Fiabilité

I Fiabilité d'un matériel

1. Introduction

- La fiabilité est l'étude de la durée de vie d'un matériel.
- Ce chapitre étudie la variable aléatoire qui à chaque matériel, associe son temps de bon fonctionnement. Son espérance mathématique et la moyenne des temps de bon fonctionnement ou **MTBF.**
- L'analyse d'un échantillon permet de justifier que cette variable aléatoire suit une loi **exponentielle** ou une loi de **Weibull.**

T désigne la variable aléatoire qui, à tout dispositif tiré au hasard, associe son **temps de bon fonctionnement (**Time Between Failures) ou sa durée de vie avant une défaillance.
Pour simplifier, nous choisissons comme origine des temps l'instant t = 0 où le dispositif choisi est mis en marche, soit pour la première fois, soit après une réparation qui l'a remis à neuf.
Alors T mesure ainsi l'instant où apparaît la première défaillance d'un dispositif pris au hasard dans la population considérée, à partir de l'instant t = 0.

2. Fonction défaillance. Fonction de Fiabilité.

T est une variable aléatoire continue à valeurs positives et possédant une densité de probabilité *f.*

Définition 1 : La fonction défaillance est définie par : $F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(t)dt$ pour $t \geq 0$.

F(t) est la probabilité qu'un dispositif prélevé au hasard dans la population considérée ait une défaillance avant l'instant t.

Définition 2 : La fonction de fiabilité est définie par : $R(t) = P(T > t) = 1 - F(t)$ pour $t \geq 0$. R(t) est la probabilité qu'un dispositif prélevé au hasard dans la population considérée n'ait pas de défaillance avant l'instant t.

- F est la fonction de répartition de la variable aléatoire T.
- En anglais fiabilité est traduit par **reliability.**

Estimation de F(t) et de R(t) :

2.1 Méthode des rangs bruts $F(t_i) = \dfrac{n_i}{n}$

2.2 Méthode des rangs moyens $F(t_i) = \dfrac{n_i}{n+1}$

2.3 Méthode des rangs médians $F(t) = \dfrac{n_i - 0,3}{n_i + 0,4}$

EXERCICE : Une usine produit des machines. On étudie la fiabilité de 25 de ces machines dès leur mise en service. Pour cela on relève leur temps de bon fonctionnement (TBF) en l'absence de toute réparation.

TBF en jours	[0;100]	]100,200]	]200,300]	]300,400]	]400,500]	]500,600]	]600,700]	]700,800]
Nombre de défaillances	6	6	5	3	0	1	2	1

TBF en jours	]800,900]	]900,1000]
Nombre de défaillances	0	1

Notons N_i le nombre de machines non défaillantes jusqu'à l'instant ti ;

$R_i = \dfrac{N_i}{25}$ (avec la méthode du rang brut) est la proportion de machines non défaillantes jusqu'à l'instant ti ;

Fi =1 – R_i est la proportion de machines défaillantes à l'instant ti .
On obtient le tableau suivant :

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ti (en jours)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Ni	25	19	13	8	5	5	4	2	1	1	0
Ri	1	$\frac{19}{25}$	$\frac{13}{25}$	$\frac{8}{25}$	$\frac{5}{25}$	$\frac{5}{25}$	$\frac{4}{25}$	$\frac{2}{25}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{25}$	0
Fi	0	$\frac{6}{25}$	$\frac{12}{25}$	$\frac{17}{25}$	$\frac{20}{25}$	$\frac{20}{25}$	$\frac{21}{25}$	$\frac{23}{25}$	$\frac{24}{25}$	$\frac{24}{25}$	1

Définition 3 : MTBF : Soit T la variable aléatoire qui, à chaque matériel, associe son temps de bon fonctionnement.
La **MTBF** (**M**oyenne des **T**emps de **B**on **F**onctionnement) est l'espérance mathématique de T : **E(T) = MTBF**.

