

ORGANISATION ET SUIVI DE LA MAINTENANCE

*Suite et support du cours NI872. *

- LA MAINTENABILITE et DISPONIBILITE -

A- LA MAINTENABILITE

I. DEFINITION :

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

Maintenabilité = être rapidement dépanné

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

A partir de ces définitions, on distingue :

- **La maintenabilité intrinsèque** : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc).
- **La maintenabilité prévisionnelle** : elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.
- **La maintenabilité opérationnelle** : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la MTTR ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité).

I.1 Commentaires :

La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable. Les « moyens prescrits » englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillages, outillages, etc.

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

Facteurs liés à l'EQUIPEMENT	Facteurs liés au CONSTRUCTEUR	Facteurs liés à la MAINTENANCE
<ul style="list-style-type: none"> - documentation - aptitude au démontage - facilité d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - conception - qualité du service après-vente - facilité d'obtention des pièces de rechange - coût des pièces de rechange 	<ul style="list-style-type: none"> - préparation et formation des personnels - moyens adéquats - études d'améliorations (maintenance amélioratives)

Tableau 1 : Les différents facteurs d'équipement de maintenabilité

Remarque :

On peut améliorer la maintenabilité en :

- Développant les documents d'aide à l'intervention
- Améliorant l'aptitude de la machine au démontage (modifications risquant de coûter cher)
- Améliorant l'interchangeabilité des pièces et sous ensemble.

I.2. Maintenabilité et maintenance :

Pour un technicien de maintenance, la maintenabilité est la capacité d'un équipement à être rétabli lorsqu'un besoin de maintenance apparaît. L'idée de « facilité de maintenir » se matérialise par des mesures réalisées à partir des durées d'intervention.

Il est évident que la maintenabilité intrinsèque est le facteur primordial pour que la maintenance soit performante sur le terrain. En effet, une amélioration ultérieure de la maintenabilité initiale n'est jamais chose facile.

Il est donc indispensable que la maintenance sache définir ses besoins et les intégrer au cahier des charges d'un équipement nouveau afin que celui-ci puisse être facilement maintenable.

I.3. Maintenabilité et disponibilité :

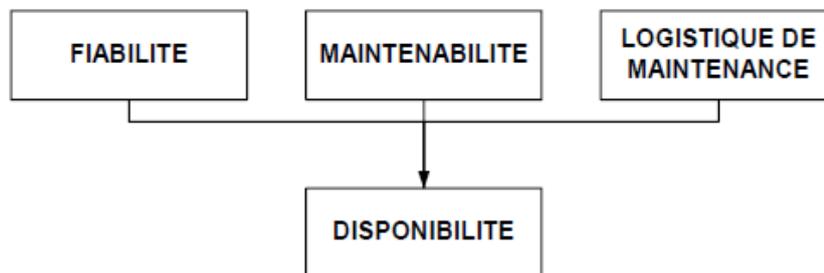


Figure 1 : Organigramme des composantes de la disponibilité d'un équipement

Le schéma ci-dessus met en évidence :

- Que la maintenabilité est un des leviers d'action pour améliorer la disponibilité et donc la productivité d'un équipement.
- Que la fiabilité et la maintenabilité sont 2 notions parallèles de même importance (et dont les démarches d'analyse sont semblables).

I.4. Construction de la maintenabilité intrinsèque :

La construction de cette maintenabilité doit prendre en compte un certain nombre de critères listés en pages suivantes et intégrés dès la phase de conception d'un nouvel équipement.

- Modularité et interchangeabilité :

La conception modulaire d'un équipement repose sur l'idée de la simplification de sa fabrication, mais aussi de la simplification de sa maintenance grâce à l'interchangeabilité des modules.

La facilité de l'interchangeabilité (carte électronique par exemple) est un facteur favorisant le transfert de tâches vers les opérateurs, dans le cas de la TPM.

