, incident, anomalie, arrêt fortuit, détérioration, etc.

Cause de défaillance : « circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ».

Mécanisme de défaillance : « processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance ».

Mode de défaillance : effet par lequel une défaillance se manifeste.

Panne : « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures ».

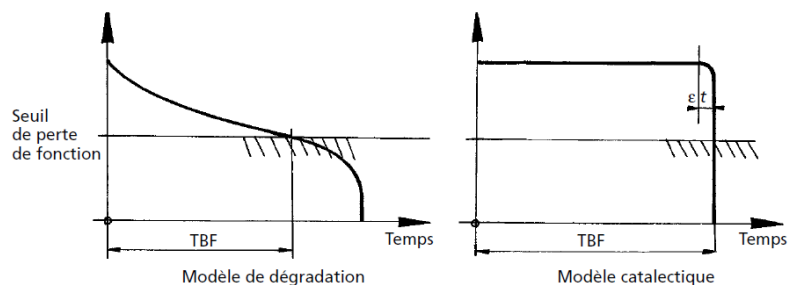
Dégradation : « évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation ». Une dégradation peut conduire à la défaillance.

État dégradé : « état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises ».

Typologie des défaillances

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances, parmi lesquelles nous retiendrons :

- **suivant leur cause** (Les causes intrinsèques et extrinsèques) ;
- **suivant leur degré** : défaillances partielles ou complètes, permanentes, fugitives ou intermittentes ;
- **suivant leur vitesse d'apparition** : défaillances soudaines ou progressives. La défaillance soudaine « ne peut pas être anticipée par un examen ou une surveillance préalable » alors que la défaillance progressive peut l'être (critère de détectabilité). Par combinaison des deux : défaillance catalectique ou par dégradation. La défaillance **catalectique** est **soudaine + complète**, alors que la dégradation est progressive + partielle.



Les causes de défaillances

Défaillances de causes intrinsèques ou inhérentes (définitions CEN)

« Intrinsèques » signifie qu'elles sont générées par le système lui-même, en condition normale de fonctionnement. Parmi les causes intrinsèques, la norme CEN distingue :

- « défaillance due à une **conception** inadéquate du bien » ;
- « défaillance due à une **fabrication** du bien non conforme à sa conception ou à des procédés de fabrication spécifiés » ;
- « défaillance due à une **installation** incorrectement réalisée ». Les défaillances par usure (liées à la durée d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.

Défaillances de causes extrinsèques (définitions CEN)

La norme CEN permet de distinguer :

- « défaillance de **mauvais emploi**, due à l'application de contraintes qui excèdent les capacités spécifiées du bien » ;
- « défaillance par **fausse manœuvre**, due à une manipulation incorrecte du bien ou un manque de précaution » ;
- « défaillance due **à la maintenance**, résultant d'une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte » ;
- « défaillance secondaire », conséquence d'une autre défaillance en amont (en cascade).

Analyse qualitative post-défaillance

Les six éléments de connaissance d'une défaillance

Une analyse qualitative post-défaillance doit comporter les **six éléments** de connaissance permettant de comprendre aussi bien **l'environnement du système** lors de sa perte de normalité que les **mécanismes ayant engendré la défaillance**. Cela afin d'**apporter des remèdes** durables et des mesures d'organisation pour éviter la réapparition de la défaillance, ou pour atténuer ses effets.

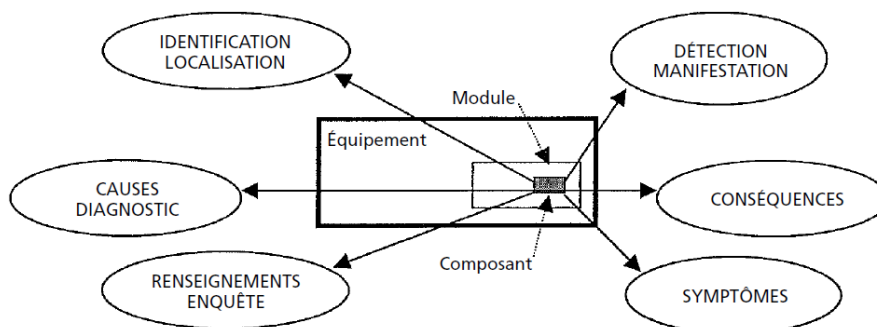


Figure 4.2 – Les critères permettant l'analyse postdéfaillance

Les six pôles de l'analyse

1. *L'identification et la localisation de la défaillance :*
 - identification dans l'organisation (numéro de DT (demande de travail), intervenants et nature de la panne) ;

- situation dans le temps (relevé compteur et date + heure) ;
 - localisation dans l'espace à travers l'arborescence (localisation par code de l'équipement, puis du module ou du composant défaillant) ;
 - identification fonctionnelle : quelle est la fonction perdue ?
2. *La détection, la manifestation et l'alarme :*
 - par qui, quand et par quel moyen la défaillance a-t-elle été détectée ?
 - dans quelles conditions de surveillance et/ou par quels capteurs en place ?
 - manifestation de la défaillance : amplitude (partielle ou complète), vitesse (progressive ou soudaine), caractère (permanent, fugitif, intermittent).
 3. *Les renseignements recueillis par une enquête préliminaire :*
 - DTE (dossier technique d'un équipement) relatif au composant défectueux localisé ;
 - origine et référence du composant localisé ;
 - état de l'environnement avant et au moment de la détection, conditions de service et circonstances ;
 - fichier historique (quelles sont les interventions antérieures ?).
 4. *Les symptômes :*
 - observés *in situ* avant l'arrêt : relevé des « anomalies » (bruit et vibrations, couleur, odeur, chaleur, etc.), indications mesurées ou captées, caractérisation des contraintes, perturbations en sortie, défauts de qualité associés ;
 - observés après dépose ou démontage : mesures statiques, mesures électriques en tension ou hors tension, examen morphologique en cas de rupture mécanique, examen de surface, photographie ou dessin ;
 - observés par examens complémentaires : microscopie, analyses chimiques, contrôles non destructifs ou destructifs, essais, etc.
 5. Les conséquences :
 - sur le plan de la sécurité, de l'indisponibilité, de la non-qualité-produit, des coûts directs, etc. ; - mineures, majeures ou critiques.
 6. Les causes :
 - **imputation extrinsèque** : accident, choc, surcharge, mauvaise utilisation, erreur de conduite, non-respect de consigne, défaut d'entretien, manque de précaution, environnement non conforme, défaillance seconde, ou en cascade ;
 - **imputation intrinsèque** : défaut de santé-matière, de conception, de fabrication, de montage, d'installation, mode de défaillance en fonctionnement : usure, abrasion, corrosion, fatigue, détérioration de surface, déformation, rupture, vieillissement, etc.

