

Société de Calcul Mathématique, S. A.
Algorithmes et Optimisation



Validation des lois de probabilité utilisées dans les
Etudes Probabilistes de Sûreté

Rapport final

présenté à

L'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

par la

Société de Calcul Mathématique SA

En application du contrat : N° DA 90730/CA 31004657

Miriam Basso

Novembre 2009

Résumé opérationnel

La SCM présente une analyse critique des lois de probabilité actuellement utilisées par l'IRSN dans les études probabilistes de sûreté. Les aspects analysés sont :

- les défaillances des matériels ;
- les indisponibilités ;
- les événements initiateurs ;
- le facteur humain.

En s'appuyant sur la documentation fournie par l'IRSN, la SCM analyse la validité des méthodes mises en place et propose des améliorations qui permettent une meilleure prise en compte des incertitudes.

Afin d'illustrer ces améliorations, des exemples numériques concrets ont été traités et un exemple final permet une comparaison globale entre l'approche actuellement utilisée et celle que nous préconisons.

Taux de défaillance d'un matériel

Le taux de défaillance d'un matériel exprime la probabilité qu'un matériel ayant fonctionné pendant une durée T soit défaillant dans l'unité de temps élémentaire qui suit.

La SCM propose une méthode qui permet d'obtenir la distribution du taux de défaillance d'un matériel et un encadrement à 95%.

Comme le montre le graphique ci-dessous, représentant le taux de défaillance d'un type de moteur, les valeurs obtenues par la SCM, plus rigoureuses sur le plan de la méthodologie, sont proches des valeurs utilisées par l'IRSN.

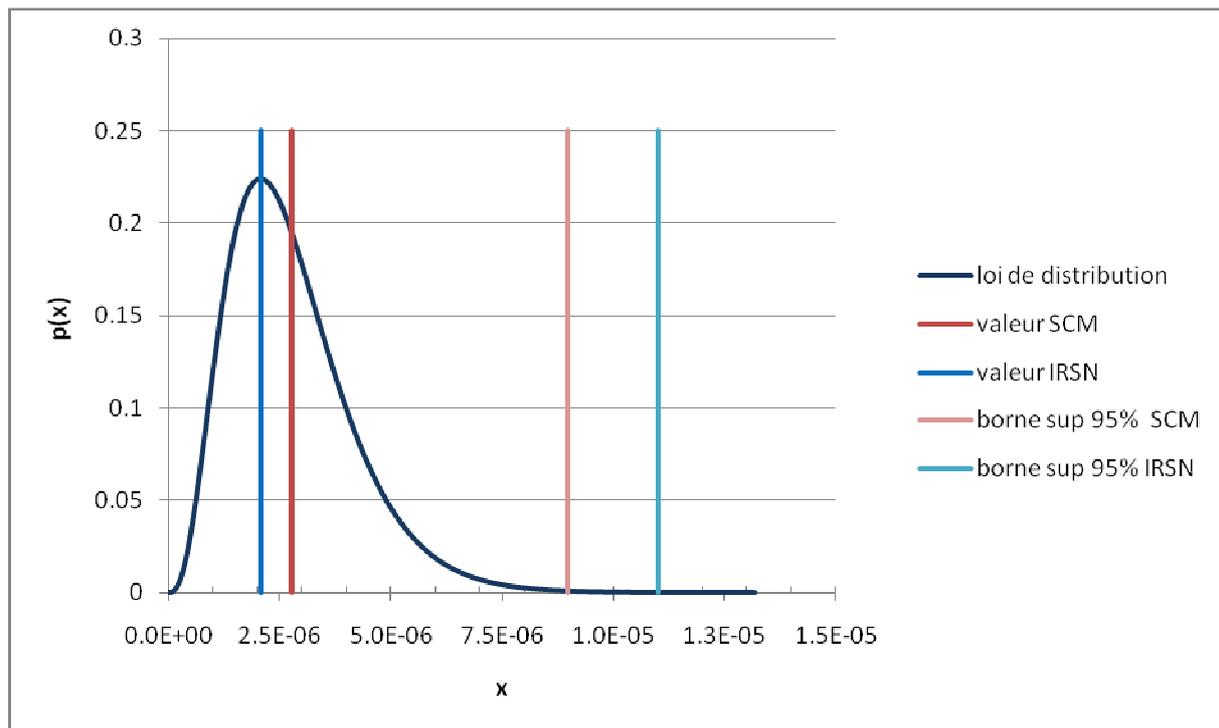


Figure 1 Taux de défaillance des moteurs 6.6 kV ANG

Paramètres de défaillance par cause commune de plusieurs matériels

Les défaillances désignées par l'appellation « défaillance de cause commune » (DCC) sont définies comme les défaillances pouvant affecter, simultanément ou pendant la durée de la mission, plusieurs composants et qui ont la même cause.

L'estimation des paramètres de DCC fait à la fois appel au calcul des probabilités conditionnelles et à l'estimation du taux de défaillance d'un matériel. La SCM valide la méthode utilisée pour le calcul des probabilités conditionnelles et propose une nouvelle méthode pour l'estimation du taux de défaillance.

Taux d'indisponibilité d'une bulle

Le taux d'indisponibilité correspond à la probabilité qu'un matériel soit en maintenance à une date donnée.

La SCM propose une amélioration de l'estimation du taux d'indisponibilité en prenant en compte la distinction entre :

- la maintenance préventive, qui est une maintenance programmée ;
- la maintenance fortuite qui suit la défaillance d'un matériel constituant la bulle.

Une méthode permettant un encadrement à 95% du taux d'indisponibilité fortuite est proposée.

Fréquence d'un événement initiateur

Un événement initiateur est un événement qui perturbe le fonctionnement normal de l'installation et nécessite l'intervention d'au moins un système de sûreté ou de sauvegarde. C'est à partir des événements initiateurs que peuvent se dérouler des séquences accidentelles.

L'estimation de la fréquence d'un événement initiateur est analogue à l'estimation du taux de défaillance d'un matériel ; la SCM propose l'utilisation de la même méthode.

Prise en compte du facteur humain

La prise en compte du facteur humain dans les EPS consiste à quantifier les probabilités d'échec des actions humaines. Ce sujet a fait l'objet d'études sur une très longue période et a donné lieu à des modélisations de bonne qualité.

Toutefois les valeurs attribuées aux probabilités d'échec des séquences envisagées semblent être des valeurs artificielles : elles n'ont pas été confrontées aux résultats du retour d'expériences.

Afin de valider les lois actuellement utilisées et réaliser un calcul d'incertitudes, la SCM suggère la mise en place et l'exploitation du retour d'expériences.

Remarques générales

De façon générale, la SCM suggère à l'IRSN l'adoption des mesures suivantes :

- Un meilleur recueil des données (ceci tout particulièrement en ce qui concerne la prise en compte du facteur humain);
- La rédaction de rapports techniques présentant le détail des données utilisées et des calculs réalisés (ceci notamment dans l'estimation des fréquences des événements initiateurs) ;
- Une utilisation la plus spécifique possible du retour d'expériences.

Exemple d'enchaînement

Dans le but d'apporter une comparaison plus globale des méthodes utilisées par l'IRSN et de celles proposées par la SCM, un exemple qui modélise l'enchaînement de plusieurs cas concrets traités (événement initiateur, défaillance, DCC,...) a été élaboré. Le scénario envisagé est représenté ci-dessous :



Les valeurs estimées par les différentes méthodes sont les suivantes.

