



## TP N° 71

# Mise en œuvre et optimisation d'une campagne d'essais accélérés de fiabilité

*Ce TP s'inspire de l'ouvrage « Sûreté de Fonctionnement & optimisation des systèmes » de la collection « La fiabilité en pratique ». Il est disponible au format Word avec les fichiers Excel incrustés sur le site : [cabinnovation.com/shop](http://cabinnovation.com/shop).*

L'objet de ce TP est de réduire les coûts d'une campagne d'essais accélérés de fiabilité d'équipements électroniques que l'on suppose a priori non soumis à usure.

-

**1 – Présenter succinctement les essais accélérés et leur mise en œuvre**

**2 – Proposer une stratégie de réduction des coûts des essais**

## 1 – Les essais accélérés

Le stress supporté par un produit accélère l'apparition des défaillances. Son niveau dépend des conditions opérationnelles (solicitations) et environnementales (température, humidité, cyclage thermique, vibration, etc.).

Le stress subi en opération (profil de vie) doit donc être pris en compte dans les évaluations de fiabilité et nécessite d'associer des modèles d'accélération aux modèles de fiabilité.

Ce couplage de modèles est également utilisé pour réduire la durée des essais de caractérisation de la fiabilité des produits.

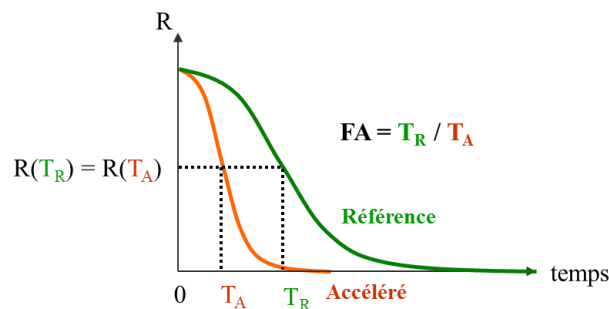
Ces essais de fiabilité accélérés doivent révéler les mêmes phénomènes de dégradation en conditions accélérées et nominales.

Ils diffèrent :

- des essais aggravés ou essais aux limites hautement accélérés (HALT), menés hors du domaine de qualification des produits pour évaluer leur robustesse et identifier d'éventuelles faiblesses de conception,
- des essais sous contrainte hautement accélérés (HAST), menés dans l'industrie électronique comme essais de qualification,
- des essais de déverminage sous contraintes hautement accélérés (HASS), menés pour éliminer les pannes de jeunesse,
- des essais d'endurance menés pour démontrer la capacité d'un produit à assurer sa mission sans chercher cependant à évaluer une probabilité de réussite.

### 1.1 – Fondement théorique

Les modèles d'accélération les plus courants sont fondés sur le Modèle Standard de Vie Accélérée (SVA) qui fait l'hypothèse que seul le paramètre d'échelle de loi de fiabilité est modifié par le stress et que la forme de la distribution des défaillances n'est pas changée, comme l'illustre la figure ci-dessous.



Un facteur d'accélération FA peut être alors défini comme le rapport des vitesses de dégradation en conditions accélérées et de référence.

$$FA = T_R / T_A = V_A / V_R$$

Ce facteur, qui dépend uniquement de la valeur du stress, permet de passer d'une fiabilité en conditions accélérées à celle en conditions de référence et inversement.

$$R_A(t) = R_R(FA * t)$$

Il permet également de passer d'un taux de défaillance en conditions accélérées à celui en conditions de référence, et donc de faire de même pour la densité de probabilité  $f(t) = R(t) * \lambda(t)$ .