Le module de remplacement peut provenir :

- d'un stock interne (module neuf ou remis en stock après réparation) ;
- d'un stock externe (module ou composant tenu en stock chez le fournisseur) ;
- du bien lui-même (par échange de deux éléments constitutifs, redondance) ;
- d'un bien identique hors service ou déclassé (cannibalisation) ;
- d'un bien différent comportant le même module;
- d'un atelier de fabrication. Dans le cas d'un composant, il doit être fabriqué dans le respect des spécifications et des tolérances normalisées (joint d'étanchéité, coussinet de palier, etc).

Cela offre une gamme large de solutions pour organiser une intervention. L'interchangeabilité suppose le respect des normes (ajustements, filetages, produits, lubrifiants, raccords, connexions, etc).

➤ **Standardisation :**

Elle vise à la simplification par réduction aussi bien en matière de fabrication que de logistique et de maintenance. En maintenance, elle s'exerce à tous les niveaux techniques et commerciaux, en permettant la réduction des stocks aussi bien que la rapidité et la simplicité des interventions. Prenons quelques exemples :

- Les équipements : il est plus facile de maintenir 10 machines de même type que de types différents.
- Les technologies : il est plus facile de se tenir à un modèle d'automate et de former les techniciens à sa programmation que de multiplier les formations.
- Les modules : utiliser 20 moteurs électriques ou 20 pompes centrifuges identiques offre plus de facilité d'organisation de la maintenance que s'ils étaient tous différents.
- Les outillages : démonter tout un module avec une clé de 13 est plus simple que d'avoir à inventorier toute sa caisse à outils.
- Les composants élémentaires : quincaillerie, visserie, graisseurs, robinets, trappes de visites, interrupteurs sont autant d'éléments qu'il est facile de standardiser.
- Les lubrifiants et leur fournisseur : ne pas suivre les préconisations par références de marque, qui conduiraient à une profusion de fûts. Il existe des tableaux d'équivalence et il suffit de 5 types d'huile et de 2 types de graisse pour assurer la lubrification d'un site industriel.
- Les procédures : standardiser leur présentation facilite l'exploitation.
- Les fournisseurs : un équilibre est à trouver entre le monopole accordé à un fournisseur privilégié et la multiplication des sources.

Notons que la normalisation est un outil de standardisation, qui elle-même facilite l'interchangeabilité.

➤ **Accessibilité :**

Elle est caractérisée par la rapidité avec laquelle un élément peut être atteint. Elle doit être d'autant mieux maîtrisée que la fréquence probable des opérations de maintenance est grande. C'est le cas des filtres, des graisseurs, des points de réglage, de mesure, de surveillance, etc.

Dans certains cas, l'accessibilité peut être définie sur des bases réglementaires touchant à la sécurité (exemple : échafaudage) ou ergonomiques (dimensions de l'ouverture d'un « trou d'homme » ou d'une trappe de visite).

➤ **Aptitude à la pose et à la dépose :**

Elle concerne les modules qui nécessitent un échange standard en préventif ou en cas de défaillance. Elle concerne les liaisons à supprimer pour isoler le module de son ensemble.

Si nous prenons l'exemple d'un groupe moteur électrique / pompe centrifuge : la dépose se rapporte à l'électricité (consignation, accès au bornier, connectique), à l'hydraulique (vannes d'isolement, vidange, boulonnerie des brides), à la mécanique (boulonnerie de la fixation). Des solutions plus ou moins rapides existent pour faciliter chacune de ces opérations de maintenance. Quelques problèmes à optimiser pour améliorer l'aptitude à la pose / dépose

- réduction du nombre de liaisons ;
- Réduction du nombre d'outils à utiliser (standardisation des liaisons) ;
- assurer un pré positionnement à la pose : repères, tétons de centrage, rails de guidage, détrompeurs ;
- absence de réglages, préférable à des réglages longs et délicats ;
- facilité d'accès.

Notons que l'interchangeabilité d'un module se fait souvent en « temps réel » d'indisponibilité de l'équipement, contrairement à sa remise en état réalisée en temps différé. Son aptitude à la dépose est donc un facteur de disponibilité de l'équipement.

