

# 5 • FIABILITÉ, MAINTENABILITÉ, DISPONIBILITÉ

## 5.1 Les analyses FMD des systèmes réparables

Nous plaçons délibérément ce chapitre sous le signe du « maintenancier » et non du « fiabiliste ». Ces deux métiers sont différents : le maintenancier est un gestionnaire des activités techniques du terrain, le fiabiliste est un scientifique concepteur de systèmes « sûrs » ou un exploitant des nombreux retours d'expérience mis en place dans quelques grands groupes industriels (automobiles, nucléaire, aéronautique, etc.).

Le premier a toujours trop de pannes, le second n'en a jamais assez dans son retour d'expérience. Le premier est spécialement concerné par la « disponibilité opérationnelle » des équipements, le second par la « fiabilité prévisionnelle » des composants et des systèmes.

Loin de les opposer, notre objectif consiste à combler le fossé qui les sépare trop souvent en mettant à la disposition du premier quelques outils du second. Des outils applicables sur le terrain industriel, leur approche théorique n'étant là que pour justifier le bien-fondé de leur mise en application.

### 5.1.1 Disponibilité des systèmes réparables et ses composantes

- Définitions (CEN)
- Disponibilité

« Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée. »

#### Remarques

1. Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.
2. Les moyens extérieurs autres que la logistique de maintenance n'affectent pas la disponibilité du bien.

**Fiabilité**

« Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. »

**Remarque**

Le terme « fiabilité » est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité.

**Maintenabilité**

« Dans des conditions données d'utilisation, 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. »

**Arborescence et caractéristiques FMD d'un système réparable**

**Les trois niveaux de l'arborescence concernés par FMD**

Les équipements industriels inventoriés sont tous des systèmes réputés « réparables » et, à ce titre, pris en responsabilité par la maintenance. Les trois niveaux de caractérisation FMD d'un équipement sont regroupés au tableau 5.1.

**Tableau 5.1 – Niveau de caractérisation FMD d'un équipement**

	Propriétés	Caractéristique FMD
<b>Ensemble</b>	Toujours réparable	Disponibilité
<b>Module</b>	Réparable ou consommable	Maintenabilité et fiabilité
<b>Composant</b>	Consommable, parfois réparable	Fiabilité

Y a-t-il des systèmes « non réparables » ? Ce sont les systèmes dits « monocoup » comme le sont certains systèmes de sécurité ou d'armes (missiles, torpilles, fusées, etc.) et les lanceurs spatiaux (Ariane).

**Le cas du « module » réparable**

Le module est un sous-ensemble identifié (carte électronique, moteur, vérin, etc.) possédant la propriété d'être réparable, mais à un niveau où le technicien de maintenance doit se poser les questions successives :

- je répare le module défaillant (avec le risque d'indisponibilité forte) ou je le « consomme » par échange standard rapide ?
- si je le consomme, je le répare (en temps différé) ou je le rebute ?

Les caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité du module sont les critères objectifs qui permettent de résoudre ces choix successifs. Les réponses sont de

nature économique, obtenues à partir de la simulation du coût de chaque scénario en prenant en compte les coûts directs d'intervention, les coûts induits liés à l'indisponibilité du système et le coût du magasinage des modules de rechange.

### 5.1.2 Analyses FMD : indicateurs opérationnels

- Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité
- Définitions

La figure 5.1 schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.

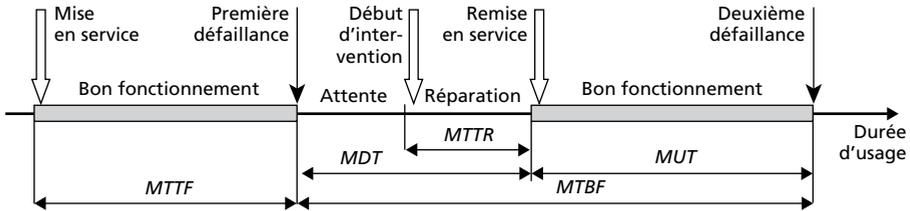


Figure 5.1 – Les durées caractéristiques de FMD

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (*TBF*) auxquelles on fait correspondre des moyennes (*MTBF*) obtenues par exploitation statistique  $m(t)$  ou probabiliste  $E(t)$  des  $n$  durées constatées et enregistrées. Les sigles utilisés sont d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes :

- *MTTF* (*mean time to [first] failure*) : temps moyen avant première défaillance ;
- *MTBF* (*mean time between failure*) : temps moyen entre deux défaillances successives ;
- *MDT* ou *MTI* (*mean down time*) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre ;
- *MUT* (*mean up time*) : temps moyen de disponibilité ;
- *MTTR* (*mean time to repair*) : temps moyen de réparation.

- Utilisation

Dans cette analyse, le système ne peut prendre que deux états : 0 = il n'est pas opérationnel, ou indisponible ; 1 = il est opérationnel, ou disponible.

Des analyses plus fines et plus complexes permettent d'intégrer un état intermédiaire nommé « mode dégradé », très utilisé en sûreté de fonctionnement. En maintenance, le choix d'un seuil d'admissibilité «  $s$  » permet de basculer de 1 à 0 face à une dégradation.

*MTTF* est utilisée dans les systèmes « monocoup » ou non réparables. Dans ce cas :  $MTTF = MTBF$ . Dans les systèmes réparables, *MTTF* est un indicateur de qualité. Le premier *TTF* est à intégrer à la collecte des *TBF*.

Nous proposons d'utiliser *MTA* (*moyenne des temps d'arrêt*) pour les temps d'arrêt relevés sous ce nom par la production. Et d'utiliser *MTI* (*moyenne des temps d'indisponibilité propre*) plutôt que *MDT* pour les temps d'arrêt de production imputable à la maintenance, l'équipement étant requis. *MTI* est important en gestion de la

maintenance, puisque c'est le temps qu'il faut relever pour estimer les coûts indirects d'indisponibilité.

Un cas fréquent se produit lorsque la  $MTI = MDT \ll MUT$ , il y a quasi-identité entre  $MUT$  et  $MTBF$ . Par exemple : 15 minutes d'indisponibilité moyenne tous les trois mois. Notons que la francisation « moyenne des temps de bon fonctionnement » s'applique mieux, en toute rigueur, à la  $MUT$  qu'à la  $MTBF$ .

La nature des  $MTBF$  et des  $MTTR$  est très différente : les  $TBF$  sont des temps d'activité machine, les  $TTR$  sont des temps d'activité humaine.

#### □ Indicateurs de FMD

Chacun des concepts FMD est défini rigoureusement par une probabilité  $F(t)$ ,  $M(t)$  et  $D(t)$  quantifiable que nous étudierons dans chacun des chapitres qui leur est consacré.

Des indicateurs (ou estimateurs, en statistique) permettent une évaluation opérationnelle de ces grandeurs à partir de paramètres simples relevés sur site. Ils seront plus ou moins rigoureux, donc plus ou moins significatifs.

#### □ Indicateurs de fiabilité

Ils sont classés ici du plus approximatif vers le plus rigoureux.

$N$  : nombre de pannes : « ma voiture est souvent en panne, donc elle n'est pas fiable ».

$\lambda$  : taux de défaillance moyen, exprimé en pannes/unité d'usage. Il est souvent supposé constant (hypothèse exponentielle dont la validité est toujours à vérifier). Dans ce cas, cet indicateur donne lieu à des analyses de fiabilité simples, objet du paragraphe 5.1.4, L'actuariat.

$MTTF$  : moyenne des temps de bon fonctionnement jusqu'à la première défaillance, dont la date d'arrivée est peu significative de la suite.

$MTBF$  calculée à partir d'une moyenne statistique d'un échantillon de  $n$  durées  $TBF$ .

$R(t)$  : fonction fiabilité ( $R$  vient de l'anglais *reliability*). C'est la fiabilité « stricte » définie comme la probabilité de bon fonctionnement d'un système à l'instant  $t$ , déterminée comme précédemment à partir d'un modèle probabiliste ajusté à un échantillon.

$MTBF$  calculée à partir de l'espérance mathématique de la variable aléatoire  $TBF$  en utilisant une loi de probabilité  $R(t)$  ajustée à un échantillon de  $n$  valeurs de  $TBF$  relevées.

$\lambda(t)$  : fonction taux de défaillance. Déduite de la fonction  $R(t)$ , c'est un bon indicateur du comportement d'un système.

Dans tous les cas, le niveau de signification de l'indicateur dépendra de deux facteurs initiaux :

- la taille  $N$  de l'échantillon collecté (d'où l'intérêt de regrouper des retours d'expérience comparables);

- la rigueur et la qualité du relevé des valeurs, qui passe par une compréhension et un consensus des opérateurs et dépanneurs chargés de ces relevés, ainsi que l'illustre par défaut la figure 5.2.

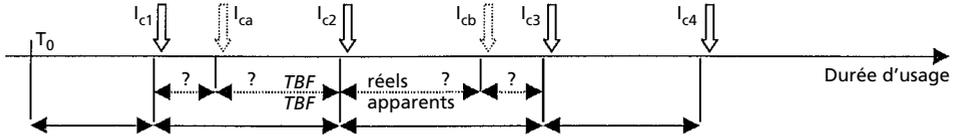


Figure 5.2 – La nécessaire rigueur des relevés, préliminaire à la fiabilité

$I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  et  $I_{c3}$  sont normalement relevés.  $I_{ca}$  a été omise par l'équipe de nuit,  $I_{cb}$  n'est pas exploitable, car mal écrite ou notée sur un BT égaré. Il est évident que la *MTBF* déduite de ces valeurs apparentes sera très largement optimiste, quelle que soit la méthode de traitement utilisée. Cela n'est pas de la « fiabilité fiction » mais une réalité pour bien des services de maintenance ! Cette réalité mérite d'être corrigée avant d'envisager de passer à la MBF (maintenance basée sur la fiabilité, voir § 10.3).

#### □ Indicateurs de maintenabilité

*MTTR* est l'indicateur de maintenabilité. Elle peut être obtenue par la moyenne statistique d'un échantillon de  $n$  valeurs *TTR* ou par l'espérance mathématique de la variable *TTR* obtenue à partir d'un modèle probabiliste.

Notons que la durée d'intervention *TTR* n'est pas une donnée facile à acquérir, comme nous le montrons au paragraphe 6.2.2.

$M(t)$  est la maintenabilité stricte. C'est la probabilité associée à un instant  $T$ , d'une remise en état de fonctionnement. Elle est déterminée à partir d'un modèle probabiliste.

#### □ Indicateurs de disponibilité

L'indicateur de base de la disponibilité opérationnelle est :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} < 1$$

Mais bien d'autres indicateurs peuvent être imaginés, plus ou moins rigoureux et choisis en fonction des données existantes. Quelques exemples :

$(T_O - T_A)/T_O$  avec  $T_O$  = temps d'ouverture et  $T_A$  le cumul des temps d'arrêt, ou des temps d'arrêt imputés à la seule maintenance;

*MTBF-MTTR* est un indicateur de disponibilité propre, *MUT* est un indicateur de disponibilité effective;

*MTI* est un indicateur d'indisponibilité propre.

□ **Tableau de synthèse des analyses FMD**

**Tableau 5.2 – Quelles sont les analyses FMD possibles ?**

Arborescence d'un système	Caractéristique	Analyses correspondantes		
		$R(t)$	$M(t)$	$D(t)$
Ensemble	Réparable Non réparable (monocoup)	$MTBF$ $MTTF$	$MTTR$ ×	$D_{op}$ ×
Module interchangeable	Réparable Consommable	$MTBF$ $MTTF$	$MTTR$ ×	× ×
Composant	Consommable	$MTTF$	×	×

- Les analyses de  $MTTF$  et  $MTBF$  sont identiques : nous utiliserons la notation  $MTBF$  indistinctement.
- Les analyses de disponibilité ne sont significatives que pour des ensembles : il est cependant indispensable, dans le cas d'une ligne de production, de la décomposer en « tronçons » dont chaque disponibilité sera évaluée, puis recomposée pour évaluer la disponibilité opérationnelle de la ligne.

### 5.1.3 Estimation empirique de la fiabilité à partir du taux de défaillance $\lambda$

□ **Forme et signification du taux de défaillance**

□ **Définition**

Le taux de défaillance, noté  $\lambda(t)$ , est un indicateur de fiabilité qui représente :

- soit un taux supposé constant de défaillances par unité d'usage exprimé sous la forme générale :

$$\frac{\text{nombre de défaillances}}{\text{durée d'usage}}$$

- soit la fonction  $\lambda(t)$  qui représente une proportion de survivants à l'instant  $t$ , tirée d'un échantillon.

Le taux de défaillance s'exprime le plus souvent en « pannes par heure ».

□ **Défaillances intrinsèques et majeures**

Il est utile de préciser que, dans toute analyse de fiabilité, seules les défaillances « intrinsèques » doivent être prises en compte. Les pannes dues à des erreurs de

conduite (accident, consignes non respectées) ou à des événements extérieurs (incendie, inondation du local) doivent être exclues.

Une autre distinction initiale est nécessaire avant toute analyse : prend-on en compte les pannes mineures, et si oui, quel est le seuil entre le « mineur » négligé et le « majeur » intégré ? La réponse est donnée par le fait que la mauvaise disponibilité de beaucoup d'équipements est principalement due à de nombreuses petites pannes répétitives ou non. Si on néglige de les analyser, on va trouver une bonne pseudodisponibilité non significative de la réalité !

❑ **La durée de vie d'un équipement : la courbe en baignoire**

❑ **La courbe en baignoire**

L'allure générale des variations de la fonction  $\lambda(t)$  d'un équipement le long de sa durée de vie est connue a priori : nous trouvons une courbe en forme de « baignoire ». Cette courbe (figure 5.3) met en évidence trois périodes distinctes : la jeunesse, la maturité et la vieillesse de l'équipement, chaque période ayant ses types de défaillances propres...

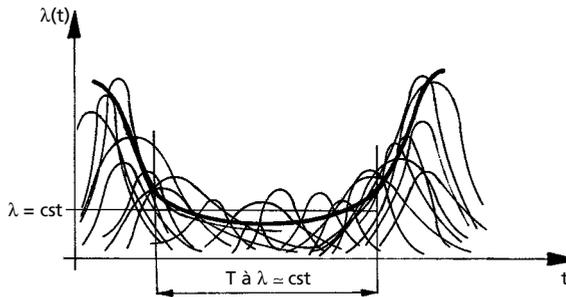


Figure 5.3 – Courbe en baignoire d'un système complexe

Pour un système comportant des technologies variées, la courbe  $\lambda(t)$  peut être considérée comme une « ligne de tendance » résultante des différentes distributions des défaillances des composants. Cette courbe permet de séparer trois populations de défaillances de natures différentes, généralement classées en trois périodes successives (figures 5.4 et 5.5) :

- période de jeunesse, caractérisée par des défaillances « précoces » ;
- période de vie utile, avec des défaillances aléatoires et un taux de défaillance sensiblement constant. Nous nommerons « hypothèse exponentielle » le fait de considérer  $\lambda$  constant sur la période de vie utile ;
- période de vieillesse ou d'usure, avec un taux de défaillance inexorablement croissant jusqu'à l'obsolescence.

**Remarque**

Cette géométrie de courbe a un caractère « universel » : elle représente aussi bien des taux de défaillances « humaines » (taux de mortalité bien connue en démographie) que

des défaillances du règne végétal : plantez 3 000 pins et observez le devenir de chaque semis; vous verrez apparaître les trois populations successives.

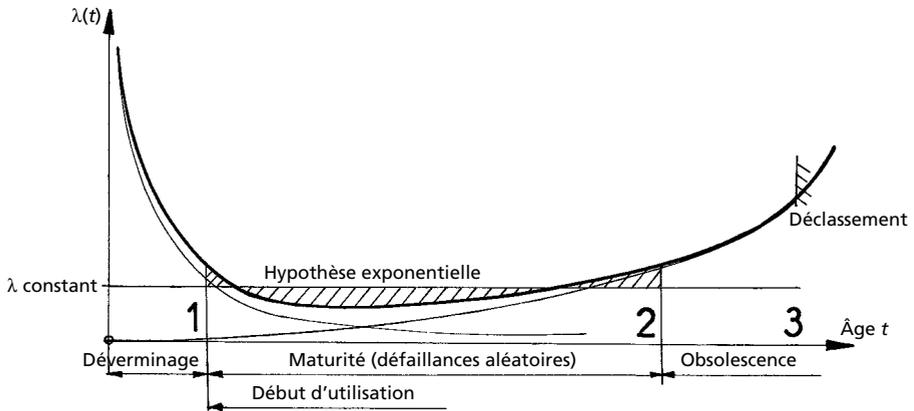


Figure 5.4 – Courbe de défaillance en baignoire pour des modules et composants du domaine électronique

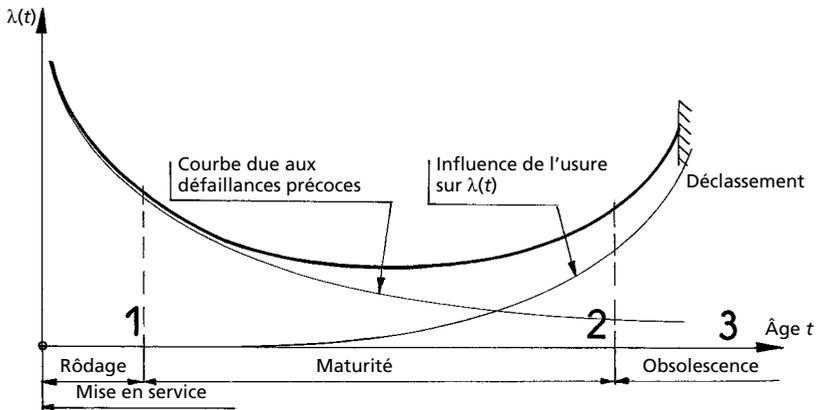


Figure 5.5 – Courbe de défaillance en baignoire pour des modules du domaine électromécanique

#### □ Interprétations de la courbe en baignoire

Pour l'électronique, la phase de jeunesse est caractéristique de défauts initiaux de fabrication qu'il est possible de « couvrir » par des techniques de déverminage. Elles consistent à faire subir aux composants fabriqués (composant, circuit intégré ou carte) un « stress » suivant un programme d'agressions thermiques, vibratoires ou d'ambiance en fonction de leur profil d'utilisation. Sur 100 composants ainsi déverminés, puis testés, seuls les  $n$  résistants (donc dépourvus de défaut initial de fabrication) seront commercialisés.

La mise en service de ces  $n$  composants se fera donc en période aléatoire, pendant laquelle l'hypothèse exponentielle du taux constant est acceptable. Leur prévision comportementale sera donc possible en utilisant la loi exponentielle (voir § 5.3.1).

Pour l'électromécanique, la séparation des périodes est moins nette. L'hypothèse exponentielle étant mal ou non vérifiée, des modèles probabilistes tels que la loi de Weibull devront être utilisés pour analyser la fiabilité.

Remarquons cependant que la notion de rodage mécanique (lissage des aspérités à l'interface de deux pièces mobiles) correspond à la phase de « jeunesse », alors que l'émergence de certains modes de défaillances marque le début de la phase de « vieillesse ».

- **Calculs du taux de défaillance**
- **Analogie du taux de défaillance avec la vitesse**

Commençons notre étude quantitative par une analogie avec le phénomène mécanique de vitesse. En fait le taux de défaillance représente la « vitesse d'arrivée des pannes ». Nous savons calculer une vitesse moyenne  $\Delta x / \Delta t$ , puis, faisant tendre  $\Delta t$  vers 0, une vitesse instantanée qui est la dérivée de l'espace par rapport au temps.

De la même manière, nous définirons un taux moyen de défaillance pendant un intervalle  $(t, t + \Delta t)$ , puis un taux instantané  $\Delta t \rightarrow 0$ .

Statistiquement,  $\lambda(t)$  est une densité de probabilité conditionnelle de défaillance, qui caractérise la probabilité de défaillance dans l'intervalle  $\Delta t$  de dispositifs ayant survécu à l'instant  $t$ .

- **Calcul du taux de défaillance moyen**

*Cas 1 : les éléments défaillants sont remplacés*

Nommons :

$N_0$  : nombre initial de dispositifs,

$N_s(t)$  : nombre de survivants à l'instant  $t$ ,

$N_s(t + \Delta t)$  : nombre de survivants à l'instant  $t + \Delta t$ ,

$C(\Delta t) = N_s(t) - N_s(t + \Delta t)$  : nombre de défaillants pendant  $\Delta t$ .



Figure 5.6

Dans ce cas, le lot de dispositifs est constant, donc  $N_s(t) = N_0$ . Le taux de défaillance moyen sur l'intervalle  $\Delta t$  est :

$$\lambda(t) = \frac{C(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}$$

*Cas 2 : les éléments défaillants ne sont pas remplacés*

Utilisons les mêmes symboles. Dans ce cas,  $N_s(t)$  est différent de  $N_0$ , la fonction  $N(t)$  étant décroissante. Le taux de défaillance moyen sur l'intervalle  $\Delta t$  est :

$$\lambda(t) = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_s(t) \cdot \Delta t}$$

#### □ Calcul du taux de défaillance instantané

Il s'applique aux seuls survivants à l'instant  $t$  et caractérise leur probabilité conditionnelle de défaillance dans l'intervalle  $t + dt$ .

$$\lambda(t) = -\frac{dN}{N(t)dt} \quad \text{ou} \quad \lambda(t)dt = -\frac{dN}{N(t)}$$

#### Remarque

Le signe moins s'explique par la décroissance de  $N(t)$ .

#### □ Applications

*Cas des éléments defectueux remplacés ou réparés*

Nous avons étudié 70 véhicules pendant la période allant de 80 000 à 90 000 km. 41 défaillances ont été réparées. Quel est le taux de défaillance relatif à cette période ?

$$\lambda(t) = \frac{C(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{41}{70 \times (90\,000 - 80\,000)} = 0,585 \times 10^{-4} \text{ pannes/km}$$

*Cas des éléments defectueux non remplacés*

On teste un lot de 50 électrovannes soumises en continu à 8 impulsions/minute. À la 50<sup>e</sup> heure, il en reste 33. À la 60<sup>e</sup> heure, il en reste 27. Quel est le taux de défaillance sur cette classe, par heure et par impulsion ?

$$\lambda(t) = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_s(t) \cdot \Delta t} = \frac{33 - 27}{33 \times 10} = 18 \times 10^{-3} \text{ déf/heure}$$

ou 
$$\lambda(t) = 3,79 \times 10^{-5} \text{ déf/impulsion}$$

Si l'on avait remplacé les électrovannes défaillantes,  $\lambda$  serait :

$$\lambda(t) = \frac{6}{50 \times 10} = 12 \times 10^{-3} \text{ déf/heure}$$

### 5.1.4 Réalisation d'un actuariat de défaillances

#### □ Définition et utilisation de l'actuariat

Un actuariat permet d'évaluer les lois de comportement d'un parc matériel standardisé : nombreux équipements identiques ou comparables mis en service de façon étalée dans le temps. Par exemple, une flotte d'autocars, un parc de machines-outils ou un lot de pompes centrifuges.

Une condition nécessaire est de posséder l'historique ( $n$  défaillances) de chaque équipement. Son intérêt est de pouvoir cumuler les expériences afin de posséder un échantillon de taille significative  $N = \Sigma n$ . L'actuariat permet de tracer la courbe en baignoire caractéristique du parc, et d'en estimer la fiabilité.

□ **Méthodologie de l'étude**

□ **Données de départ**

Soient A, B, C, D des équipements identiques.

$t_e$  : date de l'étude « actuariat »

$t_0$  : date de chaque mise en service

$t_i$  : date d'une intervention corrective

$t_d$  : date du déclassement éventuel de l'équipement

Traçons leur graphe de vie en reportant les défaillances sur le référentiel relatif à chaque équipement (figure 5.7).

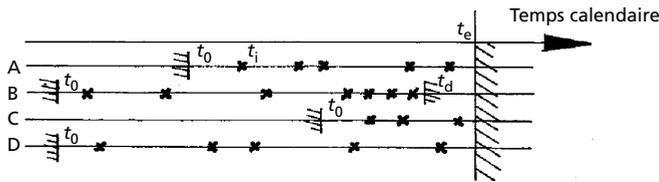


Figure 5.7

□ **Initialisation**

Il faut initialiser leurs mises en service à  $t_0 = 0$  et individualiser leur temps de fonctionnement, de façon à obtenir le graphe de comparaison de la figure 5.8.

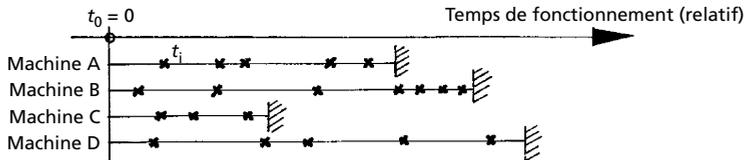


Figure 5.8

□ **Choix des classes**

Si le nombre de défaillances  $N$  est supérieur à 50, ce qui est le cas le plus fréquent par nature de l'actuariat, on découpe le temps en  $k$  classes tel que  $k = \sqrt{N}$  en choisissant des tranches d'âges pratiques.

**Exemple**

Nous avons 66 défaillances réparties entre 0 et 1 100 heures. Nous prendrons  $k = 8$  classes de 150 heures chacune.

### □ Tableau de recensement

Pour chaque classe d'âge (1), on établit l'inventaire des machines en service (2), le cumul des heures de fonctionnement des machines survivantes (3), puis le recensement des défaillances sur la classe (4) (tableau 5.3).

Tableau 5.3 – Exemple de tableau de recensement

1 Classe	2 Nombre d'équipements	3 Cumul des temps de fonctionnement	4 Nombre de défaillances	5 Taux moyen $\lambda$ de défaillances
0-150 h	...	...	...	...
150-300 h	...	...	...	...
300-450 h	9	$9 \times 150 = 1\ 350$ h	11	$11/1\ 350 = 3,1 \times 10^{-2}$
450-600 h	...	...	...	...

### □ Exploitation : la courbe en baignoire

Le taux de défaillance moyen obtenu dans le tableau précédent est représenté constant sur la classe d'âge considérée, ce qui permet de tracer l'histogramme des défaillances et de visualiser la courbe en baignoire des variations de  $\lambda(t)$ .

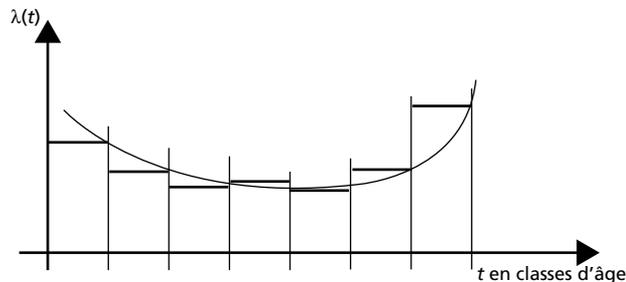


Figure 5.9

#### Remarque

Une étude de cas complète d'actuariat se trouve page 114 de l'ouvrage (MON 90).

## 5.1.5 Les analyses de fiabilité et de maintenabilité : la méthode statistique

### □ Méthodologie de la recherche des lois de probabilité $R(t)$ et $M(t)$

### □ Nature des échantillons de valeurs

Les valeurs à traiter sont des échantillons de *TBF* provenant d'un historique pour la fiabilité, ou des échantillons de *TTR* (durées d'interventions) provenant de BT (papiers ou écran) pour la maintenabilité. Ces échantillons, dans l'industrie, sont généralement de taille modeste : malheureusement pour le fiabiliste et le niveau de confiance de ses résultats, heureusement pour la maintenance.

Nous ne prendrons nos exemples que dans le traitement statistique d'historiques en recherche de fiabilité : les méthodes dégagées sont extrapolables aux études de maintenabilité, moins souvent réalisées...

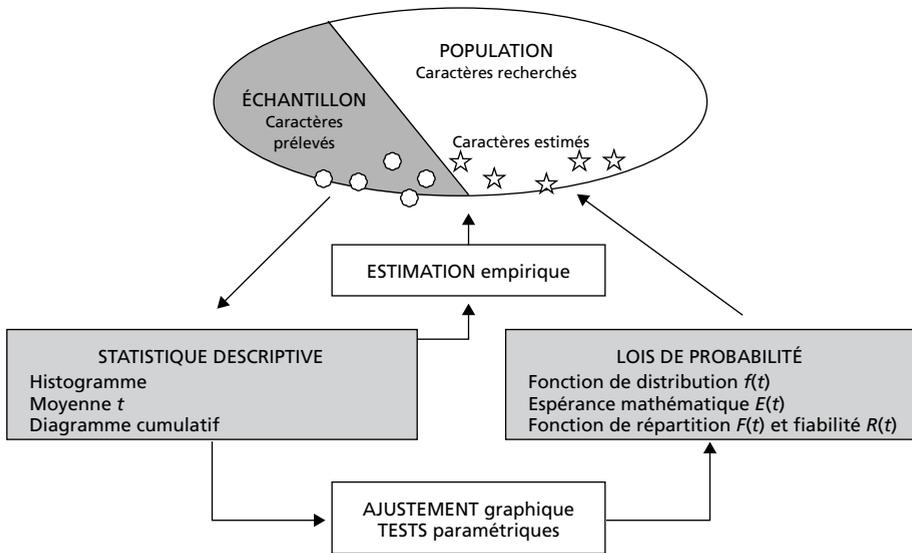
L'historique (ou les essais de fiabilité) d'un dispositif fournit un échantillon de  $N$  valeurs de la variable aléatoire  $TBF$  sous la forme d'une série chronologique. Cet échantillon est une « image du passé » appartenant à une population mère constituée de toutes les défaillances passées et à venir, sur un dispositif donné. Remarquons que d'autres historiques établis à partir de dispositifs identiques exploités dans des conditions comparables fourniraient d'autres valeurs numériques : autant d'images différentes d'une même « population mère ».

L'objectif des analyses de fiabilité est de caractériser la population mère de défaillances aux fins de connaissance du comportement et de prévisions utiles à la maintenance. Cette caractérisation peut s'obtenir :

- soit à partir de la description statistique de l'échantillon si celui-ci est significatif;
- soit par l'exploitation de modèles probabilistes déduits de l'échantillonnage.

□ **Les deux méthodes de traitement d'échantillon de TBF**

Nous proposons de décrire deux méthodes de traitement, schématisées à la figure 5.10.



**Figure 5.10** – Les méthodes d'estimations statistiques de la fiabilité d'un dispositif

- Pour les grands échantillons ( $N > 50$ , éventuellement  $> 30$ ), mettre en œuvre une estimation statistique en application de la statistique « descriptive ». Cette méthode donnera des estimateurs « empiriques » de la fiabilité de l'échantillon :  $R(i)$ ,  $MTBF$  et écart-type.

- Pour des échantillons petits ( $8 < N < 50$ ), mettre en œuvre une recherche de loi de probabilité ajustable à l'échantillon. Cette méthode fournira les caractéristiques  $R(t)$ ,  $F(t)$ ,  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $E(t) = MTBF$  de la population mère associée à un intervalle de confiance, sous forme graphique et/ou analytique.

