TP N° 63

Démontrer une fiabilité en opération

L'objet de ce TP est de traiter deux problématiques types de démonstration de fiabilité opérationnelle, l'une prévisionnelle avant exploitation et l'autre en ligne ou justificative après des opérations effectuées dans des conditions d'utilisation et d'environnement incertaines.

1 – Démonstration de fiabilité prévisionnelle en opération

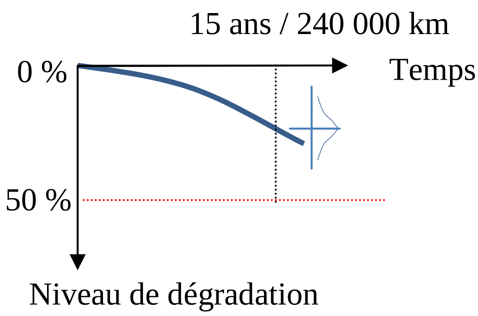
Un équipement automobile comprend une pièce d'usure qui entre dans une fonction de sécurité classée Sil B (risque < 10^{-4} sur 15 ans ou 240 000 km de roulage). Le fournisseur souhaite exploiter des essais d'endurance initialement prévus sur 3 pièces pour démontrer la tenue de l'exigence de sécurité sans avoir à effectuer des essais complémentaires relativement onéreux.

2 Justification de comportement après des opérations effectuées dans des conditions d'utilisation et d'environnement incertaines.

Un équipement militaire est utilisé sur des véhicules engagés dans des opérations extérieures (Opex) avec des conditions incertaines d'utilisation et d'environnement. Le fournisseur doit justifier une fiabilité opérationnelle, qui peut être inférieure à celle attendue par le client, pour éviter des pénalités ou perdre sa confiance.

1 – Démonstration de fiabilité prévisionnelle en opération

Le phénomène d'usure de la pièce concernée peut être modélisé par un processus gamma car la dégradation est supposée toujours croissante.



Entre deux observations consécutives t et t+h, l'évolution de la dégradation se caractérise par une loi d'accroissement Z(t+h) - Z(t) correspondant à une loi gamma de paramètres αh et β.

La dégradation évolue alors linéairement, en moyenne.

Si le processus de dégradation n'est pas linéaire en raison d'une surface d'usure évolutive ou d'une inhomogénéité interne du matériau utilisé, le modèle peut être rendu non stationnaire en remplaçant αh par m(t+h)-m(t), avec m(t) une fonction croissante telle que $p\ t^q$ (p et q > 0).

On considère ici que les essais d'endurances sont représentatifs des conditions opérationnelles, sur 15 ans ou 240 000 km de roulage, et sont identiques sur les 3 pièces. Dans le cas contraire le modèle peut être complexifié par différentes lois d'accélération pour prendre en compte la diversité des stress subis.

Le modèle peut alors être ajusté à partir de mesures de dégradation réalisées au cours des essais d'endurance puis être utilisé pour estimer le risque de dépassement d'un seuil de dégradation inacceptable (50% par exemple) en fin de vie opérationnelle.

A titre d'exemple, une mesure de dégradation de chacune des pièces est effectuée tous les mois durant les 6 mois prévus d'essais d'endurance. A partir des 18 mesures acquises, le modèle de dégradation peut être ajusté par la méthode du maximum de vraisemblance au moyen d'un outil d'optimisation globale afin de s'affranchir des optima multiples.

On vérifie cependant l'absence de fortes dispersions entre les mesures de dégradation issues des différentes pièces qui pourraient révéler une mauvaise maitrise de l'homogénéité de la production.

L'outil Gencab, utilisé pour traiter l'exemple ci-après, permet de calculer la matrice de variance covariance, par inversion de la matrice de Fisher, et d'estimer chacun des paramètres avec un intervalle de confiance.

La probabilité que le niveau de dégradation en fin de vie dépasse le seuil d'acceptabilité peut alors être estimée par simulation de Monte-Carlo, au moyen de l'outil Simcab comme indiqué ci-après (les paramètres p, q et Bêta étant pris ici à 60 % de confiance).