Les fiches d'analyses qualitatives de défaillances

Le recueil de ces informations après défaillance doit se faire sur une **fiche d'analyse de défaillance**. Elle sera structurée à partir des six pôles étudiés, et adaptée à la logique documentaire de l'entreprise.

Dans quel cas faut-il analyser une défaillance ?

Certainement pas en temps réel et pour chaque défaillance ! Mais en **temps différé**, après sélection de pannes répétitives ou coûteuses par l'agent des méthodes. Cette hiérarchisation des défaillances peut se faire à partir d'une analyse quantitative de défaillances suivant les graphes de Pareto ou suivant une **AMDEC** qui s'appuie généralement sur trois critères :

- la probabilité d'occurrence,

- la gravité de ses effets,
- la non-défectabilité.

Genèse (formation) des défaillances

Maintenance proactive : expertise et diagnostic

Les défaillances sont des événements caractérisés par des phénomènes pathologiques qui débouchent, pour un équipement, sur un état : **la panne**.

Diagnostic

Par définition « **recherche de la cause** », le diagnostic est l'action cérébrale identique à une « enquête » qui permet, à partir de l'observation de symptômes, de rechercher les causes d'une défaillance, intrinsèques ou extrinsèques, ou les deux conjuguées.

Expertise

L'expertise est une démarche **plus approfondie** qui permet de comprendre les **mécanismes d'une défaillance intrinsèque**, c'est-à-dire les processus chimiques, physiques, métallurgiques ou autres, qui sont en amont de l'arbre des causes. Ce que J. Maxer appelait la « cause première », avec pour enjeu la prévention de ces processus, donc la suppression *ab initio* des défaillances.

Du bon fonctionnement à la défaillance

Nous nommerons ϕ_0 l'ensemble des phénomènes permettant la réalisation d'une fonction f , c'est-à-dire le « comment ça marche ». Nous nommerons ϕ_1 le ou les phénomènes pathologiques expliquant la perte de cette même fonction f .



Les phénomènes ϕ_0 ou comment ça marche...

Ce sont les lois comportementales associées aux disciplines traditionnellement enseignées dans une optique de compréhension et de conception des systèmes. Les connaissances techniques acquises lors de l'apprentissage initial, sous forme de **disciplines telles que la mécanique sous ses différents aspects, l'électronique, l'électrotechnique, l'hydraulique, l'automatisme**, etc., permettent de construire des systèmes qui, à t_0 , auront un bon fonctionnement.

L'application des lois ϕ_0 permet la construction, puis la fabrication d'équipements qui seront vendus et utilisés, mais dont le bon fonctionnement initial sera vite altéré lorsqu'il sera confronté à la réalité du terrain. En effet, ces lois reposent souvent sur **des modélisations et des hypothèses**, telles que l'homogénéité et l'isotropie, qui ne sont pas vérifiées dans le réel.

Les phénomènes ϕ_1 ou comment ça ne marche plus ...

Il s'agit **des mécanismes de défaillance** considérés comme des phénomènes pathologiques générant une perte de normalité ou un facteur d'instabilité. **Leur élucidation requiert une expertise**, base de la maintenance dite proactive, s'appuyant sur des compétences nouvelles généralement externes : physiciens, métallurgistes, chimistes, thermiciens, hydrauliciens, etc.

Prenons l'exemple simple d'un joint d'étanchéité de carter d'huile « fuyard ». Après l'avoir changé n fois, on peut se préparer à le changer pour la $n + 1$ fois, sauf si l'on a compris l'incompatibilité du matériau du joint avec l'huile ! Sans être expert en chimie organique, il sera aisé de trouver un matériau compatible, et nous n'entendrons plus jamais parler de ce joint. Les deux graphes précédents paraissent semblables : et pourtant, quelle différence dans la progressive maîtrise du comportement d'un équipement !

ϕ_0 et ϕ_1 sont des phénomènes de nature différente

Un décalage existe souvent entre les modes de fonctionnement et les mécanismes de défaillance, qui rend vain le corporatisme et justifie la nécessaire polyvalence des techniciens. Ainsi une corrosion d'acier, déterminé par un mécanicien, implique une compétence en électrochimie pour être comprise, donc pour être prévenue. Ainsi un roulement à billes peut être dégradé par des « crevasses » dues à un courant de fuite. Ainsi un défaut de connectique (discontinuité électrique) peut avoir une origine mécanique.

Les formations initiales en maintenance n'étudient en général que les phénomènes ϕ_0 . Il serait certainement utile aux techniciens de compléter leur expérience de terrain par des formations complémentaires en « pathologie ϕ_1 » de façon à pouvoir mieux diagnostiquer les défaillances.

Constitution d'une expertise

1. Renseignements préliminaires

Toute expertise comprend une enquête préliminaire de terrain destinée à rassembler tous les éléments de connaissance utiles, à l'identique de l'analyse qualitative. Elle analysera les conditions de fonctionnement, nominales et réelles.