	Evaluation IRSN	Evaluation SCM	Borne supérieure SCM à 95%
Rupture d'un tube de générateur de vapeur (par an)	$6 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$
Défaillance du moteur 6.6 kV ANG (par jour)	$5 \cdot 10^{-5}$	$6.7 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$
Défaillance simultanée des deux pompes RRA (par jour)	$9.3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

Tableau I Valeurs estimées par les deux méthodes

Pour la prise en compte du facteur humain, nous ne disposons pas de retour d'expérience, mais seulement de la valeur IRSN ; nous l'utilisons donc telle quelle : 10^{-3} .

En supposant que ces événements sont indépendants, la probabilité finale correspond au produit de la probabilité liée à chaque étape. Voici les résultats :

Evaluation IRSN : 2.8×10^{-15}

Evaluation SCM : 4.7×10^{-15}

Borne supérieure SCM à 86 % : 1.2×10^{-13}

Cette borne supérieure est obtenue en faisant le produit des trois bornes supérieures à 0.95 pour les trois premières défaillances ($0.86 = 0.95^3$) ; pour le facteur humain, on utilise simplement la valeur nominale, puisque aucune autre estimation n'est disponible.

Les probabilités d'échec final de l'enchaînement calculées à partir des données originales l'IRSN et des données obtenues par la nouvelle méthode SCM sont du même ordre de grandeur.

Le travail réalisé par la SCM ne remet donc pas en cause les données actuellement utilisées par l'IRSN, mais permet un traitement plus rigoureux des incertitudes.

Sommaire

Résumé opérationnel	2
I. Introduction	8
II. Lois de probabilité liées à un matériel.....	9
1) Taux de défaillance d'un matériel	9
a) Méthode utilisée.....	9
Définition.....	9
Formule utilisée	9
Facteur d'erreur associé.....	9
Cas $N = 0$	10
b) Méthode proposée par la SCM.....	10
Distribution du taux de risque d'un matériel.....	10
Choix du taux de risque d'un matériel.....	11
Encadrement à 95%	12
c) Exemple d'application : les moteurs ANG.....	13
Données exploitées	13
Distribution du taux de défaillance	13
Cas $N = 0$	14
Encadrement à 95%	15
2) Défaillances par cause commune	18
a) Méthode utilisée.....	18
Définition.....	18
Vecteur d'impact moyen.....	18
Estimation des paramètres de fiabilité.....	21
b) Remarques et critiques.....	22
Modélisation des DCC par le vecteur d'impact moyen.....	22
Calcul des probabilités conditionnelles.....	23
c) Exemple d'application : les pompes RRA	23
Formules utilisées	23
Données	23
Estimation des paramètres DCC	24
3) Estimation du taux d'indisponibilité.....	25
a) Méthode utilisée par l'IRSN	25
Définition.....	25
Exemple	25
Remarques.....	26
b) Critiques et améliorations	26
4) Estimation de la fréquence des événements initiateurs.....	27
a) Méthode utilisée.....	27
b) Critiques et améliorations	27
c) Exemple : rupture du tube de générateur de vapeur.....	28
III. Prise en compte du facteur humain.....	29
a) Modélisation du facteur humain	29

Séquences	29
Comportement de l'équipe de conduite.....	30
Probabilité de non prise de la consigne en fonction du temps.....	30
Erreur d'exécution en cours d'application d'une consigne	31
Probabilité de non récupération par l'ingénieur de sûreté.....	31
Probabilité d'échec globale	32
Exemple	32
Action des opérateurs	32
Action de l'ingénieur de sûreté.....	32
Probabilité d'échec globale.....	33
b) Critique	33
IV. Exemple de comparaison.....	34
Scénario	34
Données	34
Résultats.....	35

I. Introduction

Les Etudes Probabilistes de Sûreté (EPS) reposent sur un nombre important de données qui quantifient la probabilité d'échec d'un comportement humain ou d'un matériel.

Ce travail consiste en une analyse critique des lois de probabilité utilisées pour estimer ces données à partir des données recueillies par le retour d'expériences. Les aspects traités sont les suivants :

- les défaillances ;
- les défaillances par cause commune ;
- les indisponibilités ;
- les événements initiateurs ;
- le facteur humain.

Dans chaque cas, la validité des approches utilisées est jugée et, si cela est nécessaire, une amélioration qui tient compte de la compatibilité avec le logiciel utilisé par l'IRSN est proposée.

Les comportements humains présentent des caractéristiques qui rendent impossible un traitement systématique et logique comme dans le cas des matériels ; de ce fait la prise en compte du facteur humain dans les EPS est traitée distinctement des quatre autres aspects.

II. Lois de probabilité liées à un matériel

Cette partie correspond à une analyse critique des lois de probabilité utilisées afin d'estimer :

- le taux de défaillance d'un matériel ;
- les paramètres de fiabilités liés aux défaillances d'un ou plusieurs matériels par cause commune (DCC) ;
- le taux d'indisponibilité d'un matériel ;
- la fréquence d'un événement initiateur.

1) Taux de défaillance d'un matériel

Les documents pris en compte sont les suivants :

- Blin, *R EPS-G.4 - Données de fiabilité*, IRSN, Novembre 1989
- V. Meyer, *Note technique données de fiabilité génériques utilisées pour les EPS 900/1300 & 1450 MWe 'Note de synthèse – Tome 1'*, EDF, Juillet 2006
- Daniel, *Note technique élaboration des paramètres de fiabilité des moteurs 6.6 kV tous paliers*, EDF, Mars 2007

a) Méthode utilisée

Définition

Le taux de défaillance d'un matériel λ exprime la probabilité pour qu'un matériel qui a fonctionné pendant une certaine durée soit défaillant au cours de l'unité de temps élémentaire qui suit.

Formule utilisée

Le taux de défaillance λ d'un matériel est estimé comme suit:

$$\lambda = \frac{n}{T}$$

Où :

- n correspond au nombre de défaillances observées ;
- T correspond à la durée cumulée de fonctionnement du matériel.

Facteur d'erreur associé

Pour chaque estimation de λ , le facteur d'erreur E est calculé en faisant l'hypothèse que le nombre de défaillances observées se répartit selon une loi de Poisson, la formule utilisée est la suivante :

$$E = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{sup}}}{\lambda_{\text{inf}}}}$$

Où λ_{inf} et λ_{sup} sont les valeurs proposées des bornes inférieure et supérieure à 5% et 95% calculées à partir des tables de la loi du Khi-deux :

- la borne inférieure à 5% du nombre de défaillances observées correspond à $\chi^2_{0.05}(2n)$
- la borne supérieure du nombre de défaillances correspond à $\chi^2_{0.95}(2n+2)$

L'intervalle à 90% correspondant est déterminé en divisant par T .

Cas $N=0$

Lorsqu'aucune défaillance n'est observée sur la période d'étude, l'estimation peut être donnée par deux moyens différents :

- Soit par application de la « loi du χ^2 à 50% »

$$\lambda = \frac{\chi^2_{50\%}(2n+2)}{2T} \approx \frac{1,39}{2T} \approx \frac{0,7}{T}$$

- Soit en faisant appel au jugement d'experts

Le facteur d'erreur est pris arbitrairement égal à 10.

b) Méthode proposée par la SCM

Dans la méthode ci-dessus, l'hypothèse relative à une loi de Poisson est artificielle.