#### Traitement statistique des grands échantillons

#### Classement des données

Les  $N$  durées de bon fonctionnement (intervalles entre pannes successives) sont classées par ordre croissant et regroupées en  $k$  classes. Puis on dénombre l'effectif sur chaque classe. De nombreuses théories régissent le choix des classes. Selon Chapouille et De Pazzis, nous prendrons  $k = \sqrt{N}$  et  $k > 5$ .

Le tableau 5.4 montre la structure d'un tableau de valeurs, en prenant l'exemple d'un historique de 50  $TBF$  relevées entre 0 et 5 100 h : nous prendrons  $k = 7$  classes avec  $\Delta t = 750$  h.

**Tableau 5.4** – Tableau de valeurs pour réaliser un histogramme et évaluer la  $MTBF$

N° des classes	Limite des classes	Centre de classe $t_i$	Fréquences absolues		Fréquences relatives $f_i = n_i/N$	Produit $f_i \cdot t_i$
			Effectif $n_i$	Cumulées $\Sigma n_i$		
1	0; 749	375 h	2	2	2/50 = 0,04	15
2	750; 1 499	1 125 h	6	8	6/50 = 0,12	135
3	1 500; 2 249	1 875 h	14	22	14/50 = 0,28	525
4	2 250; 2 999	2 625 h	16	38	16/50 = 0,32	840
5	3 000; 3 749	3 375 h	7	45	7/50 = 0,14	472,5
6	3 750; 4 499	4 125 h	4	49	4/50 = 0,08	330
7	4 500; 5 249	4 875 h	1	50	1/50 = 0,02	97,5
			50		$\Sigma n_i/N = 1$	$\Sigma f_i \cdot t_i = 2 415$ h

#### Statistique descriptive : histogramme et diagramme cumulatif

On visualise les résultats du tableau en traçant :

- l'histogramme, dont la ligne polygonale passant par les centres de classes donne une allure de la distribution. La valeur modale est le centre de classe associé à la plus grande fréquence absolue trouvée;
- le diagramme cumulatif (des fréquences relatives cumulées) se trace à partir des bornes supérieures des classes et donne l'allure de la répartition, le diagramme inverse donne l'allure de la courbe de fiabilité. La médiane se trouve à l'ordonnée 0,5.

### □ Estimateurs empiriques

L'indicateur de fiabilité *MTBF* de l'échantillon est obtenu directement dans le tableau 5.4.

Sa forme générale est :

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \cdot \sum n_i \cdot t_i$$

ou  $\sum f_i t_i$  dans le tableau 5.4 (*MTBF* de l'échantillon).

La variance associée est :

$$V = \sigma^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum n_i (t_i - \bar{t})^2$$

Le coefficient de dispersion est :

$$c = \frac{\sigma}{\bar{t}}$$

Il est possible de réaliser deux types d'estimation pour la *MTBF* de la population mère :

- soit par estimation ponctuelle,
- soit par estimation de l'intervalle de confiance ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) associé à un risque d'erreur prédéterminé (0,05 en général) tel que  $\text{Prob}(\alpha_1 < \theta < \alpha_2) = 0,95$  (ou 0,90 ou 0,99).

L'intérêt de l'estimation par intervalle de confiance est d'indiquer le niveau de confiance du résultat trouvé, en fonction de la taille de l'échantillon, ce que l'estimation ponctuelle ne montre pas. Un exemple relatif à la loi exponentielle sera traité au paragraphe 5.3.1.

### □ Estimation de la fiabilité $R(t)$

Il est nécessaire de compléter le tableau 5.4 par les deux colonnes  $F_i$  et  $R_i$  et on obtient le tableau 5.5.

Tableau 5.5 – Estimation empirique de la fiabilité

Intervalle de classe	Effectifs	Fréquence relative	Fréquence cumulée	Fiabilité estimée
$t, t + \Delta t$	$n_i$	$f_i = n_i/N$	$F_i = \sum n_i/N$	$R_i = 1 - F(i)$
1	2	0,04	0,04	0,96
2	6	0,12	0,16	0,84
...	...	...	...	...
6	4	0,08	0,92	0,08
7	1	0,02	1	0

Les valeurs de la colonne « fiabilité estimée » permettent de tracer la courbe d'évolution de la fiabilité  $R(i)$ .

□ **Le traitement pour la recherche des lois de probabilité (cas des petits échantillons)**

En fiabilité, les lois de probabilité étudiées dans cet ouvrage sont la loi exponentielle et la loi de Weibull. En maintenabilité sont utilisées la loi log-normale et la loi de Gumbel (ou loi des valeurs extrêmes).

Pour chaque loi, l'estimation de la fiabilité  $R(t)$  peut se faire rapidement par des méthodes graphiques, à partir de « papiers fonctionnels », ou analytiquement.

□ **Structure des tableaux de valeurs**

Les  $N$  valeurs de durées de bon fonctionnement  $TBF$  obtenues en exploitation seront classées par valeurs croissantes selon un ordre  $i$  allant de  $i = 1$  à  $i = N$ . L'ordre  $i = n(t)$  représente la  $i$ ème défaillance de l'échantillon.

$F(i)$  est la probabilité cumulative de défaillance sur  $(0, t)$ . Suivant la taille  $N$  de l'échantillon, il est recommandé d'estimer la fiabilité  $R(i)$  par les approximations suivantes :

– si  $N > 50$  :

$$R(i) = 1 - \frac{i}{N}$$

pourcentage de dispositifs n'ayant pas subi de défaillance entre 0 et  $t$ ;

– si  $50 > N > 20$ , formule des rangs moyens :

$$R(i) = 1 - \frac{i}{N + 1}$$

– si  $20 > N$ , formule des rangs médians :

$$R(i) = 1 - \frac{i - 0,3}{N + 0,4}$$

Le tableau 5.6 montre un exemple de traitement des données pour trois tailles d'échantillon. La même valeur  $TBF = 652$  h est successivement traitée comme étant la 8<sup>e</sup>/10, puis /30 et /60.

**Tableau 5.6** – Obtention de valeurs approximées de la fiabilité d'un échantillon de  $N$  valeurs

N	Ordre $i$	Valeurs $TBF$	$F(i)$ $i/N$	$F(i)$ approximée		Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
				$i/(N + 1)$	$(i - 0,3)/(N + 0,4)$	
10	8	652 h			$7,7/10,4 = 0,740$	0,260
30	8	652 h		$8/31 = 0,258$		0,742
60	8	652 h	$8/60 = 0,133$			0,867

**Remarque**

La justification de ces formules d'approximation sort du cadre de cet ouvrage (voir LIG 92, AFN 88). Elles corrigent le « biais » de l'estimateur  $i/N$  en représentant la moyenne (a) ou la médiane (b) des valeurs de  $F$  que l'on obtiendrait en répétant de nombreuses fois l'expérience à l'instant  $t$  de la  $i$ ème défaillance.

□ **Ajustements graphiques**

Les ajustements graphiques se font sur des papiers à échelles fonctionnelles qui sont conçus pour linéariser la fonction de répartition  $F(t)$  à partir du nuage de points  $(t_i, F(i))$  représentatif des résultats obtenus en exploitation (figure 5.11).

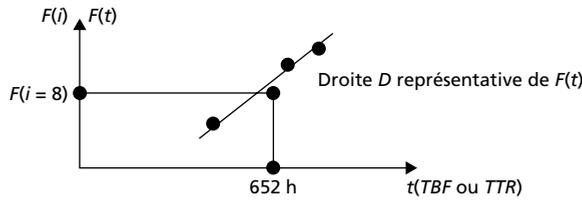


Figure 5.11

Les papiers fonctionnels permettent de déterminer les valeurs des 1 ou 2 ou 3 paramètres des lois recherchées, et donc de pouvoir appliquer ces lois représentatives de la population des défaillances passées et futures.

Nous avons sélectionné les quatre lois et les quatre papiers fonctionnels correspondants permettant à des agents des méthodes de maintenance (non à des spécialistes de la fiabilité) de traiter leurs historiques afin de déterminer les lois de fiabilité et de maintenabilité nécessaires à de bonnes prévisions de comportement des systèmes ou de certains composants « fragiles ».

1. Loi exponentielle à un paramètre  $\lambda$  : papier semi-logarithmique sur lequel sera tracée une droite dont la pente  $\lambda$  est l'inverse de la *MTBF*.
2. Loi normale à deux paramètres  $m$  et  $\sigma$  : papier « normal » sur lequel sera tracée la droite de Henry.
3. Loi des valeurs extrêmes : papier de Gumbel dont les deux paramètres  $a$  et  $u$  permettent d'obtenir la loi de maintenabilité et la *MTTR*.
4. Loi de Weibull à trois paramètres  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\eta$  : papier d'Allan Plait, sur lequel la droite de Weibull permettra d'obtenir la loi de fiabilité ainsi que la *MTBF* de la population.

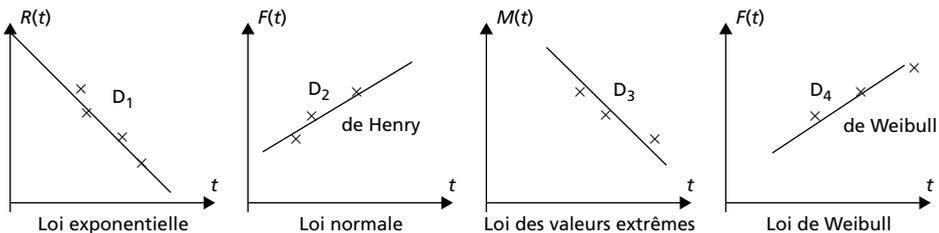


Figure 5.12 – Quatre exemples de papiers fonctionnels d'ajustement de lois de probabilité

La régression de ces nuages de points en une droite  $D$  permet d'affirmer, si le test paramétrique est positif : « si  $Dz$  existe, alors la loi  $z$  relative à la population peut s'appliquer ».

#### □ Tests paramétriques

Ils ont pour rôle de vérifier qu'une loi de probabilité est applicable à un échantillon de valeurs, avec un risque  $\alpha$  ou un niveau de confiance  $1 - \alpha$ . À chaque loi de probabilité correspond un ou plusieurs tests statistiques d'hypothèses, de corrélation ou de tendance appropriés. Les deux tests d'adéquation les plus courants en fiabilité sont le test du  $\chi^2$  pour les échantillons  $N > 50$  et le test de Kolmogorov Smirnov pour les petits échantillons.

#### □ Intérêt des analyses de fiabilité

Pour un équipement donné ou pour l'un de ses sous-ensembles, la connaissance de la loi de fiabilité  $R(t)$  déduite d'un échantillon fini de valeurs représentatif d'une « réalité d'atelier » permet une exploitation prévisionnelle fructueuse en organisation de la maintenance.

Certaines applications demandent une analyse de fiabilité « système » (grand échantillon), d'autres s'appuient sur une analyse « composant » (petit échantillon le plus souvent). Prenons quelques exemples :

- l'optimisation des périodes d'intervention systématique est possible à partir de simulations économiques et de la connaissance du comportement d'un module ou d'un composant;
- l'optimisation de la gestion des rechanges se fait à partir des lois de consommation qui coïncident avec les lois de défaillance;
- l'évaluation du moment de fin de période aléatoire marque le début de l'émergence d'un mode de défaillance prédominant qu'il va falloir identifier et prévenir;
- la « connaissance culturelle » de la notion de probabilité associée à la prévision et à la décision, de la courbe en baignoire des taux de défaillance et de la décroissance de la fiabilité permet à l'agent des méthodes d'acquérir une certaine maîtrise des événements fortuits de l'atelier. Même sans faire les calculs correspondants;
- l'évaluation correcte des *MTTR* et des *MTBF* d'un équipement permet de mieux le gérer suivant l'indicateur « disponibilité »;
- le cumul de toutes ces analyses permet de générer une « base de données interne » qu'il est ensuite possible de regrouper ou de comparer avec d'autres bases de données de fiabilité et de maintenabilité. Il devient également possible de « retourner les expériences de terrain » vers le service « travaux neufs » ou vers le fournisseur en partenariat;
- la MBF (maintenance basée sur la fiabilité), comme son nom l'indique, ne peut se mettre en place qu'à partir de la connaissance du comportement d'un équipement.

Remarquons que la confrontation de ces analyses de fiabilité avec les analyses qualitatives de défaillances correspondantes est indispensable pour optimiser la maintenance d'un équipement.

## 5.2 La fiabilité : introduction et expressions mathématiques

### 5.2.1 Approche qualitative de la fiabilité

Définition probabiliste de la fiabilité et commentaires

Définition AFNOR

« La fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée. »

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné.

Commentaire sur les quatre concepts de la définition

1. Probabilité : c'est le rapport :

$$\frac{\text{nombre de cas favorables}}{\text{nombre de cas possibles}} < 1$$

dans l'hypothèse d'équiprobabilité.

On notera  $R(t)$  la probabilité de bon fonctionnement à l'instant  $t$ . Le symbole  $R$  a pour origine le mot anglais *reliability*.

On notera  $F(t)$  la fonction définie par  $F(t) = 1 - R(t)$ , probabilité complémentaire (ou événement contraire). Donc  $F(t)$  est la probabilité de défaillance à l'instant  $t$  et  $R(t) + F(t) = 1$ .

2. Fonction requise : nous parlerons de « fonction requise » pour un composant, de « mission » ou « de service attendu » pour un système. La définition de la fonction requise implique la définition d'un seuil d'admissibilité au-delà duquel la fonction n'est plus remplie.
3. Conditions d'utilisation : définir les conditions d'usage revient à définir l'environnement du système et ses variations, ainsi que les contraintes mécaniques, chimiques, vibratoires, thermiques, etc. auxquelles il est soumis. Il est évident que le même matériel soumis à deux environnements différents n'aura pas la même fiabilité.
4. Période de temps : c'est la définition de la durée de mission  $T$ , mais à chaque instant  $t_i$  est associée une valeur de fiabilité  $R(t_i)$  décroissante.

Illustration

Envisageons la préparation d'un moteur pour Les Vingt-Quatre Heures du Mans (compétition d'endurance). Qu'est-ce qu'un moteur fiable ? La réponse n'est jamais absolue, mais relative à un profil de mission, qui est dans ce cas :

1. la probabilité de terminer = fiabilité requise = 0,9 (exemple d'objectif),
2. à 195 km/h de moyenne (seuil minimal de la fonction requise),
3. de jour et de nuit, avec de la pluie, du vent, avec  $n$  ravitaillements,
4. au bout de 24 heures (durée de mission).

La compétition automobile nous offre un bon modèle de la maîtrise de la fiabilité, car il n'y aurait plus beaucoup de voitures au Mans au bout de 26 heures, ni au bout de 3 heures pour un Grand Prix de F1.

### □ Fiabilité et qualité

Ces notions sont indissociables. Si la qualité est prise dans son sens général de « satisfaction du besoin des utilisateurs », il est évident que la fiabilité (ou la disponibilité) est un des éléments de la satisfaction de l'utilisateur : fiabilité = probabilité de bon fonctionnement. Si la qualité est prise dans le sens de « qualité initiale », nous pourrions dire que la qualité initiale garantit la conformité d'un produit à ses spécifications, alors que la fiabilité mesure son aptitude à y demeurer conforme au long de sa vie utile.

### □ L'hypothèse de base de la maintenance

La maintenance n'accepte de prendre en responsabilité que des systèmes, modules ou composants ayant fait la preuve de leur bon fonctionnement initial, suivant des procédures de « recette » d'un équipement. Nous écrirons en fiabilité,  $t_0$  étant la date de mise en service :

$$R(t_0) = 1$$

D'où trois propositions de bon sens :

- tout système maintenu a fait la preuve de son bon fonctionnement au moment de sa mise en service;
- il n'y a pas de bonne fiabilité sans bonne qualité initiale;
- la fiabilité est l'extension de la qualité initiale dans le temps.

### □ Illustration : qu'est-ce que la fiabilité d'un palier mécanique ?

À partir d'un cahier des charges (fréquence de rotation  $N = 1\,200$  tr/min, charges supportées, conditions de lubrification) relatif à la conception d'une fonction « guidage en rotation ».

À partir du dessin de définition d'un palier lisse (géométries + côtes fonctionnelles + matériaux) représenté sur la figure 5.13.

À partir du contrôle qualité qui garantit la conformité de l'assemblage fabriqué à ses spécifications.

Un palier a été ainsi défini, fabriqué et contrôlé : quelle sera sa fiabilité ? La réponse passe par la connaissance du phénomène de dégradation auquel il sera inexorablement soumis : l'usure associée à tous ses facteurs d'influence.

- Fonction requise : guidage en rotation d'un arbre.
- Perte de fonction : par usure au-delà d'un seuil. Soit  $t_m = TBF$  la durée de bon fonctionnement limitée par la « perte de fonction ». Cette perte de fonction se produira lorsque les « points d'interrogation » de la figure 5.13 auront atteint des seuils mesurés directement (contrôle du jeu fonctionnel, de la rugosité, de la cylindricité) ou indirectement (niveau de vibration, température, etc.).

- Caractérisation de la fiabilité : par l'indicateur *TBF* (si une expérience) ou *MTBF* (si échantillonnage) exprimé en heures de rotation ou en millions de tours. Si l'on dispose de 50 paliers identiques et que l'on se fixe une durée de mission de 8 000 heures, il suffit de dénombrer les 41 paliers survivants à 8 000 h pour exprimer  $R(8\ 000) = 0,82$ . La détermination d'une loi de probabilité permettra de calculer  $R(t_i)$  quel que soit  $t_i$ .
- Aspects de la maintenance liés :
  - surveillance : par l'observation et les mesures indirectes en marche (vibrations, température), par les mesures directes à l'arrêt (jeu, rugosité);
  - ronde : suivant la procédure de lubrification prédéfinie;
  - préventive systématique : interchangeabilité de la bague d'usure avant  $t_m$ ;
  - préventive conditionnelle : déclenchée à partir d'un seuil d'alerte d'usure prédéterminé et mesuré;
  - corrective : interchangeabilité de la bague au-delà du seuil d'usure et réfection éventuelle de l'arbre (rechargement ou échange standard);
  - améliorations : elles peuvent porter sur la mise en œuvre d'une lubrification plus efficace, sur le choix de matériaux mieux adaptés ou sur l'ajout de traitements thermiques ou de surface.
- Le point de vue du concepteur : pour un problème mécanique aussi simple et aussi classique, il est difficile pour un concepteur d'appréhender la fiabilité autrement que par empirisme. Mais que devient le « H7 g6 » bien connu au bout d'un an de fonctionnement ? Seuls des essais de fiabilité ou l'organisation de retours d'expérience permettent d'acquérir la maîtrise de ces phénomènes d'usure.

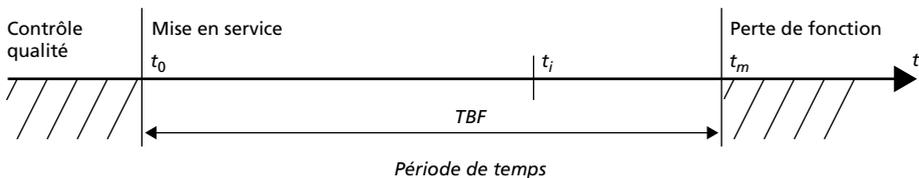
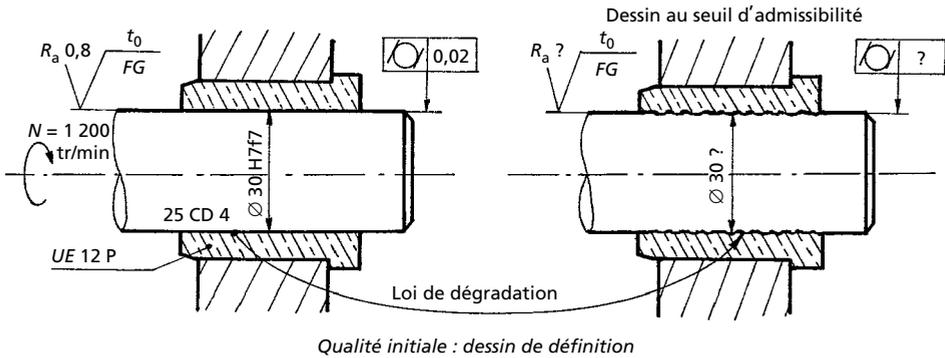


Figure 5.13 – Dégradation d'un palier : quelle est sa fiabilité à  $t_i$  ?

## 5.2.2 Expressions mathématiques de la fiabilité

### □ Fonctions de distribution et de répartition

#### □ Notion de variable aléatoire

On appelle variable aléatoire  $X$  une variable telle qu'à chaque valeur  $x$  de  $X$  on puisse associer une probabilité  $F(x)$ . Une variable aléatoire peut être :

- continue : intervalle de temps entre deux défaillances consécutives;
- discrète : nombre de défaillances d'un composant sur un intervalle de temps.

#### □ Cas général d'une variable aléatoire continue

Soit une loi de probabilité relative à une variable aléatoire continue  $t$ . Elle est caractérisée par sa fonction de distribution, ou densité de probabilité  $f(t)$  et par sa fonction de répartition  $F(t)$  telles que :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}(t < T < t + dt)}{dt}$$

La fonction de répartition  $F(t)$  représente la probabilité qu'un événement (une défaillance) survienne à l'instant  $T$  dans l'intervalle  $(0, t)$  :  $F(t) = P(T < t)$ .

#### □ Représentations graphiques de $f(t)$ et $F(t)$

$$f(t)dt = \text{Prob}[t < T < t + dt]$$

$f(t)$  est une densité de probabilité.

$$F(t) = \int_{-\infty}^{t_i} f(t)dt = \text{Prob}(T < t_i)$$

Si variable aléatoire discrète :

$$F(t_n) = \sum_0^n f(t_i) = \text{Prob}(T < t_n)$$

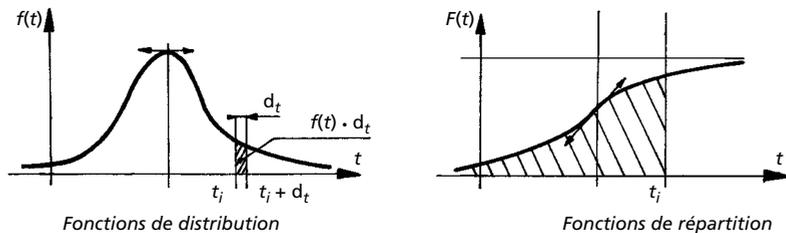


Figure 5.14 – Fonctions de densité de probabilité et de répartition

#### □ Application à la fiabilité

Un dispositif mis en marche pour la première fois à  $t_0$  tombera inexorablement en panne à un instant  $T$  non connu a priori.  $T$ , date de la panne, est une variable aléatoire de fonction de répartition  $F(t)$ .

$F(t)$  est la probabilité d'une défaillance avant  $t_i$ .

$R(t)$  est la probabilité de bon fonctionnement à  $t_i$ . C'est une fonction monotone décroissante.

$R(t)$  et  $F(t)$  sont des probabilités complémentaires, telles que :

$$R(t) + F(t) = 1$$

$$\int_0^t f(t)dt + \int_t^\infty f(t)dt = I$$

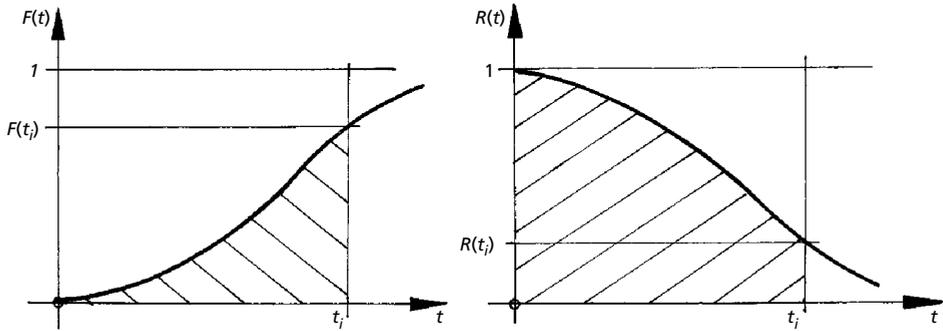


Figure 5.15 – Probabilités complémentaires  $F(t)$  et  $R(t)$

□ Taux de défaillance

Soit  $N_0$  le nombre de dispositifs fonctionnant à  $t_0$ ,

$N(t)$  le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant  $t$ ,

$N(t + \Delta t)$  le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant  $t + \Delta t$ .

$\frac{N(t)}{N_0}$  est un estimateur de la fiabilité  $R(t)$  :

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \Delta N > 0$$

Signe moins car  $N(t)$  décroît. À l'instant  $t + \Delta t$ , il reste :

$$N(t + \Delta t) - N(t) = -\Delta N$$

Si  $\Delta t$  tend vers 0, l'estimateur tend vers une limite qui est le taux de défaillance instantané :

$$\lambda(t)dt = -\frac{dN}{N(t)}$$

$\lambda(t)dt$  est une probabilité conditionnelle de défaillance sur l'intervalle  $(t, t + dt)$ , car elle ne s'applique qu'aux survivants à l'instant  $t$ .

Appliquons le théorème des probabilités conditionnelles :

$$P(\text{d'avoir une panne entre } t \text{ et } dt) = P(\text{de survivre à } t) \cdot \lambda(t) \cdot dt$$

$$f(t) \cdot dt = R(t) \cdot \lambda(t) \cdot dt$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

### □ Expression générale de la fiabilité

Intégrons l'expression trouvée  $\lambda(t)dt = -\frac{dN}{N(t)}$  entre 0 et  $t$ .

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln N(t) + k$$

$$N(t) = k \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

Pour  $t = 0$ ,  $N(t) = N_0$  d'où  $k = N_0$ .

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

C'est la relation fondamentale de la fiabilité, que nous retrouverons adaptée à la loi exponentielle avec un paramètre  $\lambda$  et à la loi de Weibull avec trois paramètres ( $\gamma, \beta, \eta$ ).

### □ Expression de la MTBF

La durée moyenne entre deux défaillances est l'espérance mathématique de la variable aléatoire  $T$ , qui a pour expression :

$$MTBF = E(T) = \int_0^t t \cdot f(t)dt$$

### □ Exemple : probabilité de réussite d'une mission

Nous allons calculer la probabilité de réussite d'une mission de durée  $\Delta t$  après un temps  $T$  de bon fonctionnement. Nous la noterons :

$$R(\Delta t / T) = \frac{R(T + \Delta t)}{R(T)}$$

Soit une mission d'une durée de 100 h au bout d'une période de 1 500 h de fonctionnement :

$$R(T) = R(1\,500 \text{ h}) = 0,367$$

$$R(T + \Delta t) = R(1\,600 \text{ h}) = 0,349$$

Donc :

$$R(100/1\ 500) = \frac{0,349}{0,367} = 0,95$$

Il y a donc 95 chances sur 100 que le système remplisse sa mission de 100 h au bout de 1 500 h de fonctionnement.

### 5.2.3 Lois de composition de la fiabilité : association de matériels

#### □ Configurations « série, parallèle »

La fiabilité d'un système est évidemment conditionnée par la fiabilité de chacun de ses composants mais aussi par la façon dont ils sont structurés. Cette structure peut être modélisée par des « blocs-diagrammes » de fiabilité configurés en série ou en parallèle.

#### □ Configuration en série

S fonctionne si A et B... et N fonctionnent, mais S est défaillant si A *ou* B... *ou* N sont défaillants ! (Revoir les tables de vérité § 4.5.4.)

La configuration en série est caractéristique de l'association d'équipements en lignes de production. Dans ce cas, ce sont les disponibilités de chacun que nous composerons pour évaluer la disponibilité de la ligne (voir § 5.5).

Au niveau des sous-ensembles ou des composants d'un système, le modèle « série » est le plus fréquent. Il se caractérise par le fait « qu'il suffit qu'un composant soit défaillant pour que le système soit défaillant ». Ce qui se vérifie le long d'une chaîne cinématique, par exemple. Le modèle « série » n'est pas toujours immédiatement visible : soit un palier monté sur deux roulements, sont-ils en série ? Oui, puisque la défaillance de l'un d'entre eux entraîne la défaillance du palier.



Figure 5.16

#### □ Configuration parallèle

S est défaillant si A et B (et N) sont simultanément défaillants.

La configuration parallèle est plus rare, puisqu'elle implique une redondance volontaire de deux ou de  $n$  éléments de telle façon que « la défaillance du système n'est obtenue que si tous les éléments sont simultanément défaillants ». Ce qui va dans le sens de la sûreté de fonctionnement du système.

Les redondances sont rares au niveau des équipements, car coûteuses en investissement (groupe électrogène de secours en parallèle avec l'alimentation électrique du réseau, par exemple), mais plus fréquentes au niveau des modules : redondance de deux automates avec un détecteur de discordance, ou de trois automates avec un « voteur » majoritaire 2/3.

Attention cependant aux pseudoredondances sous l'effet de « modes communs » de défaillances ! Les calculs suivants ne sont valables que dans le cas de « l'indépendance (des causes) des défaillances ».

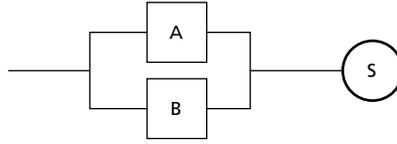


Figure 5.17

Le principe de toute redondance est de doubler ou de multiplier certains éléments pour assurer le maintien de la fonction (ou mission) du système face à une défaillance élémentaire. Un tel système est nommé *fault tolerant system*. Cette redondance peut prendre de nombreuses formes :

- matérielle ou logicielle;
- homogène (éléments identiques) ou hétérogène (natures différentes des éléments);
- massive (système doublé) ou sélective (quelques composants multipliés);
- active (tous les éléments sont activés) ou passive (l'élément inactivé doit prendre le relais en cas de défaillance).

#### □ Composition des fiabilités

Hypothèse commune : les défaillances doivent être indépendantes, au sens probabiliste du terme.

#### □ Cas du modèle série

Les probabilités composées donnent la formule suivante :

$$R_s(t) = R_A(t) \cdot R_B(t) \cdot \dots \cdot R_n(t)$$

$$R_s(t) = \prod R_i(t)$$

#### Exemple

$$R_s = 0,9 \times 0,9 \times 0,9 = 0,729$$

Commentaire : notons l'exigence de très bonne fiabilité de chaque composant mis en série pour obtenir une bonne fiabilité du système. « L'allocation de fiabilité » consiste à partir de la fiabilité-système attendue pour déterminer chaque fiabilité élémentaire. La fiabilité-système ainsi « construite » à partir du choix de composants déterminés, de matériaux sélectionnés, de contrôles optimisés coûte cher; la panne aussi...

Soit en système composé de 50 éléments tels que la panne d'un seul entraîne la perte de mission de l'ensemble. Si chacun a une fiabilité de 0,999 pendant la mission, la fiabilité du système sera :

$$(0,999)^{50} = 0,951$$

soit 4,9 % de risque de panne, ce qui n'est pas négligeable.

L'objectif « 0 panne », ambitieux et onéreux, est donc réservé à des domaines où les enjeux sont gigantesques (nucléaire, espace, aéronautique). Par contre, il est indis-

pensable de transférer une partie de ce savoir-faire « fiabiliste » vers le milieu industriel qui, avec moins de moyens, a aussi à satisfaire des exigences de disponibilité et de sécurité.