2. Observations et examens

L'expertise comprendra ensuite toutes les observations visuelles ou instrumentales des zones suspectes et des faits avérés. Souvent, des examens complémentaires de laboratoires seront nécessaires, par exemple pour la vérification de la nature des matériaux et de leur traitement.

3. Diagnostic

Seront alors incriminées les causes :

- se rapportant à la conception (choix des matériaux) ou la fabrication de la pièce (processus, contrôle);
- se rapportant aux conditions d'utilisation et à leur conformité.

4. Propositions de remèdes

L'expertise volontaire n'ayant pas pour objet de trouver des coupables, mais **des solutions, des propositions seront alors émises pour prévenir le renouvellement de cette défaillance**. Lorsque les éléments incriminés sont standardisés, il est possible d'étendre ces propositions à la surveillance des éléments semblables non encore défaillants. Nous passons alors de la défaillance « guérie » (le correctif) aux défaillances prévenues (le préventif).

À quel niveau peut-on exploiter une expertise ?

Toutes les expertises ne requérant pas un niveau scientifique extrême, il est envisageable et hautement profitable de réaliser de **l'auto-expertise** par moyen propre, ou avec l'aide ponctuelle d'un spécialiste. Seules de rares pannes majeures seront confiées à des **laboratoires d'expertises**, dans un cadre volontaire ou parfois « forcé » : cas de la défaillance entraînant des suites juridiques par un litige commercial ou par un accident corporel. Ces expertises de défaillance pourront être **exploitées à deux niveaux** :

- **en interne**, au bureau des méthodes pour apporter des améliorations évitant la réapparition de la défaillance expertisée et pour capitaliser l'expérience, ou au bureau d'études-travaux neufs pour apporter des améliorations lourdes et pour enrichir les prochains cahiers des charges. Le recours à des experts externes est évidemment envisageable pour approfondir ou conforter le diagnostic et lui associer les remèdes les mieux adaptés ;
- **en externe**, si l'on est capable de nouer des liens de partenariat avec le fournisseur de l'équipement concerné et s'il possède une structure d'exploitation de retours d'expérience.

Illustrons la situation temporelle des expertises et de leur exploitation (figure 4.6) :

- en interne, l'auto-expertise est un facteur d'amélioration. On ne sait prévenir efficacement que ce que l'on a compris. C'est l'aspect le plus valorisant du bureau des méthodes ;
- en externe, l'auto-expertise répercutée par les « travaux neufs » peut intégrer et enrichir une base de données constructeur, au bénéfice des utilisateurs ultérieurs.

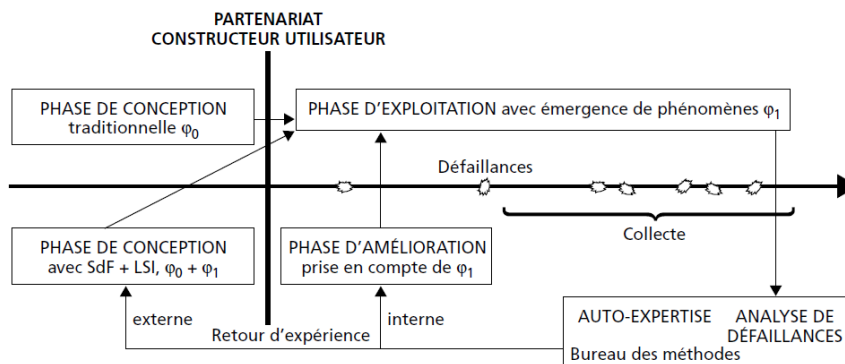


Figure 4.6 – Organisation du retour d'expérience après analyse de défaillance et/ou expertise

Modes de défaillance mécanique

Mécanismes d'évolution des défaillances mécaniques

Notions de cristallographie et les défauts de « santé-matière »

Avant de comprendre comment un matériau peut perdre sa cohésion, il faut connaître sa « normalité » initiale, qui repose sur une structure cristallographique organisée en réseau spatial souvent cubique (Fe, Cr, Cu, Al...). Ces cristaux sont composés de mailles identiques entre elles et caractéristiques de la nature du métal ou de l'alliage. Chaque point du réseau occupé par un atome constitue un nœud.

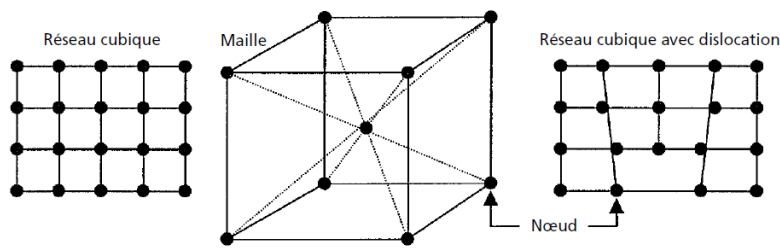


Figure 4.7 – Structures cristallographiques des métaux et des alliages

Les faces des mailles forment des plans réticulaires, séparés par la distance inter-réticulaire. Cet arrangement régulier est souvent perturbé par des défauts ponctuels ou linéaires, illustré par le schéma du réseau disloqué (figure 4.7). Autour de cette zone, le positionnement des atomes est perturbé, caractérisant un défaut-matière inhérent au mode d'obtention du matériau ou une déformation permanente sous contrainte. Ce défaut est « l'incubation » d'un processus ultérieur de dégradation. De plus, si la matière n'est jamais idéale à cœur (inclusions et impuretés sous forme d'oxydes, de silicates ou de sulfures), elle l'est encore moins en surface (couches d'oxydes). Notons que si ces défauts représentent des défaillances potentielles, tous n'évolueront pas en défaillance avérée.

Processus évolutif

Dans le cas d'une défaillance mécanique sous contrainte (fatigue par exemple), les quatre phases successives sont les suivantes : **incubation, initiation, propagation, rupture**.