3. <u>Taux d'avarie (ou taux de défaillance)</u>

Dans l'exemple précédent, le taux d'avarie de l'intervalle [200,300] est la proportion de machines qui tombent en panne dans cet intervalle de temps, par rapport à celles qui étaient en état de bon fonctionnement au début de la période. C'est à dire :

$$\frac{N_2 - N_3}{N_2} = \frac{13-8}{13} \approx 0.38 \text{ .}$$

L'unité du temps est le jour, on trouve le taux d'avarie moyen dans l'intervalle [200,300] : $\frac{0,38}{300-200} = 0,0038$. On dit que 0,38% des machines tombent en panne par jour.

<u>Définition 4</u> **<u>Taux d'avarie moyen entre les instants t et t+h est égal à :</u>**

$$\frac{\textit{nombre} \text{ d'éléments tombés en panne entre les instants t et t + h}}{\text{nombre d'éléments en état de marche à l'instant t}}$$

C'est la probabilité pour qu'un dispositif en état de marche à l'instant t, tombe en panne entre les instants t et t+h. Donc

$$\frac{P(t < T < t+h)}{P(T > t)} = \frac{F(t+h) - F(t)}{R(t)} = \frac{(1 - R(t+h)) - (1 - R(t))}{R(t)} = \frac{R(t) - R(t+h)}{R(t)} \text{ .}$$

<u>Définition 5</u> **<u>Taux d'avarie moyen par unité de temps</u> :** On divise par h : $\frac{R(t) - R(t+h)}{R(t) \times h}$

<u>Taux d'avarie instantané $\lambda(t)$ à l'instants t :</u> On calcule la limite lorsque h tend vers 0

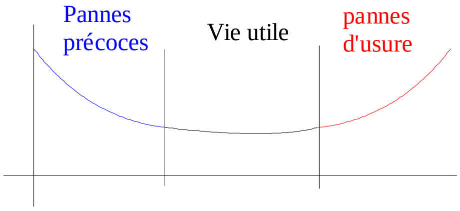
$$\lim_{h \to 0} \frac{R(t) - R(t+h)}{R(t)h} = \lim_{h \to 0} -\frac{R(t+h) - R(t)}{h} \times \frac{1}{R(t)} = \frac{-R'(t)}{R(t)} \text{ ,}$$

d'où :

<u>Définition 6</u> Le taux d'avarie instantané à l'instant t d'un matériel est la fonction λ éfinie par : $\lambda(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)}$

où R est la fonction fiabilité de ce matériel.
<u>Conséquences</u> : Si la fonction λ est connue, la résolution de l'équation différentielle linéaire du premier ordre sur un intervalle convenable : $R'(t) + \lambda R(t) = 0$ donne la fonction de fiabilité *R* du matériel.
On peut alors en déduire la fonction de défaillance *F*, puisque *F(t) = 1 - R(t)* , qui est la fonction de répartition de la variable aléatoire *T* ; puis la densité de probabilité *f* de la variable aléatoire *T* : *F'(t) = f(t)*.

Remarque: Expérimentalement $\lambda(t)$ est une courbe en baignoire.



4. MTBF : ***Moyenne des temps de bon fonctionnement***

C'est l'espérance mathématique de la variable aléatoire T définie au départ

$$MTBF = E(t) = \int_0^{+\infty} tf(t)dt = \lim_{x \to +\infty} \int_0^{x} tf(t)dt .$$

Elle représente l'espérance de vie du dispositif.

II *Loi exponentielle*

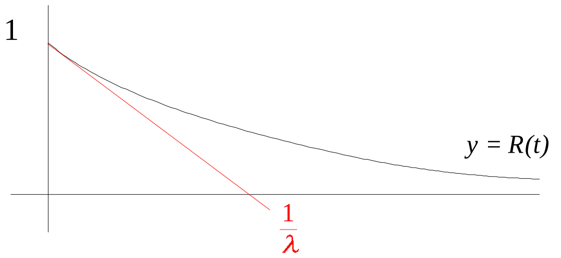
La loi exponentielle est la loi suivie par la variable aléatoire T lorsque le taux d'avarie est constant.
Pour tout $t \geq 0$ on a $\lambda(t) = \lambda$ constante strictement positive.

