

Comment développer et mettre en œuvre un programme de maintenance et de fiabilité des équipements critiques ?

Atelier C -16 octobre 2014

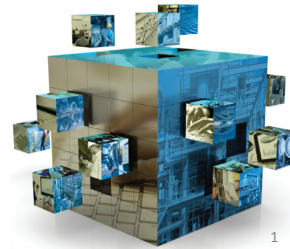
Présenté par
Xavier Zwingmann, ing., Ph. D.
Jean-Marc Papillon, ing.

MaintenanceQuébec.com

(GESTION DES ACTIFS)³

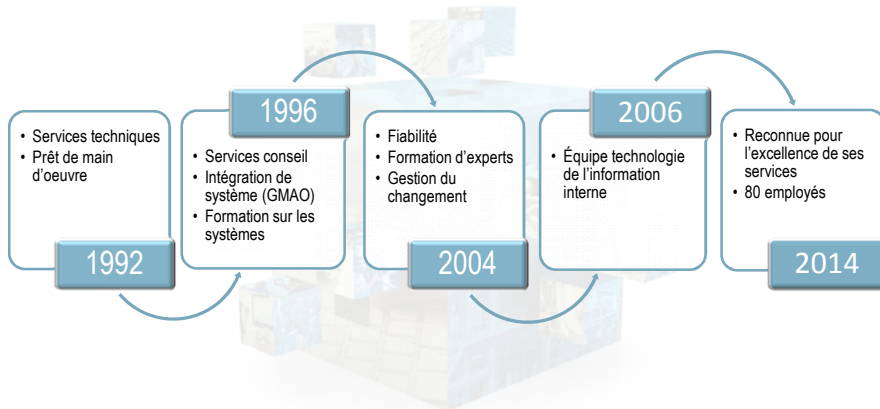


© STI Maintenance inc. 2014



1

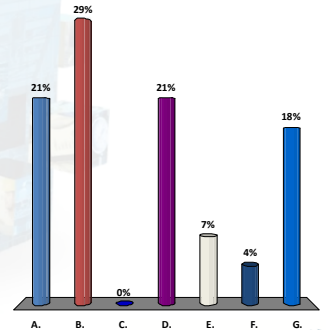
STI Maintenance



Participants à l'atelier



- ✓ Tour de salle :
 - A. Directeur
 - B. Superviseur de maintenance
 - C. Superviseur d'opération
 - D. Ingénieur fiabiliste
 - E. Planificateur
 - F. Employés de maintenance
 - G. Autre



Plan de présentation

- ✓ Objectifs
- ✓ Définitions et concepts
- ✓ Exercices pratiques et cas d'affaire
- ✓ Indicateurs
- ✓ Résumé de la démarche

Objectifs de l'atelier

- ✓ Le participant sera en mesure de :
 - Calculer la fiabilité d'un actif ;
 - Établir la criticité d'un actif ;
 - Déterminer l'impact financier d'une panne pour l'entreprise ;
 - Déterminer l'intervention de maintenance la plus profitable pour l'entreprise.

Maintenance

Définition AFNOR :

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.

Définition populaire :

Identifier la bonne chose à faire (Structure de gestion d'entretien)

et

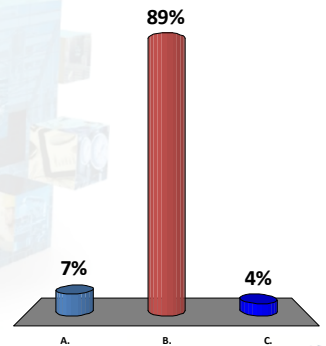
Bien faire la bonne chose identifiée (Procédures, formation, etc.)

Paradigmes



La manière la plus rapide et la plus sûre d'améliorer la performance des équipements "non fiables" existants est:

- A. D'améliorer sa conception.
- B. De commencer par agir sur la manière dont il est opéré et maintenu.
- C. De réduire la vitesse de production.



© STI Maintenance inc. 2014

8

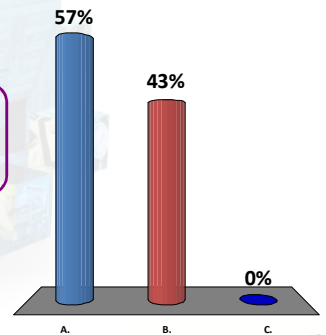
sti maintenance

Paradigmes



Quel est le but de la maintenance préventive ?

- A. Prévenir les défaillances.
- B. Réduire ou éliminer les conséquences des défaillances.
- C. Occuper le personnel de maintenance entre les urgences.



© STI Maintenance inc. 2014

10

sti maintenance

Notions abordées, définitions

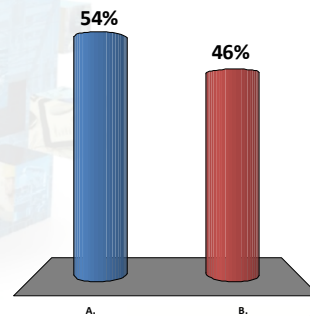
- ✓ **Fiabilité**
 - La probabilité que les équipements ou les systèmes vont accomplir les fonctions requises de manière satisfaisante sous des conditions spécifiques à l'intérieur d'un certain laps de temps (= la mission).
- ✓ **Criticité**
 - La criticité est la combinaison de l'impact et de la probabilité d'un risque.
- ✓ **Disponibilité**
 - Ratio de la durée opérationnelle sur la durée de fonctionnement attendue.
- ✓ **Durée de vie**
 - Période d'utilisation, de vie utile.