➤ **Démontabilité :**

Elle concerne l'accès plus ou moins facile et plus ou moins rapide à des composants potentiellement « fragiles » et inaccessibles lorsque le sous-ensemble est monté. Elle se caractérise par des manoeuvres rapides (portes de visites et capots avec verrous et charnières) demandant un minimum d'outils standards et facilitées par une documentation efficace (perspective éclatée montrant le fractionnement des éléments).

➤ **Défectabilité :**

Elle concerne la réduction des temps de localisation et de diagnostic, principalement pour les PC des équipements. Un logiciel de recherche et de localisation des défauts, les outils d'aide au diagnostic, une supervision, mais aussi un simple voyant ou le repérage des câbles et des points de mesure sont autant d'éléments de réduction des temps d'investigation. La réalisation d'une AMDEC amène le concepteur à évaluer le critère « défectabilité » et à proposer des solutions si nécessaire.

➤ **Autres critères de maintenabilité :**

Tout ce qui peut être intégré à la conception d'un équipement afin de faciliter sa maintenance ultérieure est un critère de maintenabilité. Il en est ainsi pour l'installation de compteurs d'unités d'usage, pour les taraudages permettant la fixation d'un accéléromètre de surveillance vibratoire, pour le repérage visuel des graisseurs, pour la présence d'un anneau d'élingage sur le bâti, etc.

- Le soutien logistique accompagnant l'équipement est également un critère de maintenabilité. Quelques exemples :
 - La possibilité de dépannage par téléphone (télémaintenance) ;
 - La formation des techniciens aux interventions correctives probables ;
- l'obtention rapide de pièces de rechange sans ambiguïté de références ;
 - Le sérieux, la pérennité et la proximité du SAV

La logistique de maintenance est distincte de la maintenabilité. Beaucoup d'éléments de la logistique de maintenance convergent avec les éléments de maintenabilité intrinsèque afin de réduire les temps d'intervention et les coûts d'indisponibilité des équipements industriels.

Citons en particulier :

- La qualité de la documentation technique (DTE),
- La disponibilité des rechanges en stock interne,
- L'efficacité des moyens mis à disposition.