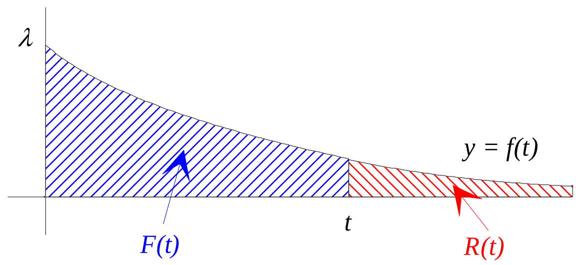
Pour tout $t \geq 0$:

Fonction de fiabilité: $\boxed{R(t) = e^{-\lambda t}}$

Fonction de défaillance: $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$

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





MTBF : E(T) = $\frac{1}{\lambda}$ Ecart type : $\sigma(T) = \frac{1}{\lambda}$

L' égalité $R(t) = e^{-\lambda t}$ est équivalente à $\ln R(t) = \ln(e^{-\lambda t})$; $\ln R(t) = -\lambda t$.

Posons Y = lnR(t), on obtient $Y = -\lambda t.$
Donc les points de coordonnées (t ; Y) tracés dans le même repère orthogonal sont alignés sur une droite passant par O(0 ;0).

On estime que T suit une lois exponentielle si, pour un grand échantillon, les points connus de coordonnées (t_i ; $\ln R_i$) construit dans un repère orthogonal sont approximativement alignés avec l'origine.

L'utilisation de papier semi-logarithmique pour représenter *R(t)* permet de déduire si une loi est exponentielle ou non. S'il s'agit d'une loi exponentielle, la $MTBF = \frac{1}{\lambda}$ est l'antécédent de $e^{-1} \approx 0{,}368$

Utilisation du papier semi-logarithmique

Reprenons l'échantillon des 25 machines observées au premier paragraphe, pour savoir si T suit une loi exponentielle. :
Les la couples (t_i ; R_i) obtenus sont les suivants.

t_i	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
R_i	1	0,76	0,52	0,32	0,20	0,20	0,16	0,08	0,04	0,04

Pour savoir si les points de coordonnées (t_i ; ln R_i) construits dans un repère, orthogonal sont alignés, on utilise du papier semi-logarithmique. Sur un tel papier, les ordonnées marquées y ont en réalité pour valeur Y = lny.
Le papier semi-logarithmique est constitué de bandes ou modules identiques de hauteur ln10 (de ln 1 = à ln 10) .
Soit a ≥ 1 et p un entier quelconque. Puisque ln(a $.10^p$) = lna + p ln 10, on passe du point de coordonnées (t; ln(a $.10^p$)) au point de coordonnées (t ; lna) par une translation de p modules.

De sorte que chaque module contient les points dont les ordonnées varient de $\ln(1.\ 10^{p})$ à $\ln(10.10^{p})$
Le tableau précédent s'écrit :

t_i	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
R_i	$100.\ 10^{-2}$	$76.\ 10^{-2}$	$52.\ 10^{-2}$	$32.\ 10^{-2}$	$20.\ 10^{-2}$	$20.\ 10^{-2}$	$16.\ 10^{-2}$	$8.\ 10^{-2}$	$4.\ 10^{-2}$	$4.\ 10^{-2}$