Fiabilité - exemple



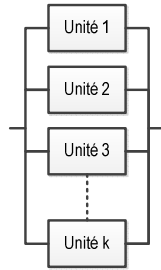
Si la fiabilité est de 89 % pour une entreprise ayant pour mission de produire 1000 unités vendables par semaine. Ceci indique que, pendant 100 semaines :

- A. 89 sem. de réussite (11 sem. avec moins de 1000 unités ou avec temps supplémentaire)
- B. 890 unités vendables en moyenne par semaine



Topologie et criticité

• Système Parallèle



$$R_P = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_k)$$

• Système Série



$$R_S = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \dots \cdot R_k$$

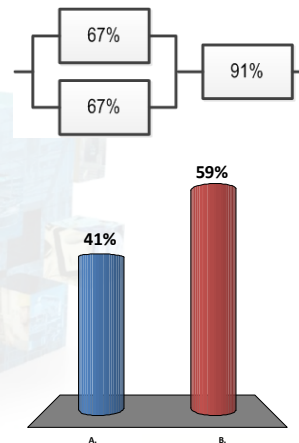
Calcul de la fiabilité Système mixte



Si nous avons un système mixte composé de 2 pompes en parallèle alimentant un cuvier:

Quel système est le plus critique si une seule pompe peut alimenter le cuvier et que la fiabilité de chaque pompe = 67 % et celle du cuvier = 91 % ?

- A. Pompes
- B. Cuvier



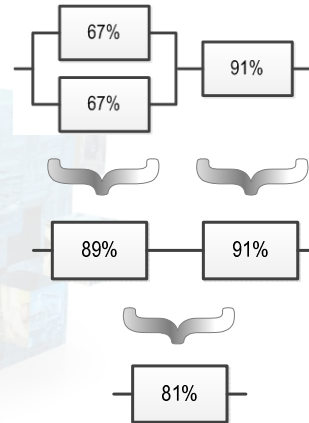
Calcul de la Fiabilité Système mixte – Réponses



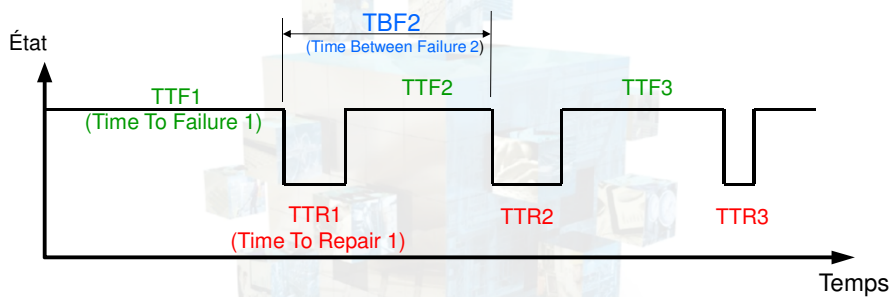
Si nous avons un système mixte composé de 2 pompes en parallèle alimentant un cuvier :

Quel système est le plus critique si une seule pompe peut alimenter le cuvier et que la fiabilité de chaque pompe = 67 % et celle du cuvier = 91 %?

- A. Pompes
- B. Cuvier



Disponibilité



$$Disp. = \frac{\text{Moyenne (TTFs)}}{\text{Moyenne (TTFs)} + \text{Moyenne (TTRs)}} = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

Notations

- ✓ **MTTF** (Mean Time To Failure)
 - Moyenne des temps « jusqu'à la défaillance »
 - Moyenne des temps de fonctionnement
- ✓ **MTTR** (Mean Time To Repair)
 - Moyenne des temps techniques de réparation
- ✓ **MTBF** (Mean Time Between Failure)
 - $MTTF + MTTR$
- ✓ **MDT** (Mean Down Time)
 - $MTTR + \text{Diagnostic/logistique/recherche de pièces/Nettoyage avant redémarrage}$

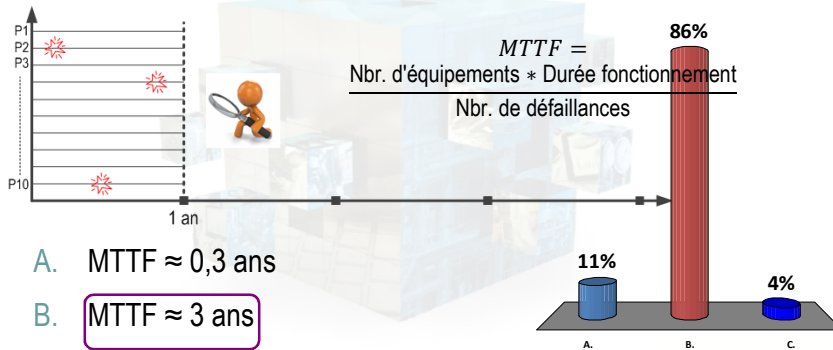
Calcul du MTTF

$$MTTF = \frac{\text{Nbr. d'équipements} * \text{Durée fonctionnement}}{\text{Nbr. de défaillances}}$$

Calcul du MTTF



Une entreprise utilise 10 pompes du même modèle. Lors de la dernière année, il y a eu 3 bris au total. Quel est le MTTF de ce modèle de pompe ?



- A. MTTF ≈ 0,3 ans
- B. MTTF ≈ 3 ans
- C. MTTF ≈ 30 ans

© STI Maintenance inc. 2014

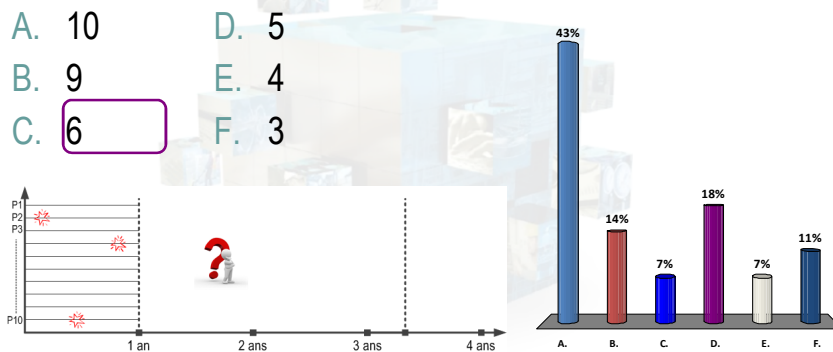
20

sti maintenance

Durée de vie



Combien de défaillances surviendront avant 3,3 ans ?



