

Maintenance des machines et des moteurs

par **Gilles DUCHEMIN**
Professeur de l'enseignement maritime

1. Définitions.....	BM 4 188 - 2
1.1 Maintenance.....	— 2
1.2 Défaillances.....	— 2
1.3 Temps	— 2
1.4 Niveaux de maintenance	— 3
2. Types de maintenance	— 3
2.1 Maintenance corrective.....	— 3
2.2 Maintenance préventive	— 4
2.3 Maintenance prédictive.....	— 7
2.4 Éléments de comparaison	— 7
3. Choix d'une politique de maintenance	— 7
4. Gestion de la maintenance.....	— 8
4.1 Classement des items	— 8
4.2 Suivi des opérations.....	— 9
4.3 Suivi des stocks	— 10
4.4 Analyse des coûts.....	— 10
4.5 Gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO)	— 10
5. Organisation des travaux lourds	— 11
6. Techniques d'entretien des moteurs industriels	— 12
6.1 Distribution.....	— 12
6.2 Système d'injection.....	— 13
6.3 Éléments constitutifs du cylindre.....	— 14
7. Conclusion	— 17
Pour en savoir plus.....	Doc. BM 4 188

Historiquement, on peut supposer que la notion d'entretien d'un matériel date de l'apparition des premiers outils et des premières machines. Cependant, il faut attendre la première moitié du XX^e siècle, après le développement de l'industrialisation, pour voir se structurer les méthodes d'intervention. C'est à la suite de la Seconde Guerre mondiale que de nouveaux besoins apparaissent, traduisant la nécessité d'une approche économique, et non plus seulement technique, de l'entretien des machines. Des notions nouvelles sont alors mises en forme pour servir d'outils efficaces permettant une gestion globale du fonctionnement des machines, notamment lorsque ces dernières sont regroupées en chaînes et ensembles complexes interagissant entre eux. Nous proposons ici de décrire les principes de ces outils.

1. Définitions

Que recouvre le terme « maintenance » et quels sont les paramètres choisis comme outils d'optimisation de sa gestion ?

1.1 Maintenance

La maintenance est définie dans la norme NF EN 13306 comme étant : « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion, durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

Cette définition appelle plusieurs remarques.

■ Par « ensemble des toutes les actions », elle nous précise que la maintenance ne se limite pas aux seules interventions d'entretien, mais se doit d'englober aussi toutes les opérations de conduite et de surveillance pendant la marche. Par extension, les opérations de gestion des pièces de rechange, du personnel et des interventions font elles aussi partie de la maintenance.

■ L'autre point primordial est donné par l'expression « état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Cela implique que, pour chaque machine ou groupe de machines dans un ensemble complexe, on ait clairement identifié les points suivants :

- l'objectif de la machine, prise individuellement ;
- l'appartenance de la machine à une chaîne ou un ensemble ;
- l'emplacement de la machine dans la chaîne ;
- les interactions de la machine avec les portions de chaîne en amont et en aval ;
- les conséquences d'une non-conformité du premier point sur la chaîne amont et sur la chaîne aval.

L'identification de la mission globale de la machine servira de base à la mise au point d'un type de maintenance approprié.

■ Enfin, « maintenir » et « rétablir » sous-entendent d'avoir la connaissance, si possible permanente, du niveau de performance de la machine par rapport au niveau de performance optimale désiré dans la définition des objectifs.

1.2 Défaillances

Il ne suffit pas de s'intéresser aux conséquences d'un défaut de fonctionnement mais aussi à sa cause. Les différents défauts se manifestant de manières variées, les défaillances suivantes ont été définies (norme NF EN 13306) :

- **défaillance complète** : cessation du fonctionnement ;
- **défaillance partielle** : altération du fonctionnement ;
- **défaillance progressive** : qui pourrait être prévue par une vérification préalable ;
- **défaillance soudaine** : qui ne peut être prévue ;
- **défaillance intrinsèque** : due à une faiblesse inhérente au matériel concerné ;
- **défaillance extrinsèque** : due à des contraintes supérieures aux capacités du matériel ;
- **défaillance mineure** : la mission globale du matériel n'est pas affectée ;
- **défaillance majeure** : la mission globale du matériel ne peut plus être assurée ;
- **défaillance cataleptique** : défaillance soudaine et complète ;
- **défaillances précoces** : défaillances dont le taux décroît dans le temps ;
- **défaillances aléatoires** : défaillances dont le taux est constant dans le temps ;
- **défaillances d'usure** : défaillances dont le taux est croissant dans le temps.

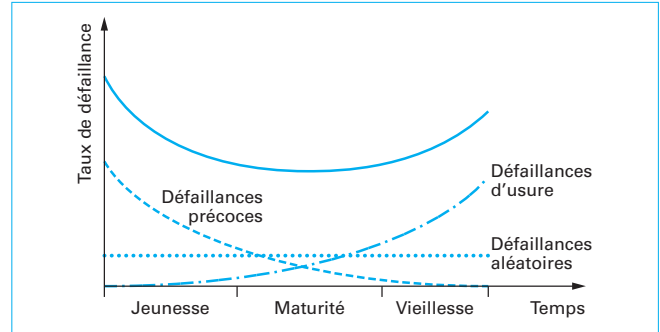


Figure 1 – Courbe d'évolution du taux de défaillance

L'objectif de la maintenance peut consister, entre autres, à diminuer le nombre de défaillances touchant une machine. On s'intéresse donc plus particulièrement à la probabilité d'apparition de ces défaillances sur la durée de vie de la machine.

Cette probabilité, ou **taux de défaillance**, évolue souvent suivant une courbe en « baignoire » (figure 1) principalement pour les équipements électromécaniques.

On remarque que cette courbe est la somme des taux de défaillances précoces, aléatoires et d'usure. Elle comporte trois périodes caractérisées par l'évolution du taux de défaillance.

Exemple : pour un moteur Diesel industriel, on considère que la jeunesse couvre un à deux ans, la maturité 10 à 15 ans.

1.3 Temps

On choisit tout d'abord une période de référence pour l'analyse des temps. Elle peut être l'année calendaire mais aussi être adaptée à l'utilisation du matériel, par exemple la durée d'un voyage aller-retour pour un navire de ligne (environ 100 jours), ou encore la durée entre deux contrôles réglementaires d'une société de classification ou d'un organisme d'État (10 ans).

La figure 2 donne l'architecture des différents temps dont voici quelques définitions :

- **temps total** : période de référence ;
- **temps requis** : pendant lequel l'utilisateur exige que la machine soit en mesure d'assurer la mission définie ;
- **temps effectif d'indisponibilité** : partie du temps requis où la machine est incapable d'accomplir sa mission pour une cause quelconque ;
- **temps effectif de disponibilité** : partie du temps requis pendant laquelle la machine est apte à accomplir sa mission, la fourniture des moyens extérieurs éventuellement nécessaires étant assurée.

Pour faciliter la gestion des temps, on peut aussi avoir l'approche suivante :

La disponibilité d'un appareil est déterminée par le rapport entre le temps moyen de bon fonctionnement (MTBF) et le temps moyen nécessaire aux opérations de maintenance (MTTR).

Cette approche, très prisée par les Anglo-Saxons, nécessite la définition de nouveaux temps :

- le **MTBF** (*mean time between failure*, moyenne des temps de bon fonctionnement) caractérise la **fiabilité** du matériel dans les conditions prescrites d'utilisation ;

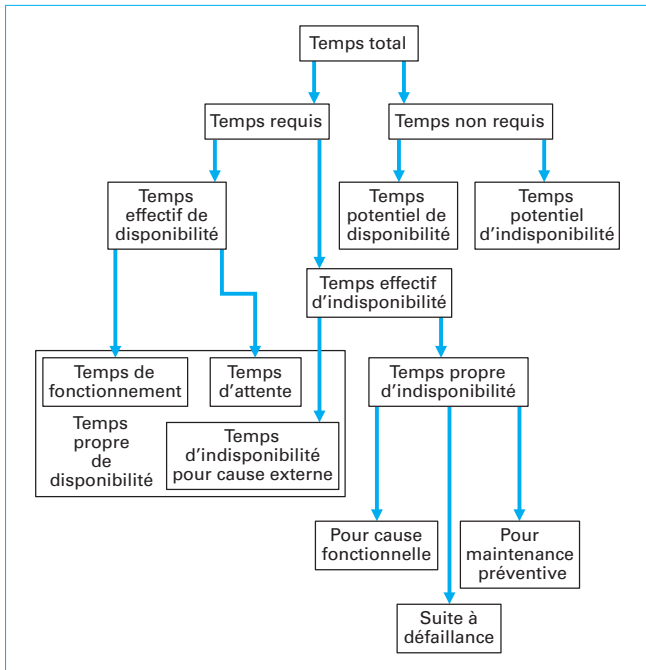


Figure 2 – Définition des temps (d'après [1])

- le **MTTR** (*mean time to repair*, moyenne des temps des tâches de réparation) caractérise la **maintenabilité** du matériel ;
- le **MTBO** (*mean time between overhaul*).

Le **MTBF** est généralement déterminé par une loi de fiabilité issue du calcul statistique, mais peut aussi faire appel à l'expérience obtenue lors des premiers mois de fonctionnement d'une machine. Nous y reviendrons au paragraphe 3.

Le **MTTR** dépend essentiellement de la conception de la machine, mais doit être aussi exprimé à partir de données de départ précises telles que le nombre et la qualification du personnel, l'application de procédures adaptées et la disponibilité de l'approvisionnement prescrit.

La figure 3 montre un moteur Diesel industriel récent, conçu pour des MTTR réduits. On constate que les éléments nécessitant le plus d'interventions de maintenance (filtres, échangeurs, pompes de circulation) sont regroupés à une extrémité du moteur et d'un accès facile tandis que chaque cylindre est traité comme un module comprenant collecteurs, culasse, chemise, piston, bielle.

Ce type de conception permet une réduction des MTTR dans un rapport de 4 comparé aux moteurs de la génération précédente.

Le **MTBO** n'a de sens que lors de l'application de la maintenance systématique, nous développerons ce point au paragraphe 3.

1.4 Niveaux de maintenance

Pour faciliter principalement la gestion des personnels affectés à la maintenance, on définit :

- niveau 1 : réglages simples sans démontage, rondes et surveillance pendant la marche ;
- niveau 2 : dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet et opérations mineures ;
- niveau 3 : identification et diagnostic de pannes, réparation ou remplacement d'éléments fonctionnels ;

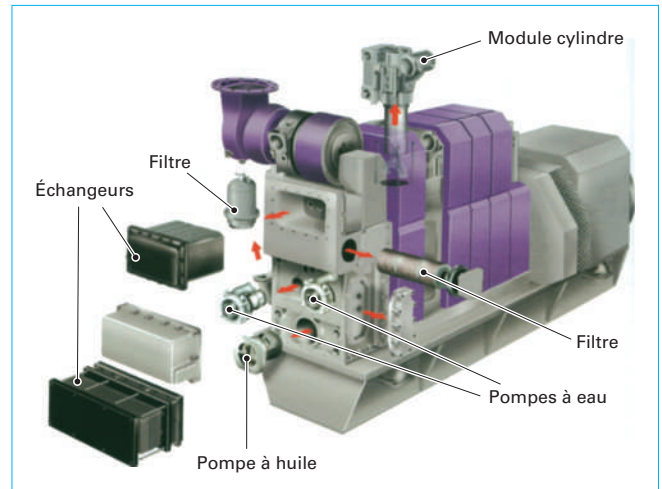


Figure 3 – Moteur à maintenance « conviviale » (doc. MAN AG)

- niveau 4 : travaux de maintenance corrective ou préventive nécessitant des démontages importants ;
- niveau 5 : rénovation, reconstruction, modifications importantes faisant appel à une main-d'œuvre qualifiée.

2. Types de maintenance

Il existe plusieurs façons d'organiser les actions de maintenance pour obtenir la disponibilité maximale du matériel au coût minimum. Il en ressort les types de maintenance suivants :

- la maintenance corrective (§ 2.1) ;
- la maintenance préventive (§ 2.2) ;
- la maintenance prédictive (§ 2.3).