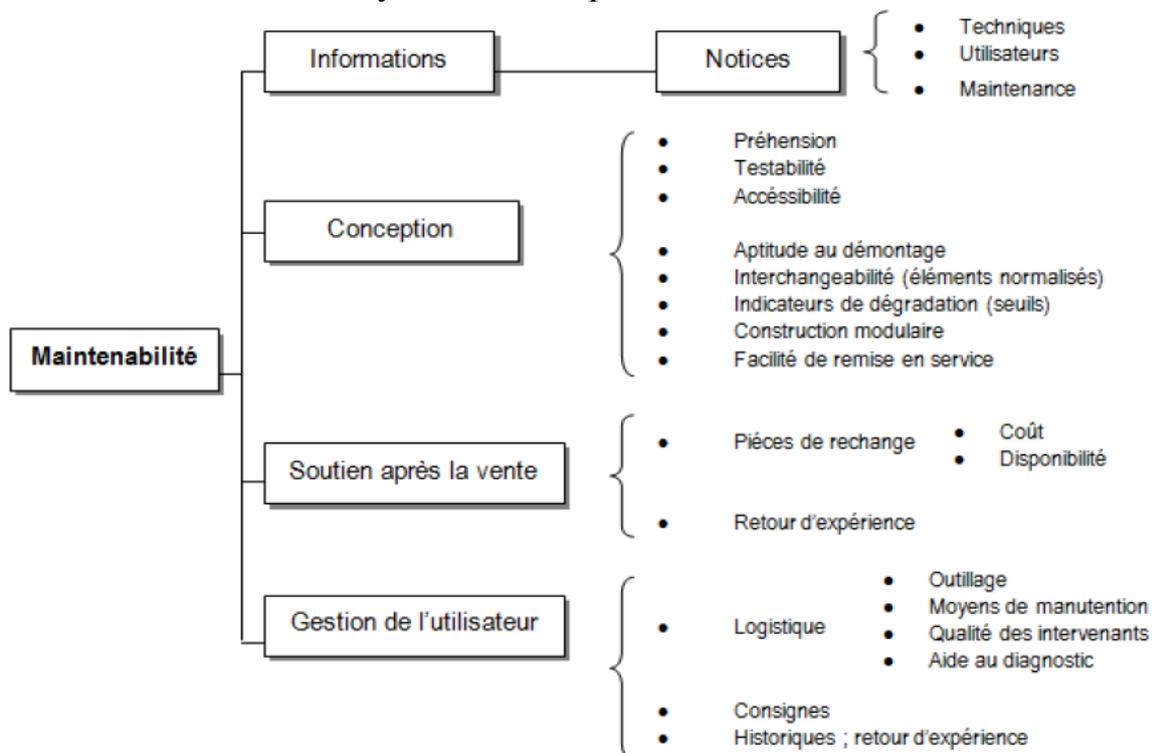


Figure Les critères de maintenabilité

II – ANALYSE DE LA MAINTENABILITE OPERATIONNELLE :

Les analyses de Maintenabilité opérationnelle se justifient, comme pour la fiabilité:

- Dans le cadre d'une évaluation précise de la disponibilité opérationnelle d'un équipement.
- Dans le cadre de la génération de standards de temps en interne afin d'améliorer l'ordonnancement ou de mieux maîtriser certains coûts directs.
- Dans le cadre de la rédaction de clauses de maintenabilité quantifiées pour de futurs équipements.
- Dans le cadre de la recherche d'amélioration permanente de l'efficacité des actions de maintenance.

Les analyses reposent sur le traitement d'échantillons de N durées d'intervention TTR collectées sur l'historique des interventions relatives à un équipement. Comme pour la fiabilité, ces données peuvent se rapporter à un système complet ou se limiter aux seules interventions sur un module sensible en particulier.

III – APPROCHE MATHEMATIQUE DE LA MAINTENABILITE M(t) :

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR (Mean Time To Repair) ou encore Moyenne des Temps Techniques de Réparation.

$$MTTR = \frac{\sum \text{Temps d'intervention pour } n \text{ pannes}}{\text{Nombre de pannes}}$$