- A. 10
- B. 9
- C. 6
- D. 5
- E. 4
- F. 3

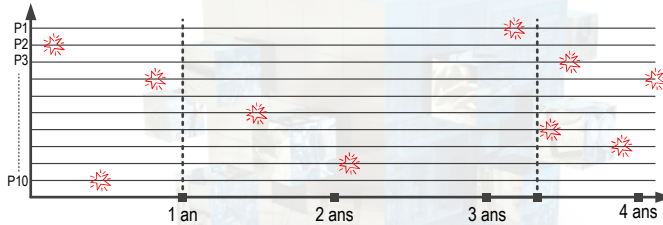
© STI Maintenance inc. 2014

21

sti maintenance

Réponse

- ✓ 6 défaillances avant 3,3 ans
- ✓ 4 défaillances après 3,3 ans

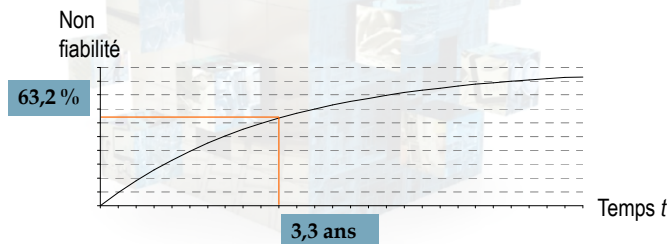


© STI Maintenance inc. 2014

22

Origine du 6 sur 10

- ✓ Fiabilité avec taux de défaillance constant ($1/MTTF$)
 - Non Fiabilité $1 - R(t) = 1 - e^{-t/MTTF}$
 - Non fiabilité entre 0 et 3.3 ans $1 - R(3.3) = 1 - e^{-3.3/MTTF}$

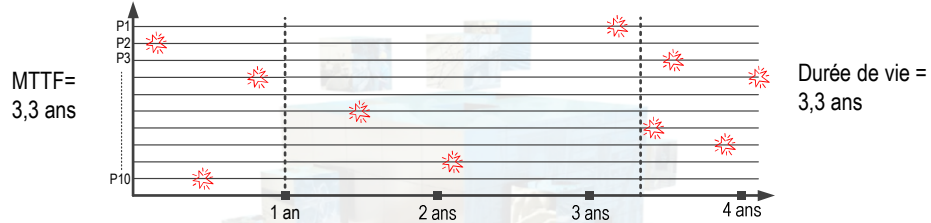


© STI Maintenance inc. 2014

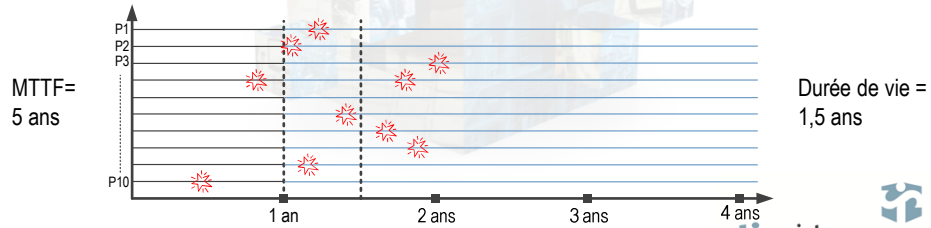
23

Limites du MTTF

✓ 10 pompes Modèle A



✓ 10 pompes Modèle B



© STI Maintenance inc. 2014

25



Explications

✓ Pompes Modèle A



✓ Pompes Modèle B

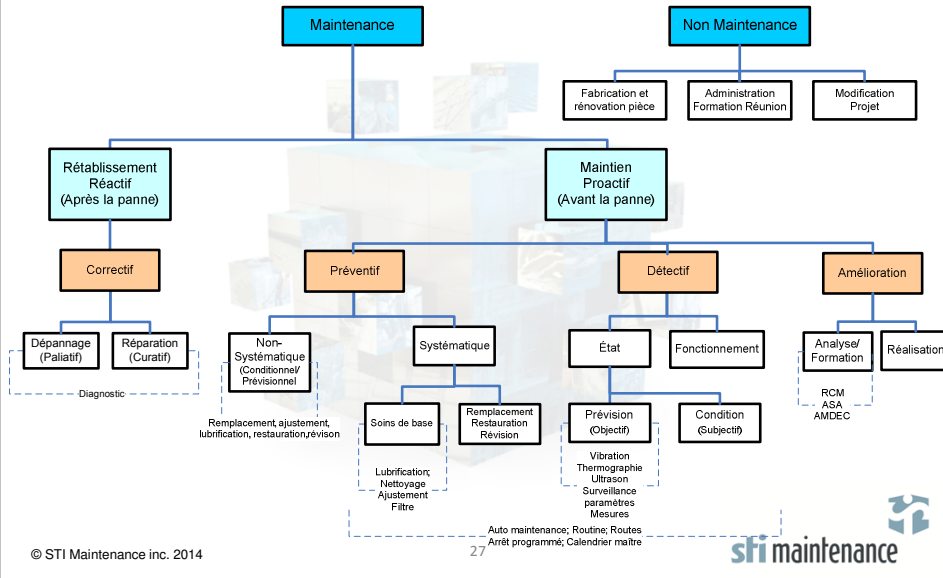


© STI Maintenance inc. 2014

26



Quelles sont les principales stratégies de maintenance que l'on peut mettre en place pour améliorer la fiabilité ?



Quelles sont les **critères** à considérer dans le choix de la **stratégie de maintenance** à mettre en place pour minimiser les effets de la non fiabilité?



Étude de cas #1

Maintenance corrective (non-planifiée)

Calculer le **coût financier** annuel pour le changement de roulements d'une pompe centrifuge pour une opération **jusqu'à la défaillance**.