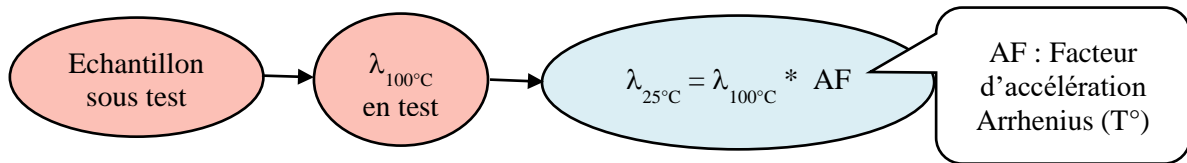
$$\lambda_A(t) = FA * \lambda_R(t) \quad f_A(t) = FA * f_R(FA * t)$$

Les lois d'accélération de type SVA les plus utilisées sont les suivantes :

- Arrhenius (température) :  $V(T) = \exp(Ea/KT)$
- Norris Landzberg (cyclage thermique) :  $V(T, \Delta T) = \exp(Ea/KT) (a/\Delta T)^m$   
ou :  $V(T, \Delta T, V_{MT}) = \exp(Ea/KT) (a/\Delta T)^m (b/V_{MT})^p$
- Peck (humidité) :  $V(RH) = \exp(Ea/KT) (aRH)^n$
- Basquin (vibration) :  $V(Grms) = (a/Grms)^l$
- Eyring (thermoélectrique) :  $V(T, V) = \exp(Ea/KT) (cV)^p$

Toutes ces lois d'accélération ont un paramètre, inconnu a priori, qui dépend du comportement sous contrainte (énergie d'activation Ea de la loi d'Arrhenius par exemple).

A titre d'exemple, la figure suivante montre comment est estimé un taux de défaillance en condition nominale à 25 °C à partir des résultats d'un test accéléré en température à 100°C.



$AF = \exp [Ea/K * (1/T1 - 1/T2)]$  : Facteur d'accélération en température (loi d'Arrhenius)

Ea = Energie d'activation (0,3 à 1,2 eV – 0,7 à défaut de donnée constructeur)

K = Constante de Boltzmann (8,617 10<sup>-5</sup> eV/Kelvin)

T = température en °K (273 + T°C) T1 = 273 + 100 T2 = 273 + 25

Ainsi, le taux de défaillance d'un équipement estimé à 10<sup>-3</sup> hr<sup>-1</sup> (1000 hr) en essais accélérés à 100°C sera estimé à 4,16 10<sup>-6</sup> hr<sup>-1</sup> (240 000 hr) à 25 °C.

Le facteur d'accélération peut faire l'objet d'une intégration et d'un calcul en valeur moyenne pour prendre en compte la variabilité des conditions de stress (principe de Sedyakin).

$$Fa(S_{Equivalent}) = \frac{1}{t} \int_0^t Fa(S(u)) du$$

L'application simultanée de différents types de stress conduit à un facteur d'accélération multiplicatif.

$$Fa = \prod_1^k Fai \quad \text{avec k le nombre de différents types de stress appliqués}$$

Chaque mode de défaillance résultant d'un mécanisme de défaillance a son propre facteur d'accélération et la fiabilité d'un composant ayant plusieurs modes de défaillance ou d'un

équipement regroupant de nombreux composants est le produit des fiabilités pour chacun de ces modes (hors redondances internes).

$$R(t) = \prod_1^n R_i(t) \quad \text{avec } n \text{ le nombre de différents modes de défaillance}$$

La fiabilité d'un équipement dépend principalement de ses modes de défaillance prépondérants.

Aussi, le facteur d'accélération global d'un essai peut s'exprimer à partir de la fiabilité et des facteurs d'accélération des modes de défaillance prépondérants.

$$R_A(t) = R_R(FA * t) = \prod_1^p R_{iR}(FA_i * t)$$

soit  $FA = \frac{1}{\lambda_0} \sum_1^p \lambda_i FA_i$  dans le cas de la loi exponentielle (en absence d'usure).

## 1.2 – Mise en œuvre

Les diverses normes sur les essais accélérés (EN 62506 par exemple) ne donnent pas des recommandations précises sur la mise en œuvre pratique des essais telle que le choix du nombre de pièces à tester, des types et conditions de stress à appliquer ou de la valeur des paramètres des lois d'accélération à considérer.

Une connaissance approfondie des mécanismes de défaillance potentiels du produit et de son profil de vie (contraintes opérationnelles et environnement) est nécessaire avant de mettre en œuvre des essais accélérés.

Tout d'abord, il importe que les stress appliqués en essais soient représentatifs de la vie opérationnelle. Certaines marges peuvent être prises pour renforcer les démonstrations de fiabilité (ajout de 50 % du nombre de cycles thermiques par exemple).