1. **L'incubation** est le stade initial, objet de défauts par dislocations qui concernent la microstructure du matériau, éventuellement observables au microscope électronique.
2. **L'initiation**, ou l'amorçage, consiste dans l'apparition de microfissures dont la croissance est liée aux plans de glissement cristallographiques. Des contrôles non-destructifs sur les zones suspectes sont envisageables.
3. La **propagation** se fait à partir d'une ou deux des microfissures précédentes. Elle se fait suivant un plan normal à l'axe des sollicitations. Des signes apparaissent (striction, fissures débouchantes, etc.) rendant possibles la maintenance conditionnelle.
4. Le phénomène s'accélère brutalement lorsque la **fissure** a atteint une taille critique : l'arrachement final se caractérise par des « gros grains » faciles à observer sur un faciès de rupture. Les défauts relatifs à la « santé-matière » précèdent et initient les défaillances en fonctionnement.

Défaillances mécaniques par détérioration de surfaces : FATIGUE ET USURE

Différentes formes de détérioration de surfaces fonctionnelles

- L'usure est l'enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.
- Le *fretting*¹-corrosion, ou usure par micro-débattements, est une usure particulière apparaissant au contact de deux pièces statiques, mais soumises à de petits mouvements

¹ **Fretting** refers to [wear](#) and sometimes [corrosion](#) damage of loaded surfaces in contact while they encounter small oscillatory movements tangential to the surface. Fretting is caused by adhesion of contact surface [asperities](#), which are subsequently broken again by the small movement. This breaking causes wear debris to be formed.

oscillants (vibrations, par exemple). C'est le cas de pièces frettées, des clavetages ou de roulements longuement à l'arrêt.

- L'écaillage est l'enlèvement d'assez grosses « écailles » de matière par fatigue de contact.
- Le grippage est la soudure de larges zones de surface de contact, avec arrachement massif de matière.
- L'abrasion est l'action d'impuretés ou de déchets (poussières, sable, particules métalliques émises).
- La cavitation est due à l'implosion de microbulles de gaz incondensables sous l'action d'une brutale chute de pression (accélération de la vitesse d'écoulement en régime turbulent) au sein d'un liquide. L'onde de choc génère du bruit et des « cratères » dans la zone de cavitation (sur hélices, rouets de pompes, etc.)
- L'érosion est l'enlèvement de matière par l'impact d'un fluide ou de particules solides en suspension, ou de phénomènes électriques (arcs).
- Le faïençage est un réseau de craquelures superficielles dû à la fatigue thermique.
- Le marquage est un enfoncement localisé dû à une charge ponctuelle.
- Le rayage est la trace laissée par le passage d'un corps dur.
- Les corrosions : Nous limiterons notre approche de la tribologie aux deux phénomènes φ_0 les plus fréquents en fonctionnement : le roulement (contacts ponctuels ou linéique) et le frottement (contact surfacique) auxquels correspondent les deux mécanismes de dégradation φ_1 : la fatigue de contact (écaillage) et l'usure.

Roulement et fatigue de contact

Les roulements à billes, à aiguilles ou à rouleaux se détériorent intrinsèquement (sous conditions idéales de montage, d'utilisation et de lubrification) par fatigue de contact, en application de la théorie de Hertz.

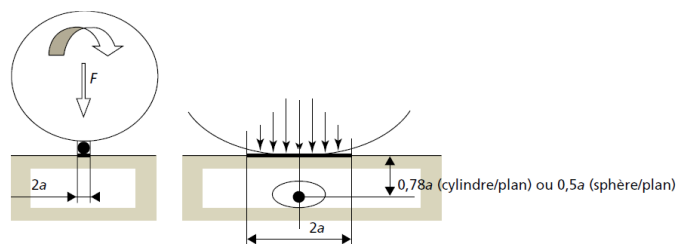


Figure 4.8 – Répartition des contraintes hertziennes (exemple d'un roulement cylindre/plan)

Prenons le cas d'un contact cylindre/plan : sous une charge F perpendiculaire, l'aire de contact a une largeur $2a$. La contrainte de cisaillement sera maximale, sur le chemin de roulement, à une profondeur de $0,78a$ déterminée par le tricerple de Mohr. C'est à partir de cette zone que

If the debris and/or surface subsequently undergo chemical reaction, i.e., mainly oxidation, the mechanism is termed fretting corrosion. Fretting degrades the surface, leading to increased surface roughness and micropits, which reduces the fatigue strength of the components. The [amplitude](#) of the relative sliding motion is often in the order of [micrometers](#) to millimeters, but can be as low as 3 [nanometers](#).^[1]

Typically fretting is encountered in [shrink fits](#), bearing seats, bolted parts, [splines](#), and [dovetail](#) connections.

peuvent apparaître des fissures parallèles à la surface, puis débouchantes (piqûres). L'évolution se fera en libérant des «écailles » entraînant une dégradation rapide du chemin de roulement.

Frottement et usure

Ce mode de défaillance est inévitable dès que deux surfaces en contact (couple tribologique) ont un mouvement relatif (plan/plan ou cylindre/cylindre). La tribologie est la science expérimentale qui étudie ces phénomènes.

Mécanisme de l'usure

La théorie de Tabor et Bowden des microsoudures donne une explication compatible avec la réalité constatée, l'adhérence ou le frottement. Elle repose sur le fait que la surface théorique de contact se limite en fait à de petites aires de contact entre les aspérités plastiquement déformées de chaque surface. Les pressions de contact entre aspérités et la chaleur dissipée créent des microsoudures instantanées constituées d'un composé dépendant de la nature des matériaux en contact. La force « de frottement » est la résultante des efforts de cisaillement qui rompent toutes ces liaisons avec transfert ou libération des particules du composé formé.

Dynamique de l'usure : allure des lois de dégradation

L'usure se paramètre de deux façons : soit par u = épaisseur usée, soit par V_u = volume de matière enlevée (figure 4.9).