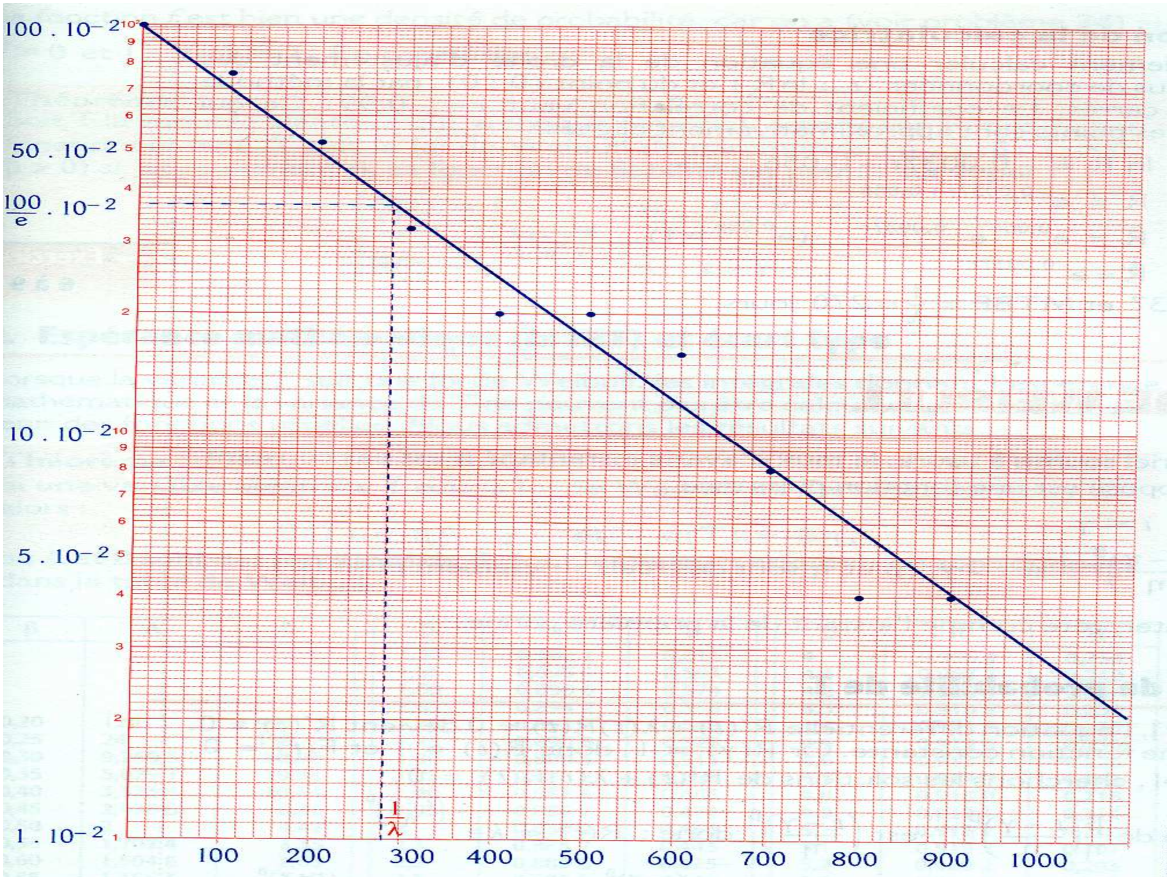
Portons les points de coordonnées marquées $(t_i;\ R_i)$ sur le papier semi-logarithmique; deux modules suffisent, car la plus grande valeur prise par a est 100. Le nuage de 10 points obtenu est presque rectiligne, ce qui autorise à estimer que T suit une loi exponentielle.

La droite D à tracer a pour équation Y = - λt . Elle passe donc par l'origine 0 du repère. Notons que les coordonnées de O sont $t = 0$, Y = 0. C'est donc le point marqué (0; $100.\ 10^{-2}$), car $\ln(100\ .\ 10^{-2}) = \ln(1) = 0$.

Construisons une droite passant au plus près des points du nuage de points et par O.

Pour $t = \dfrac{1}{\lambda}$, on obtient $Y = -\lambda.\frac{1}{\lambda} = -1$. Donc la $MTBF = \dfrac{1}{\lambda}$ est l'abscisse du point D dont l'ordonnée est marquée $\dfrac{100}{e}.10^{-2} \approx 36{,}8.10^{-2}$, car $\ln(\dfrac{100}{e}.10^{-2}) = -1$.

On obtient $\dfrac{1}{\lambda} \approx 280$, d'où $\lambda \approx 0{,}0036$.



Utilisation de la calculatrice

On peut également calculer une équation de la droite d'ajustement des 10 points de coordonnées (t_i ; $\ln R_i$) et du point (0 ; 0) , par la méthode des moindres carrés. On vérifie que le coefficient de corrélation est $r = -0{,}99$. Ce qui confirme que les points sont presque alignés.

$$\ln R = -0{,}0037t + 0{,}056$$

On trouve : $R = e^{-0{,}0037t+0{,}56}$ $\qquad R = e^{-0{,}0037t} \times e^{0{,}056}$ or $e^{0{,}056} \approx 1$

Donc $R = e^{-0{,}0037t}$, donc $\lambda = 0{,}0037$ et $MTBF = \dfrac{1}{\lambda} = 270$ jours.