2.1 Maintenance corrective

2.1.1 Définition

L'opération de maintenance intervient après défaillance. C'est l'attitude qui consiste à attendre la panne pour procéder à une intervention. Elle peut se décomposer en deux branches : la maintenance palliative et la maintenance curative.

■ **Maintenance palliative** : l'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieur au niveau optimal.

■ **Maintenance curative** : l'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel.

L'un des outils de la maintenance corrective doit permettre une identification fiable du défaut de fonctionnement, ce qui permettra de réduire le MTTR en intervenant uniquement sur le ou les organes concernés. L'intervention « au hasard » sur les organes est à proscrire.

2.1.2 Méthode d'identification d'un défaut

Le principe de la méthode consiste à faire une analyse arborescente des causes à partir du symptôme.

La capacité d'identification d'un défaut par un opérateur de machine ou un agent de maintenance est liée à deux facteurs principaux :

- de quels paramètres de fonctionnement fiables dispose-t-on pour assurer une analyse ?
- connaît-on les principes de fonctionnement de la machine ?

Exemple : pour illustrer la méthode, prenons le cas d'un opérateur assurant le suivi du fonctionnement d'un moteur industriel Diesel lent, deux temps, de grande puissance (40 à 50 MW), utilisé dans une centrale de production d'énergie électrique.

Le moteur étant instrumenté avec des sondes de température des gaz d'échappement pour chaque cylindre, on suppose que l'on constate une température anormalement élevée à l'échappement d'un des cylindres (cylindre n° 4 : 480 °C au lieu de 390 °C).

Après la prise des mesures élémentaires de sécurité consistant à transférer la charge de l'alternateur puis à découpler celui-ci, le moteur reste en fonctionnement à charge partielle afin d'analyser le défaut.

Si l'on établit un arbre des causes possibles, on obtient le schéma de la figure 4.

L'analyse consiste à valider des branches possibles, à commencer par les plus importantes, par vérification de paramètres significatifs.

Il faut choisir un paramètre de fonctionnement facilement mesurable, qui permette de valider le choix entre les différentes branches. Dans l'exemple choisi, le premier paramètre significatif est donné par l'évolution de la pression dans la chambre rapportée à l'angle d'arbre manivelle (diagramme décalé). La pression de compression, fournie par ce diagramme, permet de choisir parmi les trois branches possibles (faible : branche 3 ; normale : branche 1 ou branche 2).

Le déroulement de l'analyse est donné par le diagramme de la figure 5.

Dans notre exemple, l'opérateur mesurera la pression de compression qu'il constate anormalement faible.

Bien souvent, il est impossible d'obtenir un paramètre significatif permettant d'effectuer un choix (par exemple, entre le défaut d'étanchéité et d'alimentation) ; on doit alors tester les deux branches l'une après l'autre. En revanche, un paramètre peut être validant dans plusieurs branches et permet parfois de lever une ambiguïté.

C'est le cas ici et la réparation devra s'orienter en priorité vers le remplacement de la soupape d'échappement.

Il n'est pas rare que plusieurs causes restent probables et seuls les démontages peuvent venir les confirmer.

La limite de la méthode tient dans la capacité de l'opérateur à choisir un paramètre validant parmi ceux qui sont disponibles, capacité qui dépend principalement de sa connaissance du fonctionnement de la machine.

2.2 Maintenance préventive

2.2.1 Définitions

Les interventions de maintenance sont déclenchées avant les défaillances en fonction d'un paramètre. On cherche alors à tendre vers un taux de défaillance nul en effectuant le maintien du niveau de performance requis avant l'apparition du défaut. Elle se décompose en deux branches : la maintenance systématique et la maintenance conditionnelle.

■ **Maintenance systématique :** le paramètre déclencheur est le temps, que ce soit le temps réel (quel que soit le temps de fonctionnement de la machine) ou le temps de marche. Les interventions sont déclenchées suivant un échéancier de visites intervenant avant la défaillance supposée. Le calcul des intervalles entre visites « MTBO » est étudié au paragraphe 3.

■ **Maintenance conditionnelle :** le ou les paramètres déclencheurs sont des paramètres de fonctionnement dont les valeurs sont représentatives du niveau de performance de la machine. On fixe généralement des seuils maximaux admissibles à partir desquels l'opération de maintenance est déclenchée.

Maintenance systématique et maintenance conditionnelle peuvent être utilisées conjointement en complément l'une de l'autre.

2.2.2 Outils de la maintenance conditionnelle

Une maintenance conditionnelle efficace nécessite de choisir puis de mesurer des paramètres représentatifs de l'état du matériel. Pour les systèmes mécaniques, notamment les moteurs à combustion interne, les paramètres de fonctionnement facilement et donc habituellement mesurés tels que les pressions et les températures des fluides ou des pièces constitutives, les vitesses de rotation, l'opacité des fumées par exemple, ont rapidement révélé leurs limites. En effet, les paramètres cités ci-avant, s'ils sont représentatifs de l'état de la machine à un instant donné, sont difficilement exploitables pour juger de l'évolution du niveau de performance dans le temps, et notamment pour rendre compte des usures lentes des pièces mécaniques en mouvement. D'autres outils de suivi ont donc été mis au point.

On peut citer :

- mesure des cotes lors de visites de contrôle et suivi des évolutions ;
- mesure et interprétation des performances (puissance et rendement) ;
- analyse des lubrifiants ;

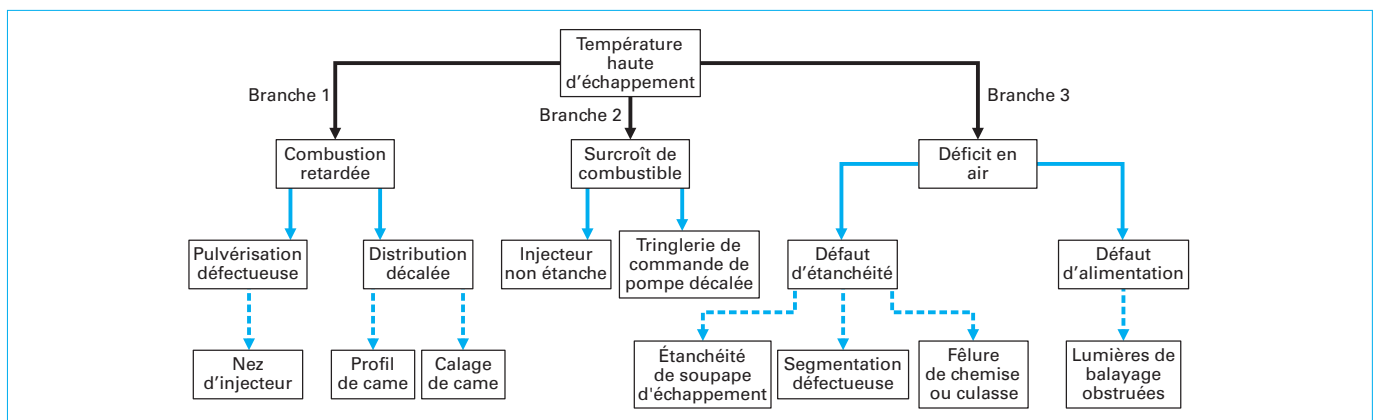


Figure 4 – Arbre des causes d'apparition d'un défaut

- mesure et analyse vibratoire ou de bruits rayonnés ;
- mesure en continu de la dégradation des pièces d'usure ;
- thermographie infrarouge ;
- analyse spectrale des gaz d'échappement.

Parmi ces outils, certains se sont révélés plus ou moins bien adaptés aux moteurs.

■ La **mesure des cotes lors de visites** de contrôle est encore très utilisée. L'exemple de la mesure de l'ovalisation de la chemise effectué à chaque visite de cylindre en est un bon exemple, cette dernière étant généralement générée par l'échéancier de la maintenance systématique (figure 6).

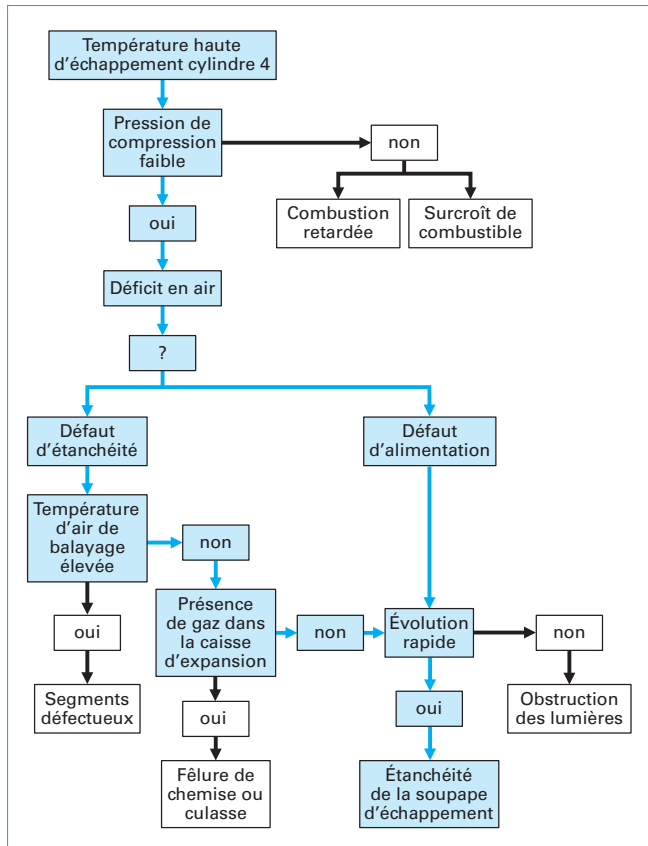


Figure 5 – Diagramme d'analyse de panne

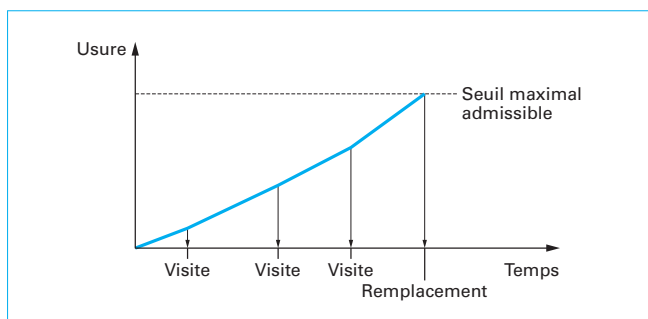


Figure 6 – Suivi préventif de l'usure

En plus de la mesure des cotes des différents composants de la machine, certains contrôles non destructifs peuvent être effectués pendant une visite pour déceler la présence de défauts de fatigue comme des fissurations.

Ces contrôles se font par :

- mesures par ultrasons ;
- radiographie des pièces métalliques ;
- magnétoscopie ;
- ressuage.

■ La **mesure de puissance** et le **calcul du rendement** permettent d'avoir une image globale de la machine mais cet outil manque de précision et ne permet pas de déterminer quels éléments sont responsables de la dégradation.

■ L'**analyse des lubrifiants** est très intéressante à deux niveaux.

D'une part, on estime la capacité d'une huile à continuer d'assurer sa fonction en mesurant ses caractéristiques propres telles que la viscosité, la teneur en produits d'oxydation et en eau, les teneurs en additifs (taux de basicité, réserve d'alcalinité) ou leurs effets (capacité détergente, dispersante).

D'autre part, on mesure les teneurs en polluants de l'huile issus de la dégradation des pièces mécaniques (présence de métaux ferreux et non ferreux) ou représentatifs d'un type de fonctionnement (résidus de combustibles, produits de combustion).

L'analyse d'une huile de moteur Diesel industriel peut être effectuée de la façon la plus simple par un essai à la tache (encadré 1).

C'est cependant par des analyses poussées en laboratoire que l'on obtient les renseignements nécessaires.

Encadré 1 – Une analyse chromatographique simple, l'essai à la tache

On dépose sur une feuille de papier filtre spéciale une goutte d'huile usagée que l'on laisse reposer pendant 24 ou 48 heures. L'huile diffuse dans les pores du papier et la tache obtenue permet d'évaluer le pouvoir dispersif et détergent du lubrifiant, le taux de matières charbonneuses, l'état d'oxydation de l'huile et la présence éventuelle de fractions lourdes oxydées du combustible (figure 7).