La SCM propose une méthode qui permet d'obtenir la distribution du taux de défaillance d'un matériel et un encadrement à 95%. Cette méthode est présentée plus en détail dans les documents suivants :

- Bernard Beuzamy, *Méthodes Probabilistes pour l'étude des phénomènes réels*, SCM SA, 2004
- Bernard Beuzamy, *The information associated with a sample*, Mars 2009

Distribution du taux de risque d'un matériel

Sachant qu'un matériel a enregistré n accidents pour N utilisations, il est légitime de considérer que son taux de risque λ suit une loi de probabilité dont la densité est donnée par :

$$f_{n,N}(\lambda) = \frac{\lambda^n (1-\lambda)^{N-n}}{\int_0^1 x^n (1-x)^{N-n} dx}$$

Ce qui revient, après calculs, à la loi de distribution suivante :

$$f_{n,N}(\lambda) = \frac{(N+1)!}{n!(N-n)!} \lambda^n (1-\lambda)^{N-n}$$

$f_{n,N}$ atteint son maximum en $\frac{n}{N}$ et son espérance vaut $\frac{n+1}{N+2}$.

La distribution de $f_{3,13}$ est donnée à titre d'exemple ci-dessous.

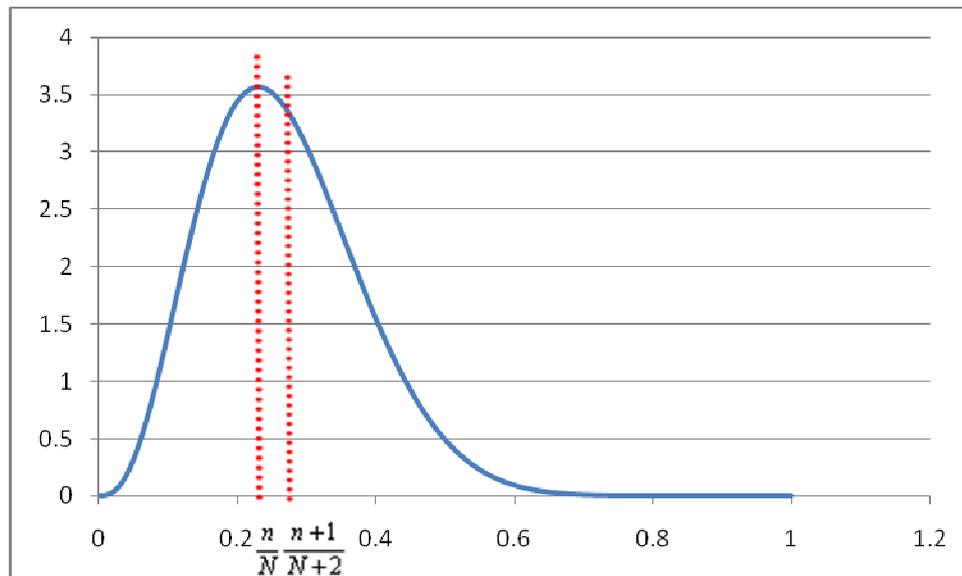


Figure 1 Représentation graphique de $f_{3,13}$

On vérifie que $f_{3,13}$ est maximale en $\frac{n}{N} \approx 0.23$

Choix du taux de risque d'un matériel

Si l'on doit faire un choix ponctuel pour λ , c'est le choix de l'espérance $E_{n,N}$ qui donnera le meilleur résultat : elle correspond à la valeur pour laquelle l'erreur commise est en moyenne la plus faible.

Remarquons bien que $E_{n,N}$ n'est jamais nul, même s'il n'y a eu aucun accident. En effet pour $n=0$ on a :

$$E_{n,N} = \frac{1}{N+2}.$$

Dans ce cas, la distribution est une fonction décroissante, maximale en 0, comme illustré ci-dessous par la représentation de $f_{0,13}$.

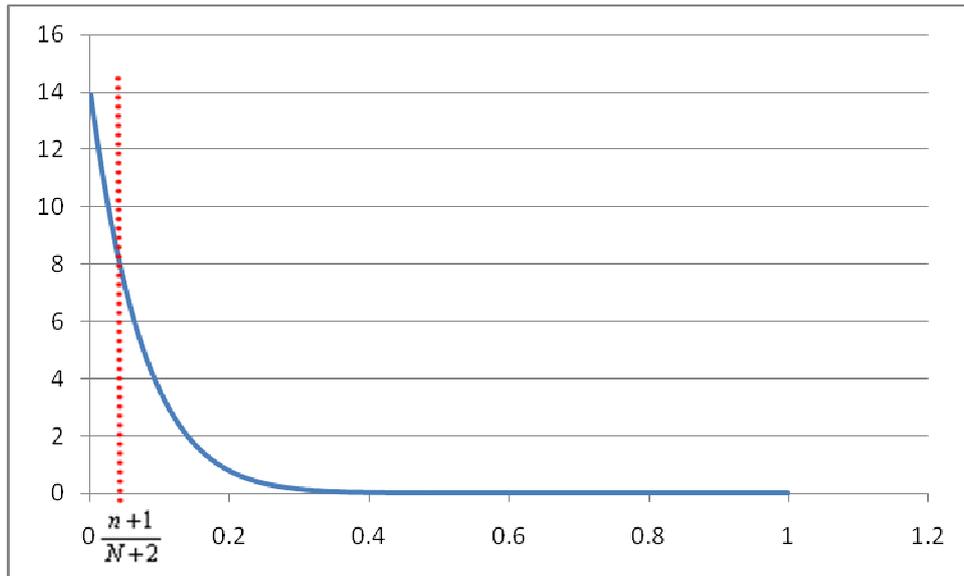


Figure 2 Représentation graphique de $f_{0,13}$

Dans ce cas l'espérance $E_{n,N}$ est égale à :

$$E_{0,13} = \frac{1}{15}$$

Encadrement à 95%

Il est démontré que pour tout $\varepsilon > 0$, pour l'intervalle $I = [\lambda - \eta', \lambda + \eta']$ tel que :

$$\eta' = \sqrt{\frac{\lambda(1-\lambda)}{N\varepsilon}}$$

la fonction $f_{n,N}$ vérifie :

$$\int_I f_{n,N}(x) dx \geq 1 - \varepsilon$$

Nous appliquons cet encadrement à $\varepsilon = 0.05$.

Si l'on prend $\lambda = E_{n,N}$, on obtient l'intervalle à 95% suivant :

$$I = \left[E_{n,N} - \sqrt{\frac{E_{n,N}(1-E_{n,N})}{0.05 N}}, E_{n,N} + \sqrt{\frac{E_{n,N}(1-E_{n,N})}{0.05 N}} \right]$$

L'intervalle de confiance à 95% de $f_{3,13}$ est $[0,0.82]$. Ceci signifie que la probabilité que le taux de risque correspondant à 3 accidents pour 13 utilisations soit inférieur à 0.82 est de 95 %.

c) Exemple d'application : les moteurs ANG

Pour illustrer l'utilisation de la méthode proposée par la SCM, nous avons traité un exemple : celui des moteurs ANG dans le palier 900 dont les données sont fournies dans le rapport EDF.

