



# METHODE DE CALCUL DE LA FIABILITE PREVISIONNELLE ASSOCIANT PLANS D'EXPERIENCES ET JUGEMENTS D'EXPERTS

Maurice Pillet, Alain Courtois

## ► To cite this version:

Maurice Pillet, Alain Courtois. METHODE DE CALCUL DE LA FIABILITE PREVISIONNELLE ASSOCIANT PLANS D'EXPERIENCES ET JUGEMENTS D'EXPERTS. Qualita 97, 1997, Angers, France. 12 p., 1997. <hal-00974316>

**HAL Id: hal-00974316**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00974316>**

Submitted on 6 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# METHODE DE CALCUL DE LA FIABILITE PREVISIONNELLE ASSOCIANT PLANS D'EXPERIENCES ET JUGEMENTS D'EXPERTS

Sylvain ROCHON<sup>1</sup>, Maurice PILLET, Alain COURTOIS<sup>2</sup>

## RESUME

**L'objectif de cet article est de proposer une nouvelle démarche de calcul de la fiabilité prévisionnelle à partir d'une méthodologie de conception des produits, qui intègre au plus tôt la préoccupation de fiabilité. La fiabilité est obtenue à partir de résultats d'essais couplés aux jugements d'experts, au travers d'un plan d'expériences particulier (le Plan d'Expériences Flou Bayésien ou PEFB) ; celui-ci permet de combiner ces deux sources d'informations.**

## INTRODUCTION

La fiabilité des produits est un des éléments essentiels de la perception de la qualité des produits chez les clients. Trop souvent, la conception consiste à développer un produit sans se soucier, d'une manière formalisée, de sa fiabilité future. Les tests de fiabilité ne viennent que comme une validation finale du produit conçu. La fiabilité prévisionnelle peut être obtenue par plusieurs méthodes "classiques" dont la modélisation par des lois connues de fiabilité, les méthodes de fiabilité interactives, la démarche bayésienne et les méthodes d'analyse prévisionnelle.

Ces méthodes ont l'inconvénient de s'intégrer difficilement dans les méthodologies de conception des produits : la fiabilité est alors calculée en aval de la conception. Nous proposons une méthode de calcul de la fiabilité prévisionnelle s'intégrant au plus tôt dans l'étude de conception des produits [1][2]. Elle permet de calculer la fiabilité en fonction des paramètres d'environnement et d'utilisation des produits. Elle autorise aussi, par un choix judicieux des niveaux de ces paramètres d'environnement et d'utilisation, à définir des essais de fiabilité accélérés. Les paramètres d'environnement et d'utilisation (paramètres d'E&U) formalisent l'ensemble des conditions qui influent sur le fonctionnement du produit et en particulier sur sa fiabilité. La méthode proposée pour la détermination de la fiabilité prévisionnelle est basée sur l'utilisation de plans d'expériences qui peuvent être transformés en plans d'expériences particuliers, grâce à l'utilisation de données d'experts relatives aux phénomènes étudiés : ces plans sont transformés à l'aide de techniques issues de la logique floue et de techniques bayésiennes. Les nouveaux plans obtenus sont appelés Plans d'Expériences Flous Bayésiens (PEFB).

## 1. MODELISATION DE LA FIABILITE A PARTIR D'UN PEFB

---

<sup>1</sup>S. ROCHON dirige le département Recherche & Développement chez ITT CANNON Switch Products à Dole (Jura - France)

<sup>2</sup>M. PILLET et A. COURTOIS sont enseignants chercheurs au Laboratoire de Logiciels Pour La Productique au CESALP - ESIA (Annecy)

Notre objectif est d'évaluer et de modéliser l'influence respective des facteurs d'E&U sur la durée de vie du produit. Nous souhaitons en effet connaître les différences de durée de vie du produit en fonction des combinaisons des facteurs d'E&U. Ensuite, nous voulons obtenir un modèle de calcul de la fiabilité prévisionnelle en fonction des niveaux de ces facteurs. Pour cela, nous utilisons la technique des PEFB. Cette technique est développée dans le paragraphe suivant (§ 1.1.), puis reprise dans l'exemple d'application du paragraphe 2.