### □ Cas du modèle parallèle

Il n'existe pas d'expression simple en dehors de la redondance active de deux éléments pour laquelle le théorème des probabilités totales donne :

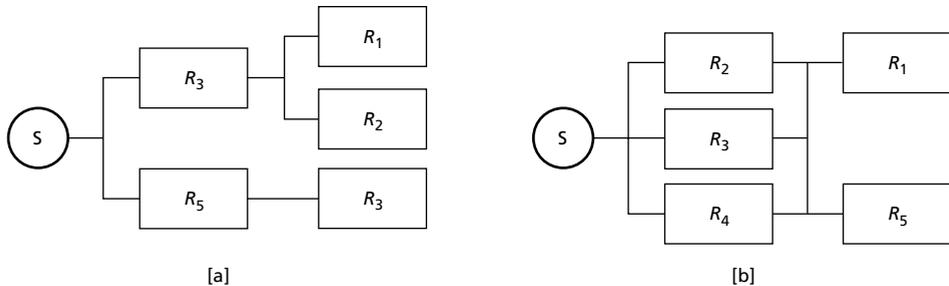
$$R_s(t) = R_A(t) + R_B(t) - R_A(t) \cdot R_B(t)$$

### Exemple

$$R_s = 0,9 + 0,9 - 0,81 = 0,99$$

Commentaire : la mise en redondance fiabilise un système, sous réserve que les éléments de la redondance ne soient pas soumis à des causes communes de défaillances. Le paragraphe 4.5.4 « Arbre de défaillances » donne un exemple de composition dans le cas particulier de la loi exponentielle.

Notons que certains circuits complexes ne peuvent pas se ramener aux modèles « série-parallèle ». Il faut alors faire appel aux techniques bayésiennes (du théorème de Bayes). La figure 5.18 montre un exemple de structure non réductible.



**Figure 5.18** – (a) structure réductible;  
(b) structure non réductible par les probabilités simples

### □ Différentes formes de redondances

Il y a redondance dès qu'une fonction peut être assurée par deux ou plusieurs moyens. On distingue plusieurs formes de redondances :

- la redondance active est telle que tous les moyens fonctionnent simultanément;
- la redondance majoritaire est telle que certains moyens sont au repos, et qu'ils sont sollicités en cas de défaillance;
- la redondance majoritaire  $m/n$  est telle que la fonction est assurée si au moins  $m$  des  $n$  moyens sont en état de fonctionner. Prenons l'exemple de trois canaux redondants : un « voteur 2/3 » permet d'assurer la continuité de la fonction en alarmant la défaillance du canal (détection + localisation).

### 5.2.4 Essais de fiabilité

Lorsque l'on désire évaluer la fiabilité d'un dispositif (module ou composant), on se trouve confronté au double problème du temps et de l'argent. D'où l'idée de mettre en œuvre des « essais de fiabilité » accélérés.

#### □ Essais accélérés

Ces essais sont réalisés sur des effectifs faibles, mais en lot homogène, en utilisant des techniques faisant apparaître les défauts plus rapidement que lors des conditions normales d'exploitation.

#### □ Définition des critères d'essai

- La forme et la taille de l'échantillonnage : un lot ( $N$ ) à étudier est décomposé en  $k$  échantillons de taille  $n$ .
- La durée de l'essai.
- Le niveau de confiance attendu.

Ces paramètres sont évidemment définis et souvent limités par le budget consacré à l'essai de fiabilité.

#### □ Définition des conditions d'essai

- Recherche des processus de dégradation et des zones sensibles à ces dégradations (exemple : zone d'usure ou de corrosion).
- Recherche des lois de dégradation (vitesse d'évolution de dégradation). L'évaluation du « facteur d'accélération » est complexe, car on n'applique jamais la totalité des contraintes.
- Les techniques d'accélération : les essais se font sous contraintes constantes ou échelonnées.

Contraintes constantes : le lot est décomposé en  $k$  échantillons. Différents niveaux de contraintes sont appliqués aux  $k$  échantillons, chacun étant soumis à un niveau de contraintes constant.

Contraintes échelonnées : on applique à chaque échantillon plusieurs niveaux d'une même contrainte.

#### □ Différentes formes d'essais

Ces essais peuvent se pratiquer sous forme :

- complète : les essais durent jusqu'à la défaillance du dernier composant ;
- tronquée : l'essai est arrêté à une date prédéterminée. Remarquons que l'exploitation statistique de ce cas rejoint l'exploitation statistique d'un historique arrêté à la date de l'étude, donc tronqué par nature ;
- censurée : l'essai est arrêté à un nombre prédéterminé de défaillances ;
- séquentielle : l'essai est arrêté lorsque la fiabilité estimée est supérieure à un seuil prédéterminé ;
- de mort soudaine, essai développé ci-dessous.

Essai par mort soudaine

Principe

L'essai par mort soudaine présente la particularité d'être rapide. Il consiste à partager un lot de  $N$  composants à évaluer en  $m$  groupes de  $p$  composants :  $N = m \cdot p$ . On enregistre le temps de la première défaillance de chaque groupe, et on arrête l'essai quand tous les groupes ont subi leur première défaillance. L'exploitation de l'essai se fait par la loi de Weibull, développée au paragraphe 5.3.2.

Exemple

Soit un lot de 80 électrovannes partagé en 10 groupes de 8. L'essai permet d'enregistrer les temps relatifs aux 10 « premières défaillances » de chaque groupe, que l'on porte sur un papier de Weibull. On obtient ainsi la « droite de mort soudaine » des premières défaillances.

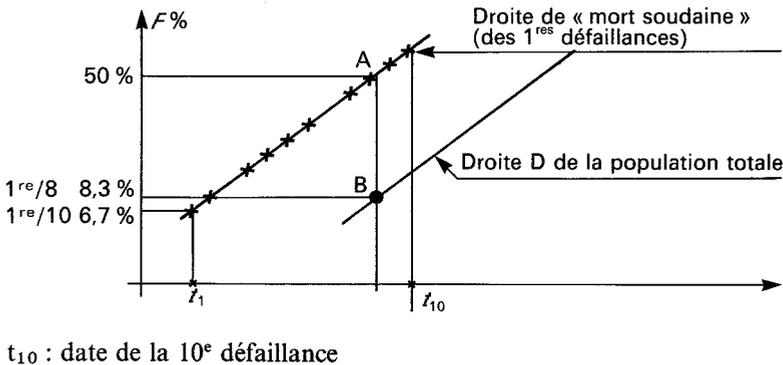


Figure 5.19 – Essai de fiabilité par mort soudaine

A représente la médiane de l'essai. B représente le rang médian de la première défaillance sur 8 (effectif du groupe essayé). La droite D, menée par B et parallèle à la droite de mort soudaine, est caractéristique de la population essayée. On déduira donc de cette droite la valeur des paramètres de Weibull, donc la loi de fiabilité  $R(t)$  de l'échantillon.

## 5.3 La fiabilité : analyses par les lois de probabilité

### 5.3.1 Analyse de la fiabilité à partir du modèle exponentiel

Domaine d'utilisation de la loi exponentielle en fiabilité

La courbe en baignoire de la figure 5.4, relative à la durée de vie d'un système, fait apparaître une période de maturité plus ou moins longue pendant laquelle le taux de défaillance d'un système ou d'un composant est sensiblement constant :

c'est le champ d'application de la loi exponentielle, qui repose sur l'hypothèse  $\lambda = \text{constante}$ .

Dans ce cas, les défaillances « aléatoires » émergent sous l'action de causes diverses et indépendantes – par opposition à la période suivante, dite « de vieillesse », pendant laquelle un ou plusieurs modes de défaillance prédominants apparaissent (fatigue, corrosion, etc.).

L'électronique se prête bien à l'utilisation de la loi exponentielle, dès lors que les composants sont déverminés. La plupart des analyses prévisionnelles de fiabilité et de maintenabilité reposent sur les hypothèses exponentielles :

$\lambda$  taux de défaillance constant en fiabilité, donc  $MTBF = 1/\lambda$ ;

$\mu$  taux de réparation constant en maintenabilité, donc  $MTTR = 1/\mu$ .

#### □ Origine : la loi de Poisson (loi discrète)

La réalisation d'événements aléatoires dans le temps se nomme « processus de Poisson ». Il caractérise une suite de défaillances équiprobables, indépendantes du temps et indépendantes entre elles. Dans ce cas, la probabilité de constater  $k$  pannes à l'instant  $t$  s'exprime par la loi de Poisson :

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

L'espérance mathématique est alors donnée par :  $E(t) = m = \nu = \lambda t$ . À l'instant  $t$ , la fiabilité est la probabilité pour qu'il n'y ait pas de panne à  $t$ . Elle s'écrit :

$$R(t) = P(k=0) = e^{-\lambda t} \quad (\text{sachant que } a^0 = 1)$$

#### □ Loi exponentielle (loi continue) : caractéristiques

Elle se retrouve à partir de la loi fondamentale de la fiabilité avec  $\lambda$  constant. La probabilité de survie entre 0 et  $t$  devient :

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

– Densité de probabilité :  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ .

– Fonction de répartition :  $F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} = \text{probabilité de panne entre 0 et } t$ .

– Espérance mathématique :  $E(t) = 1/\lambda = MTBF$ .

– Écart-type :  $\sigma = 1/\lambda$ .

– Durée de vie associée à un seuil de fiabilité : tirons  $t$  de la loi exponentielle :

$$-\lambda t = \ln R(t) \text{ soit } t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{R(t)}$$

Par exemple, pour un composant de  $MTBF = 2\,000$  h et un seuil  $R(t_j) = 0,9$ , on aura  $t_j = 0,105/\lambda = 0,105 \cdot MTBF$ , d'où la valeur  $t_j = 210$  h telle que 90 % des composants survivent.

□ Représentations graphiques de la loi exponentielle

□ Anamorphose de la loi exponentielle

La représentation linéaire de la loi exponentielle s'obtient sur un simple papier semi-logarithmique. L'anamorphose permet une représentation linéaire de la fiabilité, la droite ayant pour pente  $\lambda/2,3$ .

En effet, si  $R(t) = e^{-\lambda t}$ ,

$$\ln R(t) = -\lambda t \text{ en logarithmes népériens}$$

$$\text{ou } \log R(t) = -\frac{\lambda}{2,3} t \text{ en logarithmes décimaux.}$$

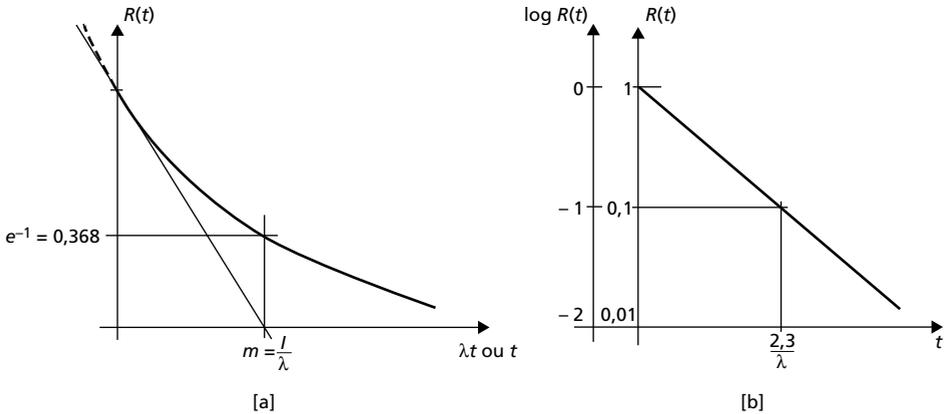


Figure 5.20 – Représentations graphiques de la loi exponentielle : (a) en échelles linéaires; (b) sur papier semi-logarithmique

□ Ajustement graphique : méthode d'estimation de  $\lambda$

Portons sur le papier semi-logarithmique les  $N$  points formés des couples  $(t_i, F_i)$  extraits d'un tableau de valeurs du type du tableau 5.6. Traçons la droite  $D$  de régression des  $N$  points : si les points sont sensiblement alignés, alors la loi exponentielle s'applique. Notons que la régression peut se faire « au jugé » ou par une méthode de régression linéaire.

Déterminons la valeur du paramètre constant  $\lambda$  (par la pente de la courbe). Nous en déduisons la valeur de la  $MTBF = 1/\lambda$  et l'équation de la loi exponentielle  $R(t) = e^{-\lambda t}$ , qui permet d'associer à chaque instant  $t_i$  du fonctionnement la probabilité de bon fonctionnement  $R(t_i)$  sur la période de validité de la loi.

□ Estimation par intervalle de confiance

Il est parfois indispensable de « relativiser » l'écriture «  $MTBF = 1\ 827$  heures » par un encadrement de cette valeur dans un intervalle de confiance. En effet, la signification de ce résultat probabiliste est fonction de la taille  $N$  de l'échantillon et du niveau de confiance choisi (le plus souvent la valeur 0,9). Un exemple de détermination d'intervalle de confiance est donné dans (MON 90) à partir des abaques extraits de la norme X 06-501.

### □ Application à la gestion des rechanges

Soit un « module » à approvisionner en magasin comme pièce de rechange, dont nous avons déterminé la *MTBF* par le modèle exponentiel. Sa consommation dépend de la maintenance préventive programmée (consommation connue) et de la maintenance corrective (actions de fréquences aléatoires).

Dans le cas de la seule maintenance corrective, le problème est de calculer le nombre  $r$  de modules de rechange au point de commande, de façon à éviter la rupture de stock avec un risque admis de 5 à 10 % en général. Nous adopterons les notations suivantes :

$T$  : durée maximale d'approvisionnement, à partir du point de commande;

taux de défaillance constant :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

$i$  : variable « nombre de défaillances » = nombre de modules consommés;

$r$  : nombre maximal de défaillances pendant  $T$ , associé au risque  $1 - P = 10\%$ ;

$P$  : probabilité de non-rupture = probabilité qu'il n'y ait pas plus de  $r$  défaillances pendant  $T$  :

$$P(r) = \sum_{i=0}^r \frac{e^{-\lambda T} (\lambda T)^i}{i!}$$

Une table de la loi de Poisson permet de calculer le nombre  $r$  de modules de rechange. Appliquons la loi de Poisson à deux exemples numériques, un sous-ensemble A ( $MTBF = 5\,000$  h) et une pièce a ( $MTBF = 12\,500$  h). Si la période d'approvisionnement est  $T = 800$  h, le tableau 5.7 nous donne le nombre  $r$  de rechanges à stocker.

Tableau 5.7

Module	<i>MTBF</i>	$\lambda$	$\lambda T$	$r$
Sous-ensemble A	5 000 h	$2 \times 10^{-4}$	0,16	2
Pièce a	12 500 h	$8 \times 10^{-5}$	0,06	1

L'utilisation d'abaques donnant directement le nombre de rechanges nécessaire sera expliquée au paragraphe 7.3.3.

### 5.3.2 Analyse de la fiabilité à partir du modèle de Weibull

#### □ Domaine d'utilisation et polymorphisme de la loi de Weibull

#### □ Domaine d'utilisation de la loi de Weibull

La loi de Weibull à trois paramètres est très « souple », ce qui lui permet de s'ajuster à un grand nombre d'échantillons prélevés au long de la vie d'un équipement. Elle couvre les cas de taux de défaillance variables, décroissants (période de jeunesse) ou croissants (période de vieillesse).

Son exploitation fournit :

- une estimation de la *MTBF* de la population de défaillances;
- les équations de  $R(t)$  et de  $\lambda(t)$ , ainsi que leurs variations sous forme graphique;
- mais aussi le paramètre de forme  $\beta$  qui peut orienter un diagnostic, sa valeur étant caractéristique de certains modes de défaillance.

□ Polymorphisme de la loi de Weibull

Les graphes de la fonction de distribution  $f(t)$  et du taux de défaillance  $\lambda(t)$  de la figure 5.21 illustrent ce polymorphisme sous la seule influence du paramètre de forme  $\beta$ .

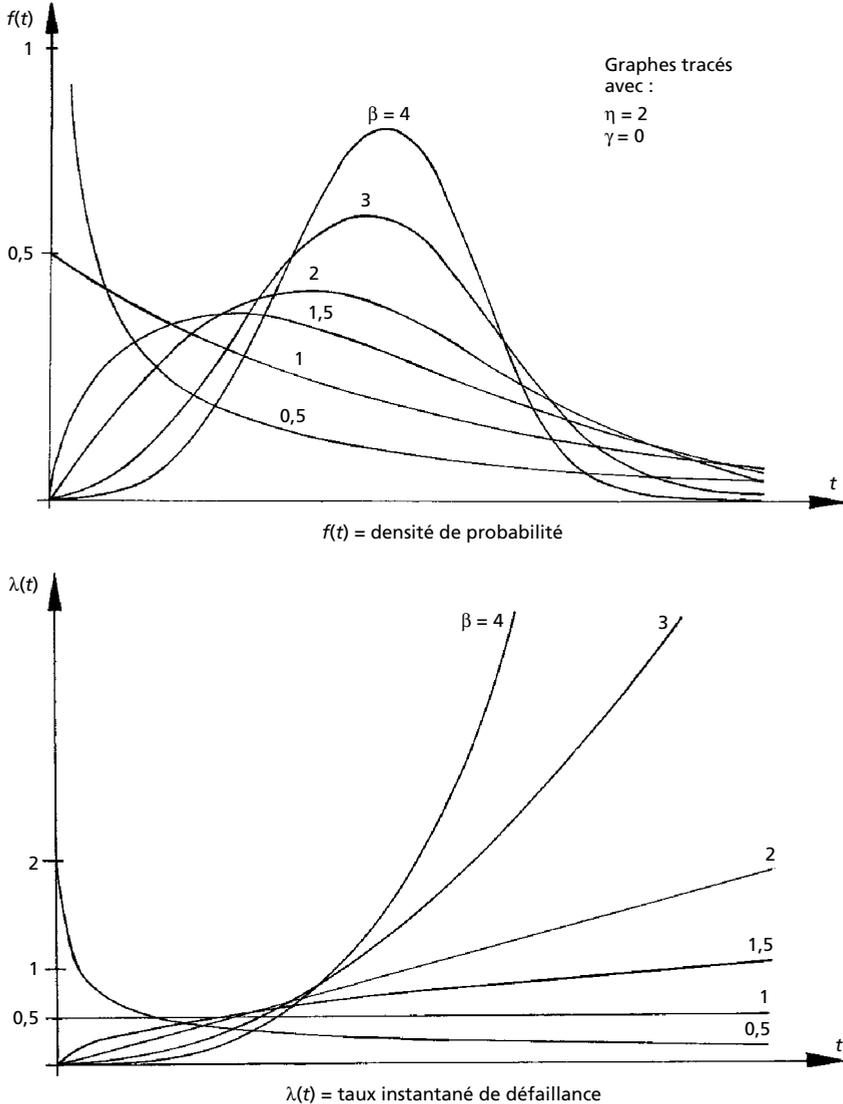


Figure 5.21 – Variabilité de la loi de Weibull sous l’influence de  $\beta$

$\beta$  est appelé paramètre de forme ( $\beta > 0$ ) : suivant que  $\beta$  est supérieur, égal ou inférieur à 1, la loi de Weibull correspond à un taux de défaillance instantané croissant, constant ou décroissant.

$\eta$  est appelé paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ ) : parfois nommé « caractéristique de vie », c'est un simple paramètre de changement d'échelle de temps.

$\gamma$  est appelé paramètre de position ( $-\infty < \gamma < +\infty$ ) : il définit un changement d'origine dans l'échelle des temps. Par exemple, si  $\gamma > 0$ , il y a une survie totale (pas de défaillance) entre 0 et  $\gamma$ .

Une analyse de la signification « pratique » des paramètres sera donnée au paragraphe 5.3.3.

**Expressions mathématiques caractéristiques : relations de la loi de Weibull**

**Densité de probabilité  $f(t)$**

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{(\beta-1)} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \text{ avec } t \geq \gamma$$

**Fonction de répartition  $F(t)$  et fiabilité  $R(t)$**

$$F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

La fiabilité correspondante est donc  $R(t) = 1 - F(t)$  :

$$R(t) = e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

**Remarque**

Pour  $\gamma = 0$  et  $\beta = 1$ , on retrouve la distribution exponentielle, cas particulier de la loi de Weibull. Dans ce cas,  $\lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF}$ .

**Expression du taux instantané de défaillance  $\lambda(t)$**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{(\beta-1)}$$

avec  $t \geq \gamma$ ,  $\beta > 0$ ,  $\eta > 0$ .

□ **Espérance mathématique (MTBF) et variance**

$$E(t) = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) = MTBF$$

dans laquelle  $\Gamma$  est le symbole d'une fonction eulérienne de seconde espèce.

$$v(t) = \eta^2 \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) - \eta^2 \left[ \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \right]^2$$

Notons que la recherche numérique de la  $MTBF = A\eta + \gamma$  et de l'écart-type  $\sigma = B\eta$  se fait à partir des valeurs du tableau 5.9.

□ **Durée de vie associée à un seuil de fiabilité**

La loi  $R(t)$  permet d'associer la fiabilité à tout instant de fonctionnement d'un équipement. Réciproquement, il peut être intéressant de savoir à quel instant la fiabilité atteindra un seuil prédéterminé. En particulier, pour les roulements à billes, la durée de vie nominale est définie comme la durée atteinte par 90 % d'un lot de roulements. On la nomme  $L_{10}$ , durée de vie associée à un seuil de fiabilité de 0,90.

Développement :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Prenons le logarithme népérien des deux membres :

$$\ln R(t) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta$$

$$\left[ \ln \frac{1}{R(t)} \right]^\frac{1}{\beta} = \frac{t-\gamma}{\eta}$$

d'où la formule générale :

$$t = \gamma + \eta \left[ \ln \frac{1}{R(t)} \right]^\frac{1}{\beta}$$

et, en particulier, au seuil  $R(t) = 0,9$  :

$$L_{10} = \gamma + \eta \left[ \ln \frac{1}{0,9} \right]^\frac{1}{\beta}$$

□ **Structure du papier de Weibull**

□ **Description du papier fonctionnel de Weibull**

Ce papier « log-log » porte quatre axes :

- l'axe A est l'axe des temps sur lequel nous porterons les valeurs  $t_i$  de durées de bon fonctionnement;
- l'axe B porte  $F(t)$  sur lequel nous porterons les valeurs  $F(i)$  calculées par approximation (rangs moyens ou médians). Nous estimerons la fiabilité en prenant le complément :  $R(t) = 1 - F(t)$ ;
- l'axe a correspond à  $\ln t$ ;
- l'axe b correspond à  $\ln \ln (1/1 - F(t))$ . Cet axe permettra d'évaluer la valeur de  $\beta$ .

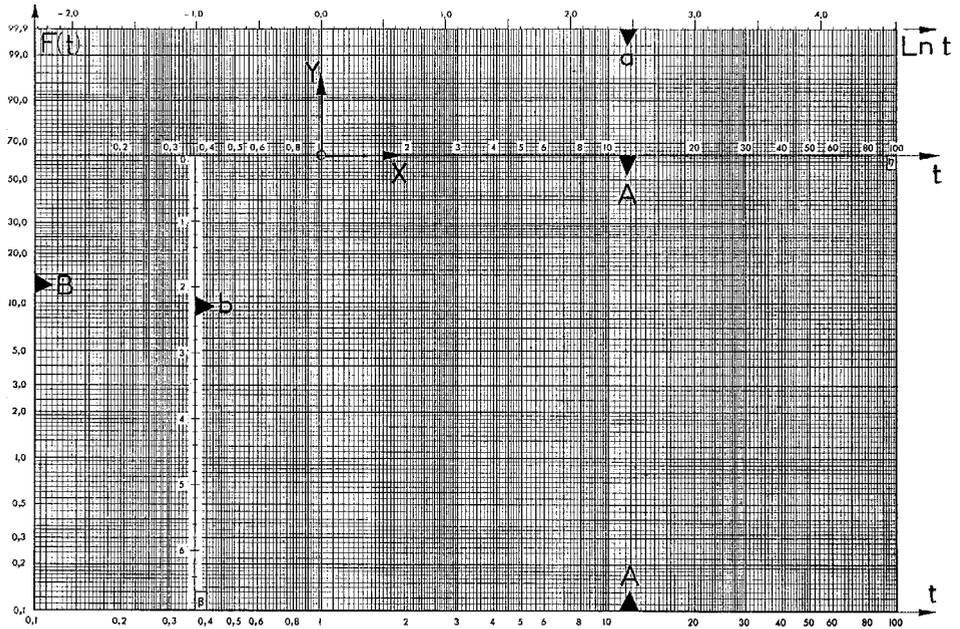


Figure 5.22 – Description du papier de Weibull

Justification mathématique de la structure du papier de Weibull

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Nous pouvons prendre le log népérien des deux membres car  $R(t) \leq 1$ .

$$\frac{1}{R(t)} = \frac{1}{1 - F(t)} \geq 1$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) \geq 0$$

L'équation devient :

$$\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = \beta \ln\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = \beta \ln(t-\gamma) - \beta \ln \eta$$

qui est de la forme :

$$Y = \beta X + C$$

Nous obtenons une relation linéaire entre  $X$  et  $Y$  telle que la droite  $D_1$  de régression du nuage de points  $(F_i, t_i)$  a pour pente le paramètre  $\beta$ .

Au point  $t = \eta = 1$ , origine du repère  $(X, Y)$ ,  $\ln \eta = 0$ , donc  $C = 0$ .

La droite  $D_2$  parallèle à  $D_1$  passant par l'origine de  $(X, Y)$  a pour équation  $Y = \beta X$ . Elle permet de déterminer la valeur de  $\beta$  sur l'axe  $b$ .

### 5.3.3 Modèle de Weibull : réalisation de l'ajustement graphique

#### □ Méthodologie de l'analyse de fiabilité

1. Préparation des données.
2. Tracé du nuage de points  $(t_i, F_i)$ .
3. Tracé de la droite dite « de Weibull »  $D_1$ .
4. Détermination des valeurs des trois paramètres  $\beta, \eta, \gamma$ .
5. Équation de la loi de Weibull (et représentation graphique éventuelle).
6. Détermination de la *MTBF* (et de l'intervalle de confiance éventuellement).
7. Exploitation des résultats.

#### □ Application de la méthodologie à un cas simple

##### 1. Préparation des données

Le tableau 5.6 a mis en évidence la structure générale d'un tableau de données en fonction de la taille  $N$  de l'échantillon. Prenons un exemple « mini » de 6 *TBF* (durées de bon fonctionnement d'un composant) traité avec la formule des rangs médians.

$$F(i) = \frac{i-0,3}{N+0,4}$$

Tableau 5.8

Ordre $i$	TBF	$F(i)$
1	165	$0,7/6,4 = 0,11$
2	330	0,26
3	515	0,42
4	740	0,58
5	915	0,73
6	1 320	0,89

2. Tracé du nuage de points

3. Tracé de la droite  $D_1$  de Weibull

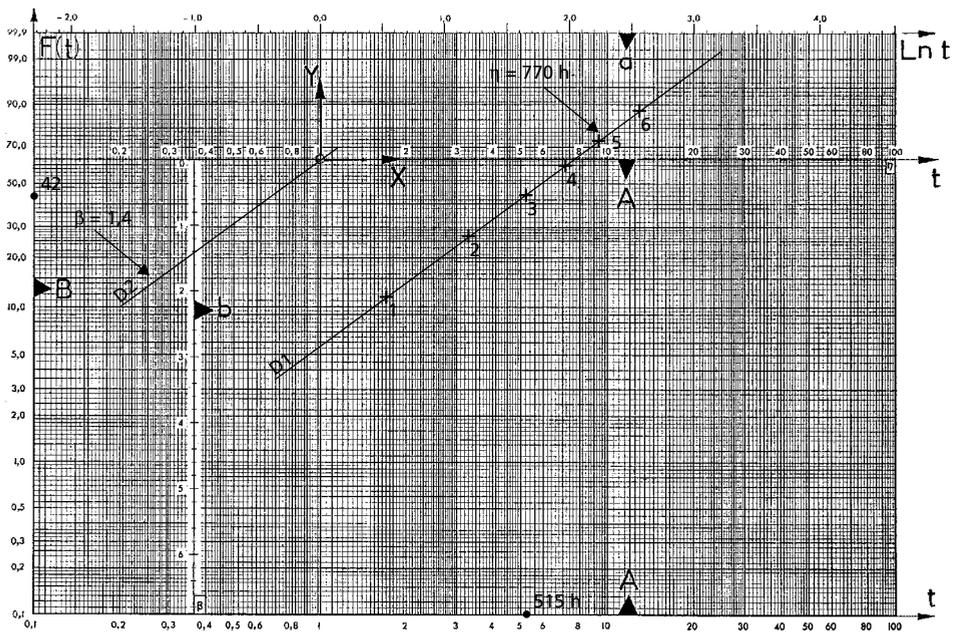


Figure 5.23

Le tracé du point 3 ( $t = 515$  heures,  $F(i) = 42\%$ ) figure à côté des 5 autres points. La régression des 6 points « au jugé » se fait sans difficulté dans ce cas simple : nous obtenons la droite  $D_1$ .

4. Détermination des valeurs des trois paramètres :

- le fait d'avoir eu directement une droite  $D_1$  sans redressement indique que  $\gamma = 0$  (paramètre de position);

- menons la parallèle  $D_2$  à  $D_1$  passant par l'origine de  $(X, Y)$ .  $D_2$  coupe l'axe  $b$  en un point  $\beta = 1,4$  : c'est la valeur du paramètre de forme ;
- la droite  $D_1$  coupe l'axe  $t = \eta$  à l'abscisse  $\eta = 770$  h : c'est le paramètre d'échelle.

### 5. Équation de la loi de Weibull

Il suffit de remplacer les trois paramètres constants dans l'équation générale  $R(t)$  de Weibull pour avoir l'équation de la fiabilité du composant étudié.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{770}\right)^{1,4}}$$

Il est possible de trouver les expressions de  $f(t)$ ,  $F(t)$  et de  $\lambda(t)$  à partir des trois paramètres, d'en visualiser les variations sur des graphes et d'associer à tout instant la probabilité de défaillance et le taux de défaillance instantané. L'étude de cas 5.3.5 montrera les différentes exploitations possibles.

### 6. Détermination de la MTBF et de l'écart-type $\sigma$

Le tableau 5.9 nous donne les valeurs des constantes A et B pour  $\beta = 1,4$  (voir p. 180) :  $A = 0,911$  et  $B = 0,660$ . Nous en déduisons la valeur de la  $MTBF = A\eta + \gamma = 0,911 \times 770 = 700$  heures ;  $\sigma = B\eta = 0,660 \times 770 = 508$  heures.

#### □ Ajustement graphique : détermination des paramètres

Contrairement à notre exemple précédent volontairement « simple », les points expérimentaux portés sur le papier de Weibull sont souvent plus délicats à traiter et à interpréter.

#### □ Détermination de $\beta$ et de $\eta$

La droite  $D_1$  de régression coupe l'axe  $A(t, \eta)$  à l'abscisse  $t = \eta$  (justification : quand  $Y = 0$ ,  $\ln(t - \gamma) = \ln t = \ln \eta$  donc  $t = \eta$ ).