On peut aussi chauffer l'échantillon d'huile avant de le déposer sur la feuille afin d'en évaluer les qualités à chaud. Ce test simple peut se réaliser rapidement sur tout moteur en fonction.

L'essai à la tache s'applique à l'évaluation de la réserve de dispersivité et au degré de pollution d'une huile Diesel usagée. On distingue D la zone de diffusion de l'huile et d la zone de diffusion des insolubles. On détermine :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

et :

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (2)$$

et on appelle ID l'indice de dispersivité :

$$ID = \frac{d}{D} \times 100 \quad (3)$$

L'auréole interne est plus ou moins sombre en fonction de la teneur en matières charbonneuses.

La coloration de l'auréole externe renseigne sur le degré d'oxydation et sur la pollution par le combustible du lubrifiant. La tache prend alors une teinte de plus en plus jaune, voire franchement brune.

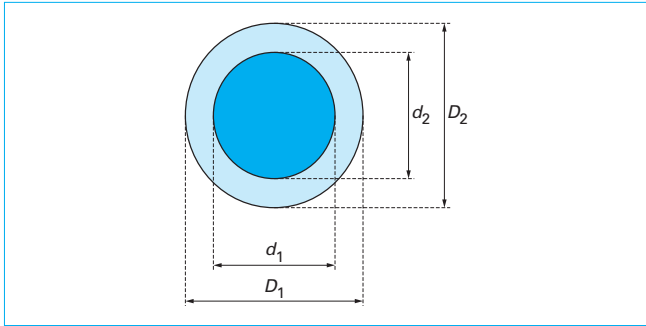


Figure 7 – Essai à la tache d'une huile détergente

● La **viscosité** et l'**index de viscosité** (variation de la viscosité avec la température) renseignent sur la présence de combustible et de résidus carbonneux dans l'huile, ainsi que sur la rupture éventuelle sous cisaillement des molécules longues et des polymères.

● Le **point éclair** renseigne sur les constituants légers et sur la pollution par du combustible.

● La **présence d'eau** est source de corrosion, de réactions d'hydrolyse avec les additifs, de mise en danger du régime hydrodynamique de graissage. On admet une teneur maximum de 0,5 %.

Ces quatre analyses ne demandent pas un matériel sophistiqué ou des connaissances particulières et peuvent être effectuées sur le lieu d'exploitation de la machine. Certains moteurs sont équipés de dispositifs de mesure en continu de la teneur de l'huile en eau.

● Les **insolubles** sont les produits d'oxydation de l'huile et des combustibles, des résidus d'usure du moteur et des polluants issus de l'air extérieur, de la suie (produit très dur et abrasif). On profite de la solubilité de ces produits dans le pentane ou dans le toluène pour les extraire et les peser.

● Les **métaux d'usure** sont mesurés par ferrographie, spectrométrie d'émission, fluorescence X, spectrométrie d'absorption atomique.

Les résultats peuvent être interprétés de la manière suivante :

- fer (Fe) : usure et corrosion des aciers et des fontes ;
- manganèse (Mn) : usure et corrosion des aciers alliés ;
- molybdène (Mo) : usure des segments ;
- nickel (Ni) : usure et corrosion des aciers alliés ;
- plomb (Pb) : usure et corrosion des revêtements de coussinets ;
- antimoine (Sb) : usure des coussinets ;
- étain (Sn) : usure et corrosion des coussinets en métal blanc ;
- chrome (Cr) : usure des segments ou gorges chromés ;
- cuivre (Cu) : usure des bagues de pied de bielle.

La teneur doit être sensiblement constante ou en très légère augmentation mais il faut prendre en compte les appoints ou vidanges effectués.

● Les **additifs**, tels que magnésium, phosphore, zinc, calcium, sont dosés. Leur concentration permet de juger de la consommation de l'huile et de la nécessité d'appoints.

La figure 8 illustre des résultats d'analyse d'un échantillon d'huile de moteur Diesel industriel.

Ces analyses ont lieu suivant un échancier (mensuel par exemple), et une brusque dégradation peut passer inaperçue avant l'avarie. Certains constructeurs de moteurs (MAN) mettent en place des analyses en continu, notamment du taux de basicité et de la teneur en fer sur les égoutteurs d'huile de graissage des cylindres des moteurs lents deux temps.

■ Les **mesures de vibrations**, effectuées par des accéléromètres piézo-électriques ou des sondes laser sans contact, permettent une étude en valeur globale sur une bande de fréquence prédéfinie, ou

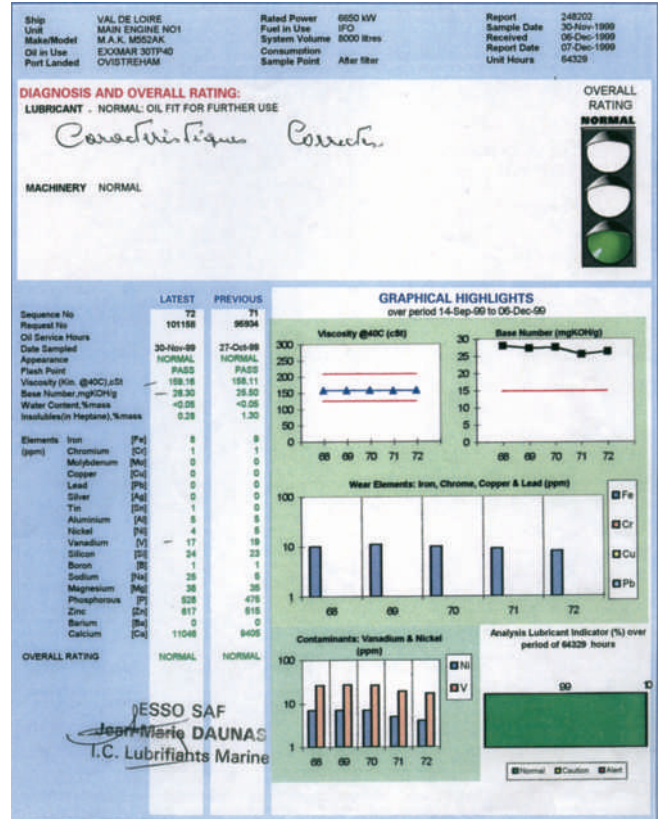


Figure 8 – Résultats d'analyse d'huile moteur

(doc. Esso Marine Lubes, devenu Exxon Mobil Marine Lubricants)

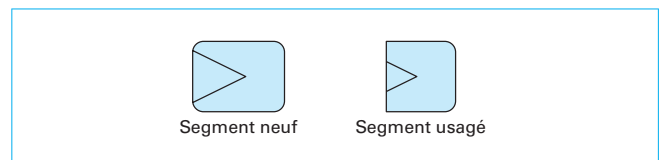


Figure 9 – Coupe d'un segment avec suivi d'usure

en signature spectrale après décomposition par série de Fourier. Elles se sont révélées très intéressantes sur les machines tournantes (turbines, moteurs électriques), notamment pour le suivi des paliers à roulements. Les spectres de référence sur ces machines sont bien connus et leurs évolutions caractérisent des défauts clairement identifiables. Cependant, leur mise en œuvre sur des machines à trains alternatifs est plus délicate et ne s'est pas réellement développée.

■ La **mesure en continu de la dégradation des pièces d'usure** est difficile à mettre en œuvre mais il existe des systèmes pour mesurer par exemple l'usure de la segmentation en marche. L'un d'eux fait appel à un insert amagnétique en V disposé sur la face active du segment. Un capteur placé dans la chemise mesure le temps de passage de cet insert devant lui. Rapporté à la vitesse de rotation du moteur, le temps de passage de l'insert diminue avec l'usure du segment (figure 9).

■ La **thermographie infrarouge** permet un suivi des températures des pièces sans contact direct ; c'est une méthode très utile dans le suivi des connexions et des machines électriques en fonctionnement.

■ **L'analyse spectrale des gaz d'échappement** est encore peu utilisée sur les moteurs industriels et est plus envisagée comme un moyen d'optimiser le fonctionnement à toutes les allures plutôt que pour la maintenance préventive.

D'autres outils peuvent être envisagés pour la maintenance des moteurs à partir de la définition d'un paramètre représentatif, tels que la mesure du débit de *blow by* ou celle de la pression dans le cylindre, obtenue par mesure de l'éirement d'un goujon de culasse.

2.3 Maintenance prédictive

Son objectif est de pouvoir établir un diagnostic d'état du matériel à un instant donné pour en déduire une durée de vie probable sans panne. On doit pouvoir prévoir et effectuer les opérations de maintenance les plus rapides et les moins onéreuses juste avant l'apparition d'une défaillance.

Les informations fournies par les outils de la maintenance conditionnelle peuvent être utilisées mais doivent être regroupées, ordonnées, corrélées. Seul un outil informatique tel qu'un système expert permet une gestion efficace tant au niveau de la synthèse de l'information collectée, des interactions entre les différents paramètres, de l'arborescence des causes de défaillances, qu'à l'élaboration d'éléments de décision permettant de limiter les opérations de maintenance au résultat requis.

2.4 Éléments de comparaison

2.4.1 Maintenance corrective

La défaillance engendre souvent des avaries en chaîne et des dégâts importants. Les réparations sont effectuées dans des conditions difficiles puisque imprévues. Le contrôle des temps est délicat, et le maintien d'un taux de disponibilité suffisant de l'installation n'est possible qu'au prix de la redondance du matériel, de l'existence d'un stock de rechange important ou de l'assurance de la disponibilité de ces rechanges, de la présence de personnel qualifié pour les interventions. Pour pallier cet inconvénient, l'installation peut être organisée en modules que l'on remplace par « échange standard » en cas de défaillance.

Le nombre d'interventions reste en revanche faible.

2.4.2 Maintenance préventive systématique

Le taux de défaillance est faible puisque les défaillances prévisibles sont théoriquement éliminées, mais les défaillances soudaines ne le sont pas. Les interventions sont programmées dans le temps, ce qui améliore la gestion des personnels et des rechanges nécessaires ainsi que l'adéquation des opérations de maintenance avec les impératifs commerciaux.

Le nombre et la durée des interventions sont élevés et le remplacement systématique d'éléments ayant encore un bon potentiel n'est pas rare (joints d'étanchéité par exemple). Enfin, la multiplication des interventions augmente le risque d'erreur humaine susceptible d'être à l'origine d'une nouvelle avarie.

2.4.3 Maintenance préventive conditionnelle et maintenance prédictive

Le nombre d'interventions est réduit au strict nécessaire pour un taux de défaillance faible. La mise en œuvre de ce type de maintenance requiert un nombre important de capteurs et de systèmes de traitement de l'information qui sont eux-mêmes des sources de défaillances.

3. Choix d'une politique de maintenance

L'objectif principal de la politique de maintenance est l'**efficacité économique** souvent doublée d'impératifs de **sécurité** et de **contraintes réglementaires** (normes antipollution par exemple). Ces contraintes étant identifiées, le choix de la politique de maintenance est déterminée par le calcul du coût global de durée de vie (*life cycle cost*).

À long terme, il s'agit d'abord de juger de la durée de vie optimale d'une machine en estimant la somme des coûts suivants :

- coût d'achat A ;
- coût de fonctionnement F ;
- coût total de maintenance M ;
- valeur de revente éventuelle VR .

Le coût global vaut :

$$CG = A + F + M - VR \quad (4)$$

Le coût total de maintenance ayant tendance à augmenter avec l'âge de la machine, et la valeur de revente à diminuer, il est intéressant de déterminer la durée au bout de laquelle on atteint un minimum.

Cette **durée de vie optimale** correspond à l'abscisse du point de contact de la tangente à la courbe passant par l'origine (figure 10).

Le coût total de maintenance peut être difficile à estimer. En effet, il regroupe les coûts directs des opérations, mais aussi les coûts indirects tels que les coûts de remplacement temporaire, de stockage et d'immobilisation des rechanges, d'indisponibilité du matériel.

Cette détermination étant réalisée, il faut choisir pour chaque machine ou groupe de machines un type de maintenance approprié. Dans l'absolu, la maintenance conditionnelle, voire prédictive, semble la plus adaptée mais en réalité, il est rare de pouvoir disposer des mesures en continu des paramètres significatifs du fonctionnement permettant de l'appliquer. Le choix s'effectue alors entre maintenance systématique et corrective. On peut utiliser des critères de choix simples résumés par des arbres (figure 11).