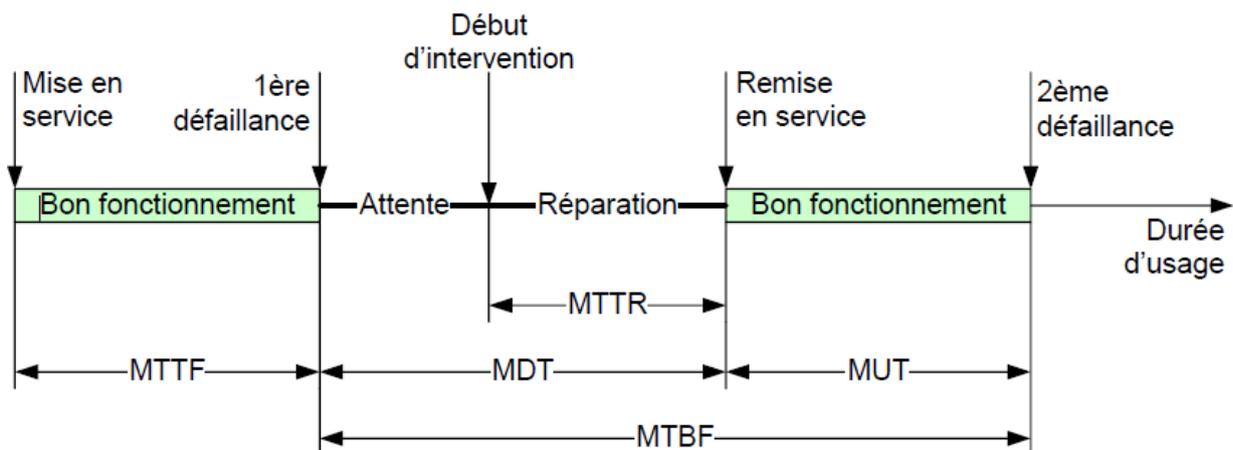


Figure : Schéma des états successifs d'un système réparable

Les N valeurs de l'échantillon des durées d'intervention seront relevées à partir des bons de travaux complétés, puis portés sur l'historique d'un équipement, que ce soit sous une forme « papier » ou « écran ». L'analyse de maintenabilité peut porter sur l'ensemble de l'équipement (afin de déterminer sa disponibilité opérationnelle le plus souvent), ou sur l'un quelconque de ses modules. C'est ainsi que sont élaborés par exemple les barèmes de temps de réparation automobile. Il existe une analogie forte entre les notions de fiabilité et de maintenabilité.

Les démarches d'analyse sont donc semblables :

- La VA : c'est la durée d'intervention corrective ou préventive de maintenance. Elle se note $t = TTR$ (*Time To Repair* ou *Temps Technique de Réparation*), de moyenne **MTTR**.
- La densité de probabilité est notée $g(t)$. La distribution des durées d'intervention est cependant dissymétrique. Les lois de probabilité ajustables à cette dissymétrie sont la loi « *log normale* », la loi « *gamma* » et la loi « *LVE* » des valeurs extrêmes appelée aussi loi de *Gumbel*.
- La fonction de répartition est notée $M(t)$. Elle exprime la probabilité qu'une intervention ait une durée $TTR < t$, ou que le système en panne à $t = 0$

Soit rétabli à t :

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

$$M(t) = \int_0^t g(t) \cdot dt = Prob(TTR < t).$$

- De façon analogue au taux de défaillance, on définit un **taux de réparation $\mu(t)$** tel que :

$$E(t) = MTTR = \tau = 1/\mu$$

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1-M(t)}$$

Les calculs prévisionnels de maintenabilité reposent sur l'hypothèse exponentielle, signifiant ici que le taux de réparation est supposé constant. La répartition des TTR est alors exponentielle.

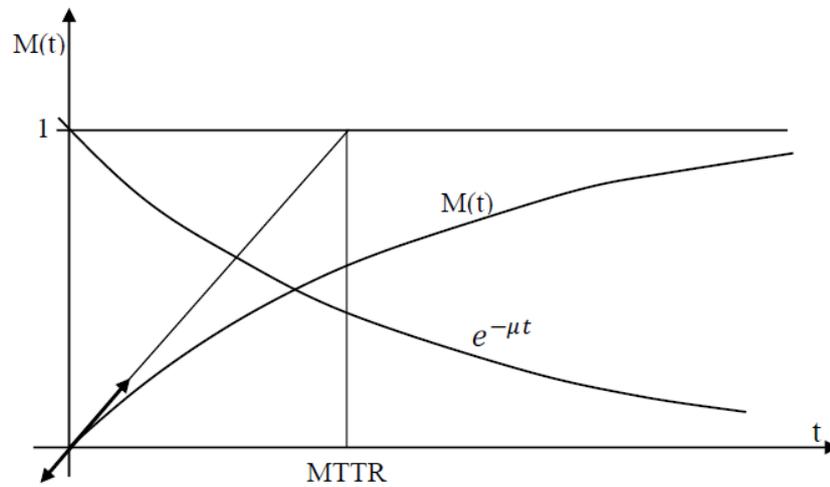


Figure : L’allure de la répartition des TTR

Analogie des analyses de fiabilité et de maintenabilité :

FIABILITE	MAINTENABILITE
Probabilité « durée de bon fonctionnement »	Probabilité de « durée de réparation »
$R(t) = P(T_p > t)$	$M(t) = P(T_R < t)$
Variable aléatoire : temps de fonctionnement	Variable aléatoire : temps de réparation
Densité de probabilité du temps avant défaillance : $f(t)$	Densité de probabilité du temps de réparation : $g(t)$
Fiabilité : $R(t) = \int_t^{+\infty} f(t)dt = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	Maintenabilité : $M(t) = \int_0^t g(t)dt = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t)dt}$
Taux de défaillance $\lambda(t)$: $\lambda(t)dt = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	Taux de réparation $\mu(t)$: $\mu(t)dt = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$