### 1. 1. L'intégration des jugements d'experts dans les plans d'expériences : les PEFB

[4][5]

L'outil que nous proposons permet de faire intervenir à la fois les jugements d'experts et les données d'essais dans la modélisation de la fiabilité des produits. L'une et l'autre approche s'enrichissent mutuellement pour aboutir à un résultat qui tient compte, d'une part des avis d'experts et d'autre part, des résultats expérimentaux. La méthode des plans d'expériences flous bayésiens (PEFB) utilise comme outils de base, d'une part, les plans d'expériences, et, d'autre part, les expertons issus de la logique floue. La combinaison de ces deux types d'informations s'effectue à partir de la formule de Bayes.

#### 1. 1. 1. Obtention d'un experton

Des experts qualifiés dans l'étude du phénomène considéré peuvent donner des valeurs ou grades relatifs à des propriétés notées  $L_i$ . Ces valeurs sont indiquées sous forme d'intervalle, comme dans l'exemple suivant [t1].

		EXPERTS									
PROP.		E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
$L_1$		7 9	6 9	5 10	6 10	5 9	6 10	5 9	6 9	6 10	7 10
$L_2$		2 6	5 5	3 6	4 6	3 6	4 5	2 5	4 6	2 5	4 6
$L_3$		4 6	5 5	4 5	5 5	5 6	4 5	5 5	4 5	5 6	4 6
$L_4$		2 3	3 3	3 4	3 3	3 3	3 3	2 3	2 4	2 4	3 3

Tableau [t1] : valeurs données par dix experts pour quatre propriétés  $L_1$  à  $L_4$

Ce tableau peut être transformé en un autre tableau indiquant les densités de probabilité des différentes distributions relatives aux propriétés  $L_1$  à  $L_4$ . En logique floue, ce nouveau tableau est appelé experton [t2].

		PROPRIETES			
Valeur		$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
0		0 0	0 0	0 0	0 0
1		0 0	0 0	0 0	0 0
2		0 0	0,3 0	0 0	0,4 0
3		0 0	0,2 0	0 0	0,6 0,7
4		0 0	0,4 0	0,5 0	0 0,3
5		0,3 0	0,1 0,4	0,5 0,6	0 0
6		0,5 0	0 0,6	0 0,4	0 0
7		0,2 0	0 0	0 0	0 0
8		0 0	0 0	0 0	0 0
9		0 0,5	0 0	0 0	0 0
10		0 0,5	0 0	0 0	0 0

## Tableau [t2] : experton relatif aux propriétés L<sub>1</sub> à L<sub>4</sub>

On peut faire subir à l'experton des opérations comme l'addition, la soustraction, la multiplication ainsi que la formule issue du théorème de Bayes.

### 1. 1. 2. Application du théorème de Bayes aux expertons

Le théorème de Bayes permet d'associer une loi de probabilité a priori avec une loi de probabilité expérimentale, afin d'obtenir une loi de probabilité a posteriori synthétisant les deux premières lois. Il permet donc de combiner l'information subjective et l'information objective (contenue dans un échantillon). Afin de généraliser les opérations applicables aux expertons, nous proposons une extension de la formule de Bayes qui combine un experton a priori exprimant des connaissances d'experts, avec un experton généralisé exprimant des résultats d'essais. L'experton des connaissances d'experts exprime des lois de probabilité a priori. Les lois de probabilité a posteriori sont présentées sous la forme d'un experton a posteriori [f1].