On peut aussi estimer pour chaque élément le rapport entre le coût c d'une intervention préventive effectuée dans de bonnes conditions, et le coût C supplémentaire supporté en cas de défaillance. Si ce rapport C/c est négligeable, la maintenance corrective est la plus intéressante. S'il est élevé, une maintenance systématique s'impose. On peut alors classer les éléments de la machine en fonction de la valeur de ce rapport en :

- vital (C/c élevé) ;
- important (C/c moyen) ;
- secondaire (C/c faible).

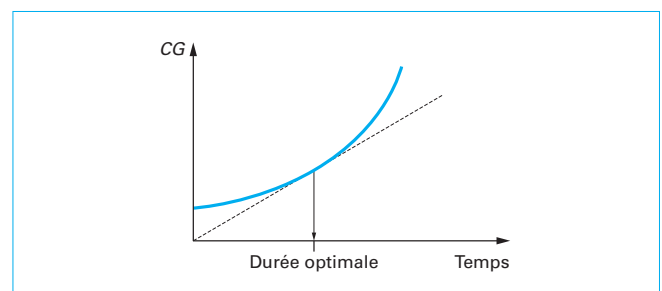


Figure 10 – Détermination de la durée de vie optimale

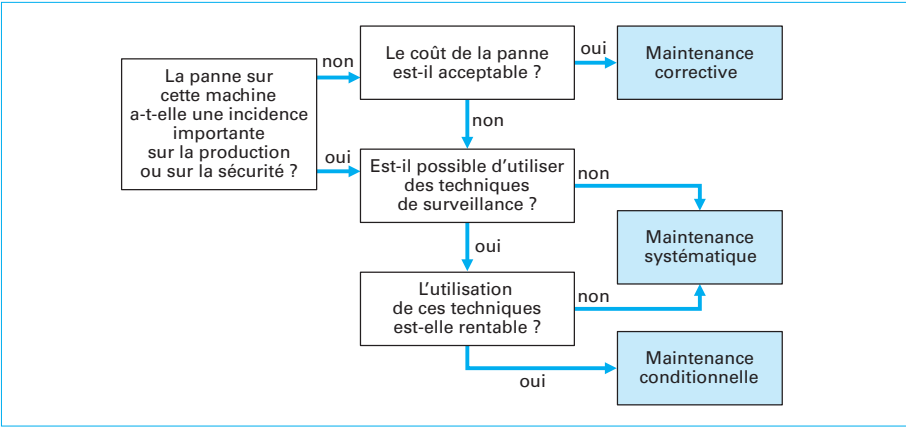


Figure 11 – Choix d’une politique de maintenance

Il est utile de connaître l’évolution dans le temps de la fiabilité des éléments vitaux et de pouvoir préciser leurs types de défaillances probables, afin notamment d’ajuster la valeur des MTBO. Ces connaissances proviennent de l’expérience sur le terrain mais aussi de l’exploitation statistique des défaillances constatées. La loi de fiabilité d’un élément est identifiable à la **loi de Weibull** :

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \tag{5}$$

avec $R(t)$ probabilité de survie au bout du temps t ,
 β paramètre de forme,
 η paramètre d’échelle,
 γ paramètre de correction de l’origine des temps.
 $\beta < 1$ caractérise les défauts de jeunesse avec un taux d’avarie décroissant dans le temps.
 $\beta = 1$ caractérise un taux constant dans le temps.
 $\beta > 1$ caractérise un taux d’avarie croissant dans le temps.
Si on pose :

$$x = \frac{t - \gamma}{\eta} \tag{6}$$

on obtient : $R(x) = \exp(-x^\beta)$ (7)

et la densité de probabilité de défaillance au temps x est : $f(x) = \beta \cdot x^{\beta-1} \cdot \exp(-x^\beta)$ (8)

Le coût total moyen de la maintenance systématique de l’élément est :

$$c_1 = \frac{c + C \cdot f(x)}{\int_0^{MTBO} [1 - f(x)] dx} \tag{9}$$

que l’on peut alors rendre minimal par ajustement du MTBO.

4. Gestion de la maintenance

4.1 Classement des items

On peut classer les éléments ou composants de la machine suivant trois critères :

- le **critère « vital, important, secondaire »** (§ 3) permettant de savoir quelle forme de maintenance est appliquée à l’élément ;
- la **nature de l’élément**, déterminant un classement horizontal, qui permet d’accéder rapidement aux données de ce dernier. On peut ainsi avoir une rubrique « pompes » ou « vannes » listant l’ensemble des pompes de l’installation sans distinction de rôle, puissance, emplacement ou appartenance à un sous-ensemble ;
- l’**appartenance de l’élément à un ensemble**, déterminant un classement arborescent, qui permet de connaître les interactions entre l’élément et le reste de l’installation (figure 12).

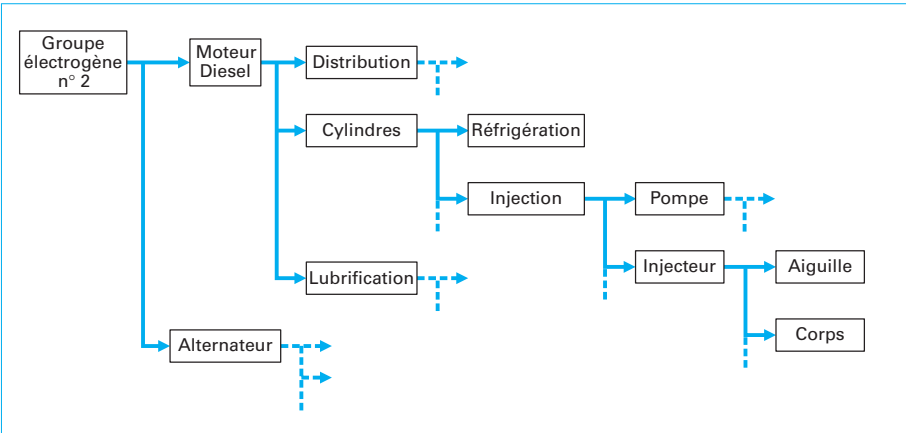


Figure 12 – Classement arborescent des items

Checking and Maintenance Schedules

900-1

V : See Volume I "Operation"
A : Adjustment to be carried out
C : Check the condition
M : See maker's instructions
O : Overhaul to be carried out

H : Check new/overhauled parts after 500-1500 hours
B : Based on observations
P : Overhaul to be based on procedure No. or refer to

		Normal hours of service (x1000)							
No.	Procedure	H	2	4	6	8	16	B	P
906	Mechanical Control Gear								
-1	Chain	C		C					V
-2	Chain Tightener	C						A	
-3	Camshaft	C				C		A,C	
-4	Camshaft Bearings							C,O	
-5	Moment Compensator							A,C	
907	Starting Air System								
-1	Starting Air Distributor	C				C		A	
-2	Starting Air Valve					C,O			
	Governor, change of oil			O					M
	Functional check of overspeed device					C			M
	Functional check of speed-setting system (engine with bridge control system)			C					M
908	Exhaust Valve								
-1	High-Pressure Pipe							O	
-2	Exhaust Valve								
	Conventional hard-faced valve seats; overhaul at intervals of 6000 hours				O				
	Nimonic exhaust valves; check new valves after 6000 hours subsequently, overhaul at intervals of 16000 hours				C		O		
-3	Exhaust Valve Actuator						O		
-4	Exhaust Valve Roller Guide	C					C	O	V
-5	Exhaust Valve Cam							C	
-7	Exhaust Valve Special Running							C	
909	Fuel Oil System								
-1	Fuel Pump Lead							A,C	V
-3	Fuel Pump Cam							A	909-1
-4	Fuel Pump							O	

When referring to this page, please quote Maintenance Schedules 900-1 Edition 212
MAN B&W Diesel A/S

Page 3 (5)

Figure 13 – Exemple de tableau de suivi (extrait, doc. MAN AG)

Ce type de classement permet de déterminer des niveaux, de l'ensemble jusqu'à la pièce détachée élémentaire, de coder chaque élément, sous-ensemble ou groupe, de faire ressortir la criticité de défaillance de chaque élément sur les sous-ensembles. Cette modélisation des systèmes peut être adaptée en fonction des contraintes.

Exemple : pour les moteurs Diesel lents d'alésage supérieur à 580 mm, il peut être intéressant de traiter chaque cylindre indépendamment des autres pour étaler la charge des interventions dans le temps au vu des coûts des pièces de rechange et du temps d'intervention. À l'inverse, pour un Diesel quatre temps six cylindres de 450 kW par exemple, il sera avantageux de visiter tous les cylindres en même temps.

4.2 Suivi des opérations

Il s'effectue grâce aux **historiques** qui permettent la mémorisation et l'accès aux actions passées, aux **tableaux de suivi** et aux **fiches d'intervention** pour préparer les opérations à venir.

Les historiques doivent comporter au minimum le code ou l'identifiant de l'élément, la date et les heures de marche au

MAN B&W		Cylinder Condition Report		Plate 70711-40D	
M:	Engine Type:	No. of cyl.:	Cylinder No.:	Checked by:	
Yard:	Builder:	Engine No.:		Date:	
No.:	Built year:		Engine hrs.:		
Voyage info:					
Weeks pr. Port calls:		Normal service load in % of MCR:		Lubricator type (rpm/imp):	
Cyl. oil consump. (p24 hrs):		at load %:		Cyl. oil type:	
Cylinder liner					
Liner hrs.:		Insulation pipe (Y/N):		Liner material:	
Drawing no.:		Insulation in cyl. frame (Y/N):		Liner cool type:	
Producer/Marking:					
Measuring point					
Depth (mm)					
Diameter (mm)					
Cyl. cover tightened (Y/N):					
Temp. betw. liner and measuring tool (°C):					
Shims (mm):					
Liner Remarks:					
Piston rings					
Width of ring (mm)					
Height of ring (mm)					
Degrees					
Ring 1					
Ring 2					
Ring 3					
Ring 4					
Piston ring type					
Free ring gap (mm)					
Lock ring (mm)					
Broken ring (Y/N)					
Reason for examination (Y)					
Routine overhaul:					
Routine check:					
Low Pump:					
Blow-by:					
Scavenger fire:					
Change of liner:					
Ring grooves					
H (mm)					
F E A M					
Ring 1					
Ring 2					
Ring 3					
Ring 4					
Piston top					
Piston no.:					
Crown (hrs.):					
Max. burning 1. (mm):					
Position 1. (degree):					
Max. burning 2. (mm):					
Position 2. (degree):					
Piston Remarks:					
PS. If a liner or piston crown is exchanged, two reports must be filled-in!					

Figure 14 – Exemple de fiche de report de données pouvant faire partie de la fiche d'intervention, visite de chemise (extrait, doc. MAN AG)

moment de l'intervention, la nature et la cause de l'intervention, la périodicité s'il s'agit d'interventions systématiques, la liste des pièces de rechange utilisées et leurs codes, des remarques ou commentaires de l'intervenant.

Les historiques sont renseignés à chaque intervention et classés chronologiquement par groupe ou sous-ensemble.

Les tableaux de suivi (figure 13) permettent d'afficher, pour chaque item soumis, les échéances des opérations systématiques mises à jour après chaque intervention et le délai restant. Leur tenue est journalière ou hebdomadaire et grandement facilitée par la mise en place d'horoscontrôles sur les machines.

Les fiches d'intervention sont utilisées pour préparer et effectuer l'intervention. Elles doivent comporter au minimum le code ou l'identifiant de l'élément, sa situation géographique, la périodicité, la date, la référence des procédures de conduite et de sécurité préalables, la durée estimée, le nombre de personnel nécessaire et sa qualification, la description de l'intervention, la liste des pièces devant être remplacées, un tableau de report des cotes et mesures effectuées (figure 14). En ce qui concerne les moteurs industriels, les guides d'entretien émis par les constructeurs sont une bonne base pour l'établissement des fiches d'intervention.