$\beta$  est la pente de  $D_1$ . Pour obtenir sa valeur, nous traçons la droite  $D_2$  parallèle à  $D_1$ , passant par le point  $\eta = 1$  (origine de  $X, Y$ ). La droite  $D_2$  coupe l'axe  $b$  en un point qui donne la valeur de  $\beta$  (justification :  $D_2$  est la droite d'équation  $Y = \beta X$  avec  $X = \ln t$ ).

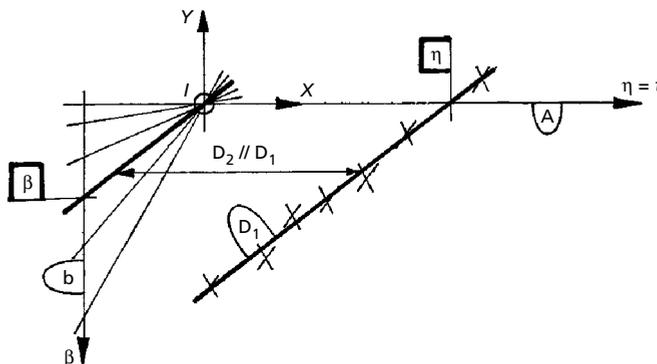


Figure 5.24

Pour  $t = 1$ ,  $\ln t = 0$  donc  $X = Y = 0$ .

Pour  $\ln t = -1$  (sur l'échelle a),  $Y = \beta \ln t = -\beta$ .

Comme l'axe b portant  $\beta$  est orienté vers le bas,  $Y = -b$  donc  $b = \beta$ .

#### □ Détermination de $\gamma$ : les techniques de redressement

Si le nuage de points  $(t_i, F_i)$  fait apparaître une courbure convexe ou concave, alors le paramètre  $\gamma$  a une valeur non nulle à déterminer après avoir effectué un « redressement ». Ce redressement peut se faire « au jugé » ou par application d'une formule de redressement.

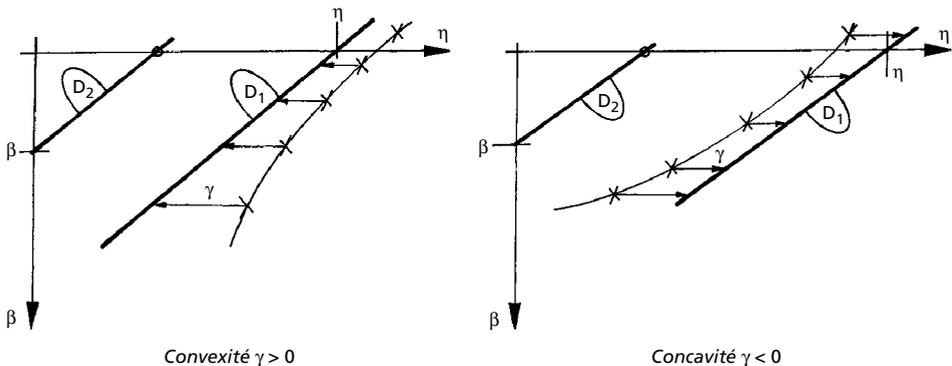


Figure 5.25

#### Redressement au jugé

Il faut translater tous les points d'une même valeur  $\gamma$  dont on augmente la valeur de proche en proche : la concavité (ou convexité) diminue progressivement jusqu'à l'obtention d'une droite : la valeur de translation finale est  $\gamma$ .

#### Redressement par la formule (MON 90, p. 167)

$$\gamma = \frac{t_2^2 - t_1 t_3}{2t_2 - t_1 - t_3}$$

Prenons trois points  $A_1, A_2$  et  $A_3$  sur la courbe  $C_1$  tels que  $(a_1, a_2) = (a_2, a_3) = \Delta$ . Il est conseillé de prendre des points espacés mais non extrêmes. Nous lisons les valeurs  $t_1, t_2$  et  $t_3$  sur l'axe des  $t$  (axe A). Il reste à appliquer la formule ci-dessus pour trouver  $\gamma$  et pour tracer la droite  $D_1$ . L'intersection de  $D_1$  avec l'axe  $\eta$  donne la valeur du paramètre  $\eta$  (figure 5.26).

#### Exemple

Soit un nuage de points, approximé par la courbe  $C_1$ . Choisissons  $A_1, A_2$  et  $A_3$ . Nous lisons  $t_1 = 2,5, t_2 = 3, t_3 = 4$ ,

$$\gamma = \frac{3^2 - 2,5 \times 4}{2 \times 3 - 2,5 - 4} = 2$$

D'où les trois paramètres de Weibull :

$$\gamma = 2, \eta = 2, \beta = 2,1$$

et l'équation de la fiabilité :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-2}{2}\right)^{2,1}}$$

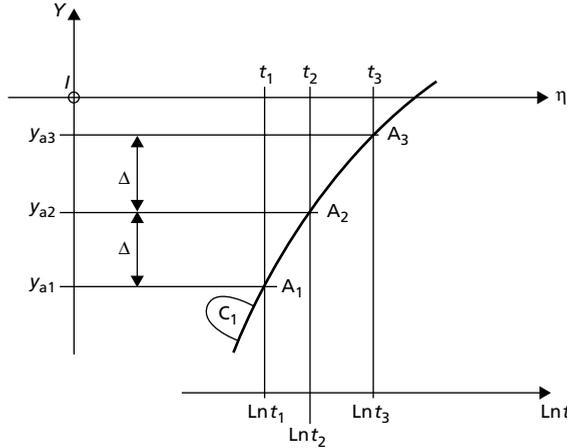


Figure 5.26 – Mode opératoire du redressement

- Signification des paramètres
- Paramètre de forme  $\beta$

C'est un paramètre sans dimension. Nous avons vu (figure 5.21) qu'il détermine la forme de la distribution  $f(t)$  des défaillances d'un système et que sa valeur caractérise chacune des trois phases de la vie d'un système :

- $\beta < 1$  phase de jeunesse avec défaillances de défauts de fabrication ou de montage;
- $\beta = 1$  phase de maturité avec défaillances aléatoires. Ce cas particulier correspond au taux de défaillance constant;
- $\beta > 1$  phase de vieillesse avec apparition d'un mode de défaillance prédominant caractérisé par  $\beta$ .

Le paramètre de forme peut aussi servir d'indicateur de diagnostic, certaines valeurs de  $\beta$  étant caractéristiques d'un mode de défaillance particulier.

**Exemple**

$1,1 < \beta < 1,6$  peut révéler un phénomène de fatigue. Il en est ainsi pour les roulements à billes dont la valeur normale est  $\beta = 1,1$ . Si  $\beta$  est plus fort, alors un mode de défaillance « anormal » (autre que la fatigue) est en cause.

Remarquons que pour  $\beta = 3,6$  on retrouve une distribution « normale ».

Un cas particulier intéressant est celui des « populations mélangées » qui sont mises en évidence lorsque deux modes de défaillances différents se succèdent, le

second se superposant alors au premier, tel que l'illustre la figure 5.27. Nous devons alors séparer les deux droites de Weibull (une par population) et non redresser la concavité d'une courbe !

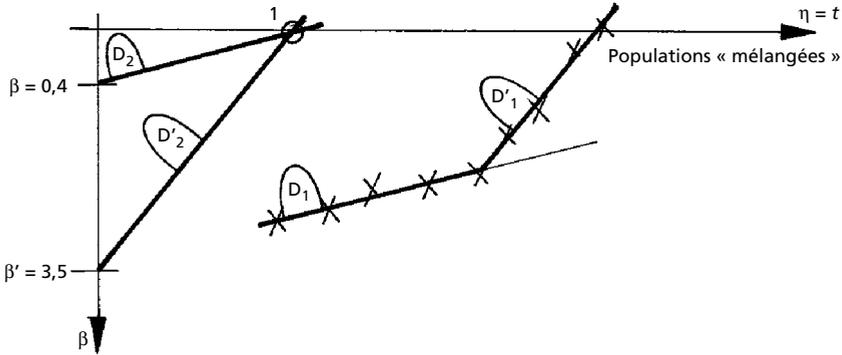


Figure 5.27 – Ajustement du nuage de points suivant deux droites

Nous pouvons penser, dans cet exemple, à des défaillances juvéniles dues à un mauvais montage ( $\beta = 0,4$ ) suivies de défaillances par usure ( $\beta = 3,5$ ).

#### □ Le paramètre d'échelle $\eta$

Caractérisant le choix d'une échelle, il s'exprime dans la même unité de temps (heures ou cycles) que les  $TBF_i$ . Si l'on trace la fonction de distribution  $f_1(t)$  avec  $\eta = 1$ , la courbe  $f_5(t)$  obtenue avec  $\eta = 5$  sera divisée par 5 (en ordonnées), le temps  $t$  sera multiplié par 5 et l'aire de la distribution restera inchangée.

#### □ Le paramètre de localisation $\gamma$

Également nommé paramètre de décalage ou de position, il s'exprime en unité de temps. Il indique la date de l'apparition du mode de défaillance caractérisé par  $\beta$ .

- Si  $\gamma > 0$ , il y a survie totale entre  $t = 0$  et  $t = \gamma$ .
- Si  $\gamma = 0$ , les défaillances débutent à l'origine des temps.
- Si  $\gamma < 0$ , les défaillances ont débuté avant l'origine des temps relevés, ce qui montre que la mise en service de l'équipement étudié a précédé la mise en historique des  $TBF$ .

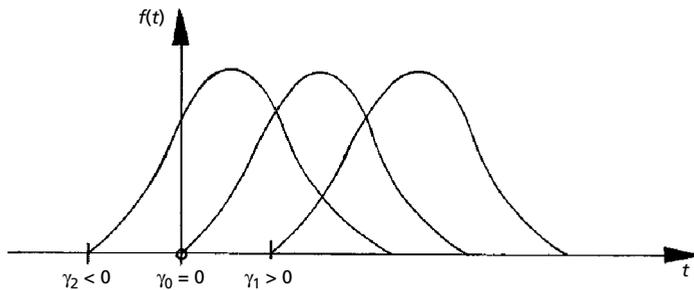


Figure 5.28

Explication : dans l'expression de la fiabilité :  $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ , le terme  $(t - \gamma)$  correspond à un changement d'origine par une translation d'abscisse  $t = \gamma$ .

### 5.3.4 Modèle de Weibull : recherche de la MTBF

Dans un contexte de gestion de la maintenance, la connaissance de la MTBF d'un système, d'un module interchangeable ou d'un composant sensible est indispensable pour optimiser un plan de maintenance systématique (période d'intervention  $T = k \cdot MTBF$ ). Le problème étant le crédit à accorder à la valeur de MTBF trouvée dans le cas, fréquent, d'un échantillonnage réduit. D'où le plan de ce paragraphe.

1. Comment estimer la MTBF à partir d'une étude de Weibull ?
2. Quel niveau de confiance lui accorder ?

- MTBF : usage des tables numériques
- Rappel des formules donnant la MTBF et la variance

$$E(t) = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = MTBF$$

dans laquelle  $\Gamma$  est le symbole d'une fonction eulérienne de seconde espèce.

$$v(t) = \eta^2 \Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2 = \sigma_2$$

La fonction eulérienne  $\Gamma$  est tabulée dans le tableau 5.9, qui dispense de fastidieux calculs.

- Tableau des valeurs A et B

À chaque valeur de  $\beta$  sont associés deux coefficients A et B tels que la durée de vie moyenne est donnée par  $MTBF = A\eta + \gamma$  et que l'écart-type est donné par  $\sigma = B\eta$ .

Tableau 5.9 – Tables numériques pour une loi de Weibull

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
			1,50	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
			1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
			1,60	0,8966	0,574	4,2	0,9089	0,244
			1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,20	120	1 901	1,70	0,8922	0,540	4,4	0,9114	0,235

$\beta$	A	B	$\beta$	A	B	$\beta$	A	B
0,25	24	199	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9126	0,230
0,30	9,2605	50,08	1,80	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,35	5,0291	19,98	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,40	3,3234	10,44	1,90	0,8874	0,486	4,8	0,9160	0,218
0,45	2,4786	6,46	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,50	2	4,47	2	0,8832	0,463	5	0,9182	0,210
0,55	1,7024	3,35	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,60	1,5046	2,65	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,65	1,363	2,18	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,200
0,70	1,2638	1,85	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,75	1,1906	1,61	2,5	0,8873	0,380	5,5	0,9232	0,194
0,80	1,1330	1,43	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
0,85	1,0880	1,29	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,186
0,90	1,0522	1,77	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,9260	0,185
0,95	1,0234	1,08	2,9	0,8917	0,334	5,9	0,9269	0,183
1	1	1	3	0,8930	0,325	6	0,9277	0,180
1,05	0,9803	0,934	3,1	0,8943	0,316	6,1	0,9286	0,177
1,10	0,9649	0,878	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,15	0,9517	0,830	3,3	0,8970	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,20	0,9407	0,787	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,9310	0,170
1,25	0,9314	0,750	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9318	0,168
1,30	0,9236	0,716	3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,166
1,35	0,9170	0,687	3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9333	0,163
1,40	0,9114	0,660	3,8	0,9038	0,266	6,8	0,9340	0,161
1,45	0,9067	0,635	3,9	0,9051	0,260	6,9	0,9347	0,160

- ❑ Intervalles de confiance de la *MTBF*
- ❑ Niveau de confiance et bande de confiance

Le niveau de confiance habituel auquel on fait les encadrements est 0,90, ce qui signifie qu'il y a 90 % de chances pour qu'à toute valeur  $t_i$  corresponde une fiabilité  $R(t_i)$  ou une valeur  $F(t_i)$  telle que  $\text{Prob}(\alpha_1 < R(t_i) < \alpha_2) = 0,90$ , en particulier :

- pour une valeur de *MTBF* estimée, on aura  $\text{Prob}(\alpha_1 < R(\text{MTBF}) < \alpha_2) = 0,90$ ;
- pour une fiabilité  $R(\text{MTBF})$  estimée, on aura  $\text{Prob}(\beta_1 < \text{MTBF} < \beta_2) = 0,90$ .

Les variations de  $(\alpha_1, \alpha_2)$  forment la « bande de confiance ». Pour les rangs médians (petits échantillons  $< 20$ ), les valeurs limites  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont tabulées suivant les rangs à 5 % et à 95 %.

Prenons un exemple relatif à un échantillon « minimal » de  $N = 6$  valeurs traitées par les rangs médians, le tableau 5.10 correspondant à la figure 5.29.

Tableau 5.10 – Intervalles de confiance

Ordre $i$	TBF	$F(i)$	Rangs à 5 %	Rangs à 95 %
4	$5,2 \times 10^5$ cycles	0,579	0,271	0,847

Les valeurs 0,271 et 0,847 sont tirées des tableaux 5.11 et 5.12.

À la notation  $F(i) = F(t) = 0,579$  (si  $F(t)$  est sur la droite  $D_1$ ) nous substituons la notation probabiliste  $\text{Prob}(0,271 < F(t) < 0,847)$ , qui correspond à un encadrement « très large » explicable fort logiquement par la petitesse de l'échantillon. Ou encore :

$$\text{Prob}(0,271 > F(t)) = 0,05$$

$$\text{Prob}(0,847 > F(t)) = 0,95$$

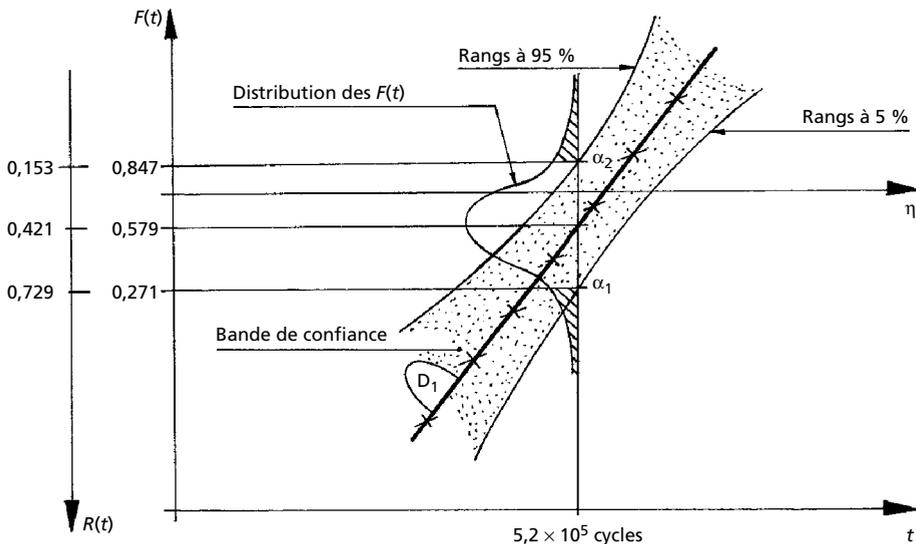


Figure 5.29

Par complémentarité de  $F(t)$ , il est possible d'encadrer la fiabilité  $R(t)$  par la fourchette  $(0,153; 0,729)$ .

□ **Table des rangs médians à 5 %**

Cette table permet le tracé du niveau à 5 %, niveau inférieur de la bande de confiance à 90 % (tableau 5.11).

**Tableau 5.11** – Tables numériques donnant les rangs médians à 5 %

Ordre de rang	Taille de l'échantillon									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,000	2,532	1,699	1,274	1,021	0,851	0,730	0,639	0,568	0,512
2		22,361	13,535	9,761	7,644	6,285	5,337	4,639	4,102	3,677
3			36,840	24,860	18,925	15,316	12,876	11,111	9,775	8,726
4				47,287	34,259	27,134	22,532	19,290	16,875	15,003
5					54,928	41,820	34,126	28,924	25,137	22,244
6						60,696	47,930	40,031	34,494	30,354
7							65,184	52,932	45,036	39,338
8								65,766	57,086	49,310
9									71,687	60,584
10										74,113

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,465	0,426	0,394	0,366	0,341	0,320	0,301	0,285	0,270	0,256
2	3,332	3,046	2,805	2,600	2,423	2,268	2,132	2,011	1,903	1,806
3	7,882	7,187	6,605	6,110	5,685	5,315	4,990	4,702	4,446	4,217
4	13,507	12,285	11,267	10,405	9,666	9,025	8,464	7,969	7,529	7,135
5	19,958	18,102	16,566	15,272	14,166	13,211	12,377	11,643	10,991	10,408
6	27,125	24,530	22,395	20,607	19,066	17,777	16,636	15,634	14,747	13,955
7	34,981	31,524	28,705	26,358	24,373	22,669	21,191	19,895	18,570	17,731

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
8	43,563	39,086	35,480	32,503	29,999	27,860	26,011	24,396	22,972	21,707
9	52,991	47,267	42,738	39,041	35,956	33,337	31,083	29,120	27,395	25,865
10	63,564	56,189	50,535	45,999	42,256	39,101	36,401	34,060	32,009	30,195
11	76,160	66,132	58,990	53,434	48,925	45,165	41,970	29,215	36,811	34,693
12		77,908	68,366	61,461	56,022	51,560	47,808	44,595	41,806	39,358
13			79,418	70,327	63,656	58,343	53,945	40,217	47,003	44,197
14				80,736	72,060	65,617	60,436	56,112	52,420	49,218
15					81,896	73,064	67,381	62,332	58,088	54,442
16						82,925	74,988	68,974	64,057	59,897
17							83,843	76,234	70,420	65,634
18								84,668	77,363	71,738
19									85,413	78,389
20										86,089

□ **Table des rangs médians à 95 %**

Cette table permet le tracé du niveau à 95 %, niveau supérieur de la bande de confiance à 90 % (tableau 5.12).

**Tableau 5.12 – Tables numériques donnant les rangs médians à 95 %**

Ordre de rang	Taille de l'échantillon = $N$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	95,000	77,639	63,160	52,713	45,072	39,304	34,816	31,234	28,313	25,887
2		97,468	86,465	75,139	65,741	58,180	52,070	47,068	42,914	39,416
3			98,305	90,239	81,075	72,866	65,874	59,969	54,964	50,690
4				98,726	92,356	84,684	77,468	71,076	65,506	60,662
5					98,979	93,715	87,124	80,710	74,863	77,756
6						99,149	94,662	88,889	83,125	77,756

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7							99,270	95,361	90,225	84,997
8								99,361	95,898	91,274
9									99,432	96,323
10										96,488

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	23,840	22,092	20,582	19,264	18,104	17,075	16,157	15,332	14,589	13,911
2	36,436	33,868	31,634	29,673	27,940	26,396	25,012	23,766	22,637	21,611
3	47,009	43,811	41,010	38,539	36,344	34,383	32,619	31,026	29,580	28,262
4	56,437	52,733	49,465	46,566	43,978	41,657	39,564	37,668	35,943	34,366
5	65,019	60,914	57,262	54,000	51,075	48,440	46,055	43,888	41,912	40,103
6	72,875	68,476	64,520	60,958	57,744	54,835	52,192	49,783	47,580	45,558
7	80,042	75,470	71,295	67,49	64,043	60,899	58,029	55,404	52,997	50,782
8	86,492	81,898	77,604	73,641	70,001	66,663	63,599	60,780	58,194	55,803
9	92,118	87,715	83,434	79,393	75,627	72,140	68,917	65,940	63,188	60,641
10	96,668	92,813	88,733	84,728	80,913	77,331	73,989	70,880	67,991	65,307
11	99,535	96,954	93,395	89,595	85,834	82,223	78,809	75,604	72,605	69,805
12		99,573	97,195	93,890	90,334	86,789	83,364	80,105	77,028	74,135
13			99,606	97,400	94,315	90,975	87,623	84,366	81,250	78,293
14				99,634	97,577	94,685	91,535	88,357	85,253	82,269
15					99,680	97,732	95,010	92,030	89,009	86,045
16						99,680	97,868	95,297	92,471	89,592
17							99,699	97,989	95,553	92,865
18								99,730	98,097	95,783
19									99,730	98,193
20										99,744

### 5.3.5 Modèle de Weibull : optimisation d'une période d'intervention systématique

Faut-il choisir de mettre en œuvre une maintenance corrective ou une maintenance préventive systématique ?

L'outil que nous allons développer est une application pratique de la loi de Weibull qui permet de répondre aux deux questions suivantes :

- existe-t-il une période d'intervention systématique  $T$  telle que la maintenance systématique soit plus économique que d'attendre la panne ?
- si oui, quelle est cette période optimisée  $\theta$  ?

Nous nommerons cet outil d'optimisation économique l'outil «  $r, \beta$  » et nous noterons  $\theta = T$  optimisée. Sa justification est longue, mais sa mise en œuvre à partir de l'abaque fourni est très rapide.

#### □ Situation du problème et prérequis

Soit un système réparable dont un constituant « fragile » est interchangeable. À quelle période  $\theta$  doit-on effectuer son remplacement préventif sachant que l'on connaît :

- la loi comportementale  $R(t)$  du constituant;
- $p$ , le coût direct de l'intervention corrective, qui est, par hypothèse, égal au coût de l'intervention systématique liée au remplacement du constituant défectueux;
- $P$ , le coût indirect des conséquences de la défaillance ?

Nous nommerons  $r = P/p$  le ratio de « criticité économique » de la défaillance. Le domaine de validité de cet outil est  $2 < r < 100$ .

#### □ Évaluation de chacun des coûts

*Coût  $C_1$  d'une intervention corrective*

Le coût d'une intervention corrective est  $p + P$ .

Le coût moyen par unité d'usage (pour comparaison) devient :

$$C_1 = \frac{p + P}{m_\infty}$$

$m_\infty = MTBF$  du composant =  $E(t)$  de la loi de Weibull connue.

$m_\infty$  est la durée de vie moyenne des composants fonctionnant sans limite de temps.

*Coût  $C_2(\theta)$  d'une intervention préventive*

Si  $\theta$  est la période de remplacement systématique du composant, le coût aura deux termes :

- le coût de l'intervention  $p$ ;
- le coût du correctif résiduel lié au risque de défaillance avant  $\theta$  et évalué par sa probabilité  $F(t)$  avec  $t < \theta$ , soit  $PF(t)$  ou  $P(1 - R(t))$ .

Le coût moyen par unité d'usage est donc :

$$C_2(\theta) = \frac{p + P(1 - R(t))}{m(\theta)}$$

$m(\theta)$  étant la durée de vie moyenne des composants ne dépassant pas  $\theta$ , puisque changés à cette date :

$$m(\theta) = \int_0^\theta R(t) dt$$

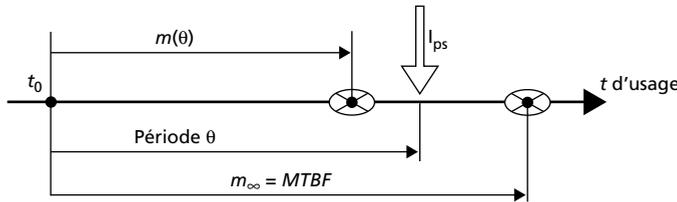


Figure 5.30

□ Critère de choix d'une politique

Il est évident qu'il conviendra d'effectuer des opérations préventives si l'on trouve une solution  $\theta$  telle que  $C_2(\theta) < C_1$  que l'on étudiera sous la forme :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} < 1$$

□ Principe de l'optimisation de  $\theta$

Le principe consiste à étudier les variations du rapport  $C_2(\theta)/C_1$  lorsque  $\theta$  varie :

- si le rapport reste  $> 1$ , il n'y a pas de solution;
- si le rapport a un minimum  $< 1$ , la valeur de  $t = \theta$  correspondant au minimum est la solution optimisée.

Formons le rapport et étudions ses variations :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} = \frac{p + P(1 - R(\theta))}{m_\theta} \times \frac{m_\infty}{p + P}$$

$R(\theta)$  est modélisable par une loi de Weibull à deux paramètres ( $\gamma = 0$ ) :

$$R(\theta) = e^{-\left(\frac{\theta}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{et} \quad m_\infty = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Posons :

$$x = \frac{\theta}{\eta} \quad \text{et} \quad r = \frac{P}{p}$$

Après transformations, le rapport devient :

$$\frac{C_2(x)}{C_1} = \frac{1 + [1 - e^{-x^\beta}]^r}{\int_0^x e^{-t^\beta} \cdot dt} \times \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{1 + r}$$

$\frac{C_2(x)}{C_1}$  est dépendant de deux paramètres :

$\beta$ , paramètre technique, qui caractérise la forme de la distribution;

$r$ , paramètre économique, caractérise le rapport des coûts indirects/directs (criticité des défaillances).

□ Exemple de courbe de variation du rapport  $C_2(x)/C_1$

Nous allons tracer la courbe représentative des variations du rapport dans le cas suivant :

- données de fiabilité (Weibull) :  $\beta = 3, \gamma = 0, \eta = 10$  mois (avec une *MTBF* = 8,9 mois);
- données économiques estimées :  $r = P/p = 10$  puis 5, et 3.

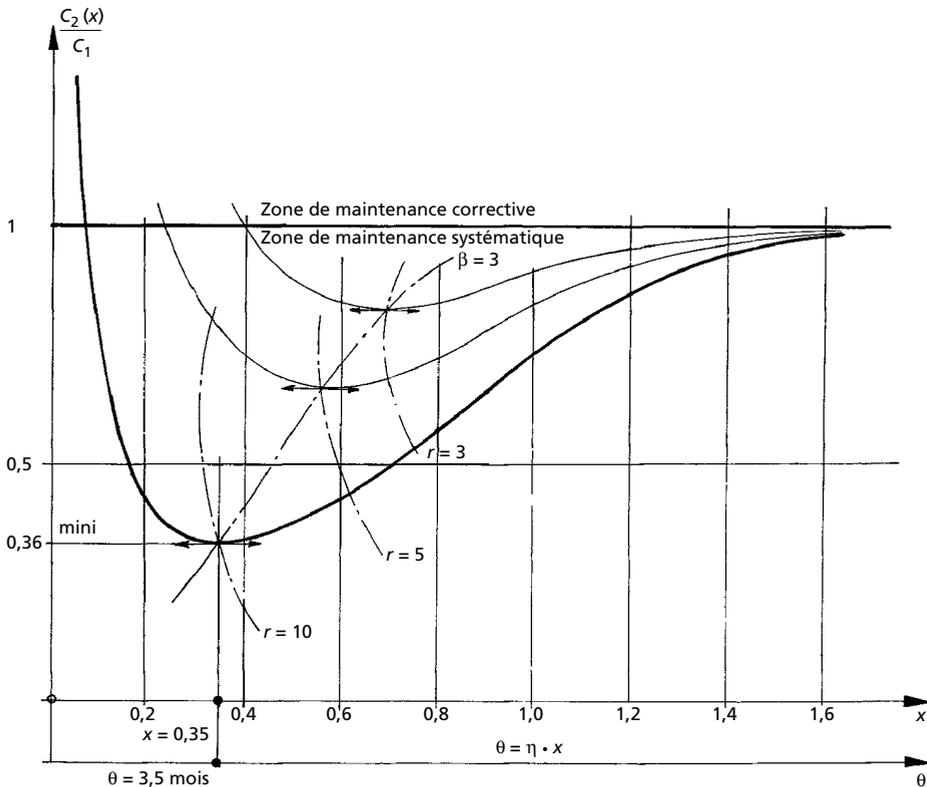


Figure 5.31 – Variations du rapport  $C_2(x)/C_1$

La valeur  $\text{mini} = 0,36 < 1$  exprime le gain d'une politique préventive effectuée à  $x_0 = 0,35$ , donc à la période d'intervention systématique  $\theta = \eta x_0 = 10 \text{ mois} \times 0,35 = 3,5 \text{ mois}$ . Rappelons que la *MTBF* de cet exemple était de 8,9 mois, ce qui montre que le défaut majeur de la maintenance systématique même optimisée reste l'important « gaspillage de potentiel » d'utilisation du composant changé.

□ **Abaques d'optimisation de la période d'intervention systématique**

□ **Principe de l'établissement de l'abaque**

La courbe précédente ne nous intéresse que par son minimum, repéré par ses coordonnées  $x$  et  $C_2(x)/C_1$  et paramétré par les deux valeurs de  $\beta$  et  $r$ . Nous allons donc ne tracer que chaque point minimum obtenu pour des séries de valeurs de  $\beta(1,2 \text{ à } 4)$  et de  $r(2 \text{ à } 100)$ . Il restera à interpoler ces courbes en fonction des deux paramètres de l'étude à mener.

□ **Abaque ( $r, \beta$ ) en gestion individuelle** (voir figure 5.32)

□ **Utilisation de l'abaque**

L'intérêt de cet outil réside dans sa grande rapidité d'utilisation. À partir de  $r$  et de  $\beta$ , par interpolation des courbes du réseau, nous déterminons graphiquement les coordonnées du point « mini » à l'intersection des deux courbes interpolées :

- l'ordonnée  $C_2/C_1$  donne la valeur du gain par rapport à une politique corrective ;
- l'abscisse  $x_0$  se corrige par la formule de changement de variable :

$$\theta = \eta x_0$$

□ **Remarque : gestion individuelle et gestion collective**

L'étude précédente a été menée dans le cas le plus fréquent de la gestion individuelle de la maintenance systématique. Ce qui signifie qu'en cas de défaillance résiduelle, le remplacement correctif du composant défaillant initialise une nouvelle période  $\theta$ .