Les modes de défaillance prépondérants d'un équipement électronique, comportant des circuits intégrés, des boîtiers et de la connectique, peuvent être ainsi accélérés par la température, l'humidité, le cyclage thermique, les vibrations ou la présence de sels (air marin).

Une hypothèse largement utilisée dans l'industrie considère que le taux de défaillance de l'équipement est affecté dans sa globalité par l'ensemble des stress appliqués. Mais, celle-ci se révèle optimiste car elle surestime le facteur d'accélération. De même le choix des paramètres des lois d'accélération doit être conservatif en l'absence d'une connaissance précise de leur valeur ( $E_a = 0,5$  pour la loi d'Arrhenius par exemple).

L'application simultanée des différents stress en essai est préférable car elle permet de prendre en compte d'éventuelles interactions mais complexifie et renchérit par là-même les moyens utilisés.

Un nombre minimum de 15 équipements en test est préconisé dans le domaine spatial pour lequel les matériels sont particulièrement onéreux. Un minimum de 30 équipements permet de calculer des intervalles de confiance asymptotiques dans de bonnes conditions statistiques, durant l'exploitation des résultats.

En l'absence de phénomène d'usure, la fiabilité ne dépend que de la durée cumulée des essais et du nombre de pannes observées, dans des conditions de stress données. Un compromis peut être alors recherché entre le nombre d'équipements et la durée des tests.

L'expertise de chacun des équipements tombant en panne au cours des tests permet de valider la liste des modes de défaillance prépondérants et de mieux caractériser ces derniers.

L'application des stress variables durant les essais permet d'estimer les paramètres des lois d'accélération et de fiabilité à partir des résultats.

## 2 – Optimisation d'une campagne d'essais

Le coût global d'une campagne d'essais accélérés recouvre le prix des équipements soumis à essai plus le coût de réalisation des essais en fonction de leur durée et de la complexité des moyens mis en œuvre.

L'optimisation des essais porte, tout d'abord, sur leur dimensionnement préliminaire puis sur leur mise en œuvre effective à travers une stratégie efficiente de test.

### 2.1 – Dimensionnement préliminaire

Un tel dimensionnement est proposé, ci-dessous, concernant un équipement électronique non sujet à usure et non soumis à des vibrations.

**Conditions d'essais : 80°C, 90% d'humidité, cycles de 0 à 80°C avec élévation de 4 °C/mn (2° en opération)**

Durée de mission :	10	années	Arrhenius	Ea:	0,5	eV	Peck	n:	2	Norris Landzberg	Ea/k:	1414	Kelv
Nb cycles thermiques :	3911	5/semaine + 50%		k:	8,62E-05	eV/Kelvin		Hr:	60%		m:	2	
Durée de test:	5	mois		Tr:	15	°C		Ha:	90%		p:	0,33	
Nb cycles en test :	304	2/jour		Ta:	80	°C		Fa:	91,91		Tmaxr:	70	°C
$\lambda_p$ (proportion) :	40%			Fa:	40,85						TmaxA:	80	°C
$\lambda_c$ :	60%										ar:	2	°C/min
											aa:	4	°C/min
											DT r:	55	°C
											DT a:	80	°C
											Fa:	3,00	

Profil de vie (1 semaine)