Application : systèmes réparables ou non



Application : systèmes réparables

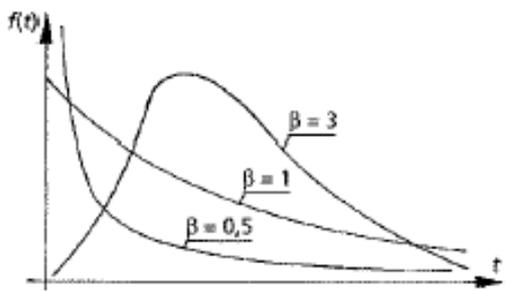
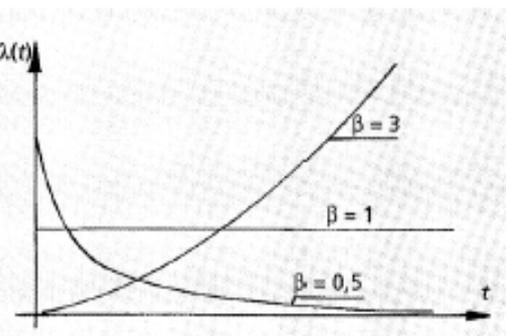
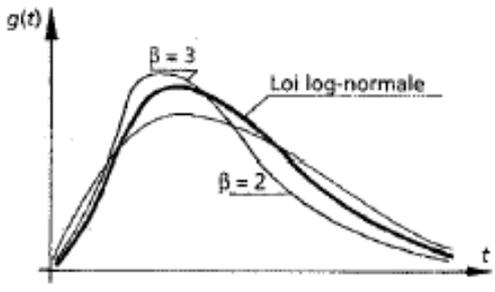
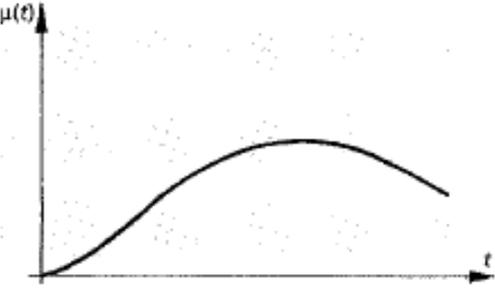
<p>MTBF= mean time between failures :</p> $MTBF = \int_0^{+\infty} t.f(t)dt = \int_0^{+\infty} R(t)dt$	<p>MTTR= mean time to repair :</p> $MTTR = \int_0^{+\infty} t.g(t)dt$
<p>Relation fondamentale:</p> $f(t) = \lambda(t).e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	<p>Relation fondamentale:</p> $g(t) = \mu(t).e^{-\int_0^t \mu(t)dt}$
<p>Lois usuelles: Si $\lambda =$ constant, loi exponentielle: $R(t) = e^{-\lambda t}$ Si $\lambda(t)$ est variable, loi de Weibull (loi à 3 paramètres)</p>  	<p>Lois usuelles: Si $\mu =$ constant, loi exponentielle: $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ Si $\mu(t)$ est variable, loi log-normale (distribution fréquence des durées d'interventions de maintenance), paramètres m et σ</p>  <p>Une modélisation par la loi de Weibull avec $2 < \beta < 3$ est possible</p> 

Tableau 2 : Les systèmes réparables ou non réparables

IV. Exemple d'application :

On possède un échantillon de $N=19$ valeurs issues du retour de bons de travaux en clientèle, dans le cadre d'un contrat de maintenance. Ces interventions correctives se rapportent à un même module fragile de l'équipement à maintenir. Une révision des prix du contrat s'impose. Mais sur quelle base de temps ?