➤ **Cas d'affaire**

- Taux horaire mécanicien = 25 \$ / heure
- Perte de production = 7 heures @ 1000 \$ / heure
- Dommages à l'équipement = 1 arbre neuf @ 2000 \$

▪ **Fiabilité et réparation**

- MTBF = 3 ans
- Durée des travaux pour effectuer la réparation = 2 hommes x 6 heures
- Pièces d'usures = 2 roulements @ 250 \$ / chacun

▪ **Choix de réponses**

A) 1 225 \$

B) 2 800 \$

C) 3 265 \$

Étude de cas #1

Maintenance corrective

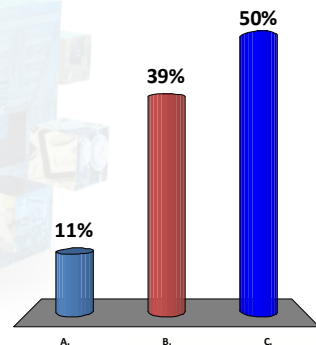


Quel est le coût de la stratégie « Opérer jusqu'à la défaillance (Run to Failure) » :

A. 1 225 \$ / année

B. 2 800 \$ / année

C. 3 265 \$ / année



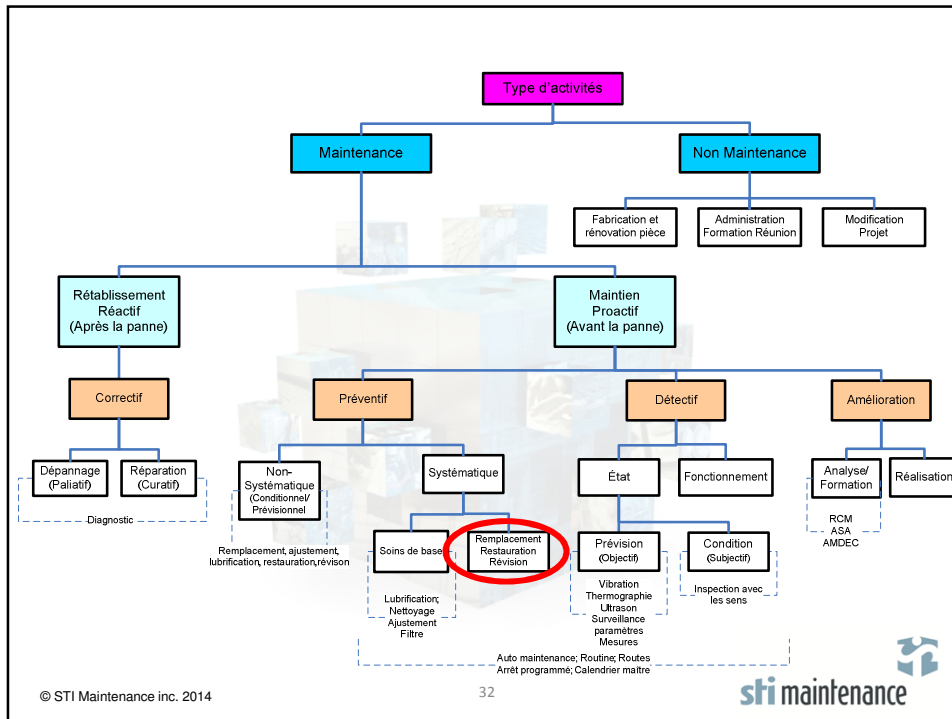
Résumé coût financier Procédure de maintenance

| Description : Pompe centrifuge – défaillance des roulements | | | | | | MTBF = 3 ans | |
|--|--|---------------------------|-------|-------|--------|----------------|---------------|
| Procédure Maintenance | | A | B | C | D | E | F |
| Maintenance Corrective non-planifié | | 0,333 | 800\$ | 267\$ | 2331\$ | 667 \$ | \$3265 |
| Maintenance Préventive systématique (AMPS) | | | | | | | |
| Maintenance Prévisionnelle Objective (analyse de vibration) | | | | | | | |
| Légende | | Calcul | | | | Rép | |
| A = Nombre de défaillances / année A = 1 / MTBF | | A = 1 / 3 | | | | 0,333 | |
| B ₁ = Coûts de la main d'oeuvre directe d'une réparation B ₁ = Taux horaire (\$) x Nbr homme x Heure travaillée | | 25 \$x 2 x 6 | | | | 300 \$ | |
| B ₂ = Coûts des pièces d'usure d'une réparation B ₂ = Pièces d'usure (\$) | | 2 x 250 \$ | | | | 500 \$ | |
| B = Coût pièces d'usures et main d'oeuvre d'une réparation B = B ₁ + B ₂ | | 300 \$ + 500 \$ | | | | 800 \$ | |
| C = Coût de maintenance directe / année (\$) C = A x B | | 0,333 x 800 \$ | | | | 267 \$ | |
| D = Coûts des pertes de production / année D = A x Temps d'un arrêt production (heures) x coût (\$ /heure) | | 0,333 x 7 x 1000 \$/heure | | | | 2331 \$ | |
| E = Coûts des dommages à l'équipement E = A x Coûts des dommages (Pièces et main d'oeuvre) (\$) | | 0,333 x 2000 \$ | | | | 667 \$ | |
| F = Coût financier entreprise / année F = C+D+E + coûts investissement (\$) | | 267 \$ + 2331 \$ + 667 \$ | | | | 3265 \$ | |

© STI Maintenance inc. 2014

31

sti maintenance



© STI Maintenance inc. 2014

32

sti maintenance

Étude de cas #2

Préventif systématique (période fixe)

On demande de calculer le **coût financier annuel** de l'entreprise pour le changement de roulements **aux 2 ans** d'une pompe centrifuge;