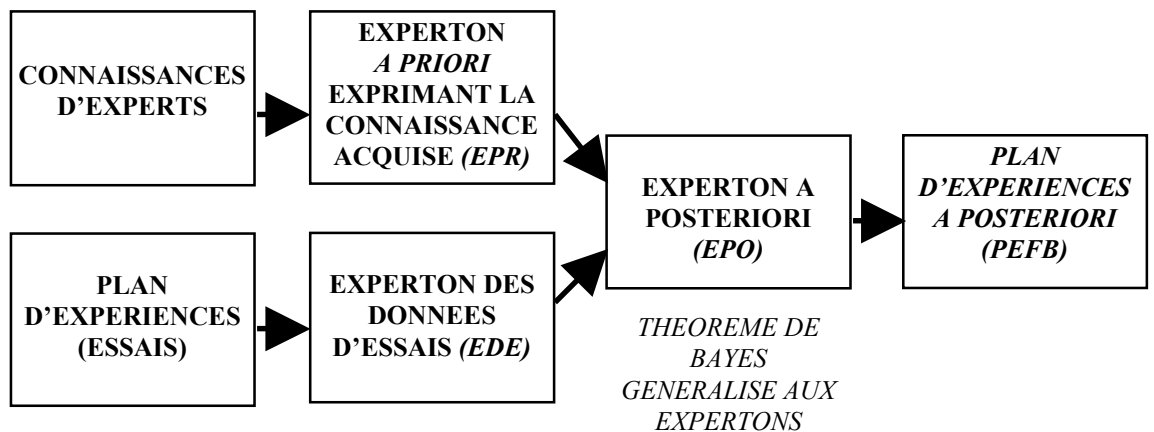


Figure [f1] : schéma de principe de la démarche des PEFB

### 1. 1. 3. Intérêt des PEFB

Le PEFB ainsi obtenu est ensuite traité de la même façon qu'un plan d'expériences, à la différence près qu'il contient une dimension floue, image de l'incertitude des experts. Nous verrons un exemple de PEFB dans le paragraphe 2.

L'utilisation des PEFB a un double avantage :

- elle permet d'associer données expérimentales brutes et jugements d'experts, représentant l'expérience acquise sur des produits similaires ou identiques ;
- elle ajoute une dimension *floue* au plan d'expériences classique. Cette dimension floue provient de l'incertitude des experts, plus ou moins grande selon les propriétés étudiées. La dimension floue est traitée comme un facteur bruit dans le PEFB.

Voyons maintenant comment modéliser la fiabilité prévisionnelle à l'aide d'un PEFB.

## 1. 2. Modélisation de la fiabilité prévisionnelle

L'approche de calcul de la fiabilité prévisionnelle va être la détermination d'un modèle propre de fiabilité issu du PEFB et non l'utilisation d'un modèle statistique. Le modèle du PEFB s'écrit symboliquement de la manière suivante :

$$Y = I + A + B + C + \dots + AB + BC + \dots + T + AT + BT + CT + \dots$$

Y est la réponse du plan ; A, B, ..., C sont les facteurs du plan et T est le facteur temps (T peut être directement la réponse, comme nous le verrons dans l'exemple du paragraphe 2.).

### 1. 3. Validation expérimentale du modèle obtenu

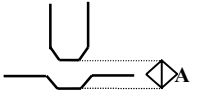
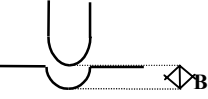
Nous utiliserons pour cela le retour d'expérience (REX), pour recueillir des informations de fiabilité dans des conditions réelles d'E&U : ces informations peuvent provenir de clients, du Service Après Vente ou d'essais en laboratoire de type client. La différence relative maximale indiquera la qualité de la cohérence entre la fiabilité prévisionnelle et la fiabilité opérationnelle.

## 2. EXEMPLE D'APPLICATION

La méthodologie présentée dans le paragraphe 1 a été appliquée au calcul de la fiabilité prévisionnelle d'un commutateur miniature (le commutateur KSR) [3]. Un plan d'expériences est créé, à partir duquel sera construit le PEFB. L'objectif est d'obtenir une expression de la fiabilité prévisionnelle en fonction des conditions d'environnement et d'utilisation à partir de l'expertise de l'entreprise et d'essais effectués en laboratoire.

### 2. 1. Plan d'expériences initial

Le tableau [t3] indique les facteurs principaux et le facteur bruit du plan d'expériences. Ici, le choix particulier des niveaux des facteurs d'E&U provient du caractère du produit et des facteurs qui agissent sur sa fiabilité. Les facteurs principaux concernent, d'une part, les paramètres de formage du dôme cloquant métallique, situé à l'intérieur du commutateur, et qui est l'élément essentiel donnant sa fiabilité mécanique. D'autre part, la température et la fréquence d'utilisation sont prises en compte, car elles interviennent a priori aussi dans la durée de vie du produit.

Facteur	Schéma	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
<b>A</b> jeu du premier formage du dôme		0,10 mm	0,09 mm	0,08 mm
<b>B</b> jeu du deuxième formage du dôme		0,04 mm	0,03 mm	0,02 mm
<b>C</b> fréquence de fonctionnement		1 Hz	2 Hz	3 Hz
<b>D</b> température d'utilisation		10 °C	25 °C	40 °C

<b>P (facteur bruit)</b> traitement de surface		sans traitement de surface	1,5 μm à 2 μm d'argent	
---	--	----------------------------	------------------------	--