En gestion collective, par opposition, l'échéancier primitif subsiste : il n'est pas corrigé en cas de défaillance résiduelle. Dans ce cas, l'expression du coût de la politique préventive devient :

$$C_2(\theta) = \frac{p + (p + P) \cdot E(\theta')}{\theta'}$$

La démarche d'établissement de l'abaque « gestion collective » est identique à la précédente.

□ **Abaque ( $r, \beta$ ) en gestion collective** (voir figure 5.33)

L'utilisation de l'abaque et son exploitation sont les mêmes que pour la figure 5.32.

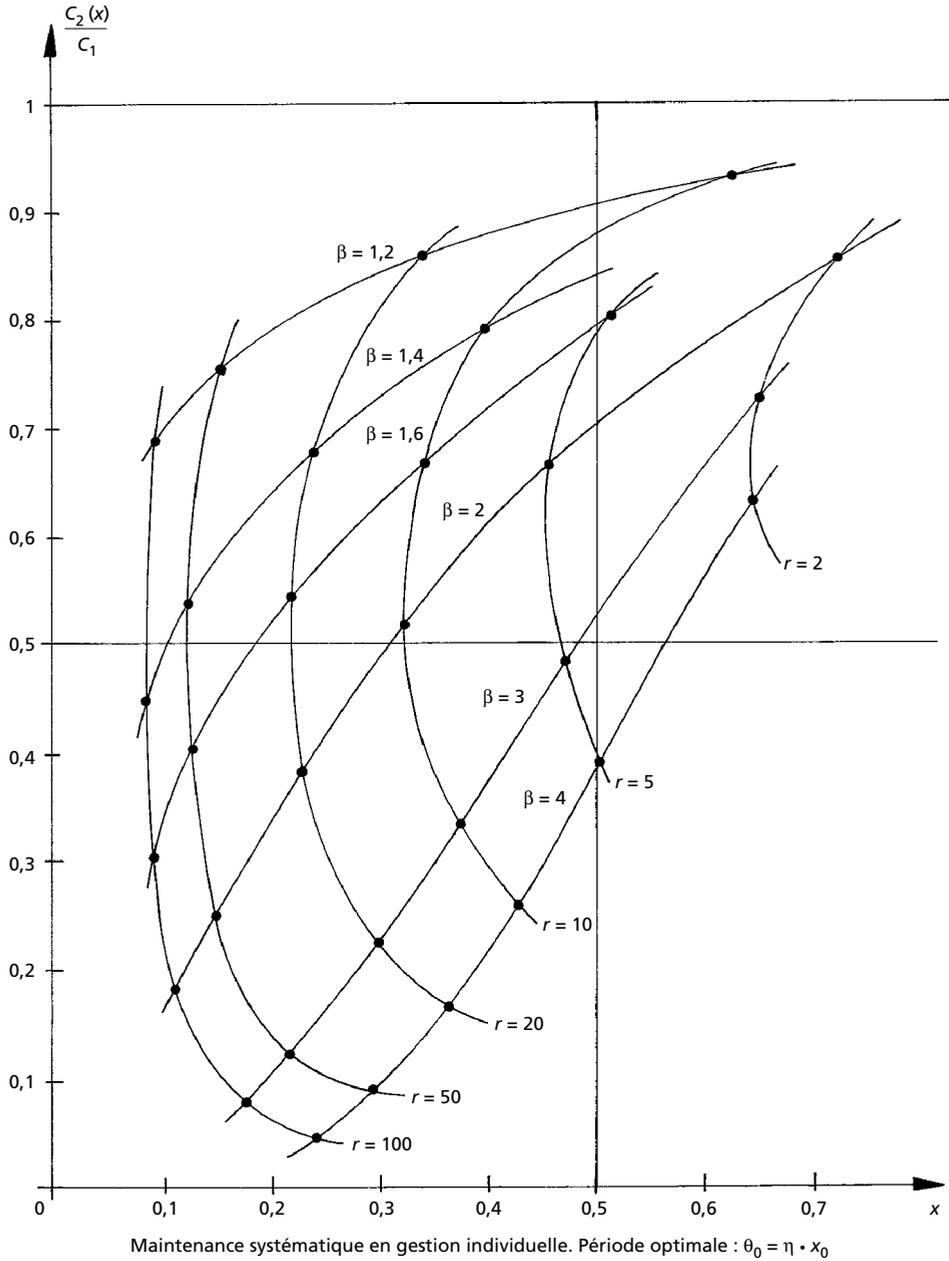


Figure 5.32 – Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion individuelle)

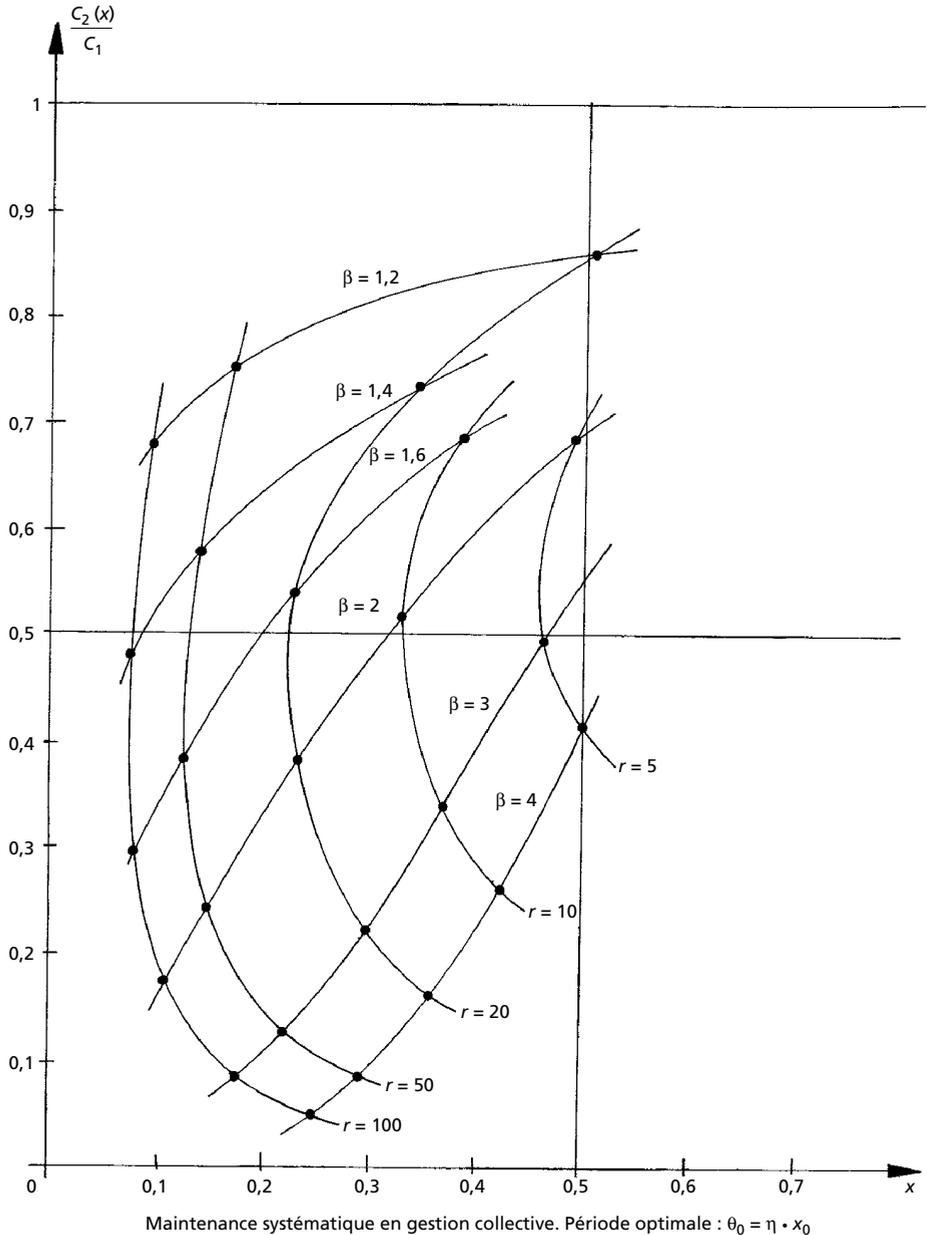


Figure 5.33 – Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion collective)

### 5.3.6 Modèle de Weibull : étude de cas de synthèse

□ **Thème traité**

Cette étude de cas, réalisée à partir d'un échantillon minimal de six valeurs, a pour objet de montrer l'algorithme d'une analyse de fiabilité et quelques-unes des

exploitations que l'on peut en déduire. Elle se rapporte à l'estimation de la fiabilité d'un roulement à billes, pour lequel les durées de vie exprimées en cycles (ou tours) ont été relevées à partir d'un historique (tableau 5.13).

Tableau 5.13

Numéro de roulement	Nombre de cycles avant rupture
1	$4,0 \times 10^5$
2	$1,3 \times 10^5$
3	$9,8 \times 10^5$
4	$2,7 \times 10^5$
5	$6,6 \times 10^5$
6	$5,2 \times 10^5$

Quels sont les éléments de connaissance que l'on peut déduire d'un tel échantillon ?

#### □ Préparation des données

Dressons directement le tableau de valeurs :

- en classant les durées de bon fonctionnement *TBF* par valeurs croissantes. En fait, il s'agit de *TTF* (durées jusqu'à la première défaillance) dont nous recherchons la *MTTF* à l'identique d'une *MTBF*;
- en calculant  $F(i)$  par la formule d'approximation des temps médians, car  $N = 6 < 20$ ;
- en intégrant les valeurs tabulées des rangs médians à 5 % et 95 %.

Tableau 5.14

Ordre $i$	<i>TBF</i> (cycles avant rupture)	$F(i)$ rangs médians	Rangs à 5 %	Rangs à 95 %
1	$1,3 \times 10^5$	0,109	0,85	39,3
2	2,7	0,264	6,3	58,2
3	4,0	0,421	15,3	72,9
4	5,2	0,579	27,1	84,7
5	6,6	0,736	41,8	93,7
6	9,8	0,890	60,7	99,1

## □ Détermination et exploitation des paramètres

### 1. Tracé de la droite $D_1$ de Weibull

Traçons les couples de points  $(F(t_i), t_i)$  sur le papier de Weibull. La régression du nuage de points par la droite  $D_1$  s'obtient sans problème (figure 5.34).

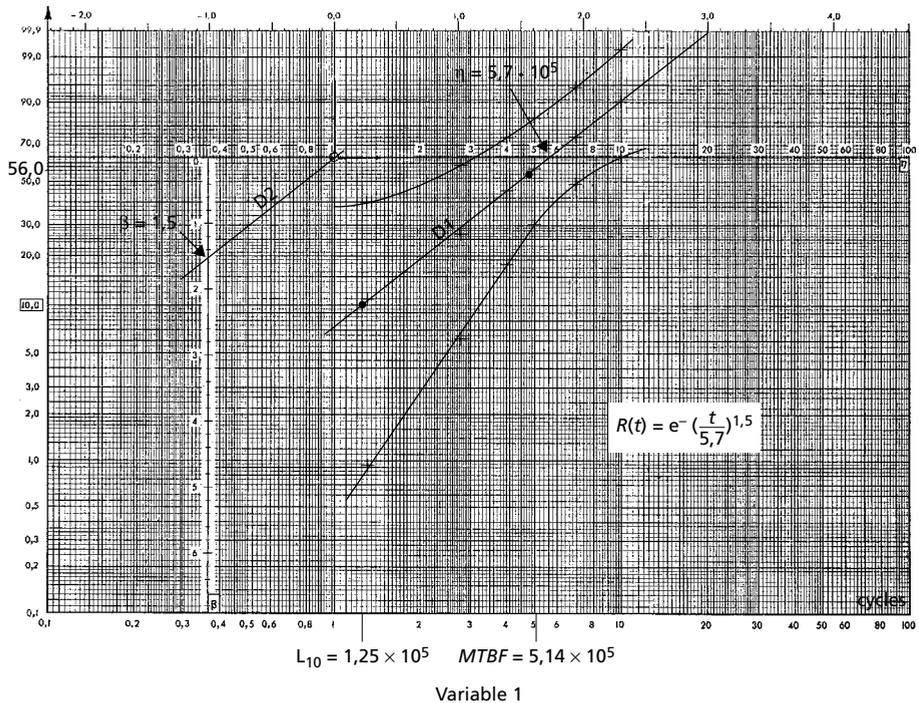


Figure 5.34 – Étude de cas : droite de Weibull

### 2. Recherche de la valeur des trois paramètres

L'obtention d'une droite sans redressement montre que  $\gamma = 0$ . La droite  $D_1$  coupe l'axe  $(t, \eta)$  à l'abscisse  $\eta = 5,7 \times 10^5$  cycles. La parallèle  $D_2$  coupe l'axe  $\beta$  à l'ordonnée  $\beta = 1,5$ . Cette valeur de  $\beta$  est caractéristique d'un phénomène de fatigue, normale pour expliquer la dégradation d'un roulement.

### 3. Recherche de la MTBF de la population des défaillances

Le tableau 5.9 des valeurs de  $MTBF$  donne, pour  $\beta = 1,5$ , les valeurs de  $A = 0,90$  et  $B = 0,61$ .

Moyenne :

$$E(t) = A\eta + \gamma = 0,90 \times 5,7 \times 10^5 = 5,1 \times 10^5 \text{ cycles} = MTBF$$

Écart-type :

$$\sigma = B\eta = 0,61 \times 5,7 \times 10^5 = 3,5 \times 10^5 \text{ cycles}$$

#### 4. Fiabilité associée à la MTBF

Graphiquement, nous lisons pour  $t = 5,1 \times 10^5$  cycles la valeur  $F(MTBF) = 56 \%$ , donc  $R(t = MTBF) = 44 \%$ , ce qui signifie que 44 % seulement des roulements atteindront la *MTBF* (distribution non symétrique). Remarquons que la détermination analytique correspondante est peu intéressante face à ce résultat graphique immédiat.

#### 5. Durée de vie nominale de ces roulements

Les fabricants de roulements nomment  $L_{10}$  leur durée de vie nominale, qui correspond à un seuil de fiabilité de 0,90 tel que 90 % des roulements atteignent  $t = L_{10}$ . Graphiquement, à partir de  $F(t) = 10 \%$ , nous lisons  $L_{10} = 1,3 \times 10^5$  cycles.

Analytiquement, nous trouvons :

$$L_{10} = \gamma + \eta(0,105)^{\frac{1}{\beta}}$$

Cela signifie que, sur 100 roulements changés systématiquement à  $t = L_{10}$ , 10 seraient déjà défectueux pour une utilisation égale au quart de la *MTBF* : une politique de maintenance systématique est peu adaptée aux roulements, ce qui explique que l'on cherche à prévenir leurs défaillances à partir des analyses de bruit ou de vibrations.

#### 6. Intervalle de confiance pour $t = MTBF$

Les tableaux 5.11 et 5.12 nous donnent les limites  $\alpha_1 = 0,26$  et  $\alpha_2 = 0,85$  (avec  $N = 6$ ), ce qui permet d'écrire :

$$\text{Prob}(0,26 < F(t) < 0,85) = 0,90$$

Donc :

$$\text{Prob}(0,74 > R(t) > 0,15) = 0,90$$

Ce résultat relativise l'écriture  $R(t = MTBF) = 0,44$ , montrant la prudence avec laquelle il faut manipuler les résultats issus de très petits échantillons.

#### 7. Équations de $R(t)$ , $F(t)$ , $f(t)$ et $\lambda(t)$

La connaissance des trois paramètres de la loi de Weibull permet d'écrire les quatre équations et d'en déduire les quatre courbes représentatives (figure 5.35) :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{5,7}\right)^{1,5}}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{5,7}\right)^{1,5}}$$

$$f(t) = \frac{1,5}{5,7} \left(\frac{t}{5,7}\right)^{0,5} e^{-\left(\frac{t}{5,7}\right)^{1,5}}$$

$$\lambda(t) = \frac{1,5}{5,7} \left(\frac{t}{5,7}\right)^{0,5}$$

8. Représentations graphiques des quatre équations  $F(t)$  et  $R(t)$ ,  $f(t)$  et  $\lambda(t)$

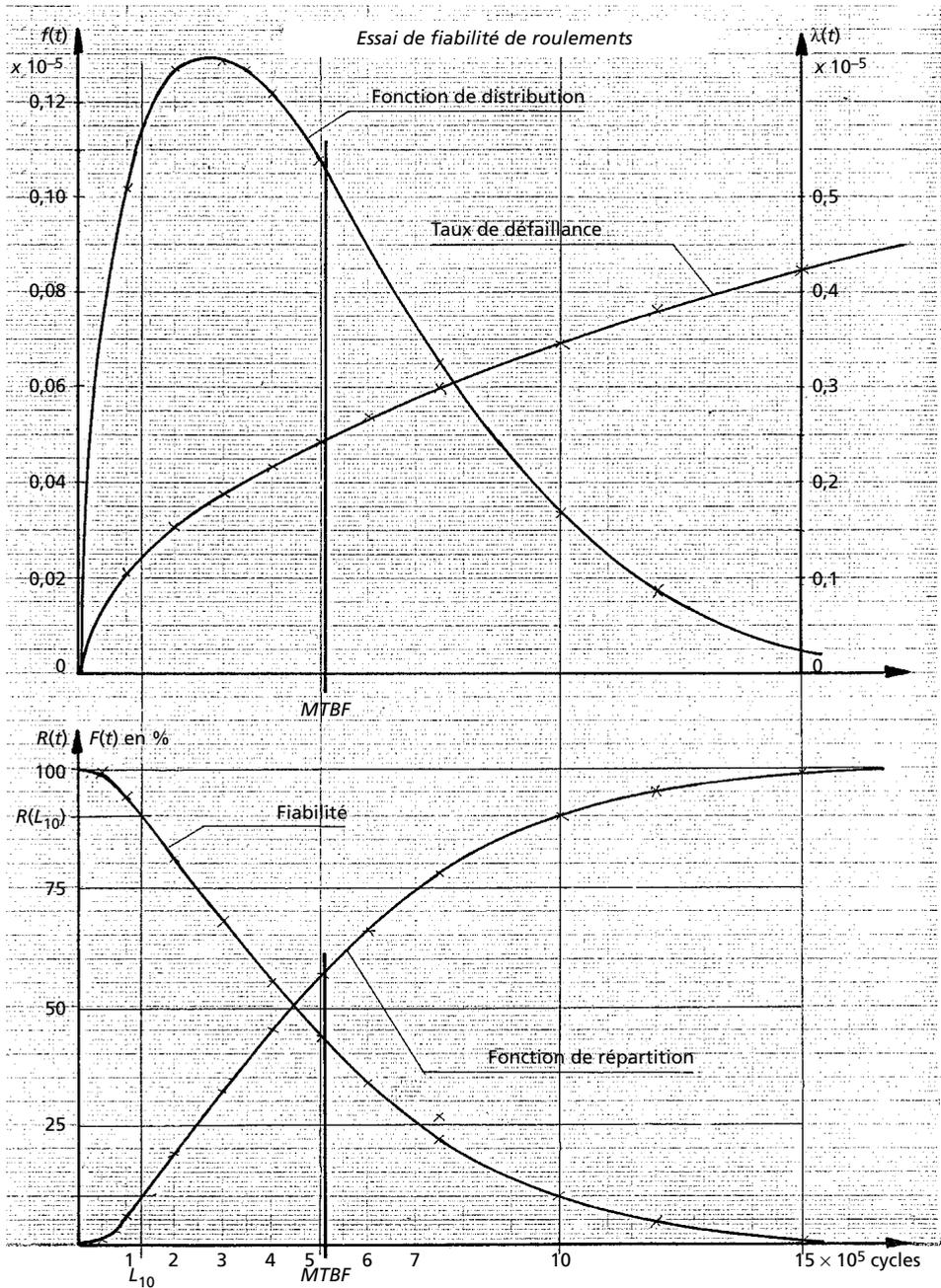


Figure 5.35 – La loi de Weibull : représentation graphique des différentes fonctions

## 5.4 La maintenabilité intrinsèque et opérationnelle

### 5.4.1 Introduction à la maintenabilité

#### □ Définitions et commentaires

#### □ Définition AFNOR

Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.

#### □ Définition probabiliste

« 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 et avec des moyens prescrits. »

#### □ Commentaires

Nous noterons  $M(t)$  la fonction maintenabilité et  $TTR$ ,  $MTTR$  les durées d'intervention. Cette définition est analogue à celle de la fiabilité, à travers ses quatre concepts :

- probabilité de rétablir =  $\text{Prob}(TTR < t) = \text{Prob}(\text{pour qu'un système en panne à } t = 0 \text{ soit rétabli à } t)$ ;
- conditions de fonctionnement : elles impliquent la mesure d'un niveau de bon fonctionnement après intervention;
- limite de temps : elle implique la définition d'un « temps prévu » associé à un délai  $t$ ;
- maintenance définie : la durée d'intervention n'a de sens que par référence aux moyens mis en œuvre (procédures, personnels et logistique).

#### □ Quelques réflexions préliminaires

#### □ Différentes formes de maintenabilité

À partir de ces définitions, nous distinguerons :

- la maintenabilité intrinsèque, c'est-à-dire « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges comprenant des critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.);
- la maintenabilité prévisionnelle est également « construite », mais à partir d'objectifs de disponibilité;
- la maintenabilité opérationnelle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

Une « analyse de maintenabilité » permettra d'évaluer la  $MTTR$  ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité, à l'identique des analyses de fiabilité.

#### □ Maintenabilité et maintenance

Pour un technicien, 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 qui seront analysées en détail au paragraphe 6.2.2.

Il est évident que la maintenabilité intrinsèque est le facteur primordial pour que la maintenance soit performante sur le terrain, car l'amélioration ultérieure de la maintenabilité initiale ne sera pas facile. À ce titre, nous pouvons dire que les techniciens de maintenance subiront les conséquences d'une mauvaise construction de la maintenabilité. Il est donc indispensable qu'ils sachent définir leurs besoins et les intégrer à un cahier des charges d'équipement nouveau.

#### □ **Maintenabilité et disponibilité**

Rappelons le schéma de la disponibilité d'un équipement (figure 5.36).

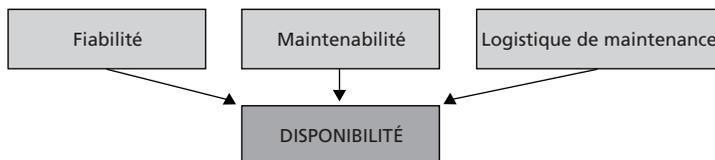


Figure 5.36

Ce schéma met en évidence :

- que la maintenabilité est un des leviers d'action pour améliorer la disponibilité, donc la productivité d'un équipement;
- que fiabilité et maintenabilité sont deux notions « parallèles » de même importance, et dont les démarches d'analyses sont semblables.

### 5.4.2 Construction de la maintenabilité intrinsèque : liste des critères

Notre propos n'est pas d'établir un plan de maintenabilité au sens d'Airbus Industrie, mais plus simplement d'analyser qualitativement les critères qui facilitent la vie des techniciens sur site, tout en réduisant les durées d'intervention. En ce domaine, le paradoxe est « qu'il est compliqué de faire simple », de trouver des solutions constructives simples, pour des interventions faciles et rapides avec des outils standard !

La maintenabilité concerne aussi bien les actions correctives que préventives, et c'est souvent « par défaut » que les techniciens découvrent l'importance des critères de maintenabilité.

Remarquons qu'une bonne maintenabilité doit être recherchée là où la fiabilité est douteuse : pièces d'usure ou susceptibles de rupture en particulier. Elle s'obtient par une prise en compte équilibrée de tous les critères énumérés ci-dessous.

#### □ **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.

Sont interchangeables deux composants, deux modules ou deux équipements pouvant être remplacés l'un par l'autre pour assurer la même fonction. En maintenance, c'est souvent au niveau de la dépose d'un sous-ensemble (module, notion développée au paragraphe 2.2.3) que va s'exercer l'action corrective, préventive ou de diagnostic.

La facilité de l'interchangeabilité (carte électronique par exemple) est un facteur favorisant le transfert de tâche 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.). Se méfier des solutions innovantes mais exotiques!

#### □ Standardisation

La standardisation 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 tables d'équivalence et il suffit de 5 types d'huile et 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

L'accessibilité 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**

L'aptitude à la dépose 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.

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**

La démontabilité 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 manœuvres 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).

#### □ **Déteçtabilité**

Elle concerne la réduction des temps de localisation et de diagnostic, principalement pour les parties commandes 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.

Remarquons que la réalisation d'une AMDEC amène le concepteur à évaluer le critère « déteçtabilité » et à proposer des solutions si nécessaire.

#### □ **Impact de l'organisation sur la 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'instal-

lation 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...

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. Remarquons cependant que 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. Cette efficacité peut être vérifiée en observant le chronogramme d'un dépannage (Figure 5.37).

#### □ Analyse de « la fonction dépannage »

Cette méthode s'adresse plus particulièrement aux PME ayant une structure de maintenance légère.

Elle permet d'analyser le fonctionnement du service de maintenance lors d'une panne en introduisant une réflexion basée sur le chronogramme suivant.

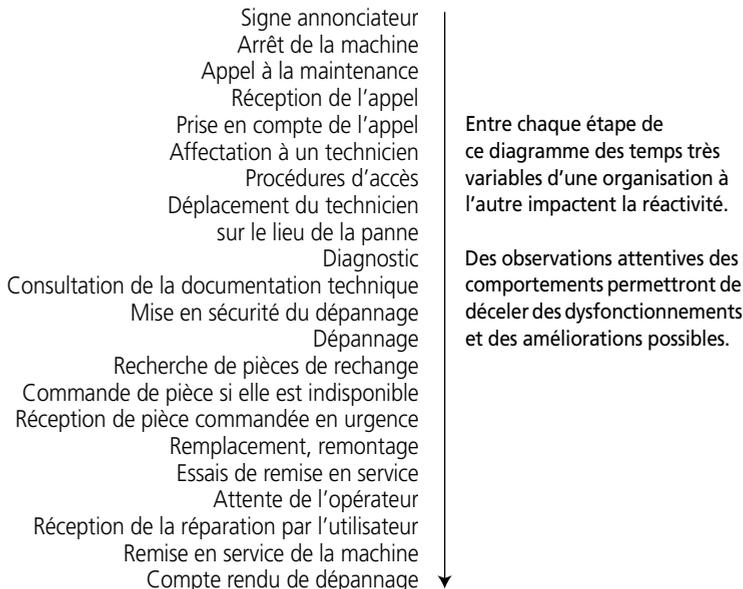


Figure 5.37 - Chronogramme d'un dépannage

Le tableau ci-dessous explique les dysfonctionnements pouvant être relevés lors de l'analyse des faits selon le chronogramme précédent et propose des suggestions d'amélioration.

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Signe annonciateur de la panne (bruit, ralentissements, micro-arrêt, message sur commande numérique)	<p>Personne n'a fait attention aux vibrations de plus en plus fréquentes ou au message affiché sur la commande numérique.</p> <p>La machine est sale et empêche de voir les fuites ou autres dysfonctionnements.</p> <p>Les utilisateurs considèrent que c'est le problème de la maintenance.</p>	<p>Faire des tournées d'inspection journalières.</p> <p>Sensibiliser les opérateurs en pratiquant éventuellement la TPM (Totale Productive Maintenance).</p>
Arrêt de la machine	Pas de relevé du moment exact de la panne ni dans la GMAO (ou équivalent) ni dans le suivi de production ou GPAO	<p>Donner des moyens pour signaler la panne et l'horodater :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– documents papiers</li> <li>– accès à des terminaux portables</li> <li>– téléphone</li> </ul>
Temps de réaction de l'utilisateur avant appel à la maintenance	<p>L'opérateur en profite pour faire une pause avant d'appeler la maintenance.</p> <p>Le service production laisse la machine de côté et l'oublie pour utiliser une machine inoccupée. Il se rappelle de la panne quelque temps plus tard quand il a besoin de la machine défectueuse.</p>	<p>Éventuellement créer des liaisons entre automates programmables et GMAO pour être certain de l'horodatage de la panne.</p> <p>Effectuer régulièrement des analyses de ces informations lors des retours d'expérience.</p> <p>Assurer un retour d'information vers la production.</p>
Appel à la maintenance	<p>Pas de n° de téléphone d'urgence, « on ne sait pas à qui s'adresser » et on attend le passage du chef actuellement en réunion.</p> <p>On constate plusieurs appels (des différentes équipes postées) pour une même panne.</p>	<p>Des fiches d'information sont affichées près de la machine avec les adresses n° de téléphone.</p> <p>Utiliser la demande d'intervention de la GMAO avec un indicateur de doubles demandes.</p> <p>Enregistrement dans un cahier des demandes d'intervention avec indications de leur prise en compte.</p>

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Réception de l'appel	Il n'y a personnes à temps complet pour les recevoir. Les notes sont écrites dans un carnet lu irrégulièrement ou elles se perdent très souvent.	En l'absence de permanence pour recevoir les appels, équiper le responsable d'un téléphone mobile, pager ou autre dispositif d'appel automatique. Ou encore organiser des permanences avec des techniciens ou des agents de service méthode.
Prise en compte de l'appel	C'est toujours dans l'urgence. C'est le dernier qui appelle qui a la priorité.  Quand le responsable n'est pas là on ne sait pas que faire.	Les équipements et les pannes sont affectées d'un niveau de priorité qui facilite les planifications et les affectations. Des procédures rédigées en commun et éventuellement un plan de maintenance corrective permettent de définir les tâches à accomplir même en l'absence du chef. Les techniciens sont équipés de téléphones mobiles et ont une ligne de conduite précise.
Affectation à un technicien	C'est celui qui passe par là qui reçoit la mission.  On attend le retour des techniciens pour voir qui est disponible.	Faire un tableau de suivi des affectations. Indiquer les temps approximatifs des interventions pour avoir une idée de la charge de travail des techniciens et des prochaines disponibilités. Les techniciens sont équipés de téléphones mobiles pour éventuellement les « distraire » d'un travail en cours en cas d'urgence réelle. La GMAO permet de savoir qui fait quoi et où.
Procédures d'accès	Cela concerne les points d'accès à risque (chemin de fer, nucléaire,...)	En général les procédures sont bien établies et respectées, sécurité oblige.
Déplacement du technicien sur le lieu de la panne	Les jeunes techniciens se perdent régulièrement. C'est encore pire pour les sous-traitants.	Un OT issu de la GMAO est imprimé à chaque intervention avec des indications géographiques ou de trajet. Des repères XY permettent de se situer dans tous les points de l'usine.