Données exploitées

Les données fournies dans le rapport technique sont les suivantes :

- La période d'observation prise en compte correspond à 11 ans : du 1^{er} janvier 1995 au 31 décembre 2005.
- Pendant cette période, 30 moteurs ANG ont fonctionné : en effet il y a 5 moteurs ANG par tranche CP0 et 6 tranches CP0.
- La durée annuelle moyenne d'un moteur ANG est de 4374 h an⁻¹.
- Le nombre d'heures totales d'observations des moteurs ANG correspond donc à 1443 420.
- Le nombre de défaillances en fonctionnement observées sur les moteurs ANG pendant cette période est égale à 3.

En résumé, dans le cas de cet exemple :

- $n = 3$
- $N = 1\,443\,420$

Distribution du taux de défaillance

La représentation graphique de la distribution de $f_{3,1443420}$ correspondant à la distribution du taux de défaillance des moteurs ANG est donnée ci-dessous.

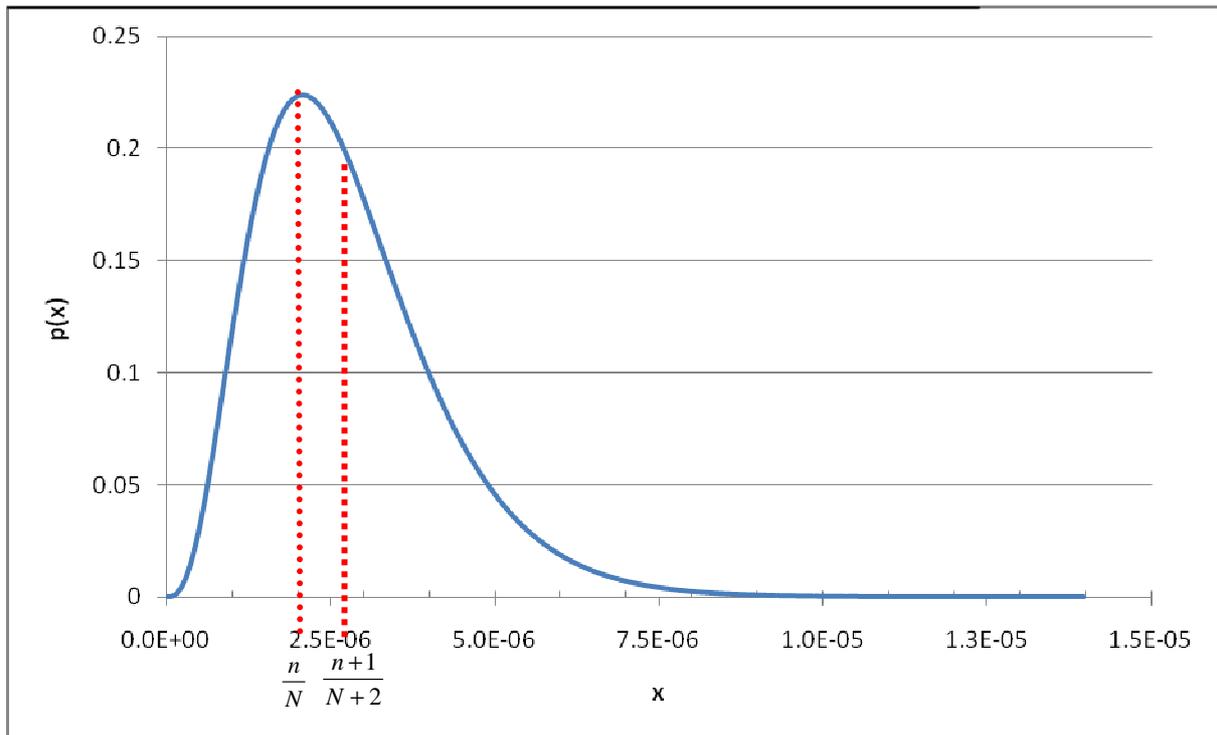


Figure 3 Représentation graphique de $f_{3,1443420}$

Nous vérifions que $f_{3,1443420}$ est maximale pour $\frac{n}{N} \approx 2.110^{-6}$ cette valeur correspond à la valeur utilisée par l'IRSN.

Le taux de risque moyen correspond à : $E_{3,1443420} = \frac{n+1}{N+2} \approx 2.810^{-6}$

Cas $N = 0$

Si l'on n'avait observé aucune défaillance, la valeur de λ et son encadrement se déterminerait de la même façon à partir de $f_{0,1443420}$ dont la représentation graphique est donnée ci-dessous.

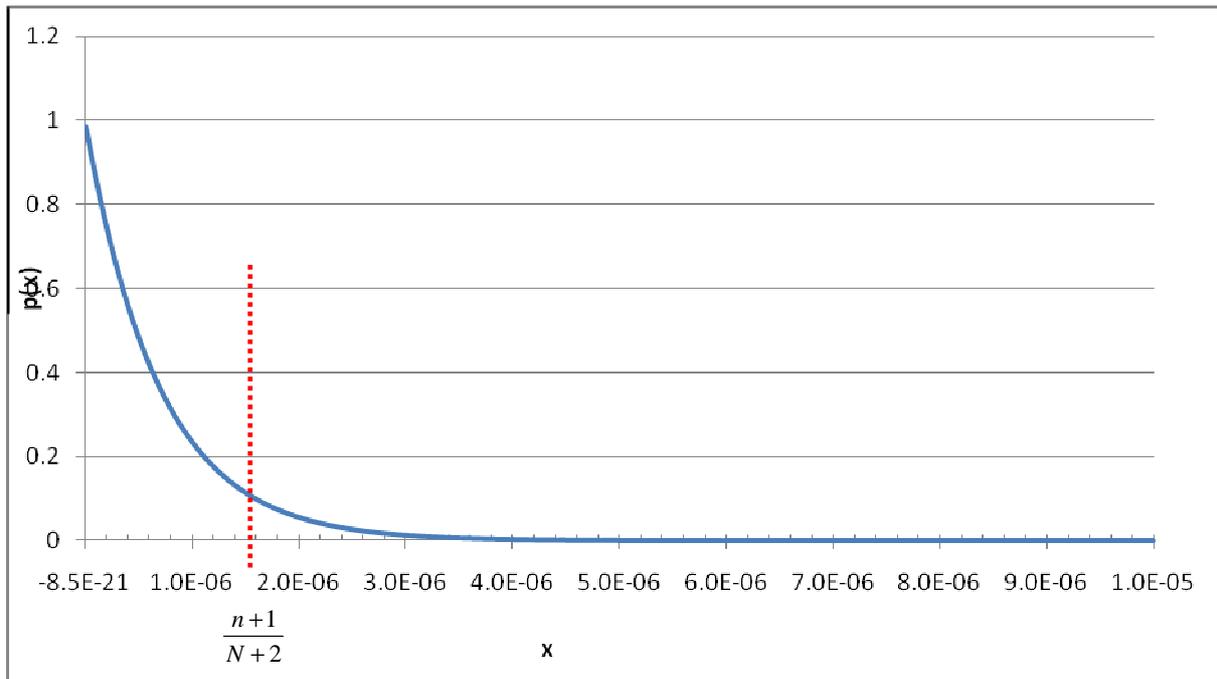


Figure 4 Représentation graphique de $f_{0,1443420}$

Dans ce cas :

$$E_{0,1443420} = \frac{n+1}{N+2} = \frac{1}{1443422} \approx 6.9 \cdot 10^{-7}$$

Alors que l'IRSN aurait trouvé la valeur :

$$\lambda = \frac{\chi_{50\%}^2(2n+2)}{2T} = \frac{\chi_{50\%}^2(2 \times 0 + 2)}{2T} \approx \frac{0,7}{T} = \frac{0,7}{1443421} \approx 4.8 \cdot 10^{-7}$$

Encadrement à 95%

En appliquant la théorie présentée précédemment, nous pouvons également proposer un encadrement du taux de défaillance.