Température: 15°C, 25°C, 70°C, 4h, 50°C

Humidité: 60%, 80%

FA: 18,91      FaT: 26,76      FaH: 58,65      FaC: 0,23

Nb équipements en test :	30	Durée cumulée	Niveau de confiance :	60%						
		(ans)	$\lambda$ (an <sup>-1</sup> )	R(8 ans)	R(9 ans)	R(10 ans)	R(11 ans)	R(12 ans)	R(13 ans)	R(14 ans)
Nb pannes :	0	236	0,003877	0,969	0,966	0,962	0,958	0,955	0,951	0,947
(équi-réparties)	1	232	0,008703	0,933	0,925	0,917	0,909	0,901	0,893	0,885
	2	228	0,013594	0,897	0,885	0,873	0,861	0,849	0,838	0,827
	3	225	0,018598	0,862	0,846	0,830	0,815	0,800	0,785	0,771
	4	221	0,023742	0,827	0,808	0,789	0,770	0,752	0,734	0,717
	5	217	0,029045	0,793	0,770	0,748	0,727	0,706	0,686	0,666
	6	213	0,034524	0,759	0,733	0,708	0,684	0,661	0,638	0,617
	7	209	0,040191	0,725	0,696	0,669	0,643	0,617	0,593	0,570
	8	205	0,046062	0,692	0,661	0,631	0,602	0,575	0,549	0,525
	9	201	0,052152	0,659	0,625	0,594	0,563	0,535	0,508	0,482
	10	197	0,058474	0,626	0,591	0,557	0,526	0,496	0,468	0,441
	11	193	0,065045	0,594	0,557	0,522	0,489	0,458	0,429	0,402
	12	189	0,071882	0,563	0,524	0,487	0,454	0,422	0,393	0,366
	13	185	0,079001	0,532	0,491	0,454	0,419	0,388	0,358	0,331
	14	181	0,086424	0,501	0,459	0,421	0,386	0,354	0,325	0,298
	15	177	0,09417	0,471	0,428	0,390	0,355	0,323	0,294	0,268
	16	173	0,102262	0,441	0,398	0,360	0,325	0,293	0,265	0,239
	17	169	0,110725	0,412	0,369	0,330	0,296	0,265	0,237	0,212
	18	165	0,119586	0,384	0,341	0,302	0,268	0,238	0,211	0,187
	19	161	0,128875	0,357	0,314	0,276	0,242	0,213	0,187	0,165
	20	158	0,138623	0,330	0,287	0,250	0,218	0,189	0,165	0,144
	21	154	0,148867	0,304	0,262	0,226	0,194	0,168	0,144	0,124
	22	150	0,159646	0,279	0,238	0,203	0,173	0,147	0,126	0,107
	23	146	0,171003	0,255	0,215	0,181	0,152	0,128	0,108	0,091
	24	142	0,182988	0,231	0,193	0,160	0,134	0,111	0,093	0,077
	25	138	0,195653	0,209	0,172	0,141	0,116	0,096	0,079	0,065



Feuille de calcul  
Microsoft Excel

L'équipement est principalement affecté par des pannes de puces de composant et de connexions électriques ( $\lambda = \lambda_p + \lambda_c$ ).

Les défaillances des puces (de taux de panne  $\lambda_p$ ) ne sont accélérées que par la température. Celles des connexions le sont par le cyclage thermique et l'humidité.

Le facteur d'accélération des défaillances des puces est celui d'Arrhenius et celui des connexions regroupe ceux de Norris Landzberg et de Peck.

Ces facteurs d'accélération font l'objet d'une intégration pour prendre en compte le profil de vie de l'équipement en opération ( principe de Sedyakin).

L'accélération liée au cyclage thermique se décompose en un rapport du nombre de cycles en mission (+ 50% de marge) sur celui en essais et une accélération résiduelle.

La fiabilité de l'équipement est alors calculée selon la durée d'essais, le nombre d'équipements en test et le nombre de pannes observées (supposée équi-réparties durant les essais).

## 2.2 – Stratégie optimale de mise en œuvre

La durée des essais est d'autant plus courte (ou l'estimation précise) que ceux-ci sont réalisés dans des conditions de stress maximales à l'intérieur du domaine de qualification de l'équipement.

Il est donc préférable de mener les essais dans ces conditions tant qu'une certaine proportion d'équipements ne tombe pas en panne.

Il est alors possible de réduire progressivement les stress appliqués en fonction de l'occurrence des défaillances, comme dans l'exemple ci-dessous.