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Diagnostic	<p>Le technicien ne connaît pas la machine et ne sait pas ce qui est normal ou non.</p> <p>Le technicien arrive et constate que la panne a été réparée.</p>	<p>Améliorer la formation.</p> <p>Utiliser les retours d'expérience issus des comptes rendus dans la GMAO.</p> <p>Lors des comptes rendus et affectations supprimer les doubles demandes d'intervention.</p>
Consultation de la documentation technique	<p>Le technicien ne prend pas le temps de la consulter.</p> <p>Les documents techniques sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– dans le bureau du chef</li> <li>– dans le bureau de l'acheteur (!)</li> <li>– dans le magasin</li> </ul>	<p>Inciter les techniciens à leur utilisation.</p> <p>Organiser la documentation, la ranger dans un endroit accessible.</p> <p>Réclamer aux constructeurs les documents manquants.</p> <p>Codifier les pièces avec un code fabricant de manière à pouvoir exploiter les informations du document et trouver la pièce en magasin rapidement.</p>
Dépannage	<p>Le technicien n'a pas amené les bons outils ou les bonnes pièces de rechange alors que c'était prévisible. Cela occasionne de longs temps de déplacements. Un podomètre placé à titre expérimental a révélé que des techniciens parcouraient 20 km dans la journée.</p> <p>Le technicien ne constate pas de défaillance.</p>	<p>Créer des plans de maintenance corrective : un signalement de panne pour un équipement correspond à une liste d'instructions avec pièces de rechange et outils conseillés.</p> <p>Attention aux pannes intermittentes fréquentes avec les matériels électroniques. Faire une enquête auprès des utilisateurs pour relever le moment et les circonstances exactes de la panne.</p>
Sécurité lors du dépannage	<p>Des incidents ou des accidents sont fréquents pour les dépanneurs ou les opérateurs.</p> <p>Des passants risquent de se blesser à cause de matériel démonté qui encombre les lieux de circulation ou de stationnement.</p>	<p>Faire imprimer automatiquement sur les OT de la GMAO les recommandations liées à une machine : permis de feu, habilitations, consignations obligatoires, présence de deux personnes obligatoire...</p> <p>Imposer l'utilisation des barrières de sécurité.</p>

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Recherche de pièces de rechange	<p>Recherche de la bonne pièce, la codification</p> <p>Attente inutile au magasin.</p> <p>La pièce de rechange commandée spécialement et en urgence a été utilisée pour une autre intervention.</p> <p>Il faut attendre le retour du magasinier pour avoir la pièce.</p>	<p>Mettre à jour les nomenclatures des équipements (liste des pièces de rechange courante).</p> <p>Possibilité de consulter depuis la GMAO la disponibilité des pièces de rechange dans le magasin avant de se déplacer.</p> <p>Indiquer pour chaque commande « flux tendu » le n° d'OT à l'origine de cette demande. Revoir l'organisation logistique, intégrer la logistique à la maintenance dans la GMAO.</p> <p>Prévoir l'accès au magasin pour les procédures urgentes lors de la fermeture du magasin.</p> <p>Codifier les pièces avec un code fabricant de manière à pouvoir exploiter les informations du document et trouver la pièce en magasin rapidement.</p>
Commande de pièce indisponible	<p>Pour compenser le délai de passation de commande (3 semaines) un « arrangement » est passé avec le distributeur local qui envoie la pièce en contrepartie d'un fax. La commande sera régularisée par après ce qui cause des problèmes administratifs.</p>	<p>Mise à disposition d'une procédure simplifiée de passation de commande.</p> <p>Amélioration des procédures administratives.</p> <p>Déléguer des montants de commande.</p> <p>Demander le prix au fournisseur qui envoie un fax ou mail transmis à l'acheteur.</p>
Réception de pièce commandée en urgence	<p>La pièce est reçue mais le technicien ne le sait pas.</p> <p>Le magasinier circule dans les ateliers la pièce à bout de bras en demandant « Pour qui est cette pièce ? »</p>	<p>Afficher un avis de réception.</p> <p>Si la GMAO existe, passer la commande sur un n° d'OT qui sera affiché ainsi que le demandeur lors de la réception.</p>

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Remplacement, remontage	<p>Outils inadaptés.</p> <p>Oubli de la méthode de démontage.</p>	<p>Revoir régulièrement l'inventaire des outils.</p> <p>La même personne procède au démontage et au remontage.</p> <p>Les vis non remplaçables et autres accessoires sont rangés dans une boîte en attendant le remontage.</p>
Essais de remise en service	<p>Le technicien ne sait pas si la machine est correctement réparée.</p> <p>Il y a conflit avec l'utilisateur à ce sujet.</p>	<p>Effectuer des caractérisations de chaque machine ou équipement : vitesse normale en charge, mesures à effectuer et valeurs attendues, cadence mini et maxi, courant consommé en charge, etc..</p> <p>Ces paramètres seront vérifiés à la fin du dépannage.</p> <p>Relever ces mesures dans le compte rendu de dépannage et les faire constater par l'utilisateur.</p>
Attente de l'opérateur	<p>L'opérateur est parti faire autre chose ce qui cause un certain temps de non-utilisation de la machine avant sa remise en état.</p>	<p>Rédiger des procédures avec le service utilisateur lequel devra nommer un responsable pour réceptionner la remise en état et constater qu'elle est effective et satisfaisante.</p>
Réception de la réparation par l'utilisateur	<p>L'utilisateur réclame le passage d'un dépanneur sans savoir que la réparation a été faite depuis un certain temps (ce que le responsable de maintenance est heureux de lui annoncer d'un air goguenard).</p>	<p>Faire constater la remise en état par l'utilisateur sur papier ou dans la GMAO et diffuser l'information.</p> <p>S'assurer que c'est sur la bonne machine qui a été « réparée » !!</p>
Remise en service de la machine	<p>Ce n'est pas la bonne machine qui a été réparée ce qui explique pourquoi le technicien n'a rien constaté.</p> <p>Attente de la production avant de la réutiliser ce qui allonge le temps de non-fonctionnement.</p>	<p>Étiquetage de toutes les machines et mention obligatoire lors de la demande d'intervention.</p> <p>Remise d'un OT détaillé avec le n° de la machine et son emplacement.</p> <p>Mentionner sur le compte rendu l'heure, minutes de la remise en état</p>

### 5.4.3 Approche mathématique de la maintenabilité

#### La fonction maintenabilité $M(t)$

#### Obtention des données

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.

#### Fonctions mathématiques caractéristiques

Étant donné l'analogie existant entre les notions de fiabilité, largement développées au paragraphe 5.2, et les notions de maintenabilité, nous serons plus concis ici, car les démarches d'analyses sont semblables.

– Variable aléatoire : c'est la durée d'une intervention préventive ou corrective de maintenance. Nous la noterons  $t = TTR$  (*time to repair*, ou temps technique de réparation), de moyenne  $MTTR$ .

– La densité de probabilité est  $g(t)$ . Par nature, la distribution des durées d'intervention sera dissymétrique ainsi que nous l'expliquerons au paragraphe 6.2.2. Les lois de probabilité ajustables à cette dissymétrie seront la loi log-normale, la loi gamma et la loi LVE des valeurs extrêmes (sous sa forme 1 nommée loi de Gumbel).

– La fonction de répartition est  $M(t)$ . Elle exprime la probabilité qu'une intervention ait une durée  $TTR < t$ , ou que le système en panne à  $t = 0$  soit rétabli à  $t$  :

$$M(t) = \int_0^t g(t) dt = \text{Prob}(TTR < t)$$

– L'espérance mathématique ou durée d'intervention moyenne  $MTTR$  s'exprime par :

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot g(t) dt$$

#### Taux de réparation $\mu(t)$

De façon analogue au taux de défaillance, nous définissons un taux de réparation  $\mu(t)$  tel que :

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

#### Hypothèse exponentielle

Les calculs prévisionnels de maintenabilité reposent sur l'hypothèse exponentielle, signifiant ici que le taux de réparation  $\mu$  est supposé constant. La répartition des temps de réparation est alors exponentielle, selon la formule :

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

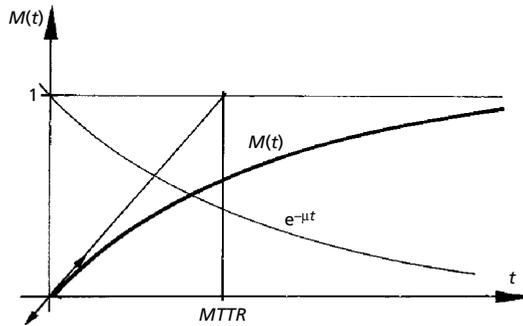


Figure 5.38

Espérance mathématique :

$$E(t) = MTTR = \tau = \frac{1}{\mu}$$

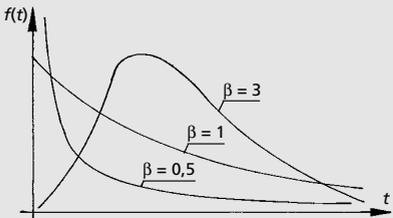
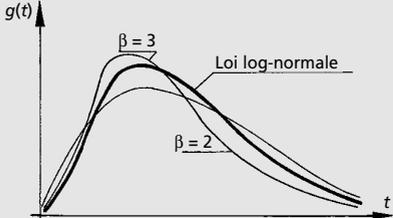
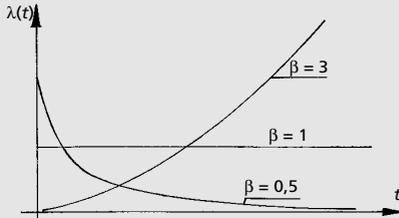
□ **Analogie des analyses de fiabilité et de maintenabilité**

La comparaison de ces deux analyses est synthétisée au tableau 5.15.

Tableau 5.15 – Comparaison des analyses mathématiques de R(t) et de M(t)

Fiabilité	Maintenabilité
Probabilité de « 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 $\mu(t)$ : $\mu(t)dt = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$
MTBF = mean time between failures : $MTBF = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{+\infty} R(t)dt$	MTTR = mean time to repair : $MTTR = \int_0^{+\infty} t \cdot g(t)dt$
Relation fondamentale : $f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	Relation fondamentale : $g(t) = \mu(t) \cdot e^{-\int_0^t \mu(t)dt}$

Tableau 5.15 – Comparaison des analyses mathématiques de R(t) et de M(t)

<p>Lois usuelles :</p> <p>si <math>\lambda = \text{constant}</math>, loi exponentielle :  <math>R(t) = e^{-\lambda t}</math></p> <p>si <math>\lambda(t)</math> est variable, loi de Weibull (loi à 3 paramètres)</p>   <p>Application : systèmes réparables ou non</p>	<p>Lois usuelles :</p> <p>si <math>\mu = \text{constant}</math>, loi exponentielle : <math>M(t) = 1 - e^{-\mu t}</math></p> <p>si <math>\mu(t)</math> est variable, loi log-normale (distribution fréquente des durées d'interventions de maintenance), paramètres <math>m</math> et <math>\sigma</math></p>  <p>Une modélisation par la loi de Weibull avec <math>2 &lt; \beta &lt; 3</math> est possible</p>  <p>Application : systèmes réparables</p>
--	--

□ Analyses prévisionnelles de maintenabilité

Lorsque le concepteur d'un système se voit imposer une performance de disponibilité à atteindre, il doit prendre en compte des éléments de maintenabilité pour les intégrer, soit à la quantification d'arbre de défaillance, soit à des modélisations de type graphe de Markov, classiques en SdF (sûreté de fonctionnement).

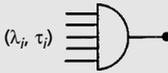
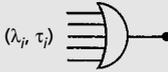
□ Quantification d'un arbre de défaillance dépendant du temps

Un arbre de défaillance permet d'identifier les défaillances élémentaires (voir § 4.5.4) influentes sur la disponibilité du système. Si l'on prend en compte pour chaque défaillance élémentaire son taux de défaillance  $\lambda$  et son taux de réparation  $\mu$  supposés constants, il devient possible de quantifier chaque branche de l'arbre jusqu'à l'estimation de la disponibilité prévisionnelle :

$$D_s = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

En se plaçant dans l'hypothèse exponentielle et avec  $MTTR = \tau = 1/\mu$ , nous obtenons le tableau comparatif 5.16.

Tableau 5.16 – Comparaison des systèmes réparables ou non réparables

	Systèmes non réparables	Systèmes réparables (arbres dépendant du temps)
<p><b>Porte ET</b></p>  <p><math>(\lambda_i, \tau_i)</math></p>	$\lambda = \prod_{i=1}^n \lambda_i$ $(\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n)$	$\lambda = \prod_{i=1}^n (\lambda_i \tau_i) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i}$ $\tau = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i}}$
<p><b>Porte OU</b></p>  <p><math>(\lambda_i, \tau_i)</math></p>	$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ $(\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)$	$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ $\tau = \frac{\sum \lambda_i \tau_i}{\sum \lambda_i}$

□ Graphes de Markov

Un graphe de Markov est caractérisé par un certain nombre d'états représentatifs de la situation d'un système de production que l'on modélise à l'instant  $t$ , et de transitions décrivant l'évolution dans le temps. Les quatre états classiques d'un équipement sont le repos, le travail, la maintenance corrective et la maintenance préventive. Il est également possible de faire une analyse sur trois états : le travail (ou bon fonctionnement), la panne (ou maintenance corrective) et le mode dégradé. Les arcs représentent les taux de transition, suivant la modélisation de la figure 5.39.

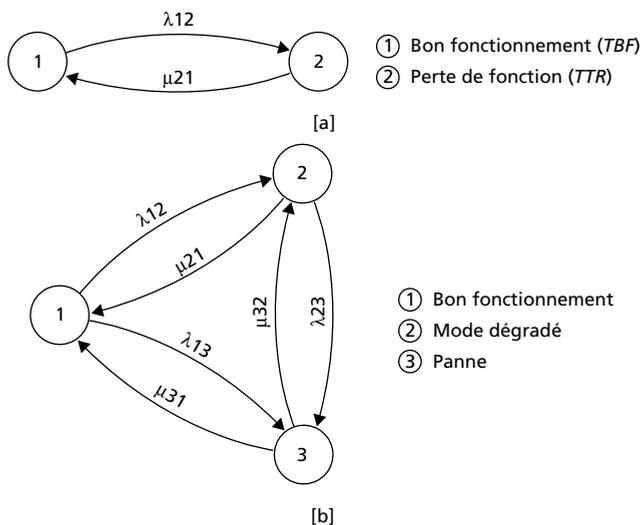


Figure 5.39 – Graphes de transition :  
 (a) entre deux états (2 paramètres  $\lambda$  et  $\mu$ );  
 (b) entre trois états (6 paramètres  $\lambda$  et  $\mu$ )

La résolution du système d'équations de probabilité se fait en utilisant les transformées de Laplace. Mises sous forme matricielle, elles forment un système d'équations résolues par la méthode de Cramer, qui a l'avantage de pouvoir se mettre sous informatique. Néanmoins, les évaluations de disponibilité et l'optimisation des paramètres relèvent d'un traitement mathématique complexe, qui sort du cadre de cet ouvrage. Pour application, nous renvoyons le lecteur à la littérature de la SdF.

Rappelons le cadre de notre propos : il s'agit de mettre à disposition de l'industrie, de ses ingénieurs et de ses techniciens de maintenance quelques outils a priori simples à appliquer, tirés des méthodes de la sûreté de fonctionnement.

#### 5.4.4 L'analyse de maintenabilité opérationnelle

##### □ Pourquoi réaliser des analyses de maintenabilité

- Comme pour la fiabilité, les analyses de maintenabilité opérationnelle se justifient :
- dans le cadre d'une évaluation précise de la disponibilité opérationnelle d'un équipement, et le suivi de ses variations et tendances. En effet, il est logique de mettre en œuvre des moyens homogènes pour estimer la *MTBF* et la *MTTR* tout en s'affranchissant de l'hypothèse exponentielle;
  - 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.

##### Remarque

La maintenabilité opérationnelle mesurée par l'indicateur *MTTR* est la résultante de la maintenabilité intrinsèque, de la logistique de maintenance et de l'efficacité propre aux intervenants.

##### □ Comment réaliser des analyses de maintenabilité

Elles reposent sur le traitement d'échantillons de  $N$  durées d'intervention *TTR* collectées sur l'historique des interventions relatives à un type d'équipement. Comme pour la fiabilité, elles peuvent concerner l'ensemble d'un système ou se rapporter aux seules interventions sur un module sensible particulier.

Pour les grands échantillons, la loi de probabilité utilisée est la loi log-normale. Pour les petits échantillons, la loi des valeurs extrêmes (ou de Gumbel) est mieux adaptée. Le paragraphe 6.2, « Analyse des temps de maintenance », étudie le détail des saisies à opérer. Le paragraphe 5.4.5 suivant développe un exemple d'application par la loi de Gumbel.

#### 5.4.5 Analyse de maintenabilité : étude de cas

##### □ Thème traité

Soit un petit échantillon de  $N = 19$  valeurs issues du retour des bons de travaux en clientèle, dans le cadre d'un contrat de maintenance. Ces interventions correctives

longues se rapportent toutes à un même module fragile de l'équipement à maintenir. Une révision des prix de contrat s'impose : sur quelle base de temps ?

Les 19 durées ont été traduites en heures et 1/10 d'heures : 4,3 – 9,7 – 7,3 – 8,5 – 6,8 – 4,7 – 9,0 – 5,9 – 11,5 – 3,6 – 8,0 – 13,9 – 5,5 – 10,3 – 3,4 – 16 – 6,4 – 4,5 – 12,7.

#### □ Préparation des données

Ordonnons les durées par valeurs croissantes et traitons-les par les rangs moyens  $M(i) = i/N + 1 = i/20$ . Les données ainsi traitées sont regroupées dans le tableau 5.17.

Tableau 5.17 – Étude de maintenabilité

$i$	$TTR$	$M(i)$	$i$	$TTR$	$M(i)$	$i$	$TTR$	$M(i)$
1	3,4	0,05	7	5,9	0,35	13	9,0	0,65
2	3,6	0,10	8	6,4	0,40	14	9,7	0,70
3	4,3	0,15	9	6,8	0,45	15	10,3	0,75
4	4,5	0,20	10	7,3	0,50	16	11,5	0,80
5	4,8	0,25	11	8,0	0,55	17	12,7	0,85
6	5,5	0,30	12	8,5	0,60	18	13,9	0,90
						19	16,0	0,95

#### □ Application à la loi des valeurs extrêmes

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

$$M(t) = \exp\left[-e^{-a(t-u)}\right] = P(T < t)$$

dans laquelle  $a$  est l'inverse de la pente du papier fonctionnel de Gumbel et  $u$  est le paramètre de localisation.

La  $MTTR$ , ou espérance mathématique de la loi, a alors pour valeur :

$$MTTR = u + \frac{0,5778}{a}$$

Le papier fonctionnel spécifique est d'usage très simple, suivant la procédure d'étude ci-dessous.

#### □ Procédure d'analyse pour la loi LVE

##### □ Utilisation du papier de Gumbel

Portons les couples de points  $(TTR_i, M(i))$  sur le papier fonctionnel relatif à la loi de Gumbel, les rangs moyens étant en abscisse. La régression des 19 points par une droite est ici facile (figure 5.40).

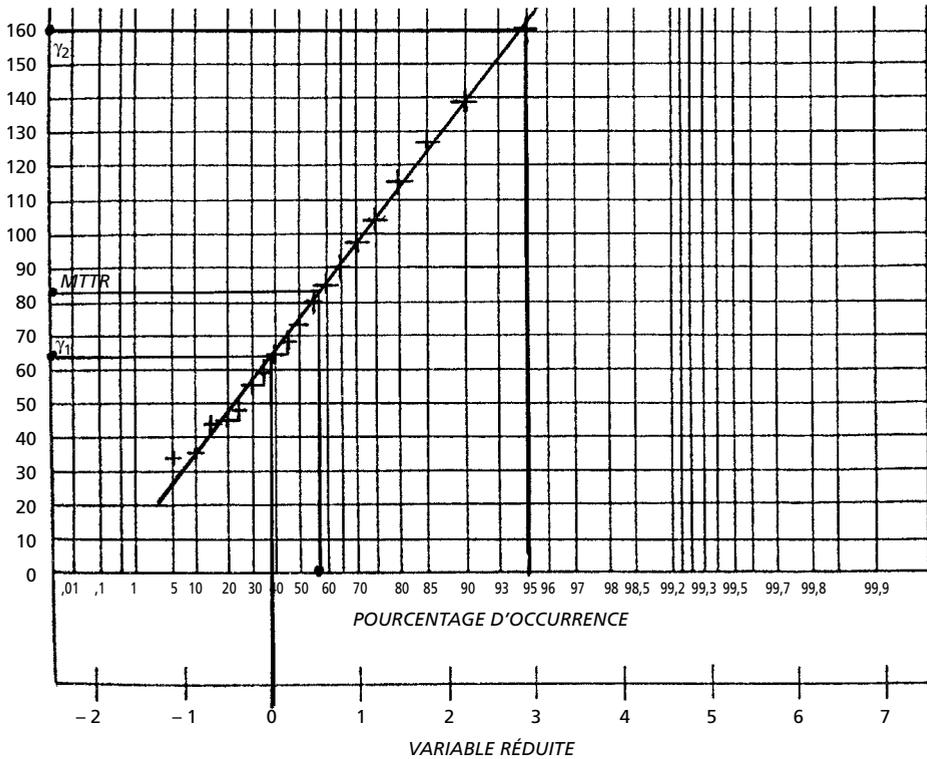


Figure 5.40 – Application de la loi de Gumbel à la maintenabilité

□ **Détermination des deux paramètres sur le papier fonctionnel**

Le papier fonctionnel a été conçu de telle sorte que  $u = \gamma_1$  se trouve sur l'ordonnée correspondante à la probabilité 0,37 ou 0 sur l'échelle réduite et que  $\gamma_2$  se trouve sur l'ordonnée correspondante à la probabilité 0,95 (ou 3 sur l'échelle réduite).

Nous lisons  $\gamma_1 = 6,3$  heures =  $u$  et  $\gamma_2 = 16$  heures.

La pente a pour valeur :

$$\frac{1}{a} = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{3} = \frac{16 - 6,3}{3} = 3,23$$

Donc  $a = 1/3,23 = 0,309$ .

□ **Calcul de la MTTR**

$$MTTR = u + \frac{0,5778}{a} = 6,3 + \frac{0,5778}{0,309} = 8,17 \text{ heures}$$

□ **Expression de la maintenabilité déduite de l'échantillon**

$$M(t) = \exp\left[-e^{-0,309(t-6,3)}\right]$$

Il est donc possible de représenter graphiquement cette fonction et d'associer par calcul à chaque durée d'intervention sa probabilité de « tenir le délai » et réciproquement. Mais il est plus rapide et plus simple d'obtenir le couple  $(t, M(t))$  directement sur le papier de Gumbel.

### Exemple

À la *MTTR* est associée une probabilité de 58 % de terminer l'intervention avant 8,17 heures (figure 5.40). Il y a 80 % de chances de terminer l'intervention en moins de 11,3 heures, mais il n'y a que 23 % de chances qu'elle se termine en moins de 5 heures. Remarquons que changer la logistique et l'organisation de cette intervention revient à changer la loi, donc à déterminer ses nouveaux paramètres.

## 5.5 La disponibilité des systèmes réparables

### 5.5.1 Disponibilité : définition et différentes formes

#### □ Rappel de la définition du projet CEN WI 319-003

Disponibilité : « Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée. »

### Remarque

« Les moyens autres que la logistique de maintenance (personnel, documentation, rechanges, équipements d'essai, ateliers) n'affectent pas la disponibilité d'un bien. »

La figure 5.41 illustre les trois facteurs d'influence de la disponibilité intrinsèque  $D_i$ .

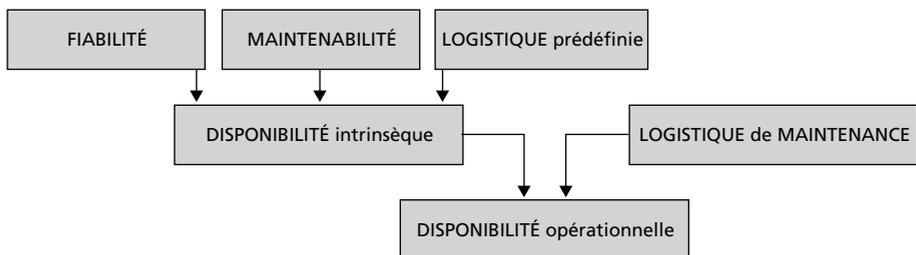


Figure 5.41 – Disponibilité intrinsèque et opérationnelle

### Remarques

- Seuls les temps d'arrêt intrinsèques, nommés également « temps d'arrêt propres » et caractérisés par la *MTI* (moyenne des temps d'indisponibilité), seront relevés pour évaluer la disponibilité opérationnelle d'un système (voir § 6.2.3, figure 6.10).
- La disponibilité se traduit par *availability*, souvent notée  $A(t)$  dans la littérature anglo-saxonne.

□ Les différentes formes de disponibilité

La figure 5.42 schématise les différentes formes de disponibilité et leur contexte.

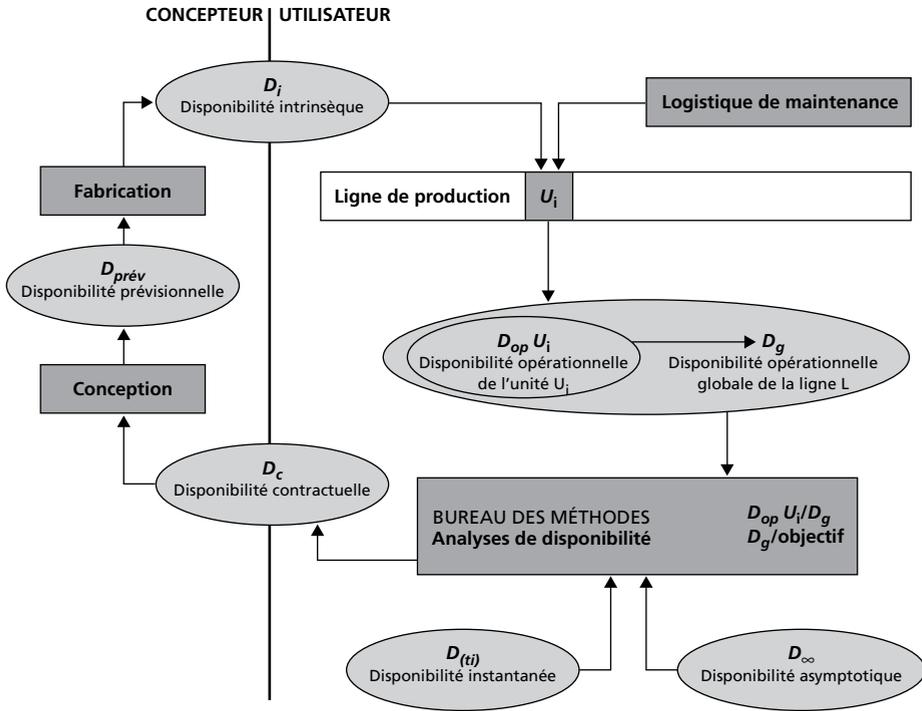


Figure 5.42 – Situation des différentes formes de disponibilité

□ Disponibilité « propre » ou opérationnelle de l'unité de production  $U_i$

Nous nommerons « disponibilité opérationnelle », notée  $D_{op}$ , l'évaluation de la disponibilité obtenue à partir de mesures de temps saisies à partir des états d'un équipement. Elle est évaluée à partir des relevés de temps relatifs :

- à une période de temps (1 jour, 1 semaine,  $n$  mois, 1 an);
- à un équipement ou, s'il s'agit d'une ligne de production, d'un tronçon  $U_i$ ;
- aux temps d'indisponibilité propres de moyenne  $MTI$  et des durées de bon fonctionnement de moyenne  $MTBF$  suivant le modèle :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTI} < 1$$

On obtient une valeur moyenne  $D_{op}$  mesurée sur un intervalle de temps  $\Delta t$  (d'une journée à un an).

La norme CNOMO E 41.50.520N distingue la disponibilité « propre », excluant les temps d'arrêt induits, de la disponibilité « opérationnelle » qui les intègre.  $MTI$  étant la moyenne des temps d'indisponibilité propre (voir figure 6.10), nous

confondons  $D_{op}$  et  $D$  propre, les temps induits se retrouvant pris en compte dans le TRS (taux de rendement synthétique) d'un équipement...

Cette disponibilité propre est un indicateur de gestion technique, spécifique à la maintenance. Elle suppose la prise en compte des microdéfaillances par saisie automatique des micro-arrêts et par imputation codée des causes intrinsèques d'arrêts, car elles représentent le gisement majeur d'amélioration de disponibilité.

Le suivi périodique de  $D_{op}$  permet de tracer des graphes d'évolution montrant l'efficacité des actions de maintenance (figure 5.43). Sa valeur absolue représente la résultante de la disponibilité intrinsèque  $D_{\infty}$  et de la logistique de maintenance qui est appliquée à l'équipement.

#### □ Disponibilité opérationnelle globale, ou résultante ( $D_g$ )

Cette disponibilité de ligne s'obtient par composition des  $D_{op}$  d'unités, suivant la présence et la valeur de stocks intermédiaires dits « stocks tampons » que la logique du flux tendu tend à supprimer.

Elle constitue un gisement d'amélioration de la productivité. À ce titre, elle représente un objectif de maintenance à atteindre suivant la conjoncture de la production (en surcapacité ou en limite de capacité). L'améliorer passe inexorablement par l'amélioration des  $D_{op}(U_i)$  les plus faibles (voir étude de cas § 5.5.4).

#### □ Disponibilité asymptotique ou intrinsèque ( $D_{\infty}$ )

Pour un équipement donné, il existe une limite de disponibilité  $D_{\infty} = D$  au même titre qu'il existe une limite de performance de production (temps de cycle ou cadence maximale) plus visible et mieux connue (capacité de production nominale du cahier des charges).

Cette disponibilité intrinsèque est une caractéristique initiale de l'équipement, de valeur difficile à « construire » a priori. Par contre, elle est la résultante de la prise en compte initiale des critères qualitatifs de maintenabilité et de fiabilité qui doivent figurer au cahier des charges de fourniture.

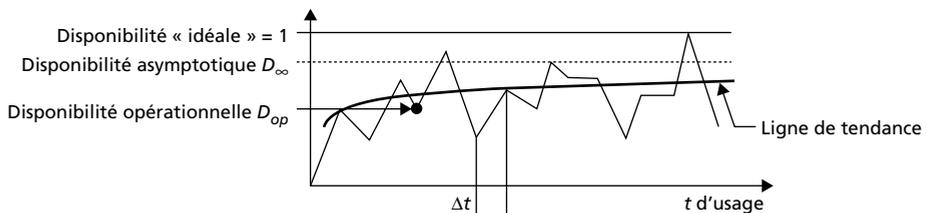


Figure 5.43 – Existence d'une limite de disponibilité  $D_{\infty}$

#### □ Disponibilité instantanée ( $D(t_i)$ )

Ce modèle probabiliste sera étudié au paragraphe 5.5.3. Il permet de démontrer l'existence d'une disponibilité asymptotique  $D_{\infty}$ .

### □ Disponibilité contractuelle ( $D_c$ ) et disponibilité prévisionnelle ( $D_{prév}$ )

Certains contrats de fourniture imposent une valeur allouée  $D_c$  qu'il appartient au concepteur de « construire » en réalisant une modélisation à partir des valeurs supposées (bases de données) de  $MTBF$  et de  $MTTR$ . Cette disponibilité prévisionnelle devra être confrontée à la disponibilité opérationnelle mesurée suivant des procédures précisées et acceptées par les deux parties fournisseur/utilisateur-client.