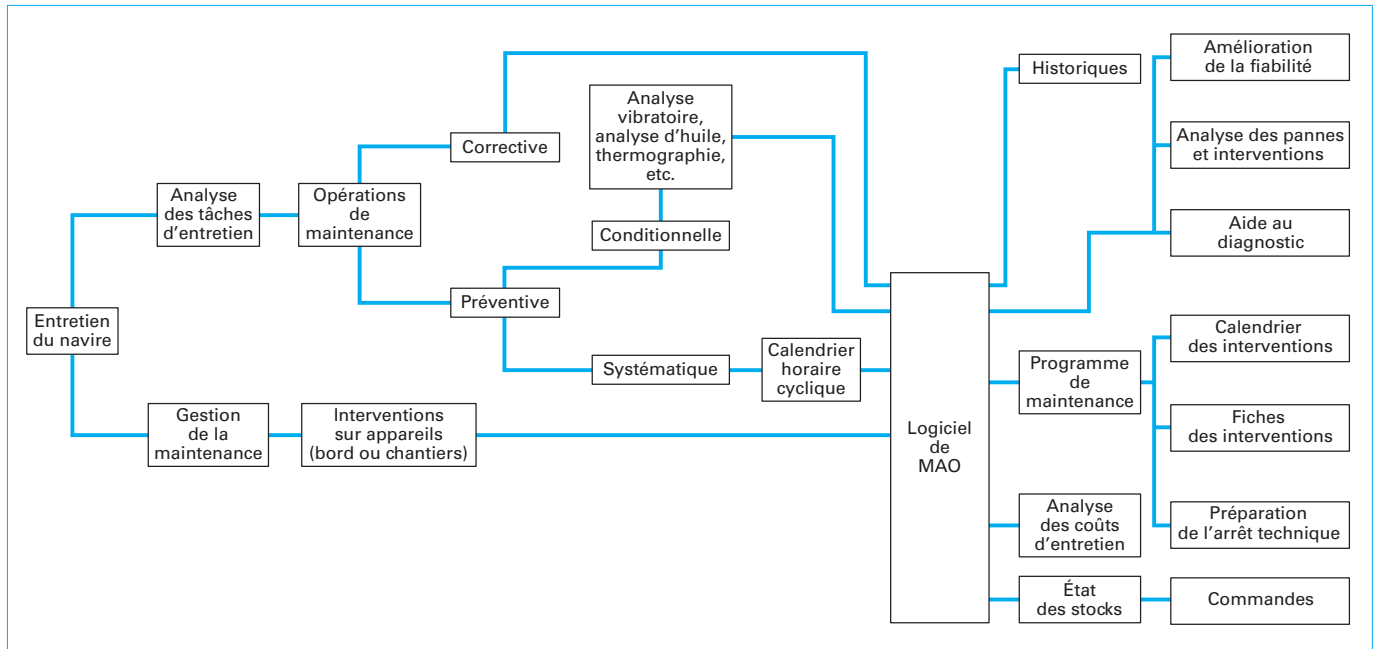


Figure 15 – Architecture de la MAO

4.3 Suivi des stocks

Les stocks de rechange sont déterminés par la criticité des matériels et les capacités d'approvisionnement. Il convient de garder un stock de sécurité constitué de pièces ou sous-ensembles dont la probabilité d'utilisation peut rester faible mais qui, en cas de manque lors d'une défaillance, entraînent un coût d'indisponibilité, que l'on appelle C_i , très élevé. Le rapport entre le coût de stockage C_s et C_i détermine l'appartenance d'un élément au stock de sécurité. On doit aussi prendre en compte les capacités et délais de livraison des pièces. Pour les moteurs industriels, les pièces d'usure normale telles que segments, pistons, chemises, soupapes, injecteurs ou pompes à combustible sont disponibles dans des délais très courts mais leur acheminement sur site peut être problématique. C'est le cas extrême d'un navire au long cours qui ne peut se réapprovisionner en pièces que lors des escales. Le stock de sécurité doit alors être conséquent et comporter notamment un cylindre complet, une culasse équipée, un attelage, une chemise, un système d'injection, un tronçon d'arbre à cames et des cames, en sus des consommables sur la durée d'un voyage.

La maintenance préventive permet de limiter le stock des pièces dont les commandes ne seront lancées que pour assurer les opérations prévues, compte tenu des délais d'approvisionnement, mais n'exonère pas de la nécessité du stock de sécurité.

Les pièces ou sous-ensembles doivent être soigneusement codés et répertoriés en rapport avec le classement des items, mais aussi en références fournisseurs dont on tient un fichier. Les risques de dérive de l'existant par rapport à l'inventaire sont grands et doivent être évités par des mises à jour régulières.

4.4 Analyse des coûts

Il s'agit de comparer les dépenses réelles aux prévisions budgétaires afin d'identifier les causes des écarts.

Il convient de classer chaque dépense le plus précisément possible. On classe par exemple les dépenses en fonction de la

nature de l'intervention, corrective ou préventive. Pour chacune d'elle, on sépare clairement le coût :

- des pièces de rechange ;
- de la main-d'œuvre interne ;
- de la main-d'œuvre externe ou sous-traitée ;
- d'indisponibilité ;
- réglementaire (expertise, classification),
- ainsi que la nature du matériel concerné (mécanique, tôlerie, électricité, automatismes, etc.).

On y ajoute les dépenses générales de tenue du stock et les frais de gestion de l'équipe par exemple.

On cherche à rendre minimal le coût global en adaptant la politique de maintenance en fonction des résultats.

4.5 Gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO)

L'outil informatique permet de résoudre de nombreux problèmes posés par la gestion de la maintenance.

L'architecture de principe du système peut satisfaire au schéma de la figure 15, exemple de la MAO mise en œuvre sur un navire.

Les informations sur les opérations de maintenance sont introduites dans le logiciel (encadré 2), manuellement par l'opérateur ou automatiquement pour certaines données de fonctionnement telles que les heures de marche. Les historiques sont mis à jour, les fiches et le calendrier d'intervention sont édités. Les commandes de pièces sont générées et les coûts analysés. En prenant en compte les informations et commentaires saisis dans les historiques, des aides au diagnostic et à l'amélioration de la fiabilité sont établis. Dans cet exemple, les capacités de gestion du personnel sont sans objet.

La figure 16 donne un exemple de tableau de suivi d'un groupe électrogène, avec mise à jour automatique des heures de marche et visualisation des délais avant intervention.

Encadré 2 – Critères de choix d'un logiciel de GMAO

1. Capacité du logiciel

Nombre d'équipements, niveau de découpage, nombre de travaux, nombre de pièces de rechange, nombre de types d'activités, nombre de types de ressources...

2. Caractéristiques conversationnelles

Langage utilisé (français, anglais) pour le logiciel, la documentation ; mode de communication : interactif par menus, par commandes ; traitement des données en entrée en temps réel ; langage d'interrogation et de recherche des données, visualisation (graphique, planning) des informations...

3. Gestion du parc de matériel

Inventaire croisé (géographie, technique), identification des matériels, objets de gestion : historique, liste des pièces détachées, des sous-ensembles, suivi des heures de marche...

4. Gestion du portefeuille de travaux

Saisie des bons de travaux, préparation de ceux-ci, méthodes d'ordonnement, suivi des travaux en cours...

5. Gestion des achats et pièces détachées

Traitement des demandes d'achat, tenue de l'inventaire du magasin, réapprovisionnement, suivi de consommation des pièces, évaluation des fournisseurs...

6. Gestion des travaux neufs

Aide à l'établissement de devis, suivi des engagements de dépenses, planification des travaux...

7. Maintenance préventive

Gestion des fiches d'entretien préventives, équilibrage du plan de préventif, modification des périodicités...

8. Gestion du personnel

Planning des absences et congés, suivis des qualifications et des formations...

9. Autres fonctions assurées

Suivi de documents, suivi des équipements, possibilités de simulation (*what-if*).

10. Rapports et sorties graphiques

Générateurs d'états, combien de rapports standards, quelles sorties graphiques (réseau, planning, diagrammes de gestion), quels traceurs compatibles...

11. Interfaçage avec autres systèmes

Dispositif prévu, mode d'extraction et d'insertion de données...

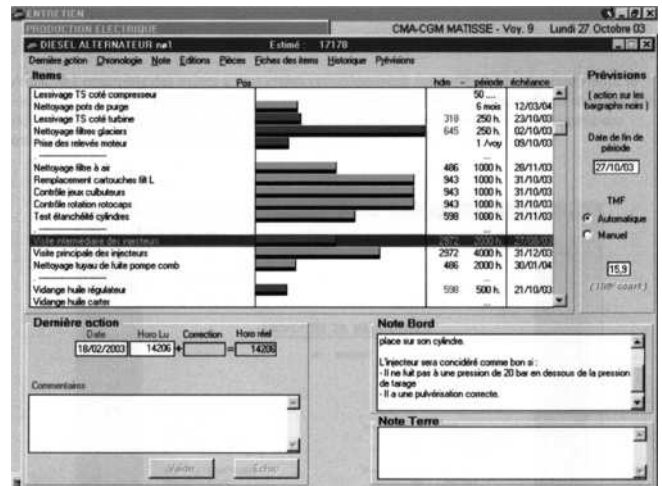


Figure 16 – Écran de visualisation des périodicités d'un logiciel de MAO

5. Organisation des travaux lourds

Les travaux de niveau 4 ou 5 (§ 1.4) tels que les grands travaux de révision d'unités complètes requièrent une organisation particulière. On utilise souvent la méthode PERT (*program evaluation and review technique*), où le chantier est décomposé en tâches élémentaires de durée connue, agencées en un réseau chronologique de tâches et d'étapes. Apparaissent pour chaque étape les temps au plus tôt et au plus tard, ce qui détermine un chemin critique, ou enchaînement des opérations pour lesquelles il n'existe aucune marge de temps disponible (figure 17).

Il est profitable de préparer par cette méthode certaines interventions majeures de maintenance corrective en cas d'avaries graves sur les équipements critiques. Ce travail, qui paraît inutile si l'avarie ne se produit pas, est en revanche très rentable dans le cas contraire. Il permet par ailleurs d'effectuer des simulations de temps d'indisponibilité pour diverses causes d'avaries.

Des logiciels spécifiques permettent d'établir les réseaux et les calendriers par chantier.

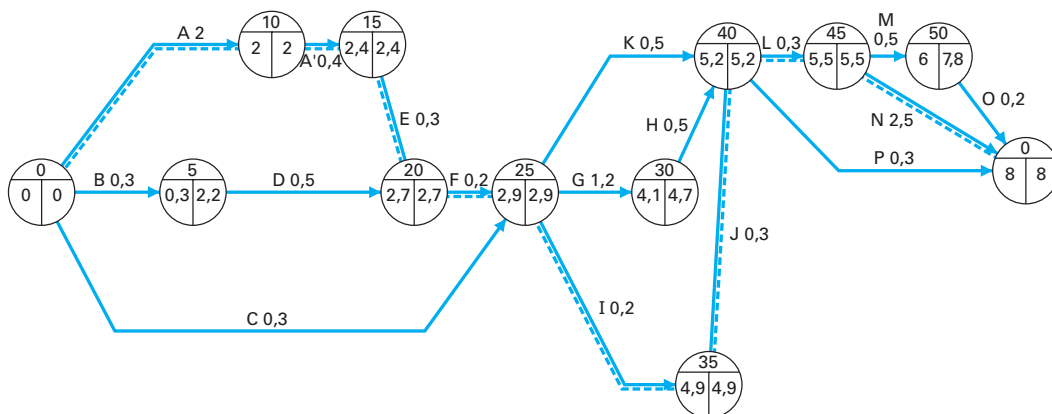


Figure 17 – Exemple de réseau PERT pour visite de piston

6. Techniques d'entretien des moteurs industriels

Les interventions préventives sur les moteurs Diesel industriels ou marins suivent des schémas types. Les périodicités des interventions systématiques, données en heures de marche (hdm), sont indicatives et issues des documents des constructeurs.

Glossaire

Arbre manivelle (appelé **vilebrequin** sur les petits moteurs) : arbre principal du moteur possédant les manivelles sur lesquelles s'articulent les embiellages de chacun des cylindres.

Axe de piston : axe d'articulation directe de la bielle sur le piston (moteurs quatre temps).

Balayage : alimentation en air d'un moteur.

Came : élément rotatif à profil non cylindrique, permettant d'actionner un organe dans un mouvement alternatif.