III Loi de Weibull (mathématicien suédois)

Weibull a choisi une loi sous forme de puissance avec 3 paramètres qui permettent d'obtenir les diverses situations : décroissante, constante et croissante.

Définition : On dit que la variable aléatoire T suit la loi de **Weibull** lorsque son taux d'avarie est :

$\lambda(t) = \dfrac{\beta}{\eta}\left(\dfrac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$ pour $t > \gamma$; β, γ, η sont des constantes avec $\beta > 0$; $\eta > 0$;

γ est le paramètre de repérage qui fixe l'instant à partir duquel on étudie la fiabilité.

Si $\gamma = 0$: on étudie la fiabilité dès la première utilisation de la machine.

Si $\gamma > 0$: on étudie la fiabilité un certain temps après la première utilisation de l'appareil.

Conséquences :

On retrouve, pour tout $t > \gamma$

Fonction de fiabilité: $R(t) = \exp\left[-\left(\dfrac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]$

Fonction de défaillance: $F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\dfrac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]$

Densité de probabilité: $f(t) = \dfrac{\beta}{\eta}\left(\dfrac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\dfrac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]$ car $F'(t) = f(t)$.

On retrouve la MTBF et l'écart type à l'aide de tables (voir formulaire)

MTBF : $A\eta + \gamma$ et $\sigma = B\eta$

L'utilisation du papier imaginé par Weibull pour représenter *F(t)* permet de déceler une loi de Weibull. Les points de coordonnées (t_i ; $F(t_i)$) sont alignés lorsque $\gamma = 0$. on retrouve alors graphiquement les valeurs de β et de η

Exercice (BTS maintenance)

On étudie la durée de vie d'un certain type de composants électriques fabriqués par une usine.

On désigne par T la variable aléatoire qui, à chaque composant , prélevé au hasard dans la population, associe sa durée de vie exprimée en mois.

Après une étude statistique, on admet que T suit la loi de Weibull de paramètres :

$\gamma = 0, \quad \beta = 2{,}4 \quad \eta = 50$

Déterminer MTBF = E(t) et $\sigma(T)$.

Déterminer graphiquement les paramètre de la loi de Weibull :

Exemple

Les durées de vie de 9 appareils sont les suivantes :
152 ; 245 ; 310 ; 405 ; 500 ; 570 ; 660 ; 785 ; 910 (en heures)

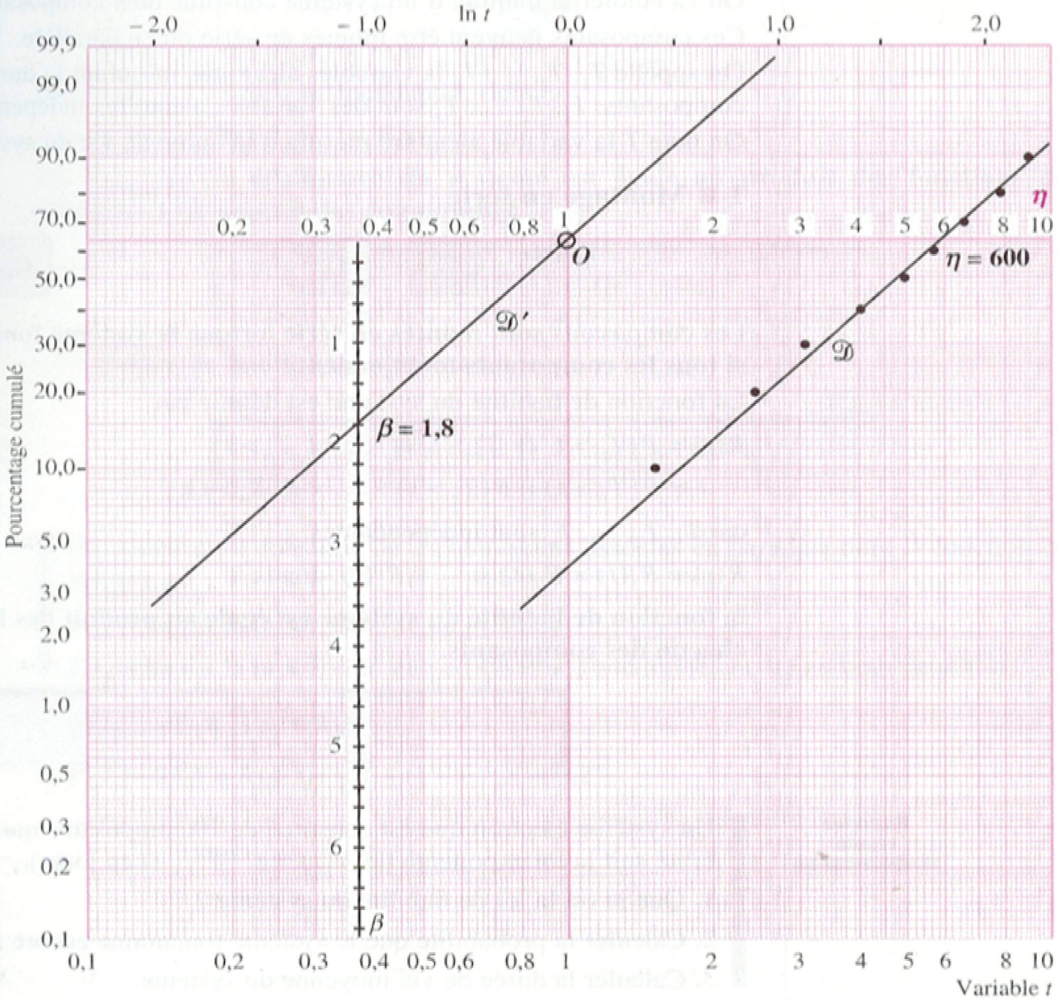
• Préparation des données.
On va présenter dans un tableau les valeurs de $F(t)$:

Nombre de défaillances	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T.B.F. (t)	152	245	310	405	500	570	660	785	910
$F(t)=\dfrac{n_i}{N+1}$ en %	10	20	30	40	50	60	70	80	90

• On place sur le papier de Weibull les points de coordonnées (t, $F(t)$).
On constate que le nuage de points est rectiligne, on peut estimer que la fiabilité suit une loi de Weibull de paramètre $\gamma = 0$.

• Détermination des paramètres β et η.
On trace la droite d'ajustement $\mathcal{D}$ du nuage. $\mathcal{D}$ coupe l'axe horizontal (noté η sur la feuille) au point d'abscisse 600 donc $\eta = 600$.
On trace la droite $\mathcal{D}'$, parallèle à $\mathcal{D}$ et passant par O. $\mathcal{D}'$ coupe l'axe vertical $X = -1$ (noté β sur la feuille) au point d'ordonnée 1,8 donc $\beta = 1{,}8$.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{600}\right)^{1{,}8}\right].$$



IV) Fiabilité d'un système en fonction de ses composants

IV.1 Constituants en série

Tous les constituants sont nécessaires au bon fonctionnement du système.

Pour que le système fonctionne il faut que tous les constituants fonctionnent.

La durée de vie T du système est donc définie par la relation :

$R(t) = \text{Prob}(T > t) = \text{Prob}\{T_1 > t \text{ et } T_2 > t \text{ et} \ldots \text{et } T_n > t\}$
$= \text{Prob}\{(T_1 > t) \cap (T_2 > t) \cap \ldots \cap (T_n > t)\}$

Si les systèmes sont indépendants alors :

$R(t) = \text{Prob}(T_1 > t) \,.\, \text{Prob}(T_2 > t) \ldots \text{Prob}(T_n > t)$

IV.2 Constituants en parallèles

Le système ne sera défaillant que si tous les constituants sont défaillants.

La durée de vie T du système est donc définie par la relation :

$F(t) = \text{Prob}(T \leq t) = \text{Prob}\{T_1 \leq t \text{ et } T_2 \leq t \text{ et} \ldots \text{et } T_n \leq t\}$
$= \text{Prob}\{(T_1 \leq t) \cap (T_2 \leq t) \cap \ldots \cap (T_n \leq t)\}$

EXERCICES

Exercice 1 (corrigé)

Taux de défaillance (ou taux d'avarie)

t_i	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000
nombre d'éléments	13	9	6	4	2	1	0

Entre t_3 et t_4, le nombre d'avaries est $N_3 - N_4 = 2$.