#### Exemple

L'un des premiers contrats de ce genre fut signé pour le métro de Caracas (Venezuela). L'AP (assurance de ponctualité, analogue à une disponibilité) était fixée a priori; à charge pour le fournisseur d'y parvenir dans un délai négocié.

## 5.5.2 Analyses de disponibilité opérationnelle

### □ Facteurs qualitatifs de la disponibilité opérationnelle

La disponibilité opérationnelle d'un équipement est la résultante de nombreux facteurs que nous avons succinctement identifiés et mis en famille suivant la figure 5.44.

### □ Analyses qualitatives d'indisponibilité

De façon analogue aux analyses qualitatives et aux expertises de pannes qui ont fait la preuve de leur richesse d'exploitation comme source de progrès, il est souhaitable de réaliser au bureau des méthodes des « analyses d'indisponibilité » paramétrées par les  $MTI$ .

Après avoir mis en mémoire, classé, puis sélectionné certaines indisponibilités critiques ou anormales (longues ou répétitives), nous analyserons l'indisponibilité à trois niveaux :

- 1<sup>er</sup> niveau, analyse de la défaillance à l'origine de l'indisponibilité. S'il s'avère possible de la guérir (maintenance proactive) ou de la prévenir (maintenance préventive), inutile d'aller au-delà. Sinon :
- 2<sup>e</sup> niveau : analyse des critères de disponibilité énumérés ci-dessus. Il s'agit alors d'opérer un diagnostic identifiant le ou les critères à l'origine des temps d'arrêt propres anormalement pénalisants. Puis de rechercher des améliorations qui peuvent être de nature technique ou organisationnelle ;
- 3<sup>e</sup> niveau : analyse des conditions de l'intervention, ou de la série d'interventions, pour remettre en cause la logistique de maintenance et son organisation. Par exemple, l'analyse des 2 heures d'indisponibilité mettra en évidence 1 h 15 dédiée à la recherche interne (magasin), puis chez un distributeur voisin, de la pièce de rechange nécessaire.

L'analyse fine des temps d'arrêt propres est réalisée au paragraphe 6.2 « Analyse des temps ». La figure 6.10 est révélatrice du fait que la réduction des durées d'intervention passe par l'anticipation de tous les aléas que les techniciens sont susceptibles de rencontrer. Cette anticipation est de la responsabilité de l'agent des méthodes, à partir de l'analyse d'indisponibilité.

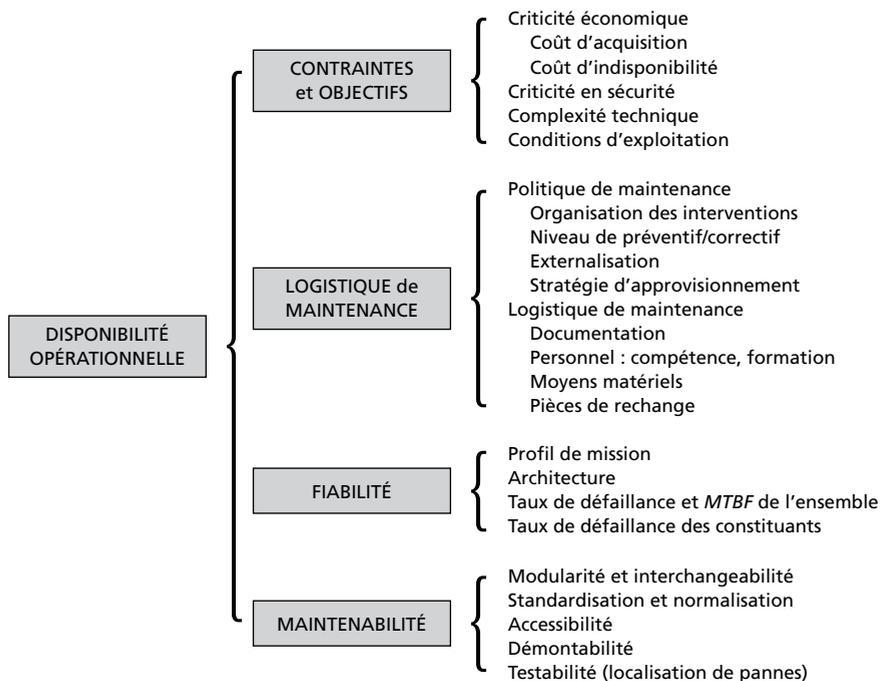
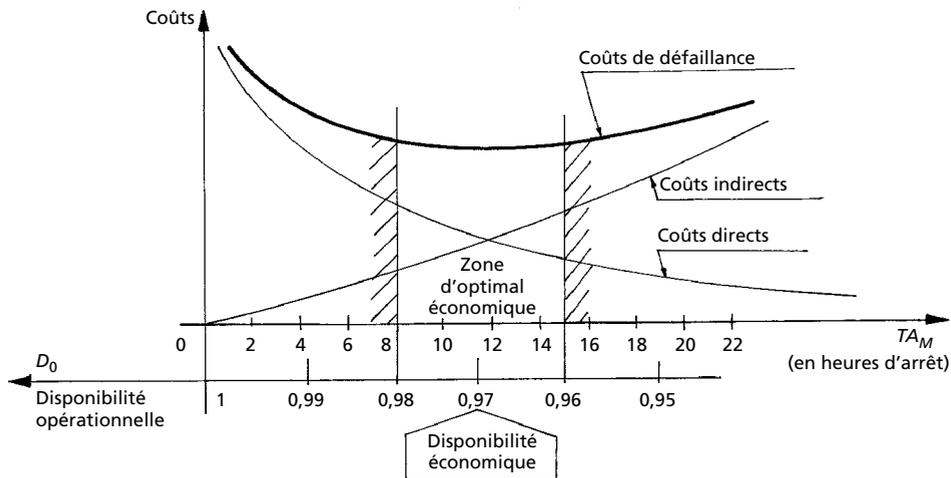


Figure 5.44 – Critères de disponibilité opérationnelle

□ Approche économique de la disponibilité opérationnelle

La maintenance a la responsabilité de gérer la disponibilité opérationnelle d'un équipement suivant deux objectifs possibles :

- obtenir la meilleure disponibilité possible au moindre coût ou pour un budget fixé;
- obtenir une disponibilité performante, en mettant en œuvre la meilleure logistique de maintenance possible.



Bilan mensuel de l'unité F

Figure 5.45 – Aspect économique de la maîtrise de la disponibilité

L'environnement économique de l'entreprise et du produit concerné conditionne la politique à appliquer, donc l'objectif de disponibilité fixé à la maintenance.

Remarquons que la productivité d'un système passe par trois facteurs étroitement liés :

- la cadence de fonctionnement, limitée par la capacité de production du système;
- la disponibilité opérationnelle de ce système, limitée par sa disponibilité intrinsèque;
- la qualité des produits fabriqués, le pire scénario étant un système qui « débite » à grande cadence et sans arrêt des produits qui doivent être rejetés car non conformes.

La prise en compte de ces trois facteurs sera proposée dans le paragraphe 10.2 sur la TPM à partir de l'indicateur *TRS*, taux de rendement synthétique.

### Remarque

La maîtrise « technique » de la disponibilité d'un équipement suppose une organisation rationnelle de la maintenance, une logistique performante et une grande réactivité (cas du changement d'objectif).

### □ Différents modèles d'évaluation de la disponibilité opérationnelle

L'évaluation de la disponibilité opérationnelle d'un équipement a un rôle d'indicateur de gestion plus que de ratio comparatif. À ce titre, il est plus intéressant en valeur relative pour comparaison à lui-même dans le temps (graphe d'évolution) qu'en valeur absolue, souvent suspecte : quels sont les temps saisis ? À la limite, peu importe les temps saisis pourvu que ce soient toujours les mêmes et que les microdéfaillances y figurent !

Beaucoup d'indicateurs sont donc possibles, par temps cumulés (*TTCBF*, *TCTTR*), par moyenne statistique ou, mieux, par espérance mathématique (*MTBF* et *MTTR*). Prenons quelques exemples d'indicateurs de disponibilité opérationnelle.

Formule de base de la disponibilité opérationnelle « propre » :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTI}$$

*MTI* : moyenne des temps d'indisponibilité (voir § 6.2.3) :

$$D_{op} = \frac{MTBF + RT}{MTBF + MTTR + MTL}$$

*MTL* : moyenne des temps logistiques (ou/et administratifs).

*RT* : *ready time* ou temps moyen d'attente, le système étant prêt à fonctionner :

$$D_{op} = \frac{MTBM}{MTBM + MMT}$$

*MTBM* : temps moyen entre actions de maintenance préventives ou correctives.

*MMT* : temps moyen des actions préventives et correctives :

$$D_{op} = \frac{T_O - T_{Ap}}{T_O}$$

$T_{Ap}$  : temps cumulé d'arrêts propres.

$T_O$  : temps d'ouverture d'une ligne ou temps requis :

$$D_{op} = \frac{TMc \cdot N}{TMc \cdot N + T_{Ap}}$$

$TMc \cdot N$  : temps moyen de cycle  $\times$  nombre de pièces produites.

$T_{Ap}$  : temps cumulé d'arrêts propres.

D'autres indicateurs sont envisageables, soit « forcés » par l'utilisation des seules données disponibles, soit mieux adaptés à un champ opérationnel particulier. Rappelons que leur structure doit être telle que  $D_{op} < 1$ , c'est-à-dire  $A - B/A$  ou  $A/A + B$ .

#### □ Modes de saisie pour l'évaluation de la disponibilité opérationnelle

La saisie traditionnelle par BT (bons de travaux), par relevés de compteurs ou par feuilles de saisie documentée par un opérateur n'est pas pertinente pour évaluer régulièrement l'indicateur de disponibilité, qui doit obligatoirement intégrer les microtemps d'indisponibilité pour être significatif.

La saisie automatique en temps réel des arrêts de production est presque toujours disponible (gestion de production) par information des entrées-sorties du système de commande.

Par contre, il faudra mettre en place une saisie semi-automatique pour imputer chaque arrêt à un code recensant les  $n$  causes d'arrêt « propres » et les  $m$  causes d'arrêt induits par l'environnement du système.

L'imputation des feuilles de saisie par usage de codes-barres est envisageable.

Le redémarrage conditionné à l'imputation garantit que l'imputation d'un arrêt à une cause est réalisée, non qu'elle soit pertinente.

Un autre problème à maîtriser est le code « causes diverses » ou « autres causes » : il n'est pas facile de cibler des actions d'amélioration lorsque 66 % des arrêts ont des causes diverses non identifiées !

La qualité des saisies est donc un facteur prépondérant de la valeur de l'indicateur « disponibilité » et de l'efficacité des actions d'amélioration que l'on va en déduire.

### 5.5.3 Approche mathématique de la disponibilité

#### □ Modélisation de la disponibilité instantanée. Formule générale

Nous nous plaçons dans l'hypothèse exponentielle, avec les deux taux  $\lambda$  et  $\mu$  supposés constants et indépendants du temps :

$$\text{Taux de défaillance : } \lambda = \frac{1}{MTBF}$$

$$\text{Taux de réparation : } \mu = \frac{1}{MTTR}$$

La disponibilité instantanée d'un système réparable est de la forme :

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t}$$

**Démonstration**

Soit la disponibilité instantanée  $D(t) = p_0(t) = \text{Prob}(\text{fonctionnement du système}) = \text{Prob}(0 \text{ défaillance})$  et l'indisponibilité  $I(t) = 1 - D(t) = p_1(t) = \text{Prob}(\text{non-fonctionnement}) = \text{Prob}(1 \text{ défaillance})$ . La qualité initiale du système garantit que  $p_0(0) = 1$  et  $p_1(0) = 0$ . Par complémentarité :  $p_1(t) = 1 - p_0(t)$ .

Pour que le système fonctionne à l'instant  $t + dt$  avec une probabilité  $p_0(t + dt)$ , il faut :  
 – qu'il fonctionne à l'instant  $t$ , et qu'il n'y ait pas de défaillance entre  $t$  et  $t + dt$  :

$$\text{probabilité : } p_0(t) \cdot (1 - \lambda dt)$$

– ou qu'il ne fonctionne pas à l'instant  $t$ , mais qu'il soit remis en état entre  $t$  et  $t + dt$  :

$$\text{probabilité : } 1 - p_0(t) \cdot \mu \cdot dt$$

Équation des probabilités :

$$p_0(t + dt) = p_0(t) \cdot (1 - \lambda dt) + (1 - p_0(t)) \cdot \mu \cdot dt$$

Si l'on divise par  $dt$  tendant vers 0, on obtient l'équation différentielle

$$p_0(t) + (\lambda + \mu) \cdot p_0(t) = \mu$$

dont la solution est :

$$D(t) = p_0(t) = \frac{1}{\mu + \lambda} \cdot [\mu + \lambda e^{-(\lambda + \mu)t}]$$

□ **Expressions de la disponibilité asymptotique (ou intrinsèque, ou stationnaire)**

$D(t)$  tend vers une limite asymptotique  $D_\infty$  quand  $t \rightarrow \infty$ . Nous trouvons alors les formules usuelles équivalentes :

$$D_\infty = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad \text{ou} \quad D_\infty = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

que l'on peut également mettre sous la forme :

$$D_\infty = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} = \frac{1}{1 + \frac{MTTR}{MTBF}}$$

$\frac{MTTR}{MTBF}$  est appelé le « rapport de maintenance ».

□ **Composition des disponibilités asymptotiques**

La détermination de la disponibilité prévisionnelle d'un système réparable s'appuie sur la méthode de l'espace des états, ou graphes de Markov : elle sort du cadre de cet ouvrage, dédié aux ingénieurs et techniciens en charge de la maintenance industrielle (voir [PAG 80] pour les calculs de fiabilité prévisionnelle). Nous ne donnerons que quelques résultats susceptibles d'être utilisés dans les cas les plus simples de détermination d'une disponibilité asymptotique « résultante » d'un ensemble de  $n$  unités.

Pour modéliser la disponibilité d'un système  $D_g$  à partir de la disponibilité  $DU_i$  de ses unités constitutives, nous devons distinguer deux cas :

1. les éléments sont statistiquement indépendants, ce qui est rarement le cas dans un atelier automatisé ;

2. les éléments sont statistiquement dépendants, ce qui est plus fréquent, car une dépendance fonctionnelle crée une dépendance sur les probabilités. Par exemple, les dépanneurs n'étant pas en nombre illimité, les unités simultanément en panne ne peuvent être simultanément dépannées.

□ **Cas de  $n$  unités indépendantes en série**

La disponibilité globale, résultante du système, est le produit :

$$D_g = \prod_1^n DU_i$$

**Exemple**

Soient deux unités de disponibilités 0,90 et 0,80 en série. Alors :

$$D_g = 0,9 \times 0,8 = 0,72$$

□ **Cas de  $n$  unités indépendantes en parallèle**

Notons l'indisponibilité  $I = 1 - D$ . Nous obtenons :

$$I_g = \prod_1^n IU_i$$

ou

$$1 - D_g = (1 - D_1)(1 - D_2)$$

**Exemple**

Soient deux unités de disponibilités 0,90 et 0,80 en parallèle. Alors :

$$1 - D_g = (1 - 0,9)(1 - 0,8) = 0,02$$

$$D_g = 0,98$$

□ **Cas de  $n$  unités en série dépendantes**

Les résultats s'obtiennent en traçant le graphe des états discrets et en résolvant le processus de Markov.

$$I = 1 - D = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}$$

□ **Cas d'une redondance active de  $n$  unités identiques**

En considérant l'intervention simultanée de plusieurs réparateurs

$$I = 1 - D = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}$$

d'après A. Villemur.

□ **Composition des disponibilités opérationnelles**

□ **Modèle « série » des lignes à unités liées (ou dépendantes)**

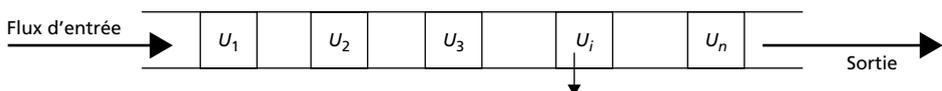


Figure 5.46

La disponibilité opérationnelle de la ligne sera dans ce cas :

$$D_g = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{DU_i} \right] - (n-1)}$$

**Exemple**

Soit une ligne de 10 unités, dont chacune a une disponibilité  $DU_i = 0,99$ . Alors  $D_g = 0,908$ . Supposons maintenant que 9 unités aient une disponibilité  $DU_i = 0,99$  et que 1 unité ait une disponibilité  $DU_i = 0,80$ . Alors  $D_g = 0,75$ .

Cet exemple est riche d'enseignements, justifiant la méthode d'amélioration de performance d'un ensemble lié par le flux tendu : il faut et il suffit d'agir sur le « maillon faible », c'est-à-dire l'unité la plus pénalisante.

Il montre également l'intérêt qu'il y a à mettre en série des équipements de performances homogènes, un seul équipement performant au milieu d'équipements « moyens » étant inopérant (surqualité inutile).

*Abaque*

La formule donnant la disponibilité globale  $D_g$  a été mise en abaque correspondant au cas d'un grand nombre d'équipements de disponibilités homogènes.

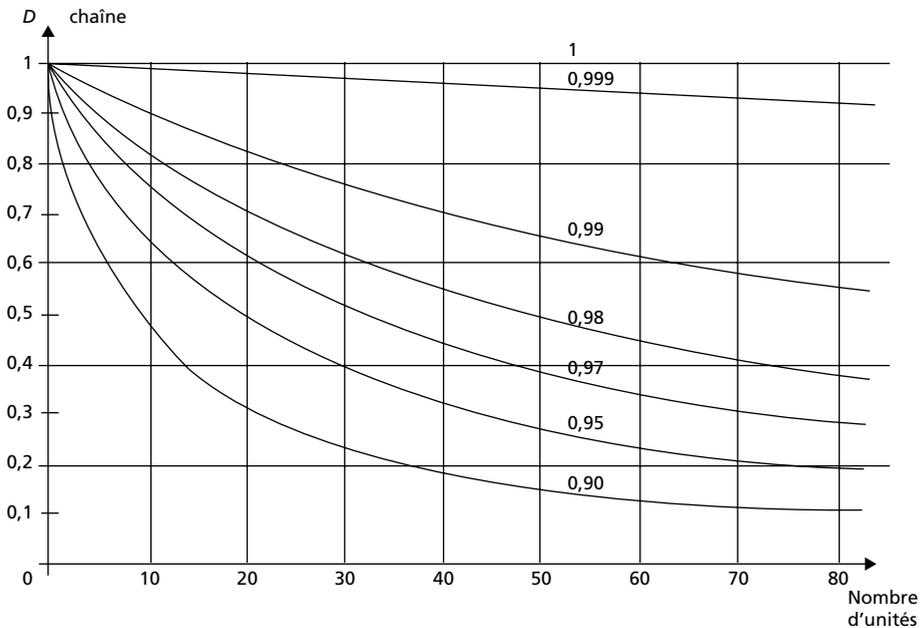


Figure 5.47 – Abaque donnant la disponibilité globale d'une ligne à unités liées

*Lecture et utilisation de l'abaque*

Si 50 unités ont une disponibilité  $DU_i = 0,97$ , la disponibilité opérationnelle  $D_g$  sera de 0,40. En lecture inverse, pour obtenir l'objectif  $D_g = 0,6$  minimum avec 30 unités de production, chaque unité devra avoir une  $DU_i = 0,978$  minimum.

Cela permet d'intégrer à une ligne existante un équipement nouveau dont la disponibilité « contractuelle » sera fixée à 0,98, mesurée dans des conditions à préciser. Ni plus, car ce serait de la « surqualité » inutile. Ni moins, car ce serait pénalisant pour tenir l'objectif  $D_g > 0,6$ .

□ **Modèle série des lignes à « dépotage-rempotage » (ou stocks tampons)**

La figure 5.48 montre que l'arrêt temporaire de  $U_2$  entraîne le stockage des produits en  $S_{12}$  et le dépotage de  $S_{23}$ .

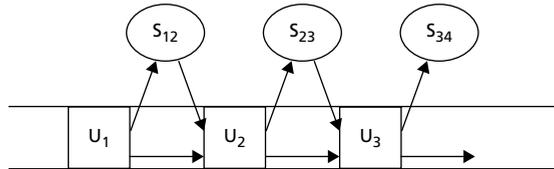


Figure 5.48

Dans ce cas simple, si le dimensionnement des stocks est suffisant, les unités deviennent indépendantes et la disponibilité globale est égale à la disponibilité  $DU_i$  la plus faible. Comme pour les unités liées, l'amélioration de la disponibilité globale passe par l'amélioration de la  $DU_i$  la plus faible.

### 5.5.4 Démarche d'amélioration de la disponibilité d'une ligne de production

La démarche proposée synthétise l'étude de cas traitée au paragraphe 5.5.5 suivant.

□ **Objectif**

L'objectif est d'obtenir une amélioration permanente de la disponibilité d'une ligne de production à partir de l'organisation d'un flux d'informations « bouclées » entre le terrain (opérateurs pour la saisie), le bureau des méthodes (analyses d'indisponibilité et propositions) et le terrain (techniciens de maintenance pour la mise en œuvre des améliorations). L'analyse des retours d'expérience permet de mesurer l'efficacité des mesures prises et mises en œuvre.

Il est évident que cette organisation peut s'inscrire dans une démarche participative, chaque acteur étant informé et sollicité, les résultats de l'effort collectif (graphes d'évolution) étant « visualisés » sur le site. L'agent des méthodes est alors naturellement l'animateur de cette organisation reposant sur les analyses collectives d'indisponibilité.

□ **Organisation de l'itération du flux d'informations et des actions d'amélioration**

Soit une ligne de production  $L$  décomposée en  $n$  tronçons ou unités liées.

□ **Saisie**

Chaque unité est décomposée en  $k$  sous-ensembles codés de 01 à  $k$ , servant à localiser les défaillances. Outre cette codification de « localisation », est établie une

codification d'imputation des 11 causes d'arrêt propre les plus fréquentes, plus un code 12 « autre cause ».

À chaque arrêt d'unité  $U_i$  sont relevés les  $TBF$ , les  $TI$  (temps d'arrêt propres) et les temps d'arrêt pour causes externes, non pris en compte pour évaluer  $DU_i$ .

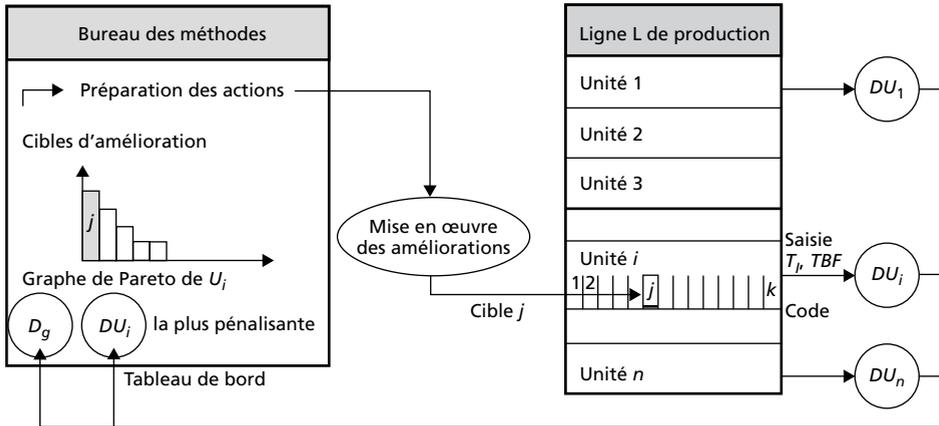


Figure 5.49 – Optimisation de la disponibilité d'une ligne de production

□ **Traitement**

Les  $TBF$  et les  $TI$  permettent d'estimer périodiquement les  $MTBF$  et les  $MTI$  (moyenne des temps d'indisponibilité propre), puis de former et d'évaluer la valeur moyenne de  $D_{op} U_i$  sur une période donnée (1 jour, 1 semaine) :

$$D_{op} U_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTI}$$

Par composition des  $DU_i$ , il est possible de tenir un graphe de tendance montrant les variations de  $D_g$  (formule des unités liées), comme le montre le tableau 5.18 ci-contre.

Les saisies ainsi que les traitements peuvent être manuels pendant une phase expérimentale, puis automatisés, l'agent des méthodes gestionnaire de la ligne ayant automatiquement les valeurs de toutes les  $D_{op} U_i$  à l'issue de chaque journée.

□ **Interprétation du retour d'expérience**

L'agent des méthodes analyse chaque semaine les tendances des  $DU_i$  les plus faibles, par rapprochement avec les valeurs des semaines précédentes. Sélectionnant la plus faible, donc celle qui pénalise le plus  $D_g$ , il doit tracer les trois graphes de Pareto en NT, N et T suivant la figure 4.24 de façon à diagnostiquer les causes d'indisponibilité en allant sur le terrain (dialogue avec les opérateurs).

□ **Préparation et validation des actions**

Cette analyse permet de cibler des actions d'amélioration qu'il reste à préparer, à mettre en œuvre et à valider : la mesure de  $DU_i$  de la prochaine période permettra de mesurer l'efficacité des actions réalisées.

**Tableau 5.18** – Exemple de suivi de la ligne L

Semaines	1	2	3	4	5	
Unité $U_i$						
Compteur	623,3 h	751,5	861,1	993,7	1 109,8	
<i>MTBF</i>	22,2	27,5	28,9	24,5	36,1	
<i>MTI</i>	1,9	2,2	1,1	1,6	2,3	
$D_{op} U_i$	0,921	0,926	0,963	0,938	0,940	
Ligne L $D_g$	0,754	0,810	0,821,12	0,769	0,798	
$D_g$						
0,82						
0,80						
0,78						
0,76						
0,74						
0,72						

□ **Conséquence**

L'application de ce principe de gestion technique débouche sur une recherche permanente de progrès, chaque problème résolu laissant apparaître de nouvelles sources d'indisponibilité, de moins en moins pénalisantes. Cet effort de la maintenance pour accroître la disponibilité a un coût : l'indisponibilité également.

### 5.5.5 Étude de cas : gestion technique d'une ligne de production

Le choix de ce thème et son traitement ont une volonté « pédagogique » d'aide aux responsables des méthodes de PMI dans une démarche rationnelle intégrant et démystifiant l'approche fiabilité.

#### □ Contexte et objectif de l'étude

Cette étude de cas est tirée d'une expérience de recherche de la maîtrise de la disponibilité opérationnelle d'une ligne de production d'un process de transformation laitier (PMI agroalimentaire de 350 personnes). Les machines (homogénéisateurs, écrémeuses, pasteurisation, emballeuses) étaient homogènes (4 à 6 ans d'âge), placées en série et dédiées à un seul produit fromager.

Lors de l'étude, la demande du produit était en forte croissance, la capacité de production devenant insuffisante. L'objectif était donc d'améliorer la disponibilité, initialement faible et non mesurée, en proposant un modèle d'organisation en « manuel », en le validant puis en l'automatisant. L'organisation préconisée a été expérimentée pendant trois mois, puis validée et pérennisée avec saisie par codebarres et formation d'un agent des méthodes.

#### Remarque

Depuis lors, la demande ayant faibli, l'objectif est devenu de faire tourner cette ligne au moindre coût.

#### □ Données de départ

- Engagement de la ligne : 16h/jour ouvrable + 9 h le samedi = 89 h/semaine.
- Dossier machine « constructeur » de chaque unité.
- Relevé des seuls temps d'arrêt  $TA > 15$  min fourni par la production pour les six derniers mois.
- Bons d'intervention « lacunaires » relatifs aux interventions correctives : description du travail et durée d'intervention  $TTR$ .
- Un chef de service et des techniciens d'intervention, mais pas de « méthodes de maintenance ».
- Possibilité de former une équipe VSD (vendredi, samedi, dimanche) en maintenance avec des techniciens volontaires.

#### □ Décomposition structurelle du process et saisie de données

La ligne L a été décomposée en 11 machines liées en série suivant la figure 5.50.



Figure 5.50

Très vite, il est apparu que l'unité F limitait la production par des arrêts divers, assez longs et répétitifs. Chaque machine a été décomposée en sous-ensembles fonctionnels codés de 01 à 12 suivant la technologie propre à chaque unité. De plus, un second code de 01 à 12 a été proposé, en concertation avec les opérateurs et dépanneurs, correspondant aux « causes » apparentes d'arrêt les plus fréquentes :  
 01 à 06 : causes externes (matières, qualité, induits, etc.);  
 07 à 12 : arrêts propres à l'unité, à saisir même s'il s'agit d'un « micro-arrêt » < 1 min.

#### □ Analyse de la fiabilité de l'unité F

Cette étude initiale a été menée à partir des seules données existantes : chronologie complète de 19 interventions correctives sur les 6 mois précédents (soit 2 314 h de fonctionnement), avec saisie des seuls temps d'arrêt > 15 min.

TBF	70	282	25	187	45	308	35	17	86	111	51	7	214	9	101	402	120	29	136
TA	3	7	12	1,5	2	8	0,5	3	2,5	11	3,5	1,5	4	0,5	8	5	2	4	

Figure 5.51

L'unité F a été choisie a priori comme l'élément pénalisant le plus la disponibilité de la ligne. L'approximation de  $F(i)$  est faite à partir des rangs médians :

$$F(i) = \frac{i - 0,3}{N + 0,4} \text{ avec } N = 19$$

#### □ Tableau de valeurs et graphe de Weibull

Tableau 5.19 – Valeurs et graphe de Weibull

TBF	$i$	$F(i)$
7	1	3,6
9	2	8,8
17	3	13,9
25	4	19,1
...	...	...
282	17	86,0
308	18	91,0
402	19	96,4

Les couples de points ( $TBF, F(i)$ ) sont reportés sur un papier fonctionnel de la loi de Weibull (figure 5.52).

Les paramètres de Weibull sont :  $\gamma = 0$  (droite Dw),  $\beta = 1$ ,  $\eta = 125$  heures et  $MTBF = 125$  heures. Nous sommes dans un cas particulier de la loi de Weibull, avec  $\beta = 1$ , pour lequel la loi exponentielle s'applique. Remarquons que ce résultat était prévisible, l'unité F de 4 ans étant en période de « maturité » bien qu'ayant un taux de défaillance fort ( $\lambda = 1/\eta = 1/125$  panne durable/heure). Aucun mode de défaillance prédominant existe, les défaillances se produisant de façon aléatoire.