- **Cas d'affaire**
 - Taux horaire mécanicien = 25 \$ / heure;
 - Les pertes de production sont négligeables (travail réalisé sur arrêt planifié);
 - Durée des travaux pour effectuer la réparation = 2 hommes x 3 heures;
 - Aucun dommage à l'équipement.
- **Fiabilité et réparation**
 - Comportement usure dominant (Taux de panne croissant avec le temps);
 - Remplacement systématique des 2 roulements aux 2 années (MTBM = 2);
 - Pièces d'usures = 2 roulements @ 250 \$ / chacun;
 - Le risque de défaillance après remplacement n'est pas considéré.
- **Choix de réponses**

A) 650 \$ B) 325 \$ C) 800 \$

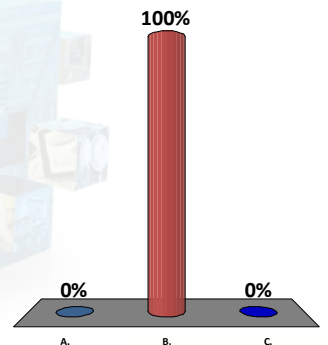
Étude de cas #2

Préventif systématique (période fixe)



Quel est le coût de la stratégie de maintenance Préventive (remplacement systématique à période fixe) :

- A. 650 \$ / année
- B. 325 \$ / année
- C. 800 \$ / année



Résumé Coût financier Procédure de maintenance

| Description : Pompe centrifuge – défaillance des roulements | | | | | | MTBF = 3 ans |
|--|-------|-------|--|--------|-------|--------------|
| Procédure Maintenance | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F |
| Maintenance Corrective non-planifié | 0.333 | \$800 | \$267 | \$2331 | \$667 | \$3265 |
| Maintenance Préventive systématique | 0.5 | \$650 | \$325 | \$0 | \$0 | \$325 |
| Maintenance Prévisionnelle Objective (analyse de vibration) | | | | | | |
| Légende | | | Calcul | | | Rép |
| A = Nombre de défaillances / année $A = 1 / MTBF$ $A_{MPS} = 1 / MTBM$ | | | A = | | | 0.5 |
| B ₁ = Coûts de la main d'oeuvre directe d'une réparation B ₁ = Taux horaire (\$) x Nbe homme x Heure travaillée | | | \$25 x 2 x 3 | | | \$150 |
| B ₂ = Coûts des pièces d'usure d'une réparation B ₂ = Pièces d'usure (\$) | | | 2 x \$250 | | | \$500 |
| B = Coût pièces d'usures et main d'oeuvre d'une réparation B = B ₁ + B ₂ | | | \$150 + \$500 | | | \$650 |
| C = Coût de maintenance directe / année (\$) C = A x B | | | 0.5 x \$650 | | | \$325 |
| D = Coûts des pertes de production / année D = A x Temps d'un arrêt production (heures) x coût (\$ /heure) | | | Travaux réalisés sur un arrêt planifié | | | \$0 |
| E = Coûts des dommages à l'équipement E = A x Coûts des dommages (Pièces et main d'oeuvre) (\$) | | | Aucun dommage | | | \$0 |
| F = Coût financier entreprise / année F = C+D+E + coûts investissement (\$) | | | \$325 + \$0 + \$0 | | | \$325 |

© STI Maintenance inc. 2014

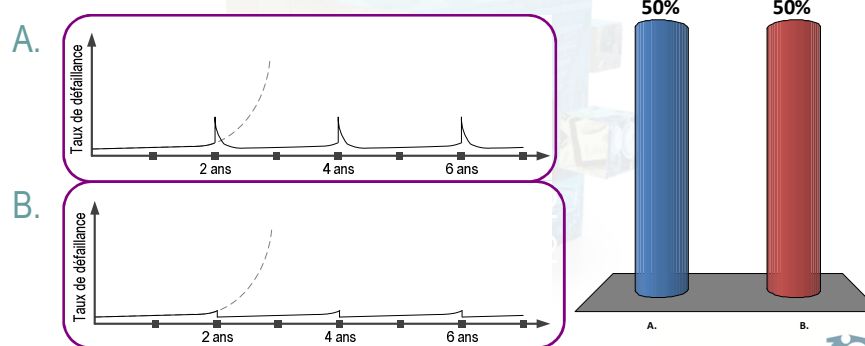
35

sti maintenance

Comportement des défaillances



Quel est l'impact de la maintenance préventive systématique sur le risque (taux) de défaillance ?