**Tableau [t3] : tableau des facteurs du plan d'expériences initial**

## 2. 2. Résultats du plan d'expériences initial [t4]

Le choix de la réponse du plan d'expériences correspond au temps moyen de fonctionnement entre défaillances (MTBF), relatif à chaque essai sur un lot (de N = 10 commutateurs) tronqué à T\* = 200000 cycles. Le MTBF est estimé de la façon suivante (pour r défaillances aux temps respectifs t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, ..., t<sub>r</sub>) :

$$MTBF = \frac{\sum_{k=1}^r t_k + (N - r) \cdot T^*}{r}$$

N°	A	B	C	D	P	1	2	moy. :
						T <sub>vie</sub> : MTBF (Kcycles)		
1	1	1	1	1		175	125	<b>150</b>
2	1	2	2	2		200	150	<b>175</b>
3	1	3	3	3		200	150	<b>175</b>
4	2	1	2	3		75	50	<b>62.5</b>
5	2	2	3	1		60	50	<b>55</b>
6	2	3	1	2		75	50	<b>62.5</b>
7	3	1	3	2		50	25	<b>37.5</b>
8	3	2	1	3		50	25	<b>37.5</b>
9	3	3	2	1		50	25	<b>37.5</b>

**Tableau [t4]: plan d'expériences initial pour la modélisation de la fiabilité**

## 2. 3. Calcul de la fiabilité prévisionnelle à l'aide d'un PEFB

Appliquons la technique des PEFB pour effectuer l'étude de fiabilité prévisionnelle. Il existe en effet des données d'experts disponibles : elles sont relatives à des essais antérieurs effectués sur des appareils de même référence.

Résumons la démarche des PEFB :

- Les trois experts donnent des évaluations E entre 1 et 10 en fonction du résultat attendu pour chaque ligne du plan d'expériences. Pour pouvoir être combinées par le théorème de Bayes, on doit convertir ces notes dans la grandeur du problème, à l'aide de la formule suivante :

$$T_{vie\_exp} = T_{vie\_min} + \frac{T_{vie\_max} - T_{vie\_min}}{7} \cdot (E - 2)$$

On affecte aux valeurs minimale T<sub>vie\_min</sub> et maximale T<sub>vie\_max</sub> du plan d'expériences initial, les notes respectives 2 et 9. T<sub>vie\_exp</sub> est la valeur du MTBF correspondant à la note E (T<sub>vie\_min</sub> = 25 Kcycles et T<sub>vie\_max</sub> = 200 Kcycles) [t5][t6].

Propriété	jeu du premier formage	jeu du deuxième formage	fréquence d'utilisation	Expert 1		Expert 2		Expert 3	
				min	max	min	max	min	max
L <sub>1</sub>	0,10 mm	0,04 mm	1 Hz	170	220	150	200	180	210
L <sub>2</sub>	0,10 mm	0,03 mm	2 Hz	150	200	150	200	170	200
L <sub>3</sub>	0,10 mm	0,02 mm	3 Hz	150	200	150	200	160	190
L <sub>4</sub>	0,09 mm	0,04 mm	2 Hz	50	80	50	100	60	90
L <sub>5</sub>	0,09 mm	0,03 mm	3 Hz	50	80	50	100	50	80
L <sub>6</sub>	0,09 mm	0,02 mm	1 Hz	50	80	50	100	40	70
L <sub>7</sub>	0,08 mm	0,04 mm	3 Hz	30	70	20	70	30	60
L <sub>8</sub>	0,08 mm	0,03 mm	1 Hz	30	60	20	70	20	50
L <sub>9</sub>	0,08 mm	0,02 mm	2 Hz	30	50	20	70	10	40

**Tableau [t5] : premier tableau regroupant les données d'experts**

				TRAITEMENT DE SURFACE : Ag					
Propriété	jeu du premier formage	jeu du deuxième formage	fréquence d'utilisation	Expert 1		Expert 2		Expert 3	
				min	max	min	max	min	max
L <sub>1</sub>	0,10 mm	0,04 mm	1 Hz	120	170	100	150	130	160
L <sub>2</sub>	0,10 mm	0,03 mm	2 Hz	100	150	100	150	120	150
L <sub>3</sub>	0,10 mm	0,02 mm	3 Hz	100	150	100	150	110	140
L <sub>4</sub>	0,09 mm	0,04 mm	2 Hz	30	60	30	80	40	70
L <sub>5</sub>	0,09 mm	0,03 mm	3 Hz	30	60	30	80	30	60
L <sub>6</sub>	0,09 mm	0,02 mm	1 Hz	30	60	30	80	20	50
L <sub>7</sub>	0,08 mm	0,04 mm	3 Hz	10	50	10	50	10	40
L <sub>8</sub>	0,08 mm	0,03 mm	1 Hz	10	40	10	50	10	30
L <sub>9</sub>	0,08 mm	0,02 mm	2 Hz	10	30	10	50	10	20