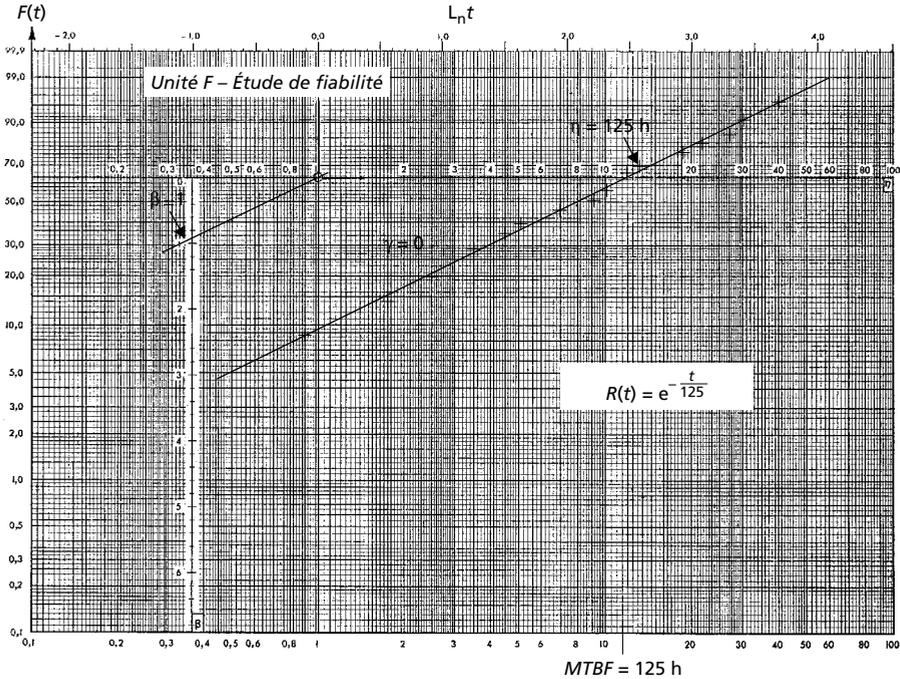


Figure 5.52

**Loi exponentielle (à titre d'exemple et de vérification)**

Tracé du nuage de points sur papier semi-logarithmique (figure 5.53 ci-contre).

**Analyse de la maintenabilité de l'unité F**

À partir des données existantes (durées d'arrêt), nous allons calculer la durée moyenne  $MTA$  de l'échantillon :

$$MTA = \frac{\sum TA}{N} = \frac{79}{18} = 4,4 \text{ heures}$$

ce qui caractérise bien des pannes durables.

Remarquons qu'une analyse probabiliste de la maintenabilité reste possible, la médiocre qualité des données disponibles dans notre cas la rendant inutile.

□ **Analyse de la disponibilité de l'unité F**

En fonction des données disponibles (lacune dans l'archivage des *TTR*), nous prendrons comme modèle de disponibilité opérationnelle :

$$D_{op} U_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTA} \text{ donc } D_{op} F = \frac{125}{125 + 4,4} = 0,966$$

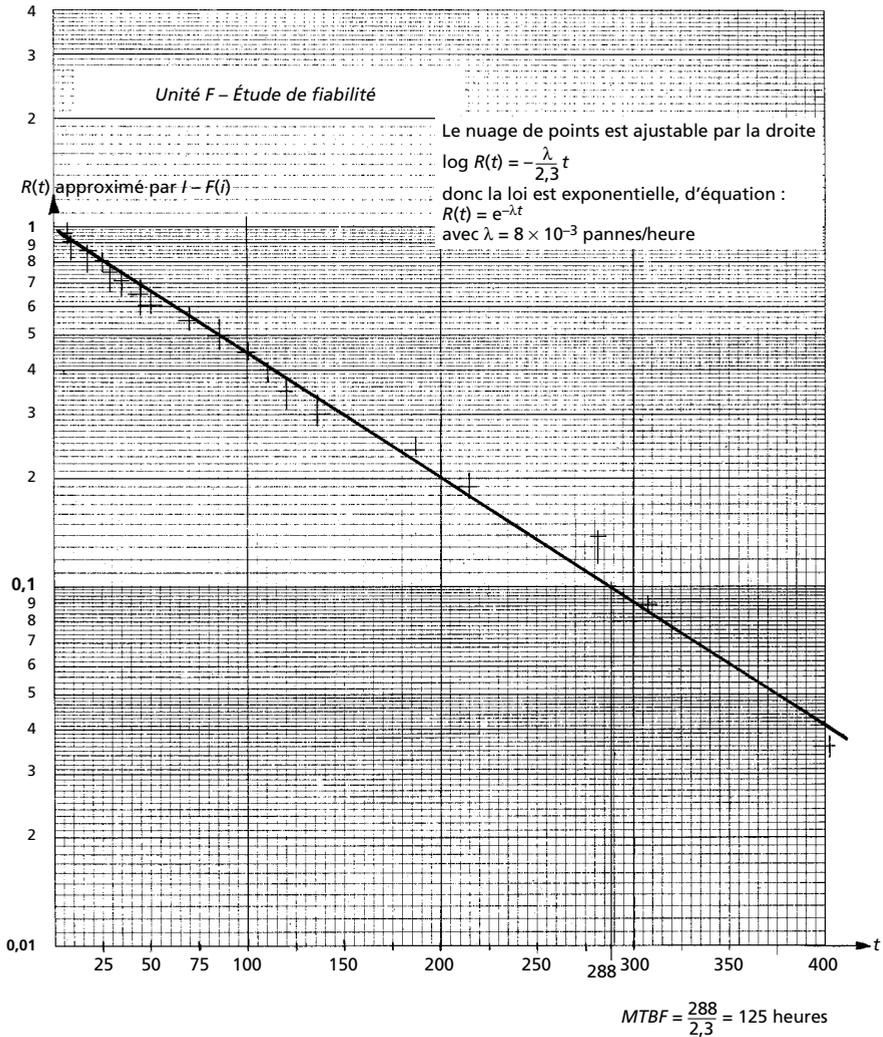


Figure 5.53 – Loi exponentielle

Il est évident que cette disponibilité est très largement optimiste, les durées courtes ou très courtes d'arrêt ( $TA < 15$  minutes) n'étant pas prises en compte. Cette saisie des micro- et miniarrêts est évidemment prévue pour l'organisation préconisée.

□ **Analyse de la disponibilité globale  $D_g$  de la ligne**

Soit  $D_{op}$   $U_i$  notée  $D_i$  la disponibilité opérationnelle de l'unité  $U_i$ . Ces unités étant liées, la disponibilité globale de la ligne L est donnée par :

$$D_g = \frac{1}{\sum \frac{1}{D_i} - (N - 1)}$$

Nous avons 11 unités en ligne :  $N = 11$

$$D_g = \frac{1}{11,123 - 10} = 0,89$$

**Tableau 5.20** – Analyse de disponibilité  $D_g$  d'une ligne de production

Ligne L période du 1/1 au 1/7				
Unité	Moyennes calculées			$1/D_i$
	<i>MTBF</i>	<i>MTA</i>	$D_i$	
A	350	4,7	0,987	1,013
B	845	1,3	0,998	1,002
C	385	3,6	0,991	1,009
D	25	0,3	0,988	1,012
E	820	2,0	0,998	1,002
F	125	4,4	0,966	1,035
G	170	0,6	0,996	1,004
H	325	1,1	0,997	1,003
I	30	0,8	0,974	1,027
J	1 710	4,5	0,997	1,003
K	250	3,2	0,987	1,013
			$\Sigma 1/D_i$	11,123

Pour les 6 derniers mois d'activité, la disponibilité opérationnelle de la ligne a été  $D_g = 0,89$ , valeur que nous savons être trop optimiste ( $TA > 15$  min). Cette valeur a pour intérêt de donner une valeur de référence pour comparaison :

– à elle-même, par intervalles successifs de temps, pour établir un graphe d'évolution,

- avec les  $D_g$  d'autres lignes semblables, à l'intérieur de l'entreprise ou à l'extérieur,
- avec un objectif de disponibilité donné.

#### Remarque

Six mois est une période trop longue. Un suivi hebdomadaire permet une meilleure gestion et une amélioration permanente.

#### □ Propositions d'organisation : exploitation du retour d'expérience

##### □ Organisation des saisies

À chaque poste de conduite d'unité, une horloge enregistre l'alternance des temps de fonctionnement TBF et des temps d'arrêts, même très courts. L'unité ne peut redémarrer que si l'arrêt a été validé par l'opérateur par une double imputation :

- de la localisation : quel est le sous-ensemble codé concerné par l'arrêt ?
- de la cause : code 01 à 06 pour les causes d'arrêts imputables à la production, code 07 à 12 pour les causes d'arrêts « propres » imputables à la maintenance, code 00 pour les arrêts « autres causes ».

Cette codification est établie à partir d'une période d'observation (8 jours par exemple) pendant laquelle sont relevés manuellement tous les arrêts et sont identifiées leurs causes apparentes.

Pour les arrêts longs (> 15 min), un BT « traditionnel » rempli par le technicien de maintenance porte les paramètres quantitatifs et qualitatifs de l'intervention.

##### □ Organisation de l'analyse hebdomadaire de disponibilité

À partir de la  $D_g$  de la période précédente (tableau 5.20), l'agent des méthodes sélectionne la  $DU_i$  la plus pénalisante : dans ce cas  $DU_F = 0,966$ . Il extrait les valeurs relatives à l'indisponibilité de l'unité F : un programme informatique lui permet d'avoir directement le tableau (tableau 5.21) et les graphes de Pareto correspondants (figure 5.54).

Tableau 5.21 – Réalisation des graphes de Pareto

Unité F mois de mars	Nombre d'arrêts $n$						Temps moyen d'arrêt $t (= \Sigma t/n)$						Temps d'arrêt $nt = \Sigma t/\text{cause}$						
	01	02	03	04	05	06	01	02	03	04	05	06	01	02	03	04	05	06	$\Sigma t$
Causes																			
Sous-ensembles																			
01																			
02																			
03	7			2			12'			8'			84'			15'			99'
04																			
Etc.																			

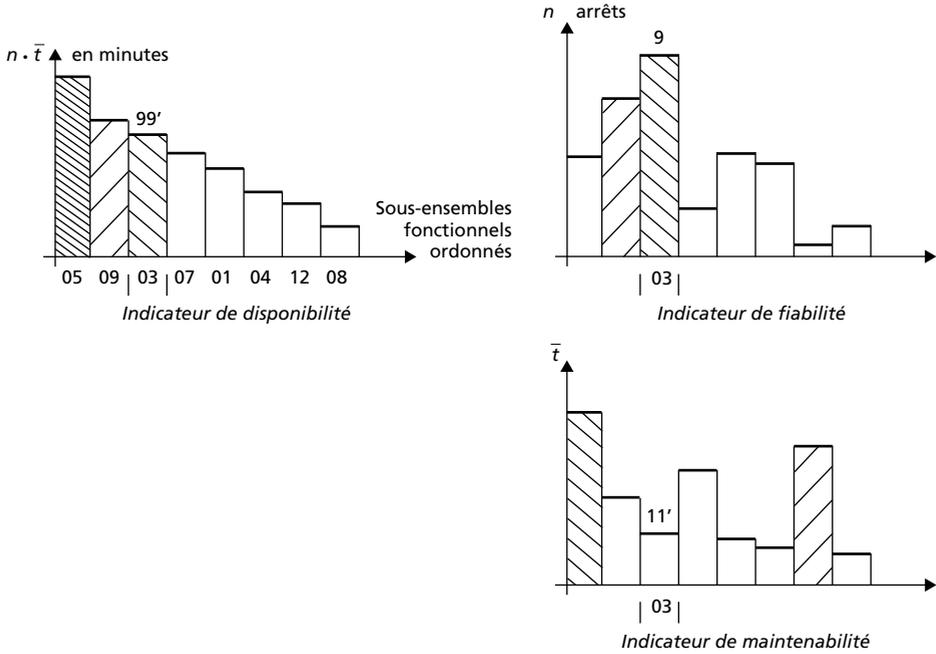


Figure 5.54 – Graphes de Pareto de l'unité F

Le graphe 1, relatif à la criticité des différents groupes fonctionnels de UF par rapport à l'indisponibilité, donne l'ordre « naturel » de prise en charge des problèmes : 05, 09 puis 03.

Prenons pour exemple le problème lié au sous-ensemble 03 : il a entraîné 99 minutes d'arrêt en 9 interventions de valeur moyenne 11 minutes, dont 7 arrêts sont dus à la cause 01, 2 arrêts à la cause 04. En l'occurrence, il s'agit de 7 pannes répétitives de cause « apparente 01 » identifiée, pour laquelle un diagnostic plus approfondi s'impose.

Quels sont les moyens de la supprimer ? Sinon, quels sont les moyens de réduire le nombre d'interventions, la durée d'arrêt, la durée d'intervention ?

Les solutions peuvent être de nature technique, mais également être liées à l'organisation de la production, de la surveillance de l'équipement ou de la maintenance.

#### □ Organisation des mesures d'amélioration

L'organisation peut se mettre en œuvre :

- dans un cadre traditionnel, l'agent des méthodes proposant, puis préparant des actions d'amélioration en concertation avec la production et les acteurs de terrain ;
- dans un cadre participatif sous forme de GAP (groupe d'analyse de panne) défini au paragraphe 10.5.3. Dans ce cas, l'agent des méthodes animateur du GAP hebdomadaire liste chaque semaine un certain nombre de problèmes à résoudre, justifie son choix et les propose au groupe. Lorsque la résolution d'un problème s'avère « lourde », un cercle de qualité formé de volontaires peut s'y attaquer pendant une période fixée.

Dans tous les cas, l'application de la démarche amène à une prise en charge hiérarchisée et progressive incluant des petits problèmes dont certains pourraient sembler négligeables, et donc n'être jamais résolus : « ça se dérègle, je règle, c'est en panne, je dépanne ».

Avec cette démarche de progrès permanent, il devient facile de cibler avec beaucoup de précision un problème dont nous sommes certains que la résolution ou l'amélioration entraînera un gain de disponibilité sur l'unité F, donc sur la ligne L. Chaque mesure d'amélioration sera validée par mesure de  $D_{op}$ , puis les résultats pourront être affichés sur le poste.

La démarche sera identique si, au lieu de se limiter à l'amélioration de la disponibilité (ce qui est l'objet de ce chapitre), nous l'étendons au taux de rendement synthétique de la ligne, qui intègre le taux de qualité et le taux de performance en plus du taux de disponibilité.

## 5.6 La fiabilité humaine : les erreurs à l'interface homme/machine

### 5.6.1 Réflexions préliminaires

*« L'erreur est inhérente à toute activité humaine. »*

*« L'homme est au cœur de l'activité maintenance. »*

Le rapprochement de ces deux truismes suffit à bien poser le problème. La maintenance repose sur un état d'esprit fait d'anticipation des pannes, des défauts, des accidents ainsi que des atteintes à l'environnement. Elle s'appuie sur une surveillance active des équipements. À ce titre, les hommes de maintenance sont facteurs de fiabilité par leurs réactions et leurs décisions d'action. Ils sont aussi porteurs de risque par leurs erreurs et les dysfonctionnements qu'ils peuvent provoquer. Erreurs de pilotage, de surveillance, d'analyse de situation, de diagnostic, de contrôle, de rédaction ou d'exécution de procédures.

#### ❑ Le facteur humain de la conception à l'utilisation

Les systèmes automatisés, bien que sérieusement conçus à l'origine au moyen des techniques de la sûreté de fonctionnement, sont utilisés dans un environnement humain. Celui-ci est constitué d'utilisateurs grand public ou professionnels, de conducteurs, de réglers, d'opérateurs, de dépanneurs, voire de saboteurs. Nous avons appris à anticiper et réduire certaines sources d'erreurs humaines, mais non à les éliminer totalement.

L'actualité mondiale nous montre que les catastrophes « technologiques », nucléaires ou aéronautiques, à travers les expertises faites a posteriori, ont toujours des niveaux de cause incriminant l'homme. De l'homme concepteur ou réalisateur à l'homme de maintenance ou à l'utilisateur.

Une caricature du décalage entre le soin apporté à la conception et le résultat opérationnel est donnée par l'automobile, dont les aspects sécuritaires sont poussés à l'extrême, dont on a éliminé la plupart des causes intrinsèques d'accident (plus de ruptures de freins ou de direction), dont la fiabilité intrinsèque est maîtrisée et

avec laquelle les usagers se tuent à déraison d'une ville moyenne par an en France. De quoi désespérer les fiabilistes de ce secteur !

Un autre exemple significatif concerne le matériel biomédical hospitalier, qui est généralement très fiable. Mais chaque ingénieur biomédical sait et vérifie chaque jour que plus de 60 % des pannes ont pour origine des erreurs d'utilisation des appareils : problème de culture, car à la légitime culture médicale ne correspond pas la nécessaire culture technique...

#### ❑ **Fiabilité et sécurité**

L'accident généré par un système est le plus souvent l'aboutissement d'une chaîne d'événements dont chaque maillon pris isolément apparaît comme mineur, et dont certains maillons sont des erreurs humaines.

La fiabilité humaine concerne « la capacité du technicien à accomplir une fonction donnée sur un système avec une probabilité de réussite associée à un risque d'erreur » (probabilités complémentaires). Les analyses de fiabilité humaine vont porter sur les modes de production de ces erreurs, aux fins de prévention et d'amélioration.

La sécurité concerne la maîtrise des risques d'accident. Les analyses de sécurité vont porter sur les conséquences de l'erreur humaine, en notant que toute erreur n'entraîne pas un accident, soit par nature ou soit parce qu'elle peut être « récupérable ».

Surtout, il est essentiel de noter qu'à l'interface « homme-système » l'homme ne doit pas être réduit à un « générateur d'erreurs », mais doit être considéré comme le moyen initial de concevoir un système sûr et comme le moyen ultime de récupérer et de maintenir la sûreté du système !

### 5.6.2 Essai de typologie des erreurs humaines

#### ❑ **La défaillance humaine**

#### ❑ **Classification des comportements humains liés à la prise de décision (avant l'action)**

Avant d'agir, le technicien confronté à un système est amené à prendre une décision. Cette décision préactive est le résultat d'une activité cérébrale (traitement d'informations) consécutive à la perception d'un signal. Trois types de comportement sont alors possibles (CET 93, p. 58) :

- le *comportement machinal*. C'est la reproduction réflexe d'une décision apprise, sans activité mentale réfléchie ;
- le *comportement procédural*. C'est une tâche coordonnée d'après des règles insuffisamment intégrées pour devenir machinales. Ce comportement caractérise une phase d'apprentissage ou d'adaptation ;
- le *comportement cognitif*. C'est un comportement reposant sur une activité mentale. Il est caractéristique de la démarche « diagnostic » précédée de la phase d'acquisition des symptômes et renseignements utiles au « traitement cérébral » du technicien.

### □ **Réflexions sur la nature de l'erreur humaine**

De la même manière que la défaillance d'un équipement doit être caractérisée avant d'être prévenue, il nous faut définir et classer les types d'erreurs humaines. L'erreur est la conséquence d'une « défaillance humaine » définie par Villemur, 1988, comme « la cessation de l'aptitude de l'opérateur humain à accomplir une mission requise ».

Du point de vue « système », un comportement humain est erroné quand il réduit ou a la possibilité de réduire la fiabilité d'un système. Il n'y a pas de différence « système » entre une vanne fermée par erreur de manipulation ou par perte d'énergie électrique. Ce sont donc les effets de l'action humaine sur les performances du système qui caractérisent l'erreur.

D'autres points de vue sont possibles, centrés sur l'activité mentale (cognitive, psychologie, physiologie) et ses dérèglements, mais ils sortent du cadre de cet ouvrage. Rappelons cependant les phases de l'activité humaine : perception par les organes sensoriels, décodage, interprétation, diagnostic, décision par le cerveau, puis l'action résultante via la coordination motrice. Nous nommerons cette approche « perception-réflexion-action ». Notons que chaque étape peut être perturbée par des anomalies physiques, biologiques ou psychiques, sources potentielles d'erreurs. Prenons quelques exemples.

1. Limitations physiologiques de nos organes sensoriels : surdité, myopie, insensibilité tactile, etc.
2. Limitations psychosociologiques de nos réactions : stress, malaise, émotion, douleur subite, ingestion d'alcool, de drogue ou de médicament.

Il nous faut sortir du domaine de notre étude la faute, associée à une culpabilité, la malveillance, liée à la volonté de nuire, et « la main du diable », expression consacrée par les fiabilistes pour toutes les agressions que les utilisateurs « grand public » peuvent faire subir à un automatisme (du portillon de métro au distributeur de billets).

### □ **Classement par rapport à l'approche « perception-réflexion-action »**

- Erreur de perception : le stimulus, le signal ou l'information est non perçu ou mal perçu.
- Erreur de décodage : l'information bien perçue est mal interprétée, mal comprise ou mal transposée en information utile.
- Erreur de communication : altération de message (interférences), confusion (lisibilité, langue, vocabulaire, etc.).
- Erreur de représentation mentale : elle vient du décalage entre l'idée que l'homme se fait d'une situation et la situation réelle. Cette « erreur de diagnostic » est la cause majoritaire des défaillances graves de systèmes et des accidents.
- Erreur d'action : conséquence des précédentes, elle génère des actions non réalisées, mal adaptées, hors séquence ou non prévues.

### □ **Classement par rapport à une procédure écrite**

- Erreur d'exécution : l'action n'est pas exécutée en conformité avec les exigences prévues.

- Erreur d'omission : une partie de l'action prescrite est omise.
- Erreur de dérive : une action non prévue a été exécutée.
- Erreur de séquence : une sous-tâche est exécutée au mauvais moment.
- Erreur de délai : le temps alloué n'est pas respecté.

#### ❑ Classement par rapport à des mécanismes d'inattention

- Erreur de mémoire : il s'agit « d'oublis » d'une action passée, en cours ou prévue.
- Erreur de discrimination : le déclencheur de l'action n'est pas correctement identifié, souvent par habitude d'une situation voisine, d'une fixation à un stéréotype.
- Erreur de substitution : l'opérateur substitue à une action adaptée une action ressemblante, mais inadaptée.
- Erreur de contrôle : l'action, ou son effet, n'est pas évaluée.

Toutes ces erreurs correspondent à des distractions, inattentions et lapsus débouchant sur des actions accomplies inconsciemment.

#### ❑ Classement par rapport aux « moteurs » de l'activité

- Erreur de compréhension : le but de l'action et ses composantes ne sont pas assimilés.
- Erreur de non implication : la motivation est faible, donc la tâche est mal acceptée.

#### ❑ Classement lié aux causes d'erreurs

- Erreur propre à l'opérateur : dysfonctionnement psychologique ou physiologique (stress, fatigue, malaise).
- Erreur propre à la tâche : inadaptation de la tâche aux capacités de l'opérateur, instructions insuffisantes, manque de formation, etc.
- Erreur propre à l'environnement : influence de tout ce qui est extérieur à l'homme en action, l'ambiance physique par exemple. L'analyse ergonomique a pour objet de réduire ces causes d'erreurs.

#### ❑ Classement spécifique aux erreurs de programmation

- Erreur de syntaxe : non-observation des règles du langage.
- Erreur de sémantique : condition impossible à réaliser, malgré une syntaxe correcte.
- Erreur de copie : accident de négligence ou d'inattention.
- Erreur de logique : amène à des résultats incorrects dans les conditions du problème.

#### ❑ Classement spécifique aux erreurs de communication orale

- Erreur d'interprétation : information ambiguë, incomplète, mal perçue.
- Erreur d'anticipation : on entend ce que l'on s'attend à entendre.
- Erreur « d'humeur » : inconsciente, mais liée à l'antipathie ou à la tension entre communicants.
- Erreur de « barrière » : cas où le poids de la hiérarchie fait hésiter à communiquer.

### 5.6.3 Notion de fiabilité sociotechnique

L'analyse d'une défaillance-système peut conduire à l'analyse d'erreur humaine. Au point de vue méthodologique, l'analyse d'erreur possède la même potentialité d'amélioration que l'analyse de défaillance. Les mêmes possibilités d'analyse qualitative à partir d'une erreur identifiée, ou d'analyse quantitative statistique à partir d'une collecte de renseignement existent. Nous pouvons puiser dans la littérature les analyses statistiques consécutives le plus souvent aux accidents, montrant les enchaînements de causes produisant l'accident. Mais la difficulté de réaliser ces analyses est grande dès lors que l'on touche à l'humain, à sa complexité et à sa susceptibilité : imaginons l'organisation d'une collecte de paramètres relatifs aux erreurs des techniciens du service...

Pourtant, si la fiabilité a une dimension technique évidente, elle a aussi une dimension humaine incontournable. Nous pouvons parler de la fiabilité « sociotechnique » comme résultante des fiabilités humaines et techniques et comme fiabilité opérationnelle vraie.

#### □ Conditions initiales

En maintenance, l'hypothèse de départ de la fiabilité s'écrit  $R(t = 0) = 1$ . Le système fonctionne à l'origine. Nous allons définir une condition initiale analogue pour la fiabilité humaine : « le technicien est capable de réaliser la fonction F sur le système », sachant qu'il s'agit le plus souvent de tâches non répétitives par nature. Il a donc les connaissances et la formation requises, ainsi que les moyens adaptés à la tâche considérée. Mais il n'est pas à l'abri d'une défaillance humaine.

#### □ Génération de l'erreur en maintenance

À partir de cette condition initiale, la fiabilité humaine a pour objet d'étudier la dégradation possible de cette capacité dans le temps, voire la perte brutale de cette capacité. Cette potentialité de génération d'erreur concerne chacune des fonctions de la maintenance, auxquelles nous avons affecté un exemple d'erreur caractéristique.

1. La conception et la réalisation des équipements (erreurs situées en amont de l'exploitation, mais essentielles, tel un défaut-matière non détecté par exemple).
2. La définition, le choix et la négociation d'investissement d'équipement (omission de certains critères de maintenabilité en particulier).
3. La préparation des opérations et la rédaction des procédures de maintenance, correctives ou préventives (analyse insuffisante des conditions de sécurité).
4. La surveillance des équipements (manque de vigilance quant à l'apparition de symptômes).
5. L'action technique en temps réel (faux diagnostic en dépannage) ou l'action « lourde » de type révision (erreur d'exécution technique) et leur contrôle (non prévu).
6. Les saisies et les rapports d'activités (paramètres faux ou rapport mal écrit, donc difficile à exploiter).

À chacune de ces fonctions correspondent des types d'erreurs caractéristiques, qu'il faut avoir à l'esprit lors des phases de préparation du travail en particulier :

c'est à ce niveau que l'anticipation de l'erreur est la plus efficace. Un bon préparateur est celui capable d'anticiper les difficultés techniques et logistiques, bien sûr, mais surtout de prévenir les erreurs de comportement de ses techniciens, de façon quasi personnalisée.

Nous pouvons donc dire qu'une *procédure ou une préparation doit être un « filtre » à erreurs et à difficultés.*

#### □ Situation de l'erreur dans le cas d'un travail préparé

Nous allons étudier la situation de l'erreur entre les phases de préparation et de réalisation, entre la tâche prescrite et l'action réalisée. L'existence d'une procédure écrite ne garantit pas qu'elle est observée, l'opérateur se l'appropriant souvent par redéfinition et transformation. Remarquons que la formalisation d'une procédure est légitimement dépendante de la qualification de l'opérateur, allant de l'indication d'un objectif global au mode opératoire détaillé sans liberté d'initiative.

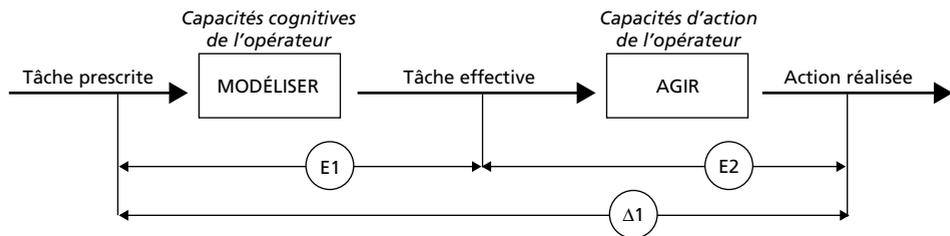


Figure 5.55 – Les erreurs d'interprétation et d'exécution de l'opérateur

$\Delta_1$  est l'écart entre la tâche prescrite et la tâche effective. La tâche prescrite est la représentation que le préparateur se fait de la situation d'intervention, la tâche effective est la tâche « redéfinie » que s'approprie l'opérateur.

$E_1$  représente l'erreur d'interprétation des prescriptions du préparateur.

$E_2$  représente l'erreur d'exécution de l'opérateur.

#### □ Situation de l'erreur dans le cas d'une action non préparée : l'erreur de diagnostic

Ce scénario, caractéristique du dépannage, diffère du précédent par les possibilités d'erreurs de perception venant de la phase d'observation (entrées sensorielles), à savoir l'inattention et le piège de l'habitude. Le travail « cognitif » du dépanneur est plus complexe, car il lui faut identifier la situation, interpréter les symptômes, les évaluer, rechercher une association avec un état ou des règles connues afin de décider d'une action. Remarquons que, dans ce cas, l'opérateur cumule les risques d'erreurs du préparateur et de l'opérateur, mais les risques liés à la communication et à l'interprétation des prescriptions sont en moins.

Dans ce cas, le dépanneur est souvent soumis à la pression du temps d'indisponibilité de l'équipement, le stress s'exerçant au détriment de la nécessaire lucidité. Il est

donc important d'inculquer l'idée que jamais l'urgence ne peut justifier le manque de réflexion, le manque de qualité, et encore moins l'accident !

#### 5.6.4 Quelques remarques en guise de conclusion

1. Face à une erreur identifiée, le comportement positif ne consiste pas à « chercher le coupable », mais à analyser l'erreur de façon à éviter sa réapparition (ne pas confondre erreur et faute). Comme la défaillance, l'erreur humaine analysée et admise est une source de progrès. Elle est aussi une condition d'apprentissage, la pratique de l'autodiagnostic et de l'autocorrection pouvant être à la base d'une « *pédagogie de l'erreur* ».

2. Nous venons de réfléchir sur la génération des erreurs au plan individuel. Des travaux de sociologues et de psychologues envisagent la dimension collective de l'erreur, soit sous la forme de l'influence du groupe sur le comportement individuel erroné, soit sous la forme d'erreur collective.

Il en est ainsi de la « *pensée de groupe* ». Groupe qui, par sa forte cohésion ou la personnalité de son leader, amène ses membres à nier des indices contraires à la pensée unique, à refuser des informations contraires à l'image préétablie de la situation et à pratiquer l'autocensure. Un management efficace doit donc pousser à une responsabilisation individuelle et collective sans culpabilisation, favorisant ainsi un état d'esprit de prévention.

3. L'organisation et le système d'information qui en découle, le respect de la réglementation et l'assurance de la qualité en maintenance sont autant d'éléments favorables à la détection et à la prévention des erreurs. Le management participatif, par la plus grande implication des acteurs qui le caractérise, est un facteur déterminant de limitation des erreurs humaines.

4. Encore une fois, nous insistons sur le fait que la plus efficace prévention des erreurs est celle effectuée *ab initio*. Les techniques de la sûreté de fonctionnement, dont l'APR (analyse préliminaire des risques) et la conception de systèmes tolérants par rapport aux erreurs et aux pannes (*fault tolerant systems*), sont de bons moyens d'anticipation des erreurs humaines, tout au long de la vie du système. Ces techniques ont fait la preuve de leur efficacité, dans les domaines nucléaires et aéronautiques en particulier. De plus, cette construction d'un « taux de confiance » doit entraîner moins d'anxiété, donc plus de lucidité chez les opérateurs. Il est prouvé (ACA 87, études de sûreté nucléaire) que plus les risques d'erreurs peuvent avoir de conséquences graves, plus le stress agit sur les acteurs qui en ont conscience, et plus l'occurrence d'erreur est grande.

Savoir que « *le risque 0 d'erreur humaine est une utopie* » montre la voie de la raison et justifie l'intérêt de ce chapitre pour un responsable de maintenance.