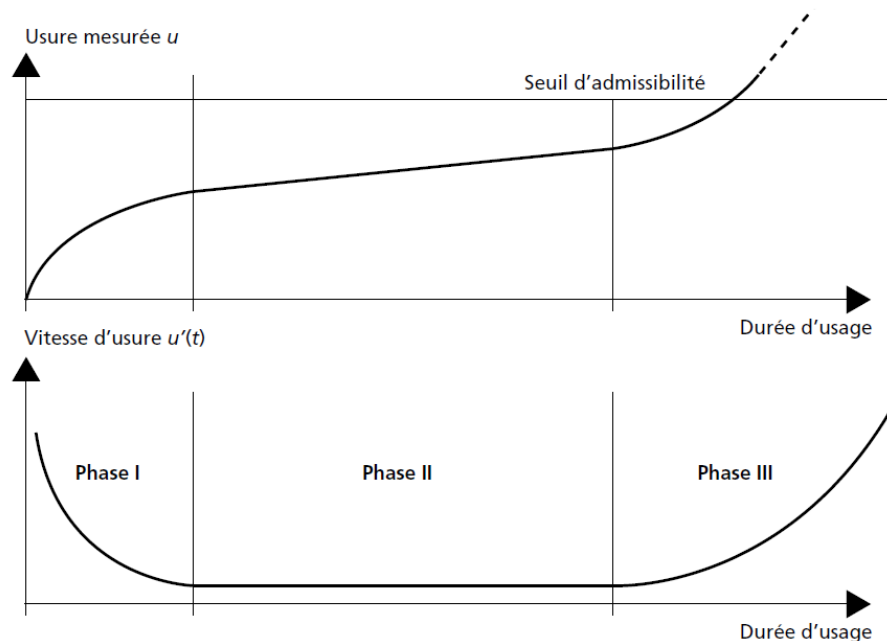


Figure 4.9 – « Loi d'usure » : le mécanisme de dégradation par usure

À partir de deux surfaces initiales « finies » (au sens du mode d'obtention) :

- **la phase I** est constituée de l'abrasion des principales aspérités : c'est la période de « **rodage** » affectant les ondulations macrogéométriques et la rugosité liée au mode d'obtention ;
- **la phase II** est constituée de « **l'usure stable** » linéaire dans le temps, avec transfert des composés : l'usure est reportée principalement sur l'une des surfaces de contact. Notons que la

vitesse d'usure $V_u(t)$ est proportionnelle au produit $p \cdot Vg$, pression de contact apparente par la vitesse de glissement ;

– **la phase III**, dite « **usure catastrophique** » consiste en émissions particulières, ces débris d'usure créant un « labourage » de la surface la plus tendre et une dégradation rapide. Remarquons que les analyses de lubrifiants mettent en évidence cette succession de phases en caractérisant le nombre et la taille croissante des particules métalliques libérées.

Le concepteur et le technicien de maintenance face à la prévention de l'usure

L'étude simplifiée précédente du mécanisme de l'usure a pour objet de mettre en évidence quelques points clés qui concernent le concepteur et le responsable de maintenance :

– l'importance du choix des matériaux (coefficient de frottement f du couple tribologique). Rappelons que suivant les applications, trois types de problèmes sont à résoudre :

– frottement et usure minimaux dans les paliers, les glissières, les engrenages, les cames, etc. ;

– frottement maximal et usure minimale pour les freins, les embrayages, les pneumatiques et semelles, etc. ;

– frottement et usure maximaux pour les meules et les limes ;

– l'importance des éléments de maintenabilité : « report » d'usure sur la pièce voulue, bagues et plaques d'usure interchangeables, détection des seuils d'usure, etc. ;

– l'importance du mode d'obtention des pièces (la rectification augmente l'écaillage des sous-couches, par exemple), de leurs traitements thermiques, de leurs traitements de surface (cémentation, nitruration) ou de leurs revêtements de surface (PTFE, céramique, oxydes métalliques) ;

– l'importance des éléments de la lubrification :

– du type de lubrification (limite, hydrodynamique ou mixte) ;

– de la nature du lubrifiant (huile, graisse ou lubrifiant solide, index de viscosité et additifs) ;

– de son organisation (surveillance des niveaux, de la qualité, fréquence des vidanges) ;

– du suivi par analyse des particules émises (nature, quantité et dimensions) et la détermination des seuils de pollution en maintenance conditionnelle ;

– l'importance de l'expertise, c'est-à-dire de la compréhension des mécanismes de dégradation observés en exploitation industrielle, pour trouver des solutions amélioratives : l'usure ne se supprime pas, mais de nombreuses solutions techniques existent pour la réduire *in situ* (maintenance) ou mieux, pour la maîtriser *ab initio* (concepteur).

Défaillances mécaniques par déformation plastique

Les différentes déformations

L'essai de traction met en évidence, suivant la sollicitation appliquée à l'éprouvette, une zone de déformation élastique et réversible, puis plastique et non réversible. La déformation élastique sous contrainte de fonctionnement n'est pas une défaillance en soi, de par sa réversibilité sauf

cas d'application particuliers : un allongement peut créer une perte d'étanchéité, un arbre long soumis à des effets centrifuges peut se déformer et entraîner un « balourd » aux conséquences néfastes au bon fonctionnement. Par contre, les déformations plastiques permanentes sont des défaillances en elles-mêmes, puisque irréversibles. De plus, elles contiennent un risque de rupture ultérieure de nature catalectique, donc dangereux.

Déformation plastique sous contrainte mécanique

Ces déformations dues à un dépassement de la limite élastique R_e (choc, surcharge) peuvent être locales (marquage, empreintes sur engrenage) ou étendues à un profil ou une section. Une inspection à ce stade d'apparition d'une striction (zone de diminution de la section) peut prévenir le risque d'une prochaine rupture.

Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps : fluage et relaxation

Le fluage est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à une température de service supérieure à $0,4 T_f$ (température de fusion), soit à partir de 450 °C pour les aciers. La vitesse de fluage peut être rapide (contrainte forte à température faible) ou lente (contrainte faible sous forte température). La relaxation est un **détensionnement**, par diminution lente de contrainte, post-fluage, post-traitement thermique ou post-soudage.