La borne supérieure de l'intervalle à 95% représentée ci-dessous est calculée comme suit :

$$E_{n,N} + \sqrt{\frac{E_{n,N}(1-E_{n,N})}{0.05 N}} \approx 8.9 \cdot 10^{-6}$$

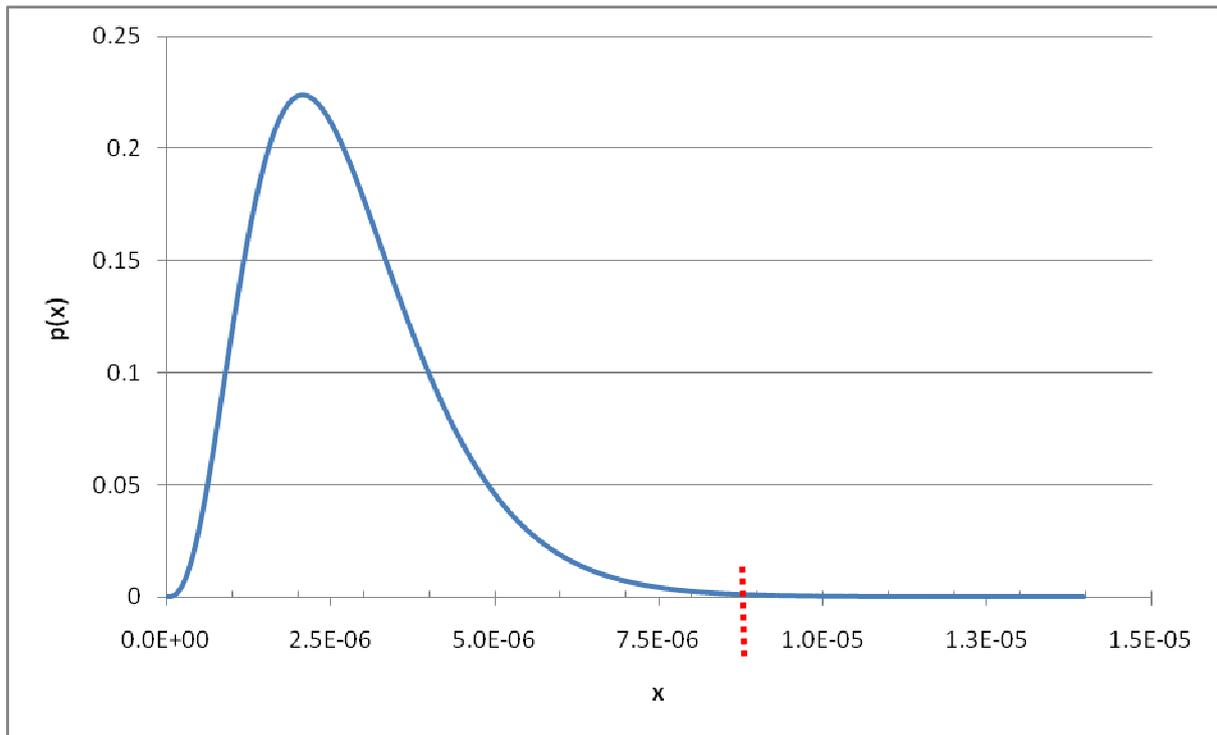


Figure 5 Représentation graphique de $f_{3,1443420}$ et de la borne supérieure à 95%

La borne inférieure correspondante est négative, elle est donc prise égale à 0.

En conclusion un encadrement à 95% du taux de défaillance en fonctionnement λ des moteurs ANG est égal à :

$$0 \leq \lambda \leq 8.9 \cdot 10^{-6}$$

Si l'on avait utilisé la méthode utilisée par l'IRSN, la borne supérieure à 95% correspond à $\chi_{0.95}^2(2n+2)$ elle est obtenue par les tables du Khi-deux.

Ici : $2n+2 = 2 \times 3 + 2 = 8$

Donc en utilisant la table ci-dessous :

Loi de Khi-deux											
Le tableau donne x tel que $P(K > x) = p$											
p	0,999	0,995	0,99	0,98	0,95	0,9	0,8	0,2	0,1	0,05	0,02
ddl											
1	0,0000	0,0000	0,0002	0,0006	0,0039	0,0158	0,0642	1,6424	2,7055	3,8415	5,4119
2	0,0020	0,0100	0,0201	0,0404	0,1026	0,2107	0,4463	3,2189	4,6052	5,9915	7,8240
3	0,0243	0,0717	0,1148	0,1848	0,3518	0,5844	1,0052	4,6416	6,2514	7,8147	9,8374
4	0,0908	0,2070	0,2971	0,4294	0,7107	1,0636	1,6488	5,9886	7,7794	9,4877	11,6678
5	0,2102	0,4117	0,5543	0,7519	1,1455	1,6103	2,3425	7,2893	9,2364	11,0705	13,3882
6	0,3811	0,6757	0,8721	1,1344	1,6354	2,2041	3,0701	8,5581	10,6446	12,5916	15,0332
7	0,5985	0,9893	1,2390	1,5643	2,1673	2,8331	3,8223	9,8032	12,0170	14,0671	16,6224
8	0,8571	1,3444	1,6465	2,0325	2,7326	3,4895	4,5936	11,0301	13,3616	15,5073	18,1682
9	1,1519	1,7349	2,0879	2,5324	3,3251	4,1682	5,3801	12,2421	14,6837	16,9190	19,6790
10	1,4787	2,1559	2,5582	3,0591	3,9403	4,8652	6,1791	13,4420	15,9872	18,3070	21,1608

Figure 6 Table de Khi-deux

L'on obtient :

$$\chi_{0,95}^2(8) = 15.5$$

Finalement :

$$\lambda_{95\%} = \frac{\chi_{0,95}^2(2n+2)}{T} = \frac{15.5}{1443420} = 1.0710^{-5}$$

Le graphique ci-dessous permet une comparaison des résultats IRSN et SCM.