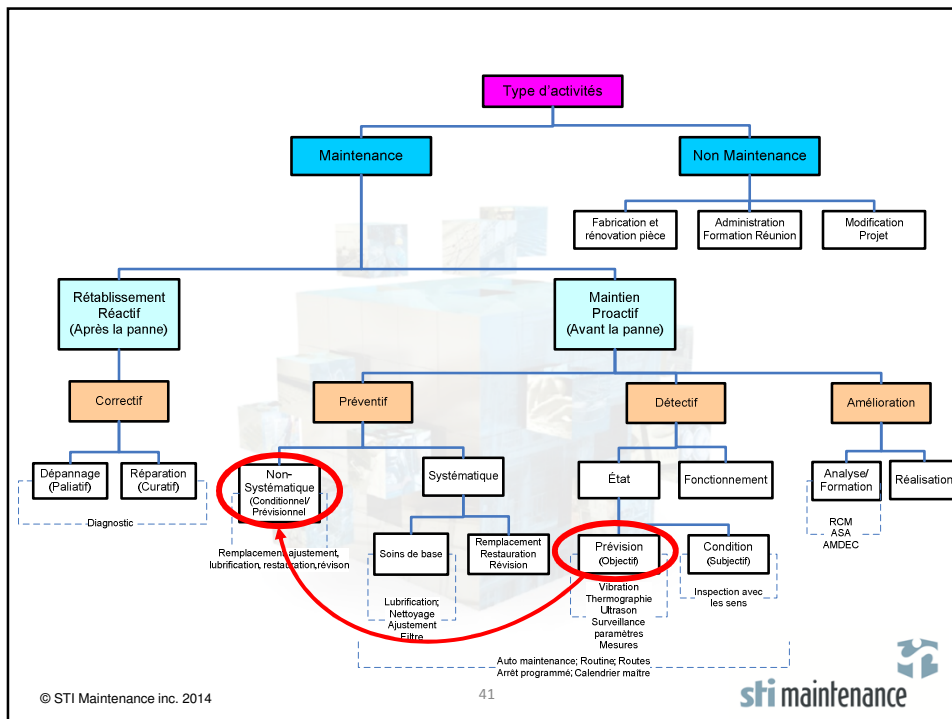
© STI Maintenance inc. 2014

38

sti maintenance

Principales causes de mortalité infantile

- Mauvaise conception;
- Mauvaise qualité de fabrication;
- Installation incorrecte;
- Maintenance inutile ou trop invasive;
- Manque de maîtrise du personnel d'opération et de maintenance;
- Écart entre la procédure de réparation appliquée et celle recommandée par le fabricant;
- Tolérance hors norme lors de l'alignement moteur /équipement rotatif;
- Pièces pré-usinées hors tolérance;
- Réparation équipement avec des pièces de remplacement de moindre qualité que les pièces d'origine;
- Contamination des roulements lors de la réparation;
- Mauvaise lubrification des pièces rotatives.



Étude de cas # 3

Maintenance prévisionnelle (analyse vibration)

Calculer le coût financier annuel pour le changement de roulements d'une pompe centrifuge selon les premiers signes de défaillance enregistrés.

- **Cas d'affaire**
 - Taux horaire mécanicien = 25 \$ / heure
 - Les pertes de production sont négligeables (travail réalisé sur arrêt planifié);
 - Durée des travaux pour effectuer la réparation = 2 hommes x 3 heures
 - Aucun dommage à l'équipement
- **Fiabilité et réparation**
 - Assumer le même MTBF que l'opération jusqu'à défaillance soit 3 ans
 - Pièces d'usure = 1 roulement @ 250 \$ / chacun
 - Coût d'achat capteurs de vibration surveillance en continu 1000 \$, dépréciation 10 ans.
 - Coût main-d'œuvre pour interpréter lecture 1 heure/ année @ 25 \$
- **Choix de réponses**
 - A) 650 \$
 - B) 400 \$
 - C) 258 \$

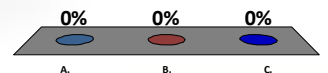
Étude de cas #3

Stratégie prévisionnelle objective



Quel est le coût de la stratégie de Maintenance prévisionnelle objective (analyse de vibration) ?

- A. 650 \$ / année
- B. 400 \$ / année
- C. 258 \$ / année



Résumé Coût financier Procédure de maintenance

| Description : Pompe centrifuge – défaillance des roulements | | | | | | MTBF = 3 ans |
|---|-------|-------|---|--------|------------------|-------------------------|
| Procédure Maintenance | A | B | C | D | E | F |
| Maintenance Corrective non-planifié | 0,333 | 800\$ | 267\$ | 2331\$ | 667\$ | 3265\$ |
| Maintenance Préventive systématique (A _{MPS}) | 0,5 | 650\$ | 325\$ | 0 | 0 | 325\$ |
| Maintenance Prévisionnelle Objective (analyse de vibration) | 0,333 | 400\$ | 133\$ | 0 | 0 | 158\$ +100\$ |
| Légende | | | Calcul | | Rép | |
| A = Nombre de défaillances / année $A = 1 / \text{MTBF}$ $A_{\text{MPS}} = 1 / \text{MTBM}$ | | | $A = 1 / 3$ $A_{\text{MPS}} =$ | | 0,333 | |
| B ₁ = Coûts de la main d'œuvre directe d'une réparation $B_1 = \text{Taux horaire (\$)} \times \text{Nbe homme} \times \text{Heure travaillée}$ | | | 25 \$ x 2 x 3 | | 150 \$ | |
| B ₂ = Coûts des pièces d'usure d'une réparation $B_2 = \text{Pièces d'usure (\$)}$ | | | 1 x 250 \$ | | 250 \$ | |
| B = Coût pièces d'usures et main d'œuvre d'une réparation $B = B_1 + B_2$ | | | 150 \$ + 250 \$ | | 400 \$ | |
| C = Coût de maintenance directe / année (\$) $C = A \times B$ | | | 0,333 x 400 \$ | | 133 \$ | |
| D = Coûts des pertes de production / année $D = A \times \text{Temps d'un arrêt production (heures)} \times \text{coût (\$/heure)}$ | | | Travaux réalisés sur un arrêt planifié | | 0 \$ | |
| E = Coûts des dommages à l'équipement $E = A \times \text{Coûts des dommages (Pièces et main d'œuvre) (\$)}$ | | | Aucun dommage | | 0 \$ | |
| F = Coût financier entreprise / année $F = C+D+E + \text{coûts investissement (\$)}$ | | | 133 \$ + 0 \$ + 0 \$ + 25 \$ Investissement 1000 \$ / 10 | | 158 \$ 100 \$ | |

© STI Maintenance inc. 2014

44

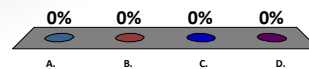
sti maintenance

Maintenance prévisionnelle



La fréquence des tâches de maintenance prévisionnelle devrait être en fonction :

- De la fréquence des défaillances et/ou la criticité de l'équipement.
- Du développement de la défaillance (également connue sous le nom de « délai d'exécution de la défaillance » ou « intervalle P-F »).
- Selon la main-d'œuvre disponible.
- Selon les directives du responsable de la production.