L'objectif est donc de déterminer, à l'aide de la loi LVE la loi de maintenabilité du module et sa MTTR.

- Les TTR relevés et classés par ordre croissant sont les suivants :

Ordre i	TTR (heures)	M (t_i)
1	3.4	
2	3.6	
3	4.3	
4	4.5	
5	4.8	
6	5.5	
7	5.9	
8	6.4	
9	6.8	
10	7.3	
11	8	
12	8.5	
13	9	
14	9.7	
15	10.3	
16	11.5	
17	12.7	
18	13.9	
19	16	

La loi des valeurs extrêmes LVE a pour fonction de répartition :

$$M(t) = e^{-e^{-a(t-u)}} = P(TTR < t)$$

Les paramètres « a » et « u » représentent respectivement l'**inverse de la pente** du « **papier fonctionnel de Gumbel** » et le « **paramètre de localisation** ».

L'espérance mathématique de la loi a pour valeur :

$$E(t) = MTTR = u + \frac{0.5778}{a}$$

▪ **Travail demandé :**

1. Déterminer les valeurs des $M(t_i)$ par approximation des rangs médians et compléter le tableau ci-dessus
2. Porter les couples de points $(M(t_i), TTR_i)$ sur le papier fonctionnel de Gumbel
3. Tracer la droite de régression
4. Déterminer les paramètres « a » et « u » de la loi de Gumbel
5. Etablir la loi de maintenabilité
6. Calculer la MTTR
7. Calculer la probabilité associée à la MTTR
8. Calculer la probabilité de terminer en moins de 11 heures puis en moins de 5 heures
9. Refaire les questions 7 et 8 de manière graphique
- 10. Déterminer le TTR correspondant à une probabilité de 90%**

SOLUTION

▪ **Recherche des paramètres de la loi :**

- ✓ Pour $M(t_i) = 0,37$, on trouve $\gamma_1 = 5,5$ heures
- ✓ Pour $M(t_i) = 0,95$, on trouve $\gamma_2 = 16,6$ heures
- ✓ A $M(t_i) = 0,37$ est associée la variable réduite 0
- ✓ A $M(t_i) = 0,95$ est associée la variable réduite 3

▪ **u = paramètre de localisation = $\gamma_1 = 5,5$ heures**

$$\frac{1}{a} = \text{pente} = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{3 - 0} \Rightarrow a = \frac{3}{\gamma_2 - \gamma_1}$$

$$a = \frac{3}{16,6 - 5,5} = 0,27$$

▪ **Loi de maintenabilité :**

$$M(t) = e^{(-e^{-0,27(t-5,5)})}$$

- **MTTR :**

$$E(t) = \text{MTTR} = u + \frac{0,5778}{a} = 5,5 + \frac{0,5778}{0,27} = 7,64 \text{ heures}$$