Défaillances mécaniques par ruptures ductiles, fragiles ou de fatigue

Les ruptures sont des phases finales d'évolution, de nature catalectique. Nommées « défaillances structurelles », la maintenance doit les prévenir en phase de propagation. L'observation des faciès de rupture est un élément intéressant pour la compréhension du mécanisme de défaillance, donc pour le diagnostic et l'expertise.

Rupture ductile

Elle survient après une phase de déformation plastique appréciable, allongement du matériau et striction au niveau de la rupture. Une inclusion est souvent à l'initiation de la défaillance.

Rupture fragile

Par opposition à la précédente, la rupture fragile survient après une très faible déformation plastique. Elle est souvent l'effet d'une sur-contrainte brutale ou d'un choc, et elle est favorisée par un effet d'entaille ou par la fragilité intrinsèque du matériau. À l'échelle microscopique, la déchirure fragile peut être transcristalline (par décohesion suivant des plans de clivage perpendiculaires aux plans réticulaires) ou intercristalline (plans de clivage parallèles aux plans réticulaires). La rupture « semi-fragile » est de même nature, mais concerne des pièces de grandes dimensions (réservoirs sous pression, par exemple). Le caractère instantané de la décohesion de la matière la rend dangereuse.

Rupture par fatigue

La courbe de Wöhler illustre les phénomènes de fatigue sous différentes contraintes (figure 4.10). La courbe de Wöhler montre que la rupture d'une pièce peut se produire :

- par fatigue oligo-cyclique (ou plastique) en zone I si la contrainte est **supérieure à la limite élastique R_e** et qu'elle est appliquée un nombre limité de cycles ;

– par limite d'endurance en zone II, sous une sollicitation **inférieure à sa limite élastique**, si cette sollicitation est répétée un certain nombre de cycles.

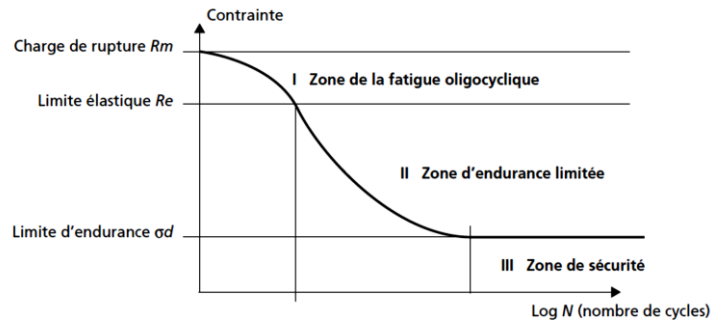


Figure 4.10 – Les trois zones de la courbe de Wöhler

Par contre, elle montre l'existence d'un niveau de contrainte appelé limite d'endurance (σ_d), en deçà duquel peut être appliqué **un nombre illimité de cycles** (en zone III dite de sécurité). Parmi les facteurs favorisant la rupture par fatigue, notons le fretting-corrosion, l'oxydation en phase de fissuration, et surtout l'impact des « effets d'entaille » (concentrations de contraintes) liés au dessin de la pièce.

Exemple d'une rupture d'arbre par fatigue oligocyclique : de l'intérêt d'une expertise...

Dessin d'origine de transmission et situation du plan de rupture

Soit le cas très fréquent d'un arbre de transmission soumis à une flexion rotative associée à une torsion (figure 4.11).

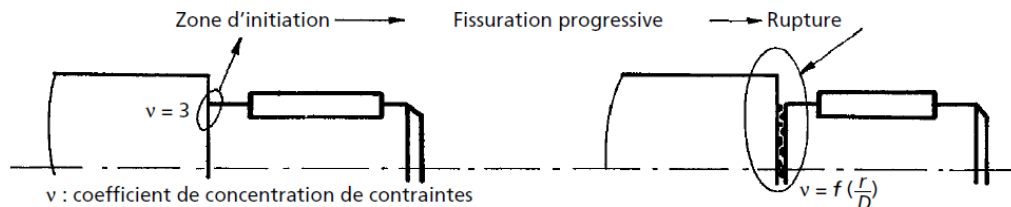


Figure 4.11 – Rupture d'un arbre de transmission par fatigue

L'initiation de la défaillance provient d'un défaut de conception classique : le concepteur a dessiné un épaulement vif en négligeant de calculer le diamètre avec la prise en compte du coefficient de concentration de contraintes. De plus, l'usinage de l'épaulement est peu soigné entre le dressage et le chariotage, d'où l'amorce de rupture. La propagation s'est faite par fissuration progressive non détectée. La rupture par fatigue en service fut soudaine, entraînant la perte de transmission du couple.

Action corrective de routine

Dans beaucoup d'ateliers, l'usage amènera soit à consommer un arbre de rechange identique au précédent, soit à reprendre le dessin initial pour refaire la pièce à l'identique, pour le même effet dans une semaine ou dans un an ! C'est l'illustration de la négation de « l'état d'esprit maintenance » !

Action corrective avec amélioration : la richesse de l'expertise !

Une fois les causes de la rupture déterminées (auto-expertise envisageable), il devient facile de redessiner cet arbre, en précisant le soin à apporter à l'usinage de la gorge de réduction des concentrations de contraintes, en modifiant éventuellement la nuance de l'acier ou les paramètres du traitement thermique. Pour une bonne maîtrise de la fiabilité ultérieure de cet arbre, modifié suivant la figure 4.12

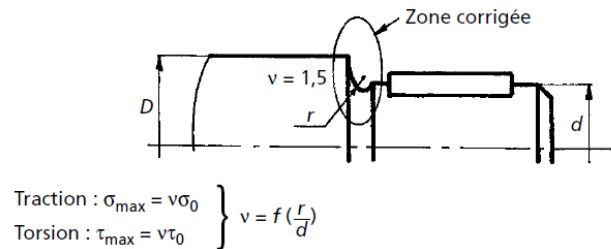


Figure 4.12 – Amélioration de la conception

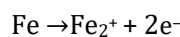
Modes de défaillance par corrosion

Tous les responsables de maintenance sont confrontés aux multiples formes de corrosions aux contacts des métaux et de leur milieu ambiant : air atmosphérique, eau plus ou moins chargée, liquides et gaz divers. Le mécanisme de base est la corrosion électrochimique. Mais bien d'autres formes existent, que nous allons présenter brièvement : pour les prévenir, mieux vaut connaître leur existence !