Dans le cas présent, le risque d'une usure supérieure à 50 % en fin de vie apparait nul, celui d'une usure supérieure à 20 % étant voisin de l'objectif à atteindre ($1{,}875\ 10^{-4}$)

Pièce d'usure

Processus Gamma non stationnaire

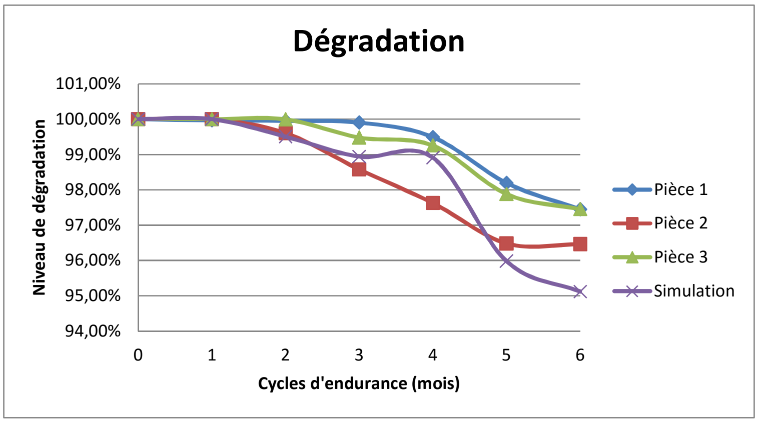
N° de cycle	Pièce 1	Pièce 2	Pièce 3	Simulation
0	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1	99,96%	100,00%	100,00%	100,00%
2	99,95%	99,61%	99,99%	99,51%
3	99,90%	98,58%	99,48%	98,94%
4	99,49%	97,62%	99,25%	98,91%
5	98,19%	96,48%	97,88%	95,98%
6	97,45%	96,46%	97,45%	**95,12%**

Densité de probabilité f(t)

167,9059	5,48E+10	6,22E+13
819,6519	38,59712	1311,648
277,7969	16,19381	47,20964
76,13779	29,37996	112,4098
24,45955	30,32011	21,98866
57,23682	38,11003	72,90428

Log vraisemblance Ln(f(t))

5,123404	24,72693	31,76086
6,70888	3,653178	7,179039
5,62689	2,784629	3,854598
4,332545	3,380313	4,722151
3,197021	3,411811	3,090527
4,047197	3,640478	4,289147



Ln Vraisemblance : 125,5296

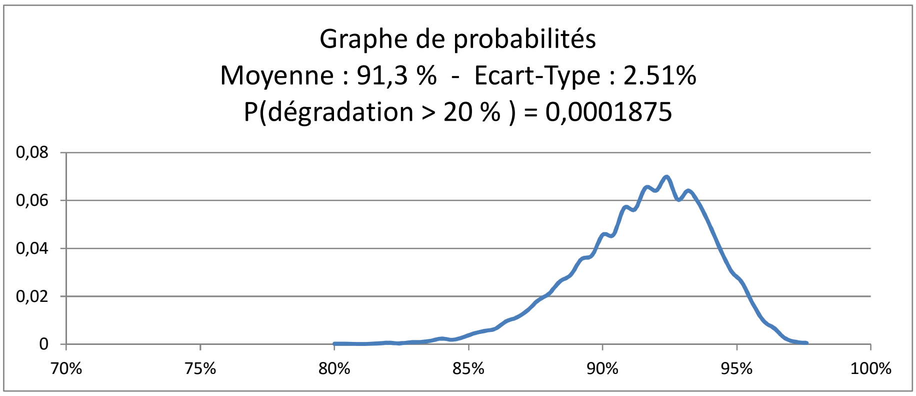
Niveau de confiance : 60%

		Min	Max
p :	0,077353	-0,028673	0,183379
q :	2,22803	2,217985	2,334056
β :	0,006873	0,006492	0,007254

Matrice de variance-covariance

2,10172	-0,125606	-0,005546
-0,125606	0,018867	2,35E-05
-0,005546	2,35E-05	2,71E-05

Cycle	Simulation
0	100,00%
1	99,96%
2	99,52%
3	99,41%
4	98,18%
5	96,46%
6	**95,24%**



Feuille de calcul Microsoft Excel

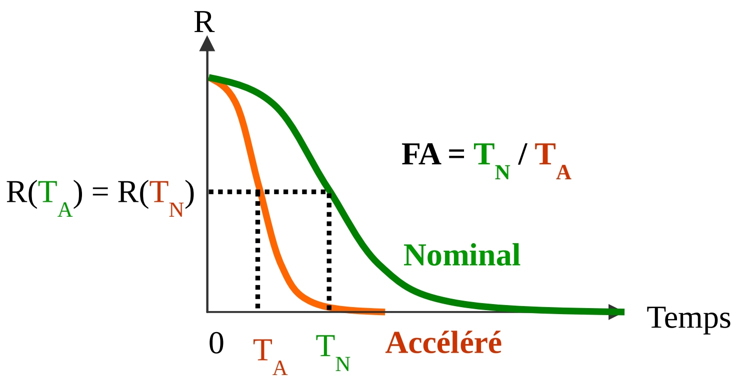
2 - Justifier a posteriori une fiabilité opérationnelle dans des conditions d'utilisation et d'environnement incertaines

Le fournisseur et son client ne peuvent s'accorder a posteriori sur des performances observées que si les conditions incertaines d'utilisation et d'environnement ont pu être enregistrées durant les opérations extérieures (Opex).