Chapeau (de palier) : cage amovible contenant un coussinet et assurant la fermeture d'un palier autour d'un arbre.

Chemise : cylindre creux formant les parois latérales d'une chambre dans laquelle se déplace un piston.

Coussinets (de palier) : coquilles minces en acier affectant la forme d'un demi-cylindre, recouverte de métal à faible coefficient de frottement, et assurant la liaison entre la soie d'un arbre et la cage du palier correspondant.

Crosse : organe de liaison entre la bielle et la tige de piston (moteurs lents à deux temps).

Culasse : pièce assurant la fermeture de la partie supérieure de la chambre de combustion.

Culbuteur : organe de commande des soupapes.

Débit de blow by : débit des gaz fuyant entre segments et chemise.

Déflexions : déformations de l'arbre manivelle consécutives au déalignement de ces paliers supports.

Déglacage : opération visant à rendre la surface intérieure de la chemise de cylindre légèrement rugueuse.

Distribution : système d'entraînement des auxiliaires de la chambre de combustion qui permettent d'assurer le déroulement du cycle moteur.

Frettage hydraulique : méthode permettant de fixer deux pièces mécaniques par serrage naturel réversible de l'une sur l'autre. L'application d'une pression d'huile assure une dilatation et le desserrage de ce montage.

Galet : pièce cylindrique roulant sur une came et transmettant le mouvement à l'organe commandé.

Grain de poussée : élément de liaison entre deux pièces animées d'un mouvement de translation (alternatif).

Joues (de manivelle) : composantes de l'arbre manivelle assurant la liaison entre les tourillons (axe de rotation de l'arbre) et les manetons (articulation de la bielle). Deux joues et un maneton forment une manivelle.

Jupe : partie inférieure du piston.

Lanterne : cage placée sur la culasse et portant la soupape d'échappement et son siège. Elle permet le démontage de cette dernière sans déposer de la culasse.

Plongeur : nom usuel du piston de la pompe à combustible.

Point mort supérieur : position extrême haute du piston moteur dans sa course.

Ressuage : opération faisant appel à deux produits déposés l'un après l'autre sur une surface métallique et permettant de faire apparaître des fissures autrement invisibles.

Siège de clapet : anneau sur lequel s'appuie le clapet d'une soupape pour assurer une étanchéité au passage d'un fluide.

Soie : surface de portage extérieure de la partie cylindrique d'un arbre dans un palier.

Tulipe : partie évasée d'une soupape.

6.1 Distribution

La distribution est très généralement effectuée par un train d'engrenages mais certains moteurs utilisent une distribution par chaîne (MAN type MC). Les premiers moteurs sans arbre à cames et à gestion électronique sont opérationnels depuis 2003 ; leur cas est traité en fin de paragraphe.

Le contrôle se répartit en trois étapes principales.

■ **Contrôle visuel** des dentures d'engrenages, cames, galets (4 500 à 6 000 hdm) : les parties actives doivent avoir un aspect blanc et poli, on y recherche les traces de rayures, grippage, écaillage et les amorces de fêlures. Les rayures légères peuvent être polies à la pierre fine (grain 500).

■ **Mesure des jeux d'engrènement** (figure 18) et axiaux des roues d'engrenage ainsi que le contrôle du calage angulaire de l'arbre à cames et des cames (8 000 à 12 000 hdm) : la vérification du calage s'effectue en virant le moteur à une position de référence, piston n° 1 au point mort supérieur par exemple, puis en vérifiant, à l'aide d'une jauge de référence (figure 19) la position des organes, manivelle du cylindre, arbre à cames, cames, par rapport aux repères du bâti moteur.

Si les cames sont frettées hydrauliquement sur l'arbre, le calage peut être repris.

■ **Vérification des poussoirs et galets** (24 000 à 30 000 hdm) (figure 20) et **visite des paliers d'arbre à cames** : lorsque la distribution est à chaîne, on mesure la longueur sur dix maillons pour juger de son élongation.

Sur les moteurs sans arbre à cames (Sulzer RT-Flex, MAN série ME), la gestion électronique du cycle utilise un capteur/codeur de position de l'arbre manivelle situé à l'extrémité de ce dernier. La procédure de réglage est identique à la vérification du calage de l'arbre à cames.

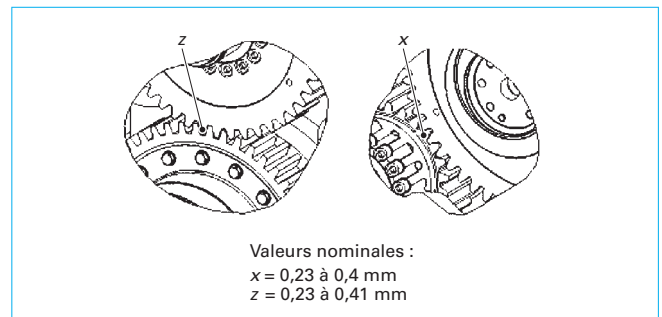


Figure 18 – Mesure du jeu radial de distribution (doc. MAK)

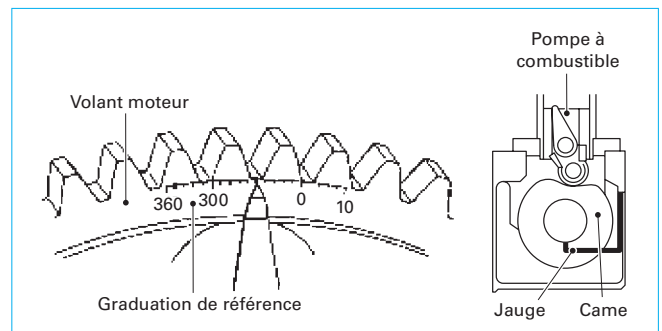


Figure 19 – Vérification du calage de l'arbre à cames (doc. MAN AG)

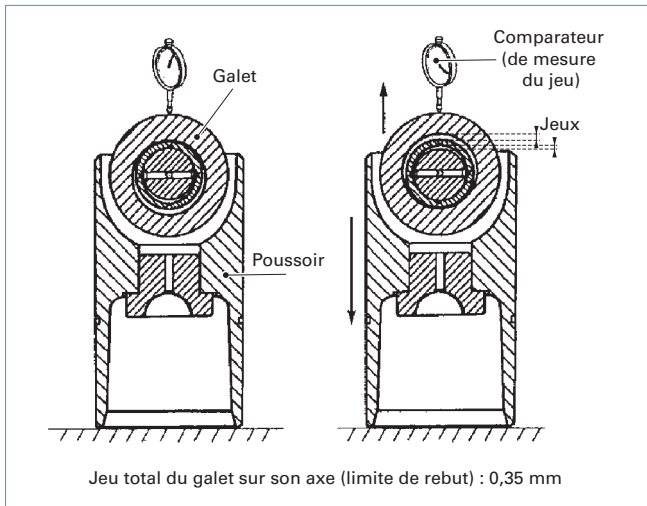


Figure 20 – Mesure du jeu des galets après démontage
(doc. S.E.M.T. Pielstick)

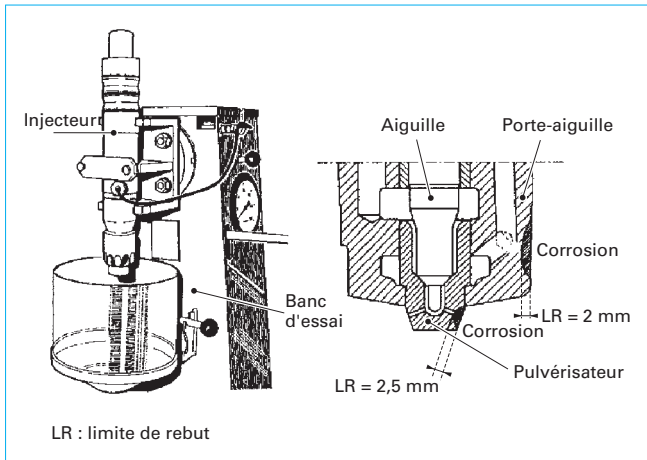


Figure 21 – Banc d'essais et corrosion du pulvérisateur
(doc. S.E.M.T. Pielstick)

6.2 Système d'injection

Il est constitué de la pompe et d'un ou plusieurs injecteurs par cylindre.

La **visite des injecteurs** (3 000 à 8 000 hdm) consiste à effectuer, au banc d'essais, un contrôle de la pulvérisation, de l'étanchéité de l'aiguille, de la pression de tarage. La dépose permet de juger de la corrosion et de l'érosion sur le pulvérisateur (figure 21). Le logement dans la culasse est nettoyé et son portage rodé. Un injecteur qui satisfait à ces contrôles ne doit pas être démonté. Dans le cas contraire, il est remplacé et subit une visite complète.

La **visite complète** (24 000 à 30 000 hdm) permet le remplacement du pulvérisateur (porte-aiguille et aiguille), le rodage du portage entre corps et pulvérisateur, la reprise du tarage.

Les **pompes à combustible** voient un contrôle en deux étapes :

- la visite de la tête de pompe qui permet de juger de l'étanchéité du clapet de refoulement et de vérifier le calage du début d'injection ;

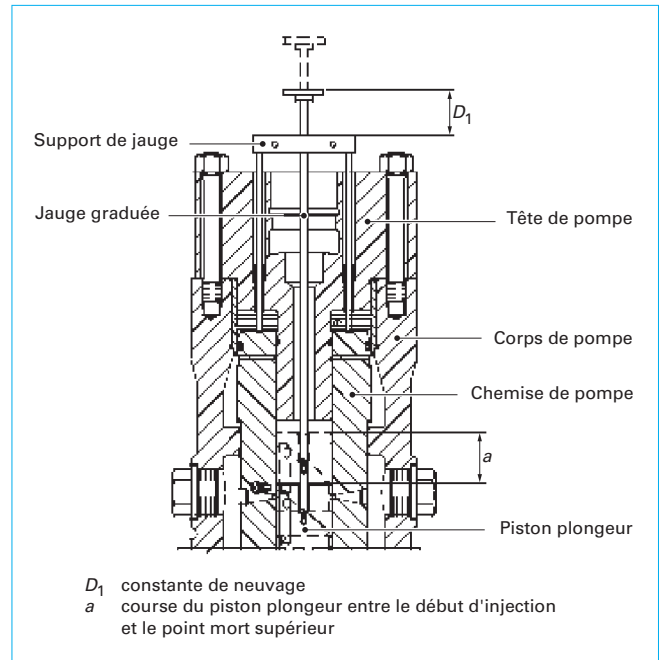


Figure 22 – Mesure de la cote du plongeur (doc. MAN AG)

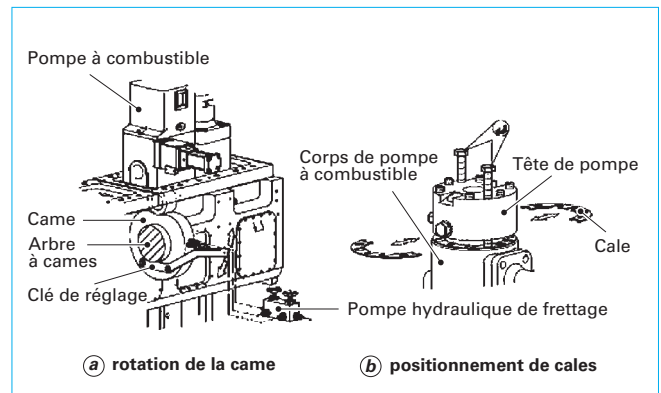


Figure 23 – Réglage de l'avance (doc. MAN AG)

- après avoir viré le moteur dans une position particulière (point mort supérieur ou début d'injection du cylindre considéré), on mesure la position verticale du piston plongeur de la pompe par rapport aux lumières de la chemise (figure 22).

En cas d'écart à la cote d'origine, le réglage de l'avance peut être repris de deux manières suivant les moteurs (figure 23) :

- par rotation de la came (fretage hydraulique) ;
- en modifiant la hauteur de la chemise de pompe par ajout ou retrait de cales sous son talon.