Corrosion électrochimique

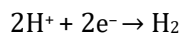
Mécanisme de la corrosion en phase aqueuse

Les surfaces métalliques exposées à un milieu aqueux sont soumises à une oxydation du métal avec libération d'électrons. Dans le cas du fer, la **réaction anodique** s'écrit :



Les électrons libérés sont captés par la réaction de réduction et les ions ferreux sont en solution dans l'eau.

La **réaction cathodique** est :



La dissolution se propage suivant une loi linéaire dans le temps

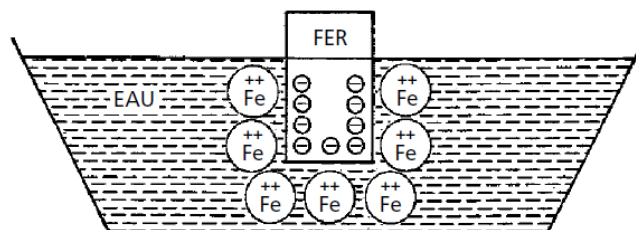


Figure 4.13 – Corrosion en phase aqueuse

Autres formes de corrosion électrochimique

La corrosion par aération différentielle est due à des différences de concentration en oxygène atmosphérique : les parties métalliques en contact avec les zones les plus aérées de l'électrolyte deviennent cathodiques, les autres devenant anodiques. La corrosion galvanique concerne des couples de métaux plongés dans un quelconque électrolyte. Les métaux les plus électronégatifs se corroderont rapidement (Mg, Al, Zn, Fe). L'usage « d'anodes sacrificielles » en Zn permet de protéger des métaux de potentiel moins négatif (usage fréquent dans la marine). La corrosion sous tension concerne des matériaux soumis à des contraintes en milieu aqueux qui rompent le film passif : il se crée une fissuration anodique. Les corrosions par piqûres, cavernes, intercrystallines, représentent d'autres formes de corrosion électrochimique.

Les autres formes de corrosions

Corrosion chimique

La mise en contact fortuite ou normale, temporaire ou permanente, de **surfaces métalliques avec des produits agressifs peut entraîner une corrosion chimique** : réaction chimique avec perte régulière de matière, formation de piqûres ou fissurations. Les agents corrosifs peuvent être des acides, des composés alcalins ou halogénés, des atmosphères réductrices ou oxydantes, et même des lubrifiants dont certains additifs peuvent réagir avec la surface qu'ils sont censés protéger !

Corrosion électrique

Sous l'effet de « courants de fuite » (mises à la terre défectueuses, charges électrostatiques, courants induits), deux surfaces métalliques voisines peuvent être soumises à une différence de potentiel suffisante pour amorcer un arc entraînant une cratérisation caractéristique.

Corrosion bactérienne

Les huiles de coupe ainsi que certaines eaux industrielles peuvent contenir des « ferrobactéries » aérobies (pseudomonas) ou anaérobies (leptothrix, crénothrix, galionella). Une bactérie se divisant toutes les 20 minutes, elle donne naissance à un milliard de bactéries en 12 heures... Les bactéries aérobies donnent des acides (transformation d'hydrogène sulfuré provenant de putréfaction

Modes de défaillance des pièces plastiques et des composites

Les pièces à base de **polymères**, généralement associées au sein des systèmes à des pièces métalliques, ont des modes de défaillance semblables : usure, fatigue, rupture statique, fluage, etc.

Par contre, elles sont plus sensibles à l'influence du milieu ambiant : température, rayons ultraviolet, atmosphère, solvant, etc. De par la diversité des natures des matériaux plastiques (thermodurcissables, thermoplastiques, élastomères) et composites, nous limiterons notre description aux ruptures mécaniques et à leur mode de défaillance particulier qu'est le vieillissement. Nous renvoyons le lecteur au recueil de conférences édité par le CETIM en 1996, *Analyse de défaillances de pièces plastiques et composites organiques en acide sulfurique*, les bactéries anaérobies attaquent les produits sulfatés pour donner du SH₂. Le diagnostic se fait par numération bactérienne (notons que le fioul peut être un vecteur de contamination). La prévention se fait en évitant les « bras morts » dans les réseaux et en utilisant des biocides.

Ruptures mécaniques

Comme pour les métaux, l'initiation provient d'un défaut matière ou d'une zone faible à partir de laquelle une fissuration va se propager sous contrainte et sous influence de l'environnement. Les thermoplastiques, formés de chaînes macromoléculaires non liées, se déformeront, évoluant vers une rupture plus ou moins ductile. Les thermodurcissables, formés de réseaux tridimensionnels, donc peu déformables, évoluent vers une rupture « fragile ». Les élastomères, par nature très déformables, se rompent en mode « fragile ».

Vieillessement des polymères composites

Le vieillissement est l'altération des propriétés des matériaux au cours du temps. Il est caractérisé par une modification structurelle par rupture de chaînes de polymères. Il s'agit en général d'un vieillissement « combiné » sous des actions thermiques, photochimiques, atmosphériques, chimiques, mécaniques ou biologiques. Les expertises relatives à l'impact du vieillissement sont affaires de spécialistes, les retours d'expérience étant plus limités que pour les pièces mécaniques, de structures moins diverses et de comportement plus homogène. Néanmoins, il est acquis que le choix du matériau et de sa mise en œuvre est déterminant quant à la durée de vie d'une pièce « plastique ».