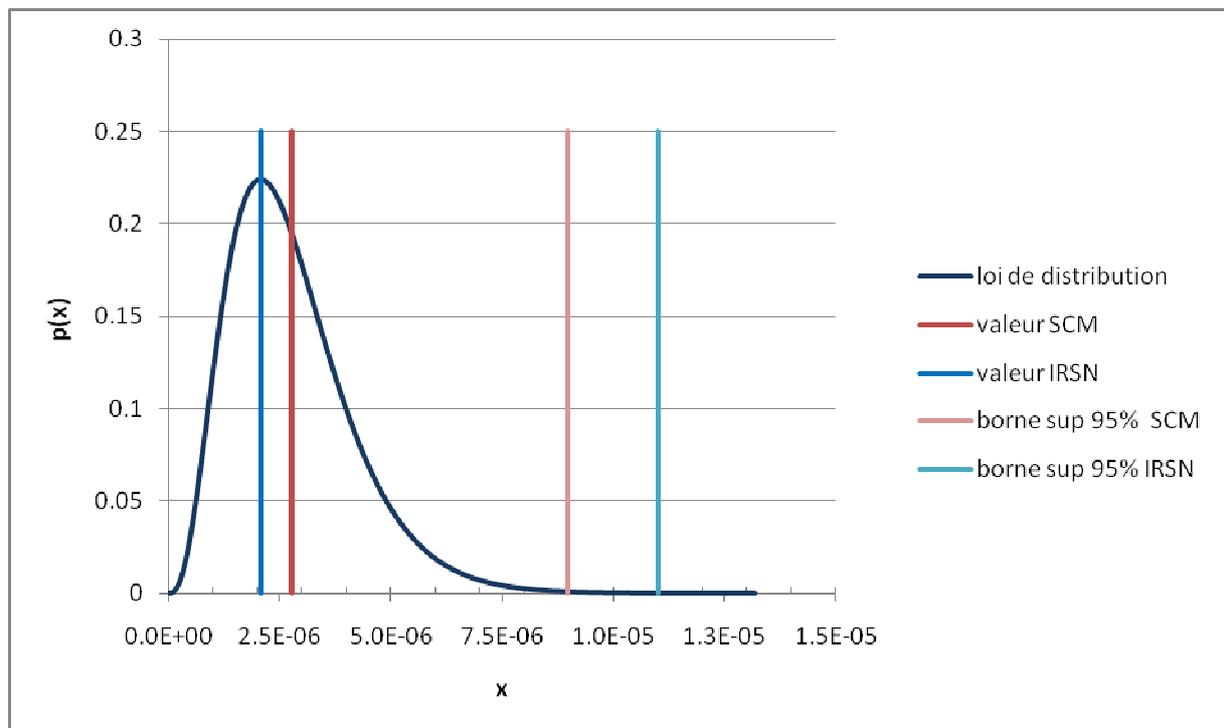


Figure 7 Comparaison des deux méthodes

Les valeurs obtenues par les deux méthodes sont du même ordre de grandeur. La méthode proposée par la SCM est plus rigoureuse, car elle ne fait pas d'hypothèses sur la loi suivie par le taux de défaillance.

2) Défaillances par cause commune

a) Méthode utilisée

Cette partie présente la méthode actuellement utilisée afin d'estimer les paramètres de DCC. Le document de référence utilisé est le suivant :

- Tirira, *Rapport SEREP N°110 Méthodes d'estimation des paramètres de défaillance cause commune*, IRSN, avril 2003.

Définition

Les défaillances désignées par l'appellation « défaillance de cause commune » (DCC) sont définies comme les défaillances pouvant affecter simultanément ou pendant la durée de la mission, plusieurs composants et qui ont la même cause, par exemple une erreur de conception, de fabrication, d'installation ou de montage, une erreur de maintenance, ou un effet de l'environnement.

Vecteur d'impact moyen

Le retour d'expériences ne permet pas de connaître de façon certaine s'il existe ou non une cause commune profonde partagée entre des défaillances qui ont affecté plusieurs matériels. Pour prendre en compte ces doutes chaque défaillance est modélisée par un vecteur d'impact moyen.

Le vecteur d'impact F est défini à partir de :

- m le nombre de matériels du groupe pris en compte ;
- k le nombre de matériels affectés.

Par exemple, le vecteur d'impact $[F_0, F_1, F_2, F_3, F_4]$ d'un groupe de matériels de taille $m = 4$ prendra respectivement les valeurs :

- $[1, 0, 0, 0, 0]$ si aucun des quatre matériels n'est défaillant : $k = 0$
- $[0, 1, 0, 0, 0]$ si un seul des quatre matériels est défaillant $k = 1$
- $[0, 0, 1, 0, 0]$ si deux des matériels du groupe sont défaillants du fait de la même cause partagée : $k = 2$
- $[0, 0, 0, 1, 0]$ si trois des matériels du groupe sont défaillants du fait de la même cause partagée : $k = 3$

Par ailleurs les valeurs affectées à ce vecteur sont corrigées par plusieurs coefficients qui quantifient :

- la dégradation subie par les matériels ;
- la simultanéité des dégradations ayant affecté plusieurs matériels ;
- la probabilité que les dégradations soient dues à une DCC.

On définit :

- p_i le facteur de dégradation du matériel i ;
- q le facteur de simultanéité qui quantifie la simultanéité avec laquelle les matériels ont été touchés ;
- c le facteur de cause partagée qui quantifie la probabilité que la défaillance soit de cause partagée.

Les valeurs affectées dans chaque cas sont données dans les tableaux suivants.

Etat du matériel	Description	Facteur associé
Défaillance complète	L'équipement est totalement défaillant et ne peut assurer sa fonction de sûreté	1
Fonctionnement dégradé	L'équipement est à même de remplir sa fonction de sûreté. Cependant, il est partiellement dégradé, ce qui augmente le risque de défaillance dans l'accomplissement de sa mission	0.5
Amorce de défaillance	L'équipement est à même de remplir sa fonction de sûreté, cependant sa dégradation, si les composants défaillants ne sont pas réparés, va conduire à un état dégradé compromettant sa fonction de sûreté à terme	0.1
En fonctionnement	L'équipement est à même de remplir sa fonction de sûreté dans le respect total des spécifications requises	0

Tableau 1 Facteur de dégradation

Facteur de simultanéité	Description	Probabilité associée
Fort	L'écart entre les défaillances survenues sur l'équipement en fonctionnement est inférieur à la durée de la mission	1
Moyen	L'écart entre les défaillances survenues sur les équipements est compris entre la durée de leur mission et un mois	0.5
Faible	L'écart entre les défaillances survenues sur les équipements est supérieur à un mois	0.1
aucun	L'écart entre les défaillances survenues sur les équipements est supérieur à la durée de l'intervalle d'essai	0

Tableau 2 Facteur de simultanéité

Facteur de cause partagée	Description	Facteur associé
Fort	L'analyste a la conviction que les causes de défaillances multiples survenues sont identiques	1
Moyen	L'analyste est quasiment certain que la cause profonde des défaillances multiples survenues est identique	0.5
Faible	L'analyste a un doute sur le fait qu'une même cause est à l'origine des défaillances multiples	0.1
Aucun	L'analyste a la conviction que les défaillances multiples survenues proviennent de causes différentes	0

Tableau 3 Facteur de cause partagée

Le vecteur moyen qui en résulte est calculé comme suit :

$$F_{0moy} = cq \prod_{i=1}^m (1-p_i) + (1-cq) \sum_{i=1}^m (1-p_i)$$

$$F_{1moy} = cq \sum_{i=1}^m p_i (1-p_i) + (1-cq) \sum_{i=1}^m p_i$$

$$F_{kmoy} = cq \sum_{i=1}^m p_i (1-p_i)$$

$$F_{mmoy} = cq \prod_{i=1}^m p_i$$

Ce qui donne, par exemple, dans un groupe de deux matériels, si l'on reprend la notation précédente :

- p_1 probabilité que le matériel 1 soit défaillant ;
- p_2 probabilité que le matériel 2 soit défaillant ;
- q facteur de simultanéité ;
- c facteur de cause partagée.

$$F_{0moy} = cq(1-p_1)(1-p_2) + (1-cq)(1-p_1 + 1-p_2)$$

$$F_{1moy} = cq[p_1(1-p_2) + p_2(1-p_1)] + (1-cq)(p_1 + p_2)$$

$$F_{2moy} = cqp_1p_2$$

Si, par exemple, dans une fiche DCC d'un groupe de 2 matériels nous faisons les hypothèses suivantes :

- Le matériel 1 a subi une défaillance complète, le matériel 2 une amorce de défaillance ;
- Le facteur de cause partagé est élevé ;

- Le facteur de simultanéité est faible.