La **visite complète de la pompe** (16 000 à 24 000 hdm) permet le remplacement des pièces d'usure telles que le grain de poussée, l'amortisseur de pulsation, les joints, ainsi que la vérification de l'état du couple piston plongeur-chemise (pièces appairées). Toute trace de grippage ou d'érosion sur les arêtes de la rampe ou des lumières entraîne le rebut (figure 24).

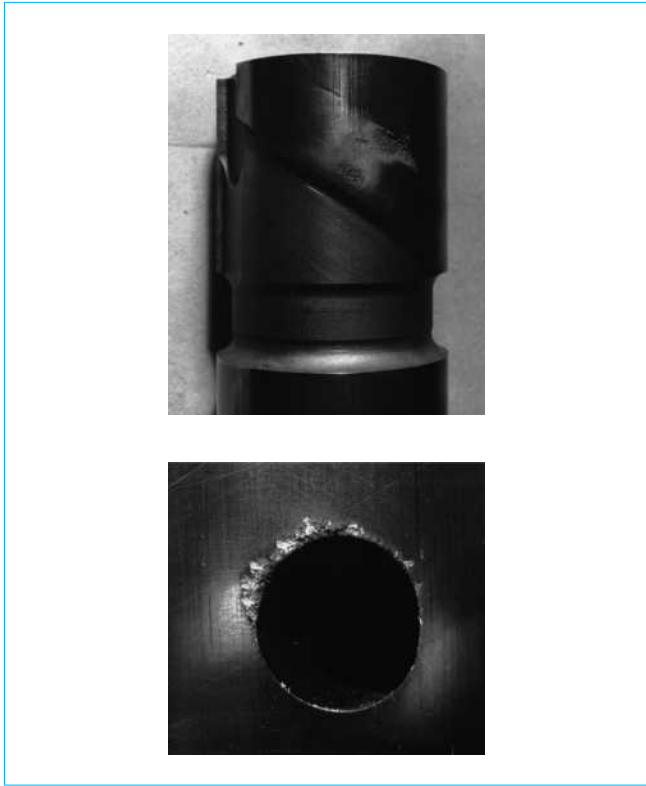


Figure 24 – Érosion et début de grippage sur une pompe à combustible
(doc. S.E.M.T. Pielstick)

6.3 Éléments constitutifs du cylindre

6.3.1 Culasse et accessoires

Il faut distinguer les moteurs deux temps des moteurs quatre temps. La culasse des premiers est d'une conception plus simple puisqu'il n'y a pas d'organe d'admission d'air. Elle comprend :

- une soupape d'échappement à ouverture hydraulique et fermeture pneumatique montée sur lanterne au centre ;
- deux à trois injecteurs ;
- une soupape de lancement à l'air ;
- une soupape de sûreté ;
- un robinet de décompression/indication ;
- une chemise de réfrigération ou des canaux forés.

La visite (8 000 à 12 000 hdm) est essentiellement constituée par le contrôle de la soupape d'échappement. Après vidange partielle du cylindre, la culasse équipée est déposée ainsi que la soupape d'échappement sur sa lanterne. Le robinet de décompression, les soupapes de lancement et de sûreté sont déposés, on vérifie leur état et leur étanchéité. Les logements dans la culasse sont nettoyés et leur portage rodé. La chemise de réfrigération est déposée et la chambre nettoyée ou détartrée, tous les joints sont remplacés.

Après démontage de la soupape, on vérifie l'état du clapet et du siège à l'aide de gabarits (figure 25). On mesure la corrosion sur le dessous de tulipe et les traces de brûlure du portage, on vérifie le diamètre de la tige.

Un siège ou un clapet peuvent être meulés ou usinés si les marques de brûlure ne sont pas trop profondes. Le système de manœuvre oléo-pneumatique est à rattrapage de jeux automatique et ne nécessite que le remplacement des joints d'étanchéité.

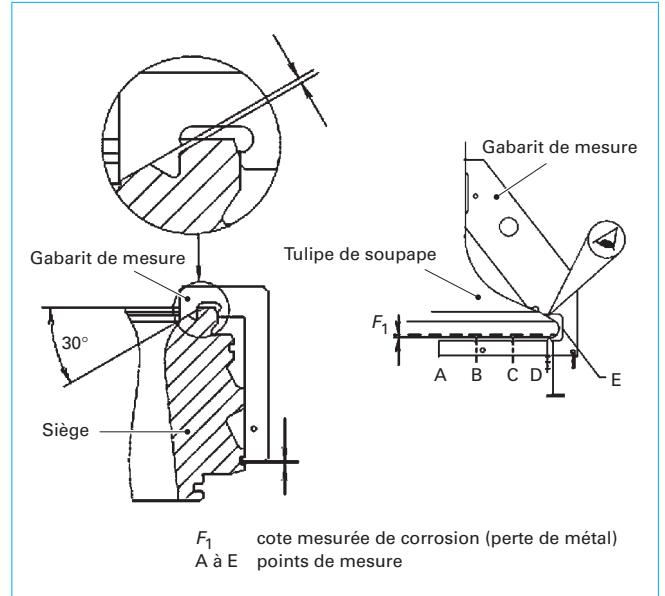


Figure 25 – Mesure sur siège et clapet de soupape (doc. MAN AG)

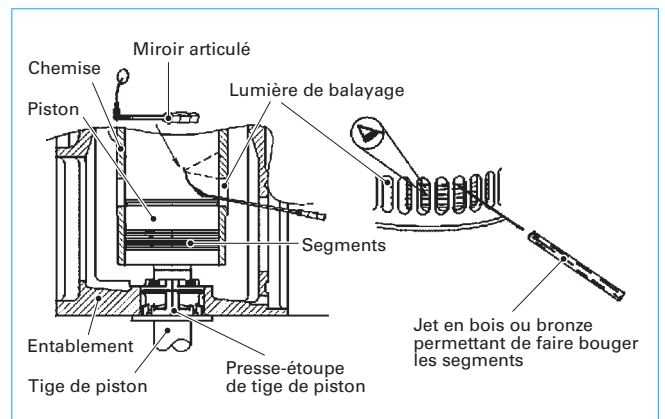


Figure 26 – Vérification de l'aspect de la segmentation et de la chemise par les lumières de balayage (doc. MAN AG)

Pour les moteurs quatre temps, la visite comporte des démonstrages et vérifications supplémentaires, notamment sur la culbutterie : vérification des axes et douilles de culbuteurs, grains de poussée et de réglage. Les soupapes et sièges d'admission sont traités comme les soupapes d'échappement bien qu'ils ne soient pas montés sur lanternes.

6.3.2 Piston et chemise

L'architecture des **moteurs deux temps** avec tige de piston et crosse, rend cette opération indépendante de la visite de l'embellage, ce qui n'est pas le cas des moteurs quatre temps.

De plus, l'accès par le collecteur de balayage permet de vérifier l'état de la chemise et des segments sans démontage (figure 26), à travers les lumières de balayage (1 000 hdm).

On vérifiera l'élasticité des segments (segment cassé) et leur liberté dans la gorge (segment gommé). La visite des segments intervient alors lorsqu'il y a nécessité de les remplacer (8 000 à 12 000 hdm). Le piston est déposé, les segments sont remplacés, on mesure les dimensions des gorges après nettoyage et le jeu de battement après repose des segments neufs. La géométrie de la tête de piston est comparée à un gabarit pour juger de la corrosion. On mesure le diamètre de la tige en plusieurs points et le presse-étoupe de tige est déposé et visité (remplacement des segments).

La visite complète du piston (16 000 à 20 000 hdm) ajoute à la précédente la dépose complète de la tête, de la jupe et de la tige pour vérification de l'état de la chambre de réfrigération. Les joints sont remplacés et une épreuve hydraulique à 7 bar, par exemple, est effectuée après remontage.

À chaque visite, la chemise est nettoyée, les petites marques sont atténuées à la pierre ou un déglacage est effectué, on mesure l'ovalisation (§ 4.2). La dépose n'intervient que lorsqu'il est indispensable de remplacer la chemise, après dépassement des seuils d'usure ou apparition de marques profondes.

Pour les **moteurs quatre temps**, la dépose du piston s'accompagne de la dépose totale ou partielle (bielle en deux parties) de l'embellage. Il faut veiller, lors de la dépose, à protéger la chemise et la bielle (figure 27). On laisse les segments en place pour vérifier les jeux à la coupe (utilisation d'un gabarit) et de battement (figure 28). Les segments ne sont déposés que si les limites d'usure sont atteintes, des marques profondes existent où le revêtement chromé a partiellement disparu. Lorsque le nettoyage des gorges nécessite la dépose des segments, il est recommandé de les remplacer.

Tout remplacement de segment implique une période de rodage, un déglacage de la chemise est souvent recommandé. Cette dernière subit les mêmes vérifications que sur les moteurs deux temps.

La visite comprend le débiellage et le contrôle de l'axe de piston (figure 29).

On mesure le diamètre de l'axe de piston en deux ou trois endroits après dépose.

Une recherche de fêlures est effectuée par ressuage dans l'intérieur de la jupe, au droit des bossages d'axe.

Les pistons sont en deux parties. Comme pour les moteurs deux temps, la visite complète (24 000 hdm) comprend la dépose de la tête et de la jupe pour le nettoyage de la chambre de réfrigération.

6.3.3 Embellage et arbre manivelle

Pour les **moteurs quatre temps**, l'embellage est déposé et visité lors de la visite du piston. On mesure l'ovalisation de la tête et du pied de bielle (figure 30), on vérifie l'état du revêtement antifriction des coussinets et de la douille et on souffle les canalisations de graissage à l'air comprimé.

Sur les **moteurs deux temps**, la dépose n'étant pas nécessaire pour la visite du piston, et vu la taille et la masse des pièces (jusqu'à 6 000 kg pour une bielle équipée), la visite (8 000 à 12 000 hdm) consiste à mesurer les jeux aux articulations sans démontage à l'aide de cales d'épaisseur (figure 31). Au vu des résultats, le démontage de l'articulation pour examen des coussinets et des soies est alors effectué.

Les opérations sur l'arbre manivelle se résument, quel que soit le type de moteur, à la mesure des déflexions, la mesure des jeux sous soie ou d'affaissements des paliers principaux et au contrôle de l'état des coussinets de paliers principaux après démontage. Sur les moteurs quatre temps, l'examen du maneton de manivelle est effectué à chaque visite du piston. Il consiste à vérifier la conicité et la cylindricité par mesure du diamètre en plusieurs points.

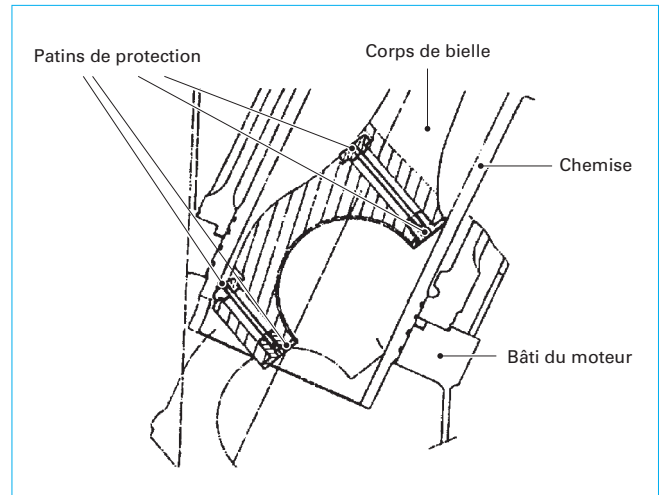


Figure 27 – Protection entre chemise et bielle (doc. S.E.M.T. Pielstick)

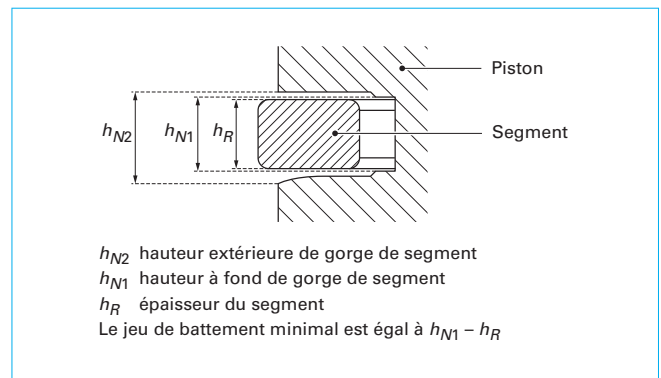


Figure 28 – Mesure des jeux de battement (doc. MAK)