Le taux d'avarie entre t_3 et t_4 est $\dfrac{N_3 - N_4}{N_3} = \dfrac{2}{6} = \dfrac{1}{3}$

Entre t_4 et t_5, le nombre d'avaries est $N_4 - N_5 = 2$.

Le taux d'avarie entre t_4 et t_5 est $\dfrac{N_4 - N_5}{N_4} = \dfrac{1}{2}$

Taux moyen d'avaries par unité de temps:

$t_4 - t_3 = 500$: Le taux d'avarie étant de 33,3%, le taux moyen sera $\dfrac{33{,}3\%}{500} \approx 0{,}07\%$

$t_5 - t_4 = 500$: Le taux moyen sera $\dfrac{50\%}{500} = 0{,}1\%$

Exercice 2 (BTS maintenance)

L'équipe maintenance a relevé durant une année les temps de fonctionnement, en heures, entre deux réglages consécutifs d'une des machines de conditionnement, des bouteilles et a obtenu les temps de bon fonctionnement, rangés par ordre croissant :**30 ; 50 ; 90 ; 130 ; 170 ; 230 ; 300 ; 410 ; 580.**

1) A l'aide de la méthode des rangs moyens, compléter le tableau suivant :

TBF t_i	**30**	**50**	**90**	**130**	**170**	**230**	**300**	**410**	**580**
$F(t_i)$									
$R(t_i)$									
$Yi=\ln R(t_i)$									

2) Déterminer le taux d'avarie moyen entre $300^{\text{ième}}$ et la $410^{\text{ième}}$ heure.

Exercice 3 (BTS maintenance)

Des pièces métalliques de forme parallélépipédique sont fabriquées par des machines pour lesquelles l'étude des temps de bon fonctionnement, exprimés en mois , conduit à la fonction de fiabilité R telle que :

$R(t) = (0,05t+1)e^{-0.1t}$.

1) Calculer R'(t). Etablir le tableau de variation de R sur l'intervalle $[0;+\infty[$
2) Calculer à 10^{-2} près :
   a) La probabilité qu'une machine fonctionne plus de 10 mois.
   b) La probabilité qu'une machine tombe en panne au cours de la 1ère année.
3) Sachant que la MTBF est donnée par la formule :

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t)dt = \lim_{\alpha \to +\infty} \int_0^{\alpha} R(t)dt$$

Calculer à l'aide d'une intégration par parties $I_\alpha = \int_0^{\alpha} R(t)dt$.

En déduire la MTBF. (On rappelle que $\lim_{\alpha \to +\infty} \alpha e^{-0,1\alpha} = 0$)

Exercice 4 (BTS maintenance)

L'usine « Mécanix » est spécialisée dans la fabrication de pièces métalliques.

Les durées de vie , en jours , de 9 pièces utilisées dans des conditions semblables ont donné les résultats suivants :

53 ; 112 ; 178 ; 255 ; 347 ; 458 ; 600 ; 805 ; 1151 jours.

1) A l'aide de la méthode des rangs moyens, compléter le tableau suivant :

TBF t_i									
$F(t_i)$									
$R(t_i)$									
$Yi=\ln R(t_i)$									

2) **a)** Tracer le nuage de points M(ti ; R(ti)) sur du papier semi-logarithmique. En déduire que la variable aléatoire mesurant la durée de vie des pièces suit une loi exponentielle. Déterminer graphiquement la MTBF.
   b) En déduire les paramètres de cette loi**,** ainsi que l'expression de R(t).
3) **a)** A l'aide de la calculatrice, déterminer le coefficient de corrélation entre y et t puis une équation y = at + b ; de la droite d'ajustement.
   b) En déduire l'expression de R(t) en remplaçant a et b par leurs valeurs respectives arrondies à 10^{-3} près.
4) Déterminer graphiquement et par le calcul l'instant t_0 où la fiabilité d'une pièce est 75 %.

Exercice 5 (BTS maintenance)

Une usine fabrique des engrenages. Le service de maintenance a relevé leurs durées de vie en usure accélérée. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Durée de vie en heures	250	350	400	510	550	600	750	800
$F(t_i)$ en pourcentage	3	11	18	40	50	63	91	96

$F(t_i)$ est le pourcentage d'engrenages hors service à la date t_i.