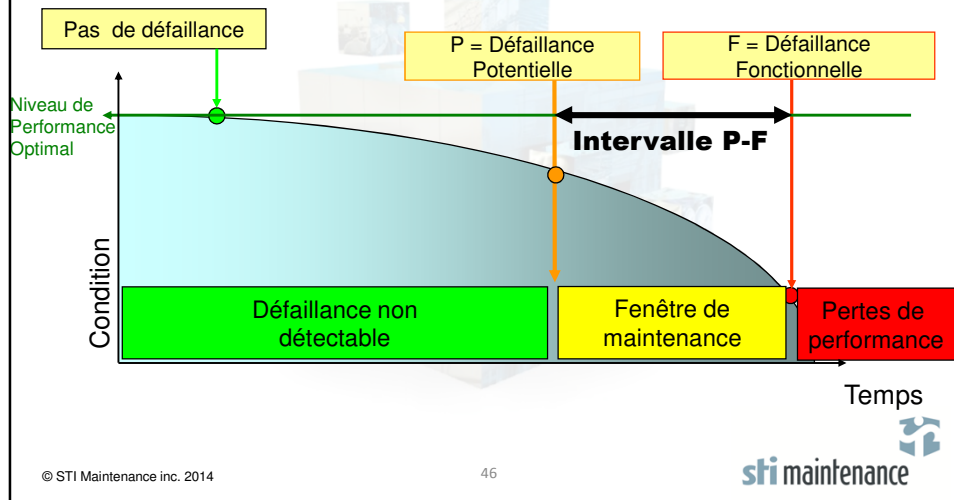


© STI Maintenance inc. 2014

45

sti maintenance

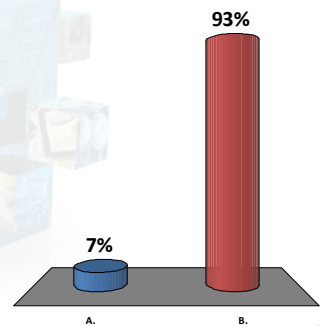
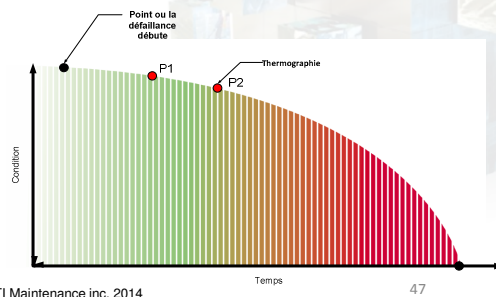
Le processus de dégradation



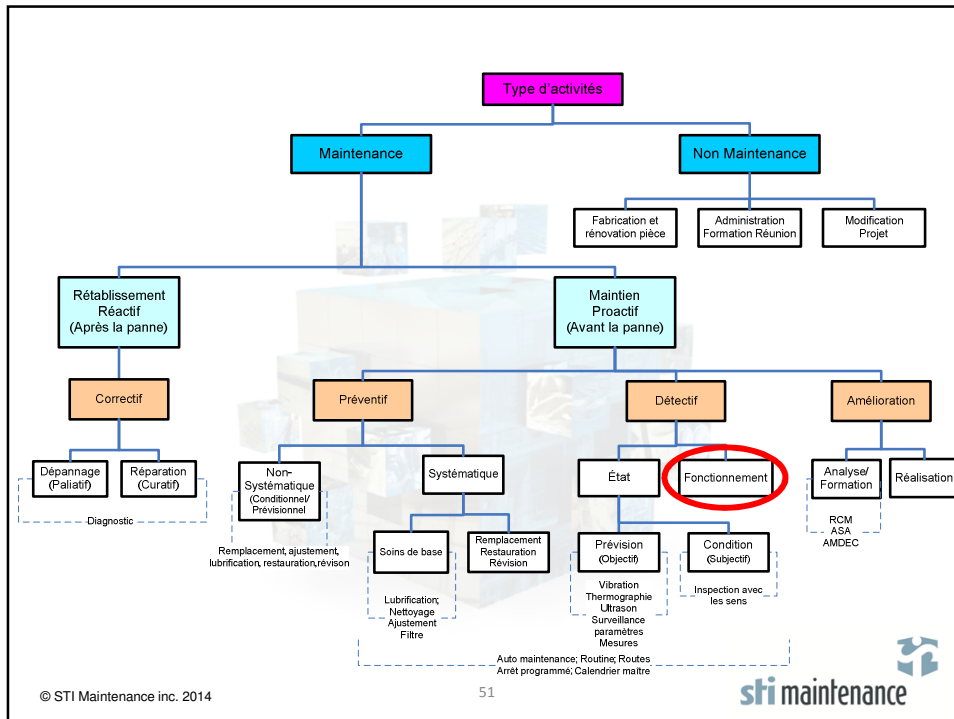
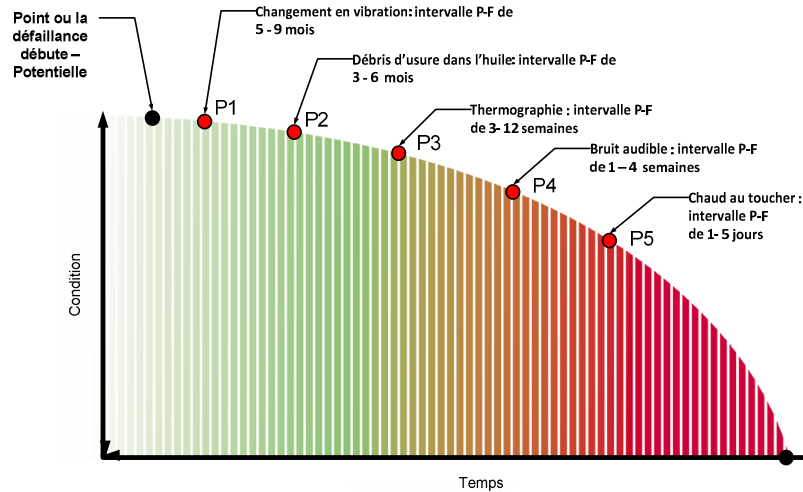
Techniques prévisionnelles

Surveillance de la dégradation d'un roulement, quelle technique en P1 :