**Tableau [t6] : deuxième tableau regroupant les données d'experts**

- On déduit des deux tableaux précédents l'experton a priori (EPR).
- Le plan d'expériences initial est transformé en experton après avoir effectué les moyennes des deux colonnes relatives au même niveau du facteur bruit (répétitions). On affecte alors à chaque valeur réponse un intervalle de confiance qui correspond ici à un écart type  $\sigma_1 = 7$ . Nous en déduisons alors l'EDE (experton des données d'essais).
- La combinaison de l'EPR avec l'EDE (à l'aide de la formule de Bayes) donne l'experton a posteriori (EPO).

### 2. 3. 1. Plan d'expériences flou bayésien (PEFB)

Le PEFB, donné dans le tableau [t7], est déduit de l'EPO en prenant les valeurs les plus probables dans l'experton. La dimension floue  $\phi$  apparaît alors comme une dimension supplémentaire définie par les valeurs minimales et maximales données respectivement par les sous-colonnes de gauche et de droite de l'EPO, relativement à chaque propriété (chaque propriété est définie par une des neuf combinaisons des facteurs A, B, C, D).

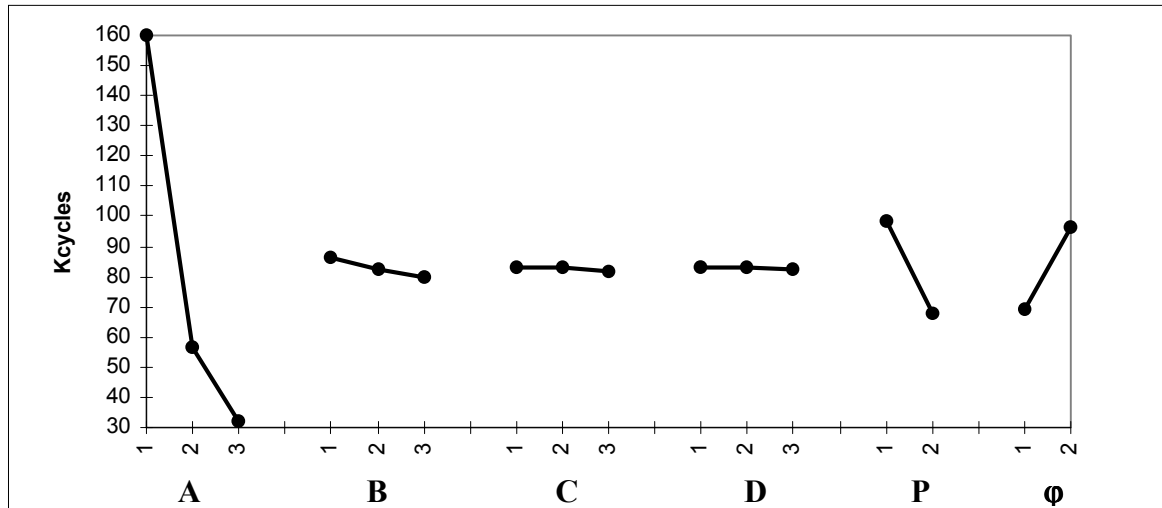
					$\phi$	1		2		moy. :
					P	1	2	1	2	
N°	A	B	C	D		<i>T<sub>vie</sub> : MTBF (Kcycles)</i>				
1	1	1	1	1		180	130	200	150	<b>165</b>
2	1	2	2	2		170	120	200	150	<b>160</b>
3	1	3	3	3		160	110	200	150	<b>155</b>
4	2	1	2	3		60	40	80	60	<b>60</b>
5	2	2	3	1		50	30	80	60	<b>55</b>
6	2	3	1	2		50	30	80	55	<b>54</b>
7	3	1	3	2		30	10	60	40	<b>35</b>
8	3	2	1	3		30	10	55	30	<b>31</b>

9	3	3	2	1		30	10	50	30	30
---	---	---	---	---	--	----	----	----	----	----

**Tableau [t7] : plan d'expériences flou bayésien**

L'analyse de variance montre que pour les données brutes, seuls les facteurs A, P et  $\varphi$  ont une influence significative (A[86%], P[7%],  $\varphi$ [5%]).

La figure [f2] représente les effets de ces facteurs. On remarque que l'influence du facteur flou, image de l'incertitude des experts, est faible devant l'effet du facteur A.