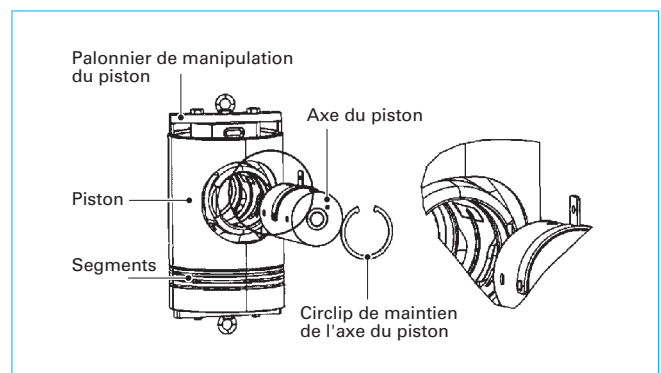


Figure 29 – Dépose de l'axe de piston (doc. MAK)

La mesure des déflexions (3 000 à 8 000 hdm ou après ouverture d'un palier principal) renseigne sur le lignage de l'arbre manivelle. Pour chaque manivelle, l'ouverture des joues est mesurée sur un tour moteur en cinq points (figure 32). La variation totale observée

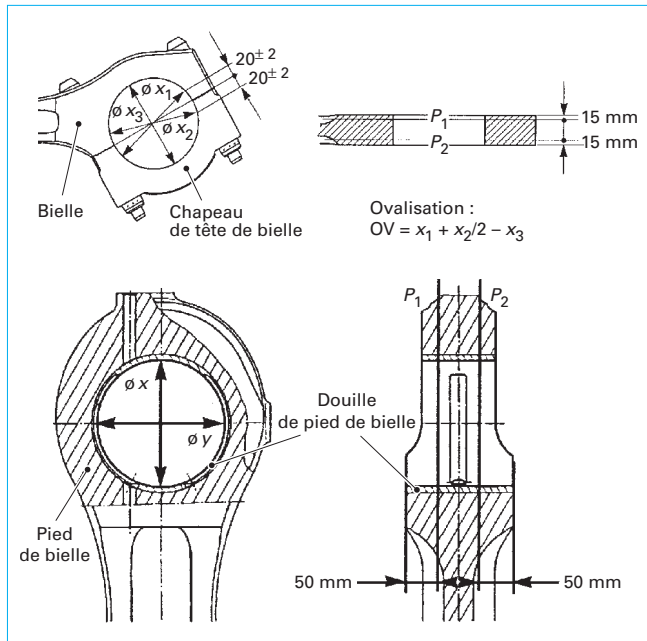


Figure 30 – Mesure de l'ovalisation de tête et de pied de bielle
(doc. S.E.M.T. Pielstick)

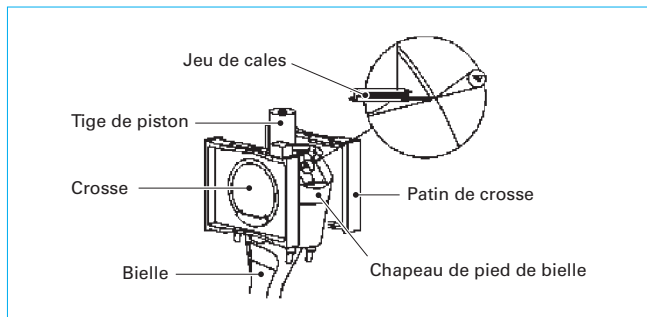


Figure 31 – Mesure des jeux sans démontage sur le pied de bielle
(doc. MAN AG)

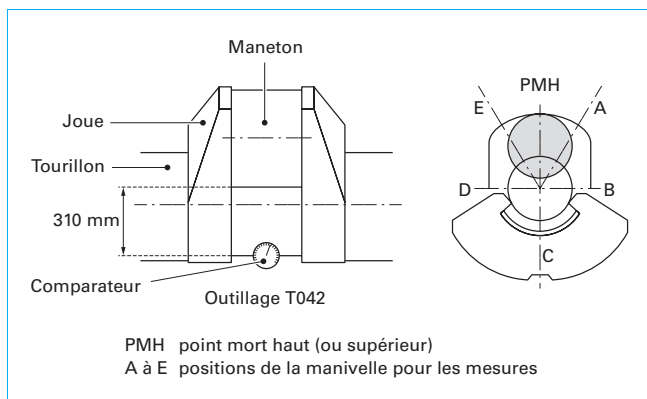


Figure 32 – Mesure des déflexions (doc. S.E.M.T. Pielstick)

dans le plan vertical puis dans le plan horizontal ne doit pas dépasser une valeur maximale. Dans le cas contraire, on cherche en premier lieu un palier affaissé. Un changement du signe des contraintes entre deux manivelles adjacentes révèle un point de fatigue accrue sur l'arbre manivelle. Le lignage complet du moteur sur son embase doit parfois être repris. La mesure de l'affaissement d'un palier principal peut s'effectuer de trois façons :

- mesure par un jeu de cales d'épaisseur insérées entre la soie et le coussinet supérieur ;
- mesure par une jauge de profondeur traversant le chapeau et le coussinet supérieur et reposant sur la génératrice de l'arbre (figure 33) ;
- mesure du déplacement de l'arbre, forcé sur le coussinet inférieur par un vérin.

La visite des paliers principaux (36 000 hdm) peut être répartie dans le temps par roulement. Pour éviter de visiter tous les paliers au même moment, un palier est visité et, si le résultat de la visite est favorable, il sert de palier témoin pour l'ensemble du moteur. Cette pratique nécessite un suivi particulièrement poussé des paramètres de fonctionnement des paliers, températures et tendance à l'échauffement, détection de points durs éventuels lors de la rotation du moteur au vireur électrique à chaud, vérifications des filtres et analyses de l'huile (échéance mensuelle au plus long).

La visite d'un palier principal présente une particularité. Le coussinet au contact avec le bâti ne peut être extrait directement. On doit le faire glisser en rotation dans son logement. Deux pratiques existent, après dépose du chapeau de palier et de son coussinet :

- rotation de l'arbre manivelle qui entraîne le coussinet en rotation par l'intermédiaire d'un outil de poussée positionné dans la canalisation de graissage (figure 34) ;
- levage local de l'arbre manivelle, 0,1 à 0,3 mm, par vérins hydrauliques et rotation du coussinet grâce à des câbles faisant le tour de l'arbre (figure 35).

On se référera au guide du constructeur pour juger du bon état ou de l'usure des coussinets, rayures, écaillage, incrustations, disparition partielle de la couche d'antifriction. On vérifie l'état de surface de la soie sur laquelle on effectue un ressuage.

La butée est traitée comme un palier principal, les systèmes d'amortissement de vibrations également.

6.3.4 Auxiliaires et accessoires

Les **turbosoufflantes** de suralimentation sont lessivées en marche de façon régulière (48 à 96 hdm). Les paliers sont visités ou remplacés (16 000 hdm), la visite complète avec dépose du rotor n'intervient qu'en cas de défaut de fonctionnement.

Les **pompes alimentaires**, de gavage ou de circulation, qu'elles soient attelées ou à entraînement indépendant, sont visitées en fonction des données de fonctionnement avec une visite obligatoire (24 000 à 36 000 hdm). On vérifie et on remplace principalement les organes d'étanchéité d'arbres ainsi que les rouets de pompes centrifuges.

Les **circuits de réfrigération** sont traités par des produits anticorrosion et des analyses hebdomadaires pour le maintien du traitement sont recommandées.

Les **filtres**, à cartouche ou automatiques, sont changés ou nettoyés systématiquement. Il est recommandé d'installer un séparateur centrifuge pour le traitement en continu de l'huile de graissage. Les systèmes spécifiques d'alimentation en combustible des moteurs fonctionnant avec des combustibles résiduels lourds doivent être particulièrement surveillés, la qualité de l'épuration de ces combustibles ayant une importance majeure sur le vieillissement des systèmes d'injection.

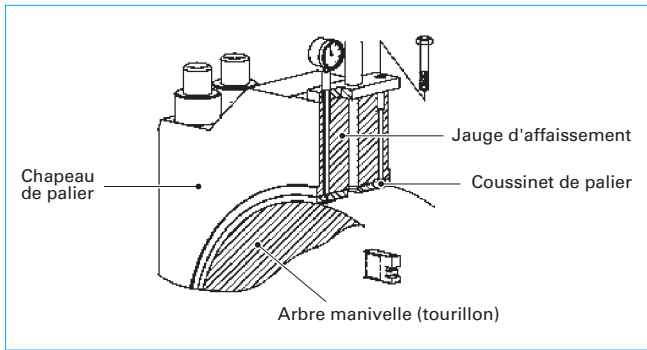


Figure 33 – Mesure d'affaissement de palier (doc. MAN AG)

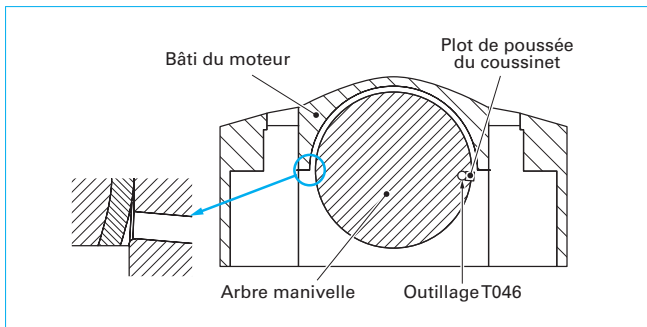


Figure 34 – Dépose du coussinet supérieur par rotation de l'arbre manivelle (doc. S.E.M.T. Pielstick)

Les **sécurités de protection** du moteur, survitesse, pression basse d'huile, température haute d'eau entre autres, doivent être testées au moins tous les six mois.

L'**outillage spécifique** fait appel dans une très grande mesure à l'hydraulique pour le serrage ou le fretage des pièces. Cet outillage doit figurer dans le plan de maintenance du moteur. Si l'on désire que cet outillage soit toujours disponible pour intervenir sur une défaillance, on doit lui appliquer un programme systématique.

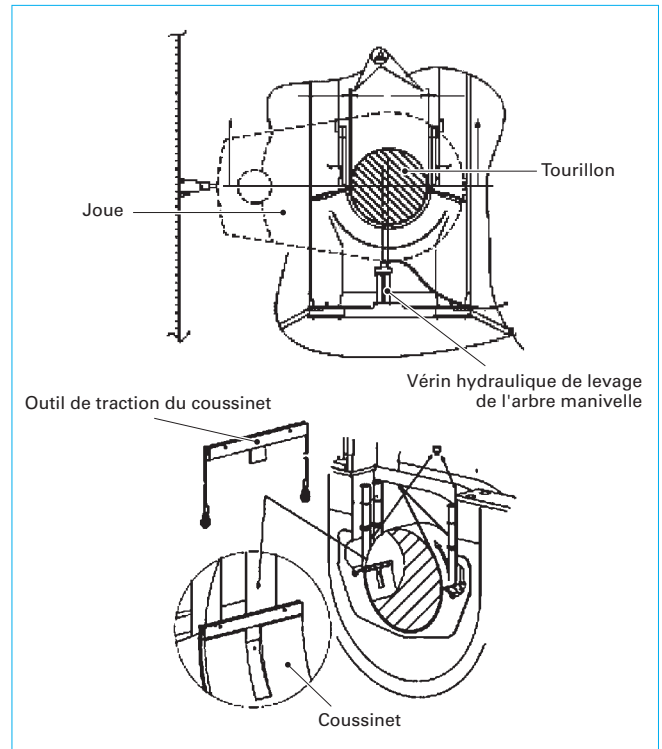


Figure 35 – Rotation du coussinet inférieur après levage de l'arbre (doc. MAN AG)

7. Conclusion

Seule une estimation juste des coûts au vu de l'objectif à atteindre permet de choisir une politique de maintenance adaptée. Pour les moteurs industriels, les outils de la maintenance conditionnelle sont encore peu répandus, et très difficilement adaptables sur des machines existantes. De fait, la maintenance systématique reste une politique encore dominante.