Modes de défaillance des parties « commande » (PC)

Modes de défaillances relatifs à la logique câblée

Relais électromagnétiques

Moins utilisés qu'avant 1970, moins fiables que la technologie électronique, ils sont encore présents dans bien des automatismes. Leurs modes de défaillance les plus fréquents sont :

- bobine de commande coupée, ou en court-circuit ;

- contacts soudés, collés fermés, érodés, corrodés ou « rebondissants » ;

- armature mobile bloquée ;

- défaut d'isolement d'un contact avec la carcasse métallique. Ces défauts ont des causes électriques (surtension ou surintensité), mécaniques (usure) ou d'environnement (température, poussières, chocs, etc.) qui induisent une non-commutation, ou, plus rarement, une commutation non commandée.

Composants électroniques passifs

Les résistances ne s'usent pas, mais peuvent subir des surintensités qui créent des coupures ou des courts-circuits. Leur valeur nominale peut être affectée par des variations thermiques. Les condensateurs s'usent sous tension et ils sèchent hors tension (gare à l'allumage après arrêts prolongés). Les surcharges provoquent la rupture du diélectrique.

Composants électroniques actifs

Ce sont les transistors et les circuits intégrés, mais aussi les thyristors et les triacs pour les circuits de puissance. De par l'intégration de plus en plus poussée des technologies SSI, MSI, LSI, VLSI contenant des milliers de portes, la fiabilité d'un circuit intégré est plus à considérer collectivement qu'au niveau du composant. Des tests de détection permettent de dire si le circuit est correct ou non. La localisation permet de situer le défaut au sein du composant. Les

mécanismes de défaillance concernent surtout les **jonctions électroniques** (semi-conducteurs thermosensibles) et se manifestent par des « collages » à 0 ou à 1 (valeurs logiques).

Causes potentielles de défaillances :

- les surcharges provoquent des pannes catalectiques par rupture de la jonction ;

- les décharges électrostatiques et certains rayonnements peuvent perturber le fonctionnement (parasites) ;

- les chocs thermiques dus à la répétition des « marche-arrêt » fragilisent la jonction par fatigue thermique ;

- le fonctionnement à basse température crée un « emballement » thermique du semi-conducteur.

Conducteurs et connexions

La connectique est la source de bien des défaillances intermittentes ou fugitives qu'il faut suspecter et vérifier avant de chercher à localiser des défauts internes. La fiabilité des connecteurs (cosses, wrapping, soudures) devrait être au moins de même valeur que celle des technologies associées, en logique câblée ou programmée. Ce n'est pas toujours le cas.

La fiabilité opérationnelle de la connectique est dépendante des conditions de l'environnement (corrosion et vibrations principalement).

Modes de défaillances relatifs à la logique programmée

La logique programmée est par nature sensible aux perturbations énergétiques (**surtension d'entrée**), thermiques et surtout électromagnétiques de l'environnement.

Dans un système programmable se retrouvent les composants actifs et passifs précédents, mais également des composants électroniques programmables, de fonction paramétrable et modifiable.

Défaillances des automates programmables et des calculateurs industriels

Un automate est plus vulnérable par son intégration à son environnement et par son utilisation que par ses faiblesses intrinsèques. L'unité centrale d'un automate (alimentation + UC + bus + mémoire) est particulièrement fiable (seulement 10 % des défauts) ; les problèmes viendront pour 90 % des coupleurs et des cartes d'entrée et de sortie (logique électronique câblée). **La cause majoritaire de défaillance des cartes d'entrée vient des surtensions**. Notons la maîtrise possible de l'effet d'une défaillance (interne, alimentation coupée, etc.) sur les sorties :

- remise à zéro de toutes les sorties,

- passage à un état prédéfini,

- gel des sorties à leur dernier état « normal ». Notons également l'intégration de produits d'autocontrôle, d'autotest, d'identification à distance, de détection de défauts et de « chiens de garde » relatifs au déroulement des programmes.

Dans le cas des calculateurs, les claviers et les écrans cathodiques sont soumis à l'usure, et peuvent être blindés pour un usage à l'atelier.

Défaillances logicielles

Des statistiques relatives aux développements de logiciels applicatifs (CET 93) montrent l'existence d'un défaut pour 100 instructions, dont 2/3 sont dus à de mauvaises spécifications et 1/3 est dû à un mauvais codage. Ce sont des défaillances humaines ayant pour cause un manque de rigueur (syntaxe), de logique ou d'attention (oublis).

Défaillances par incompatibilité électromagnétique

Définition de la CEM (directive européenne 89/336/CEE et norme CEI 60-601)

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un équipement à bien fonctionner dans son environnement électromagnétique, et sans produire lui-même de perturbations dans cet environnement (pollution électromagnétique).

Équipement perturbé/perturbateur

L'équipement est perturbateur lorsqu'il émet des signaux d'interférence :

- par rayonnement (champ électromagnétique capté par les « antennes » que deviennent les pistes et les câbles) ;
- par conduction (conducteurs, pistes de circuits imprimés). La perturbation est conduite lorsqu'elle est véhiculée par des conducteurs pouvant se comporter comme des selfs ou comme des capacités (couplage ou diaphonie).

L'équipement est perturbé par rayonnement ou conduction lorsqu'une source génère des signaux d'interférences au-delà du « seuil de susceptibilité », mesuré en V/m, de l'équipement. Au-dessous, il y a « immunité » ; au-dessus, il y a défaillance. Les perturbations se matérialisent sous forme de pannes fugitives ou de pertes de mémoire. Il est possible de remonter le niveau d'immunité par « durcissement » (utilisation de filtres antiparasitage, de blindage, de vernis conducteurs, de cages de Faraday anéchoïques munies d'absorbants d'hyperfréquences).