1) **A** l'aide du papier de Weibull justifier que la variable aléatoire qui prend pour valeurs la durée de vie des engrenages peut être ajustée par une loi de Weibull. Déterminer les paramètre de cette loi.
2) Calculer la MTBF et l'écart type de cette loi de Weibull.
3) Déterminer graphiquement, puis par les calculs, le temps au bout duquel 30% des engrenages sont défaillants.
4) Une transmission mécanique comporte une série de trois engrenages identiques dont les durées de vie suivent la loi précédente et fonctionnent de façons identiques.

Quelle est la probabilité que la durée de vie d'un tel système soit au moins de 300 heures ?

Exercice 6 (BTS)

Sur 24 appareils observés pendant une année, on relève les nombres de jours de bon fonctionnement suivants : 101 ; 144 ; 179 ; 209 ; 236 ;262 ; 287 ; 310 ; 334 ; 357. Les autres appareils continuant à fonctionner normalement à l'issue de cette année :

1) En utilisant la méthode des rangs moyens, compléter le tableau suivant :

TBF t_i									
$F(t_i)$									

2) Déterminer à l'aide du papier de Weibull les paramètres de la loi de Weibull ajustant cette distribution.

3) Calculer la durée moyenne des temps de bon fonctionnement pour une défaillance admise de 80%.

4) Déterminer graphiquement et par les calculs la probabilité qu'un appareil fonctionne plus de 300 jours sans défaillance.

Exercice 7 (BTS)

On a relevé durant une période de 500 heures la durée de vie de 19 éléments identiques et on a le tableau suivant :

Durée de vie	[0;100]	]100,200]	]200,300]	]300,400]	]400,500]
Nombre d'éléments défaillant	4	4	3	2	1

Les autres éléments continuant à fonctionner au bout de ces 500 heures.

1) A l'aide de la méthode des rangs moyens, compléter le tableau suivant :

TBF t_i					
$F(t_i)$					
$R(t_i)$					
$Yi=\ln R(t_i)$					

2) a) Tracer le nuage de points M(ti ; R(ti)) sur du papier semi-logarithmique. En déduire que la variable aléatoire mesurant la durée de vie des éléments suit une loi exponentielle. Déterminer graphiquement la MTBF.

b) En déduire les paramètre de cette loi**,** ainsi que l'expression de R(t).

3)a) A l'aide de la calculatrice, déterminer le coefficient de corrélation entre y et t puis une équation y = at + b ; de la droite d'ajustement.

b) En déduire l'expression de R(t) en remplaçant a par sa valeur arrondie à 10^{-4} près et en remplaçant e^b par sa valeur approchée à 0,01 près par excès.

4) Déterminer graphiquement et par le calcul l'instant t_0 où la fiabilité d'une pièce est 50 %.

Exemple

Les durées de vie de 9 appareils sont les suivantes :
152 ; 245 ; 310 ; 405 ; 500 ; 570 ; 660 ; 785 ; 910 (en heures)

• Préparation des données.

On va présenter dans un tableau les valeurs de $F(t)$:

Nombre de défaillances	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
T.B.F. (t)	**152**	**245**	**310**	**405**	**500**	**570**	**660**	**785**	**910**
$F(t) = \frac{n_i}{N+1}$ **en %**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**

• On place sur le papier de Weibull les points de coordonnées $(t, F(t))$.

On constate que le nuage de points est rectiligne, on peut estimer que la fiabilité suit une loi de Weibull de paramètre $\gamma = 0$.

• Détermination des paramètres β et η.

On trace la droite d'ajustement $\mathcal{D}$ du nuage. $\mathcal{D}$ coupe l'axe horizontal (noté η sur la feuille) au point d'abscisse 600 donc $\eta = 600$.

On trace la droite $\mathcal{D}'$, parallèle à $\mathcal{D}$ et passant par O. $\mathcal{D}'$ coupe l'axe vertical $X = -1$ (noté β sur la feuille) au point d'ordonnée 1,8 donc $\beta = 1{,}8$.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{600}\right)^{1,8}\right].$$