- A. Chaud au toucher
- B. Analyse de vibration



Techniques prévisionnelles et P-F



Défaillance cachée

- ✓ Défaillance qui n'est pas apparente à l'opérateur;
- ✓ Défaillance sans effet immédiat car elle sert à protéger une autre défaillance;
- ✓ Lorsque la défaillance à protéger survient et que le système de protection est défaillant, on se retrouve avec une défaillance multiple.
 - Sécurité = Haute-haute limite sur un treuil;
 - Environnement = Limite de haut niveau sur un cuvier

Détectif de fonctionnement (défaillances cachées)

- ✓ Importance de la faire même si « long » à tester.
- ✓ Calcul de l'intervalle de détection

Taux de défaillances multiples = Taux de défaillance de la fonction protégée x Taux de défaillance du dispositif de protection x La moitié de l'intervalle de détection du dispositif de protection

$$P_{DM} = P_A \times P_B \times (0,5 \times ID)$$

Défaillance cachée et intervalle de détection

Il y a 10 convoyeurs dans l'usine, chacun avec un bouton d'arrêt d'urgence;

En 5 ans, 2 interrupteurs ont été trouvés défectueux lors d'une inspection;

Durant cette même période (5 ans), un des convoyeurs a eu 3 situations d'urgence (utilisation du bouton d'arrêt d'urgence par les employés);

L'usine fait inspecter les mécanismes d'arrêt d'urgence 1 fois par année;

Quel est le risque assumé annuellement ?

Choix de réponses

A) Aucun risque

B) 1%

C) 20 %

$$P_{DM} = P_A \times P_B \times (0,5 \times ID)$$

Défaillance cachée et intervalle de détection

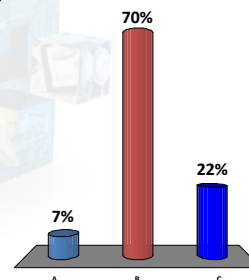
La pratique en cours dans l'usine est d'inspecter les mécanismes d'arrêt d'urgence annuellement.

Annuellement, quel est le risque implicitement assumé en opérant le convoyeur d'entrée ?

A. ≈Aucun risque

B. ≈1 %

C. ≈20 %



Réponse

- $P_A = 3 / 5 = 0,6$

- $P_B = 2 / (5 * 10) = 0,04$

- $ID = 1 \text{ an}$

- $P_{DM} = 1,2 \% / \text{an}$

$$P_{DM} = P_A \times P_B \times (0,5 \times ID)$$

$$P_{DM} = 0.6 \times 0.04 \times (0,5 \times 1)$$

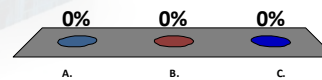
Défaillance cachée et intervalle de détection

Quelle fréquence de détection permettrait de réduire le risque à 1/1000 par an ?

A. 1 semaine

B. 1 mois

C. 6 mois



Réponse

- $P_A = 3 / 5 = 0,6$
 - $P_B = 2 / (5 * 10) = 0,04$
 - $P_{DM} = 0,1 \% / \text{an}$
 - $ID = 0,083 \text{ an (1 mois)}$
- $P_{DM} = P_A \times P_B \times (0,5 \times ID)$
- $0.001 = 0.6 \times 0.04 \times (0,5 \times ID)$

La performance: Ça se mesure! Objectif: S'améliorer

- ✓ **Indicateurs résultats d'usine**
 - Taux de rendement global (TRG)
 - Productivité maintenance (TPV / heures maintenance)
 - Compétitivité maintenance (TPV / 1000 \$ entretien)
- ✓ **Indicateurs actions maintenance**
 - Objectif: Mesurer la gestion de notre maintenance
 - Bris de cédule
 - Nombre de bons de travail actifs
 - Performance planification
 - Etc.
 - Objectif: Mesurer l'efficacité de nos interventions
 - Niveau global de vibration des équipements
 - Temps moyen avant bris par équipement (MTTF)
 - Taux de réalisation de l'entretien préventif (TREP)
 - Etc.

Normes de classe mondiale

| Indicateurs de performances | Typique | Vous | Objectif |
|--|-------------|------|----------|
| T.R.G. (O.E.E.) | 40 % @ 70 % | | > 85 % |
| Taux disponibilité | ~ 70 % | | > 90 % |
| Taux de qualité | ~ 90 % | | > 99 % |
| Urgences | 40 % | | < 5 % |
| Maintenance planifiées et ordonnancées | 20 % | | > 85 % |
| Nombre de défaillances équipements critiques analysées | < 1 % | | 100 % |
| Quantité des travaux recommencés | 5 % @ 40 % | | < 1 % |
| MTBM pompes | | | > 5 ans |
| MTBM moteurs électriques | | | > 10 ans |

Résumé de la démarche

- ✓ Comprendre et évaluer les conséquences des défaillances (production, santé-sécurité, etc.);
- ✓ Lister les équipements de l'entreprise ayant eu des défaillances avec conséquences sur l'entreprise;
- ✓ Établir la fiabilité ou le MTBF de ces équipements;
- ✓ Prioriser l'analyse des équipements selon leur criticité et leur fiabilité;
- ✓ Analyser un équipement critique identifié :
 - Identifier les modes de défaillances et estimer leur coût financier annuel;
 - Calculer le coût financier annuel des stratégies de maintenance pouvant s'appliquer selon les données disponibles ou estimées.
 - Méthodes d'analyse :
 - RCM, RCM inverse, AMDEC, Analyse RAM
- ✓ Présenter le programme de maintenance optimisé pour approbation
- ✓ Mettre en place des indicateurs de suivi de la réalisation du programme

Conclusion

- ✓ En travaillant méthodiquement sur **les stratégies de maintenance** pour minimiser les coûts liés aux pannes, quel projet peut avoir un RSI plus élevé que le dollar économisé sur une panne évitée ?
- ✓ Travailler avec méthode, changera la perception de la maintenance dans votre organisation. Elle ne sera plus considérée comme un simple centre de coût mais comme un centre de profit indirect à grand potentiel.