**Figure [f2] : graphe des effets des facteurs pour les données brutes**

Le rapport Signal/Bruit  $S/N$  ou  $S/(P+\varphi)$  est calculé pour la recherche optimisée d'une valeur maximale. Le facteur A est le seul facteur significatif (influence à plus de 99%).

### 2. 3. 2. Calcul de la fiabilité prévisionnelle

Le modèle issu du PEFB s'exprime de la manière suivante :

$$Y = T = I + A + P + AP + \varphi + A\varphi$$

Lorsque  $\varphi$  est au niveau 1, on obtient la valeur minimale de l'intervalle d'estimation de la fiabilité prévisionnelle  $T_{vie}$ . Lorsque  $\varphi$  est au niveau 2, on obtient la valeur maximale de cet intervalle [t8].

$T_{vie}$ (Kcycles)	modèle issu du PEFB			
	pas de traitement		traitement Ag	
A : 1 <sup>er</sup> formage	min	max	min	max
min : 0,10 mm	170	200	120	150
max : 0,08 mm	30	55	10	34

**Tableau [t8] : tableau comparatif des valeurs de fiabilité prévisionnelle issues du PEFB**



Les jugements d'experts ont permis d'obtenir des intervalles d'estimation de la fiabilité prévisionnelle, selon les différents paramètres exprimés par les combinaisons des facteurs étudiés.

## 2. 4. Validation du modèle de fiabilité

Validons les calculs de la fiabilité prévisionnelle effectués précédemment, et confrontons les résultats du calcul de fiabilité prévisionnelle avec des résultats d'essais de fiabilité réalisés en laboratoire, mais dans des conditions typiques d'utilisation ; ces essais sont des essais censurés sur des populations de 10 appareils. La fiabilité opérationnelle est donnée par le MTBF.

Le tableau [t9] présente les résultats des études de fiabilité prévisionnelle et les résultats comparatifs de fiabilité opérationnelle.

Facteur d'E&U		Fiabilité prévisionnelle	Fiabilité opérationnelle (REX) dans les conditions données par les facteurs d'E&U
Facteur A :	Facteur P :	MODELE PEFB	Kcycles
0,10 mm	Ag	[120, 150]	125
0,10 mm	sans	[170, 200]	200
0,11 mm	Ag	[207, 241]	225

**Tableau [t9] : tableau d'analyse de cohérence entre la fiabilité prévisionnelle et opérationnelle**

La cohérence entre la fiabilité prévisionnelle et la fiabilité opérationnelle est valable car les valeurs de fiabilité opérationnelle se situent dans les intervalles issus du PEFB.

## 3. CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer directement la fiabilité du commutateur dans différentes conditions attachées au processus de fabrication. L'utilisation des PEFB a permis de définir des intervalles de confiance d'experts, qui définissent les bornes inférieures et supérieures de la fiabilité prévisionnelle. L'objectif de fiabilité a été atteint : 200 Kcycles avec le traitement de surface argenté. Le commutateur KSR a été lancé en production de série au mois d'Octobre 1995. Les essais de fiabilité, effectués dans des conditions de type client sur des prélèvements en production, ont confirmés les valeurs de fiabilité prévisionnelle.

## Bibliographie

- [1] Delage A., Intégration de la qualité et de la Sûreté de Fonctionnement dans le cycle de Recherche et développement, Renault/Institut de Sûreté de fonctionnement (ISdF), 1<sup>ier</sup> Congrès Multidisciplinaire de Sûreté de Fonctionnement, Compiègne, 1994
- [2] Rochon S., Pillet M., Courtois A., étude de cohérence entre la fiabilité prévisionnelle et la fiabilité opérationnelle : application à la conception robuste et fiable des produits, 1<sup>er</sup> Congrès

multidisciplinaire de Sûreté de fonctionnement, Université de Compiègne, 17, 18 Novembre 1994

[3] Rochon S., Burnel T., a three steps method based on Taguchi design of experiments to optimize robustness and reliability of ultraminiature SMT tact switches : the top actuated KSR series, ITT Defense & Electronics - Symposium Taguchi 95, ITT - Washington - October 1995

[4] Rochon S., Méthodologie de conception robuste et fiable des produits industriels associant l'approche expérimentale et l'expertise, Thèse, Université de Savoie, Juillet 96

[5] Rochon S., association de l'expérience et de l'expertise dans une méthodologie de conception fiable associant l'expérience et l'expertise, Université d'été de Modane, Sept. 96