Ajustement <i>Maximum de vraisemblance</i>												
Accélération : Arrhenius / Peck + Norris Landzberg					Loi de probabilité : Double exponentielle					LN Vraisemblance		
Ea :	0,93819									$\lambda_p :$ 0,04283	-24,1104365	
n :	1									$\lambda_c :$ 1E-06		
m :	1											
Non censurées										LN K (non censurées)		
											-21,90299257	
Covariables				Facteurs d'accélération				T(hr)				
T°C	H%	Tmax	°C/min	FaT	FaH	FaC	FaH x FaC	Pannes	Taux : $\lambda(t)$	R(ti) = 1-F(ti)	Densité : f(ti)	Ln(f(ti))
80	90	80	4	26,7641	58,6509	0,23301	13,6662	37	1,146251978	0,317825758	0,364308403	-1,009754508
80	90	80	4	26,7641	58,6509	0,23301	13,6662	99	1,146251978	0,317825758	0,364308403	-1,009754508
80	90	80	4	26,7641	58,6509	0,23301	13,6662	134	1,146251978	0,317825758	0,364308403	-1,009754508
80	90	80	4	26,7641	58,6509	0,23301	13,6662	189	1,146251978	0,317825758	0,364308403	-1,009754508
80	90	80	4	26,7641	58,6509	0,23301	13,6662	199	1,146251978	0,317825758	0,364308403	-1,009754508
80	90	80	4	26,7641	58,6509	0,23301	13,6662	212	1,146251978	0,317825758	0,364308403	-1,009754508
80	60	80	4	26,7641	56,7573	0,23301	13,2249	235	1,146251537	0,317825898	0,364308424	-1,009754445
80	60	80	4	26,7641	56,5528	0,23301	13,1773	238	1,146251489	0,317825913	0,364308426	-1,009754451
80	60	80	4	26,7641	52,4309	0,23301	12,2168	311	1,146250529	0,317826218	0,364308471	-1,009754323
80	60	80	4	26,7641	49,8084	0,23301	11,6058	387	1,146249918	0,317826413	0,364308499	-1,009754245
80	60	80	4	26,7641	48,6133	0,23301	11,3273	436	1,146249639	0,317826501	0,364308512	-1,009754209
60	60	60	4	23,4009	41,2651	0,21876	9,02707	512	1,002213775	0,36706594	0,367878541	-1,000002447
60	60	60	4	19,223	32,6327	0,20105	6,56095	655	0,823279028	0,438989832	0,361411122	-1,017739126
60	60	60	4	14,2586	23,0903	0,18002	4,15667	978	0,610662731	0,542990893	0,331584302	-1,103873199
60	60	60	4	13,3643	21,4539	0,17623	3,78081	1073	0,572364574	0,564189792	0,32292225	-1,130343698
60	60	60	4	13,016	20,8234	0,17475	3,63895	1116	0,557447492	0,572668942	0,319232865	-1,141834457
60	60	60	4	12,2713	19,4881	0,1716	3,34411	1218	0,525554379	0,591227509	0,310722206	-1,168855993
60	60	60	4	11,3271	17,82	0,1676	2,98657	1380	0,485112888	0,615627696	0,29848893	-1,208486544
40	60	40	4	8,36897	12,8862	0,14303	1,84314	1966	0,358423944	0,69877677	0,250458326	-1,384462736
40	60	40	4	5,80786	8,7744	0,12177	1,06842	3109	0,24873717	0,779784897	0,193961489	-1,640095652
Censurées à droite										LN K (à droite)		
												-2,207443929
T°C	H%	Tmax	°C/min	FaT	FaH	FaC	FaH x FaC	Censure	R(ti) = 1-F(ti)		Ln(R(ti))	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	
40	60	40	4	5,15424	7,74882	0,11634	0,90148	3650	0,801921631		-0,220744393	



Feuille de calcul  
Microsoft Excel

Un traitement global des données permet alors d'estimer les taux de défaillances et les paramètres des lois d'accélération (ajustement réalisé avec l'outil Gencab).

Cependant, l'estimation des 5 paramètres de cet exemple n'est pas satisfaisante car le taux de défaillance des connexions électriques est négligé avec les données considérées.

Elle peut être améliorée en augmentant le nombre de données (nombre d'équipements en test) ou en différenciant les défaillances des puces de composant et des connexions électriques par une expertise des équipements en panne (ajustement de deux exponentielles au lieu d'une double exponentielle).

Le traitement des données permet également d'identifier d'éventuels phénomènes d'usure et de les caractériser si nécessaire (lois exponentielles + loi de Weibull).