- **Probabilité associée à la MTTR :**

$$M(7,64) = e^{(-e^{-0,27(7,64-5,5)})} = 0,57$$

- **Probabilités associées à des TTR de 5h et 11h :**

$$M(5) = e^{(-e^{-0,27(5-5,5)})} = 0,32$$

$$M(11) = e^{(-e^{-0,27(11-5,5)})} = 0,80$$

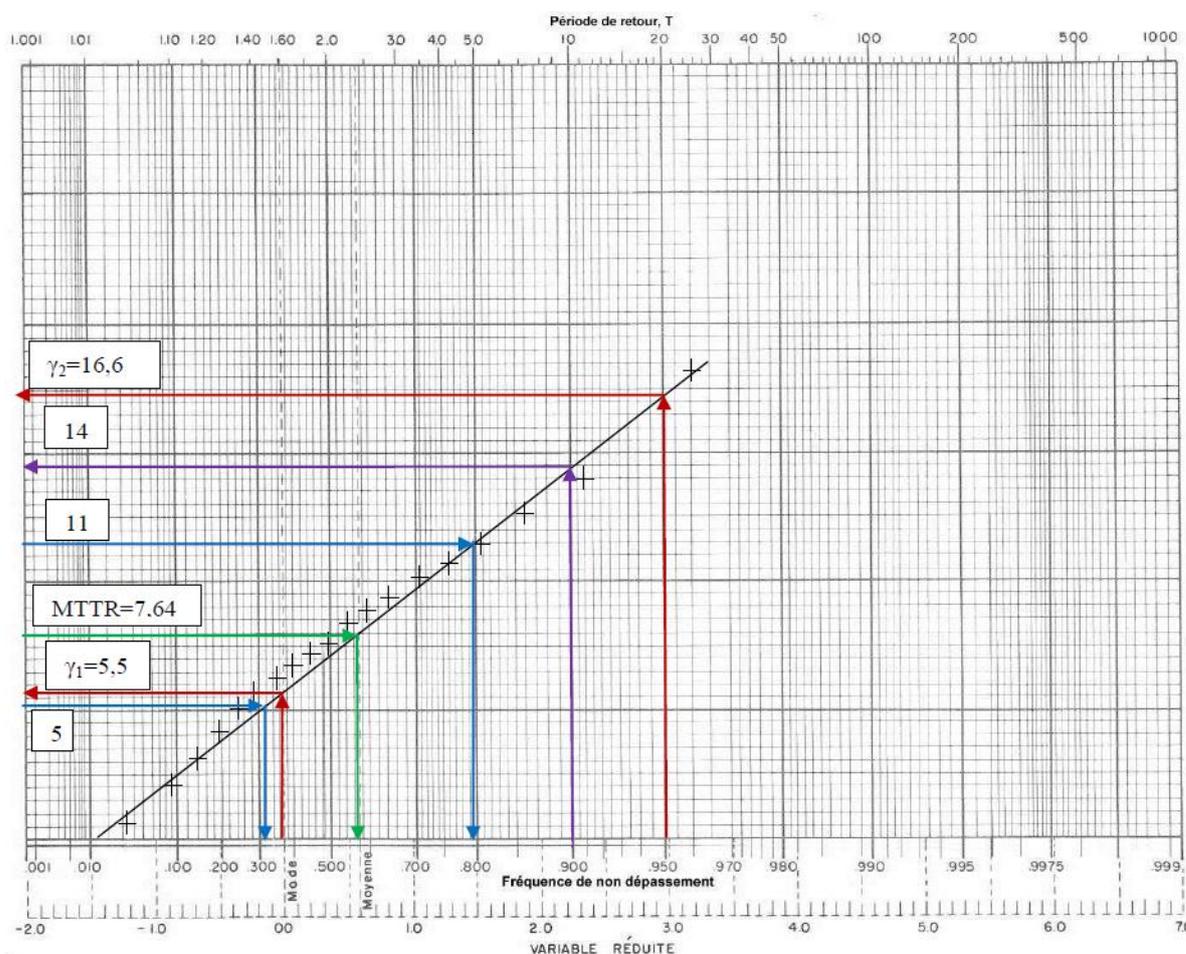
- TTR associé à une probabilité de 90% :

$$M(t) = e^{-e^{-0.27(t-5.5)}} = 90\%$$

$$-e^{-0.27(t-5.5)} = \ln 0.9 \Rightarrow e^{-0.27(t-5.5)} = -\ln 0.9$$

$$-0.27(t - 5.5) = \ln(-\ln 0.9)$$

$$t = \frac{\ln(-\ln 0.9)}{-0.27} + 5.5 = 13.83$$



Nota :

- Le tracé de la courbe à été obtenu par la méthode de moindres carrés
Essayez de revoir la méthode de moindres carrés, avec plus de d'explications.
- Merci de préparer vos leçons.
- Concernant la correction des séries de TD, de préférence, nous les corrigerons, ensemble, dès-que nous reprenons les cours, inchAllah.

NB : **S'il vous plait, prière de respectez le temps alloué pour la remise des fichiers des travaux dirigés qui vous seront envoyés et cela, 12jours à partir de la date d'envoi.**

Bonne santé à toutes et à tous.