Ces conditions peuvent être de nature confidentielle mais les données à enregistrer n'ont pas besoin d'être détaillées et peuvent ne concerner que les dépassements éventuels des conditions de qualification du matériel (au-delà desquelles plus rien ne peut être garanti) et des niveaux de stress équivalents aux conditions de stress subies durant les Opex (en fait seuls des facteurs d'accélération devront être enregistrés).

Mais comment calculer les niveaux de stress équivalents à partir d'informations fournies par quelques capteurs, à implanter dans l'équipement ou sur le véhicule, relatives aux conditions dimensionnantes pour la fiabilité (température, vibration, choc, humidité, etc.) ?

Le Modèle Standard de Vie Accélérée (SVA) fait l'hypothèse de base qu'un niveau de stress n'affecte que le paramètre d'échelle d'une loi de fiabilité ou de dégradation.



Aussi est-il possible de définir un facteur d'accélération, multiplicateur du facteur d'échelle, qui est égal à un rapport de vitesse de dégradation calculée pour une valeur de stress donnée.

Des lois d'accélération définissent cette vitesse de dégradation pour les différents types de stress.

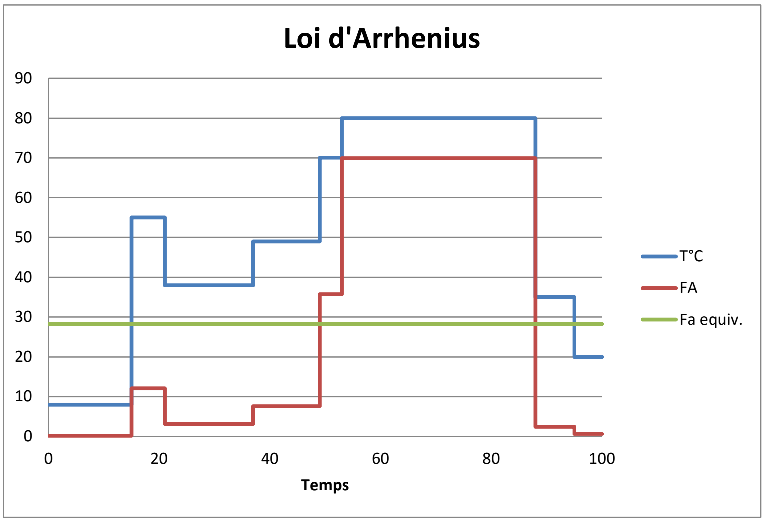
- Loi de d'Arrhenius (thermique) : $V(T) = \exp(Ea/KT)$
- Loi de Norris Landzberg (cyclage thermique) : $V(T, \Delta T) = \exp(Ea/KT)\,(a/\Delta T)^m$
- Loi de Peck (humidité) : $V(RH) = \exp(Ea/KT)\,(aRH)^n$
- Loi de Basquin (vibration) : $V(Grms) = (a/Grms)^t$
- Loi d'Eyring (thermoélectrique) : $V(T, V) = \exp(Ea/KT)\,(cV)^p$

Un facteur d'accélération équivalente à ceux engendrés par des niveaux variables de stress peut se calculer par intégration comme dans l'exemple présenté ci-dessous.

Facteur d'accélération équivalent

T Ref :	25	°C
Ea :	0,7	eV
k :	0,00008617	Kelvin/eV

T	T°C	FA	∫
0	8	0,19220729	2,88310935
15	55	12,1010438	75,4893723
21	38	3,12515877	125,491913
37	49	7,62780752	217,025603
49	70	35,7440368	360,00175
53	80	69,9168818	2807,09261
88	35	2,4231409	2824,0546
95	20	0,62801732	2827,19469
100			28,2719469



Stress équivalent

La durée de fonctionnement en Opex dans des conditions nominales spécifiées contractuellement peut être alors aisément convertie en durée équivalente par multiplication des différents facteurs d'accélérations. Soit un facteur égal à 28 pour la seule température dans notre exemple si la température nominale spécifiée est de 25°C.