Alors :

$$m = 2; \quad k = 2; \quad p_1 = 1; \quad p_2 = 0.1; \quad c = 1; \quad q = 0.1$$

Et :

$$F_{0moy} = 0.81; \quad F_{1moy} = 1.08; \quad F_{2moy} = 0.01$$

La représentation des défaillances indépendantes peut également être menée au moyen du formalisme présenté précédemment, dans le cas de défaillances indépendantes :

$$q = 0 \text{ et } c = 0.$$

Estimation des paramètres de fiabilité

Le vecteur d'impact est calculé pour chaque défaillance recueillie par le retour d'expériences. Les défaillances indépendantes et de cause commune observées pendant la période d'observation sont regroupées afin de déterminer le nombre d'événements n_k impliquant la défaillance de k matériels parmi les m du groupe pendant la durée T d'observation. La relation est la suivante :

$$n_k = \sum_{i=1}^r F_{k moy}^i$$

Où $F_{k moy}^i$ est le $k^{ième}$ élément du $i^{ième}$ vecteur d'impact moyen sur les r vecteurs d'impact évalués pour le groupe d'équipements.

Donc, par exemple pour une taille du groupe $m = 2$ et pour un nombre total r de défaillances observées, on a :

$$n_0 = F_{0moy}^1 + F_{0moy}^2 + \dots + F_{0moy}^r$$

$$n_1 = F_{1moy}^1 + F_{1moy}^2 + \dots + F_{1moy}^r$$

$$n_2 = F_{2moy}^1 + F_{2moy}^2 + \dots + F_{2moy}^r$$

Suit le calcul des paramètres de fiabilité.

On définit $\alpha_k^{(m)}$ la probabilité qu'un événement recensé pour un groupe de m matériels implique la défaillance par cause commune de k matériels. Elle se calcule comme suit :

$$\alpha_k^{(m)} = \frac{n_k}{\sum_{i=1}^m n_i}$$

$\alpha_k^{(m)}$ est estimé comme le rapport entre « le nombre de défaillances de k matériels dans un groupe de m matériels » et « le nombre total de défaillances recensées dans un groupe de m matériels »

On définit également :

- β la probabilité conditionnelle de défaillance de DCC d'ordre 2 ou plus sachant qu'un matériel est défaillant ;
- γ la probabilité conditionnelle de défaillance de DCC d'ordre 3 ou plus sachant qu'un matériel est défaillant ;
- δ la probabilité conditionnelle de défaillance de DCC d'ordre 4 ou plus sachant qu'un matériel est défaillant.

Les formules utilisées sont les suivantes :

$$\beta = \frac{\sum_{k=2}^m kn_k}{\sum_{k=1}^m kn_k}$$

$$\gamma = \frac{\sum_{k=3}^m kn_k}{\sum_{k=1}^m kn_k}$$

$$\delta = \frac{\sum_{k=4}^m kn_k}{\sum_{k=1}^m kn_k}$$

b) Remarques et critiques

Modélisation des DCC par le vecteur d'impact moyen

Les valeurs choisies pour quantifier les différents facteurs, facteur d'impact, facteur de simultanéité, facteur de cause partagée, sont des valeurs artificielles. Toutefois cette méthode a l'avantage d'être conservatrice : elle prend en compte tous les phénomènes douteux et de ce fait la probabilité de DCC est surestimée.

La méthode du « tout ou rien », précédemment mise en place, qui ne prenait en compte que les défaillances effectives, était plus rigoureuse sur le plan mathématique. Mais la nouvelle méthode est plus pénalisante et elle n'amène donc pas à des erreurs sur le plan de la sûreté.

Calcul des probabilités conditionnelles

Les formules utilisées afin de calculer les probabilités conditionnelles α , β , γ , δ sont pertinentes et rigoureuses sur le plan mathématique. Elles se réfèrent aux formules de Bayes :

$$p(A \setminus B) = \frac{p(A \cap B)}{p(B)}$$

Nous ne préconisons aucune nouvelle méthode pour l'estimation des paramètres de DCC.

c) Exemple d'application : les pompes RRA

Cette partie illustre la méthode d'estimation des paramètres DCC résumée dans la première partie par le moyen d'un exemple concret. L'exemple pris en compte est celui des pompes RRA. Les données numériques utilisées proviennent du document suivant :

- Gallet, *Note technique sur l'estimation des paramètres de fiabilité des pompes RRA des REP tous paliers*, EDF, Janvier 2006 ;

Formules utilisées

Le système des pompes RRA consiste en un système de redondance d'ordre 2. Le paramètre DCC qui nous intéresse principalement est donc β : la probabilité que le deuxième matériel soit défaillant si le premier est défaillant, qui se calcule comme suit :

$$\beta = \frac{\sum_{k=2}^m kn_k}{\sum_{k=1}^m kn_k}$$

Soit :

$$\beta = \frac{2n_2}{n_1 + 2n_2}$$

Où :

- n_1 et n_2 représentent le nombre de groupes recensés de 1 et 2 composants défaillants.

Données

Le retour d'expériences permet d'extraire l'ensemble des défaillances indépendantes et par cause connues recensées pendant la période prise en compte.

Les défaillances de fonctionnement recensées par le retour d'expériences sont les suivantes.

Paliers	Nombre de défaillances indépendantes de fonctionnement
900	7.6
1300	5.6
N4	1.2
Tous paliers confondus	14.4

Tableau 4 Défaillances indépendantes relevées

Pour ce qui concerne les DCC relevées, voici les facteurs correspondants.

	N°événement	p1	p2	c	q	F ₁	F ₂
palier 900	1	0.5	0.1	0.5	1	0.5	0.025
	2	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
	3	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
	4	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
	5	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
	6	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
	7	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
	8	0.1	0.1	1	0.5	0.18	0.005
	9	0.1	0.1	1	0.5	0.18	0.005
	10	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
palier 1300	11	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
palier 1400	12	0.1	0.1	1	1	0.18	0.01
Tous paliers confondus						2.48	0.125

Tableau 5 DCC relevées

Estimation des paramètres DCC

Le nombre total de défaillances ayant touché un matériel n_1 est donc égal à :

$$n_1 = \sum F_1 = 14.4 + 2.48 = 16.88$$

Le nombre total de défaillances ayant touché un matériel n_2 est donc égal à :

$$n_2 = \sum F_2 = 0.125$$

En découle le calcul de β la probabilité conditionnelle de défaillance de DCC d'ordre 2 ou plus sachant qu'un matériel est défaillant :

$$\beta = \frac{2n_2}{n_1 + 2n_2} = \frac{2 \times 0.125}{16.88 + 2 \times 0.125} = \frac{0.25}{17.13} \approx 1.5 \cdot 10^{-2}$$

La probabilité que si la seconde pompe RRA soit défaillante si la première est défaillante est de l'ordre de $1.5 \cdot 10^{-2}$.