Le MTBF prévisionnel de l'équipement peut être alors comparé à la durée de fonctionnement équivalente à celle de l'Opex. Cette dernière peut être sensiblement plus longue que la durée calendaire si le matériel est très sollicité dans des conditions extrêmes.

Exploitée en ligne, cette durée équivalent en Opex donne également à l'utilisateur une information continue sur le potentiel restant de son matériel.

Chaque loi d'accélération a cependant un paramètre (énergie d'activation Ea pour la loi d'Arrhenius) qui est propre à l'équipement concerné ou à ses composants. Il est cependant possible de passer d'un facteur d'accélération équivalent enregistré pour une valeur du paramètre, au facteur d'accélération équivalent d'un équipement pour lequel la valeur du paramètre est différente.

Celui-ci peut être déterminé par essais ou par exploitation d'un retour d'expérience hétérogène acquis dans des conditions variées en ajustant un modèle probabiliste associant des modèles d'accélération et un modèle de fiabilité ou de dégradation comme dans l'exemple ci-après traité par l'outil Gencab.

Ajustement

Maximum de vraisemblance

Accélération : BASQUIN

p : 1,26822618

Loi de probabilité : WEIBULL (2 paramètres)

Bêta : 1,39951715

Sigma : 3953,67494

LN Vraisemblance

-126,12889

Non censurées

LN K (non censurées)

-125,954532

Variable	**Réf :**	**Covariables** Vibration (grms) 2	**Facteur d'accélération**	**AF * ti**	**Taux : λ(ti)**	**R(ti) = 1-F(ti)**	**Densité : f(ti)**	**Ln(f(ti))**
663,34		6,4	4,37164036	2899,88392	0,00136722	0,52307413	0,00071516	-7,24300754
6962,68		1,37	0,61889715	4309,18279	0,00022674	0,32365947	7,3388E-05	-9,51975349
1087,05		5,34	3,47466346	3777,13292	0,00120771	0,39138234	0,00047268	-7,65709628
258,72		8,1	5,89373172	1524,82627	0,00142579	0,76829872	0,00109543	-6,81660678
3351,61		2,29	1,18734973	3979,53323	0,00042139	0,36452315	0,00015361	-8,78111057
4178,71		1,18	0,51213979	2140,08368	0,00014186	0,654702	9,2877E-05	-9,28423012
379,31		6,38	4,35432191	1651,63784	0,00108754	0,74471338	0,00080991	-7,11859024
456,92		5,81	3,86699896	1766,90917	0,00099221	0,72329208	0,00071766	-7,23951351
231,49		4,75	2,99520416	693,35981	0,00052887	0,91623774	0,00048457	-7,63224064
2930,44		5,74	3,80800762	11159,1378	0,00204037	0,01394936	2,8462E-05	-10,466945
1554,66		6,8	4,72101604	7339,5748	0,00213969	0,09283931	0,00019865	-8,52397912
974,64		8,22	6,00468554	5852,40671	0,0024861	0,17704535	0,00044015	-7,72838916
53,3		9,88	7,58232993	404,138185	0,00107912	0,95973525	0,00103567	-6,87270716
244,63		9,3	7,02233119	1717,87288	0,00178168	0,73239865	0,0013049	-6,64162957
354,11		8,33	6,10677574	2162,47036	0,00169862	0,65064629	0,0011052	-6,80773005
940,83		7,93	5,73730156	5397,82542	0,00229989	0,21307572	0,00049005	-7,62100226

Censurées à droite

LN K (à droite)

-0,1743589

Variable	**Réf :**	**Covariables** Vibration 2	**Facteur d'accélération**	**Variable**	**R(ti) = 1-F(ti)**	**Ln(R(ti))**
185,41		5,88	3,92618126	727,953267	0,91060326	-0,09364798
1365,6		1,12	0,47934198	654,589405	0,92246031	-0,08071093

Taux de confiance : 60%

		Min	Max
Bêta :	1,39951715	1,17959007	1,61944424
Sigma :	3953,67494	2761,43268	5145,91721
p :	1,26822618	0,99596822	1,54048413

Matrice de Fisher :	16,3816495	-0,00170833	8,19647535
	-0,00170833	2,0048E-06	-0,00767615
	8,19647535	-0,00767615	39,1302137

Matrice de variance-covariance :	0,0682848	13,7437402	-0,01160729
	13,7437402	2006761,03	390,78599
	-0,01160729	390,78599	0,10464724

Ajustement