3) Estimation du taux d'indisponibilité

a) Méthode utilisée par l'IRSN

Ce document présente la modélisation des bulles et la méthode d'estimation du taux d'indisponibilité d'une bulle. Le document de référence pris en compte est le suivant :

- J-M. Spies, *R-EPS 900 – Modélisation des indisponibilités*, EDF, Avril 1998

Définition

Le calcul des indisponibilités repose sur la définition des bulles d'indisponibilité. Une bulle d'indisponibilité est un ensemble fonctionnel qui regroupe tous les matériels dont l'indisponibilité de l'un rend l'ensemble totalement indisponible.

Le taux d'indisponibilité d'une bulle quantifie la probabilité qu'à une date t donnée, le matériel soit objet d'une maintenance.

L'analyse de l'historique permet de connaître, pour chaque bulle élémentaire :

- la durée de l'indisponibilité des bulles élémentaires ;
- les temps passés dans les différents états par tranche.

Le taux d'indisponibilité de chaque bulle est ainsi calculé selon des formules analogues à l'estimation du taux de défaillance, la formule est la suivante :

$$\text{taux indisponibilité} = \frac{\text{durée indisponibilité}}{\text{temps passé}}$$

Exemple

On prend l'exemple numérique de la bulle d'indisponibilité ASG003PO du système ASG dans l'état A. Les données numériques sont les suivantes :

- La durée totale d'observation du système à l'état A dans la tranche 1 est de 58 557 heures.
- La durée totale d'indisponibilité enregistrée pendant cette période est égale à 51 heures. Ce qui amène au calcul suivant :

$$\text{taux indisponibilité} = \frac{51}{58557} \approx 5.84 \cdot 10^{-4}$$

Remarques

Si aucune indisponibilité n'a été enregistrée, alors le taux d'indisponibilité d'une bulle est nul. Il n'y a pas de facteur d'erreur associé au taux d'indisponibilité.

b) Critiques et améliorations

Nous proposons une amélioration de l'estimation du taux d'indisponibilité en prenant en compte la distinction entre ces deux types de maintenances :

- la maintenance préventive, qui est une maintenance programmée ;
- la maintenance fortuite qui suit la défaillance d'un matériel constituant la bulle.

Dans le cas de la maintenance préventive, le taux d'indisponibilité peut être nul pour certaines bulles où aucune maintenance n'est programmée.

Par contre, dans le cas de la maintenance fortuite, le taux ne devrait jamais être nul, même si aucune panne n'a été enregistrée pendant la durée d'observation. Dans ce cas, il faudrait utiliser une méthode analogue à celle élaborée pour estimer le taux de défaillance d'un matériel.

Le taux d'indisponibilité attribué à une indisponibilité fortuite peut être calculé comme suit :

$$\text{taux indisponibilité} = \lambda \cdot \tau$$

Où :

- λ probabilité que la bulle soit indisponible ;
- τ temps moyen de réparation.

Cette méthode était également proposée dans le document suivant :

- Blin, *R EPS-G.4 - Données de fiabilité*, IRSN, Novembre 1989

λ est calculé de la même façon que ce que l'on a proposé pour le taux de défaillance d'un matériel.

τ est calculé en déterminant le temps moyen de réparation ou peut être estimé par des experts.

Dans le cas de bulles pour lesquelles il n'y a pas eu d'indisponibilité, on peut considérer que le taux de défaillance correspond à :

$$\lambda = \frac{1}{T + 2}$$

Où T correspond au nombre total d'heures d'observations prises en compte.

4) Estimation de la fréquence des événements initiateurs

a) Méthode utilisée

Un événement initiateur est un événement qui perturbe le fonctionnement normal de l'installation, et nécessite l'intervention d'au moins un système de sûreté ou de sauvegarde. C'est à partir des événements initiateurs que peuvent se dérouler des séquences accidentelles.

Le calcul des probabilités repose en priorité sur le retour d'expérience :

- pour les événements pouvant être observés un nombre de fois relativement important, les valeurs utilisées sont issues de l'expérience d'exploitation des centrales EDF ;
- pour les événements moins fréquents, les valeurs utilisées sont issues du retour d'expérience mondial ;
- pour les événements très rares, les valeurs sont estimées par jugement en tenant compte des études étrangères.

Déterminer la fréquence f d'un événement initiateur revient à déterminer le taux de défaillance d'un matériel. Elle se fait par une formule analogue :

$$f = \frac{n}{T}$$

Où :

- n correspond au nombre d'événements initiateurs observés;
- T correspond à la durée cumulée prise en compte.

b) Critiques et améliorations

L'estimation de la fréquence d'un événement initiateur est analogue à l'estimation du taux de défaillance d'un matériel ; elle peut donc se faire selon la même méthode.

Malheureusement, les rapports techniques qui donnent la fréquence des différents événements initiateurs ne précisent pas le détail des calculs : ni la durée prise en compte, ni le nombre d'événements observés ne sont fournis.

Nous conseillons l'utilisation de rapports techniques qui justifient les valeurs adoptées. Même si le nombre d'événements initiateurs observés est nul, il est important de connaître la durée prise en compte.

c) Exemple : rupture du tube de générateur de vapeur

Dans le document : A. Blin, R. EPS/G/3, *EPS 900 MWE – Evénements initiateurs*, IRSN, Février 1990, à la page 24, nous trouvons la donnée suivante : « On a observé dans le parc mondial des REP du type Westinghouse pour un total de 1000 années réacteur 6 ruptures de tubes simples de GV et zéro défaillance simultanée ».

La fréquence annuelle de l'initiateur RTGV est alors égale à :

$$f = \frac{n}{T} = \frac{6}{1000} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ an}^{-1}$$

La fréquence horaire correspondante est égale à :

$$f = \frac{n}{T} = \frac{6}{1000 * 365 * 24} = 6.84 \cdot 10^{-7} \text{ h}^{-1}$$

En utilisant la méthode proposée par la SCM pour estimer le taux de défaillance d'un matériel nous obtenons un encadrement de la fréquence à 95% égal à :

$$0 < f < 2.14 \cdot 10^{-6}$$

III. Prise en compte du facteur humain

La méthodologie sur laquelle repose la prise en compte du facteur humain est présentée dans les documents suivants :

- C. Villeroux-Lombard, *R-EPS/G/5 – Prise en compte du facteur humain*, IRSN, Avril 1990
- M. Lambert, *R DES/SECCA n°30 - Modèle de Quantification du Facteur Humain pour l'EPS 1 : PANAME 2002*, IRSN, Mai 2002

a) Modélisation du facteur humain

Le facteur humain joue un rôle fondamental lors des situations accidentelles ; la prise en compte de ce facteur est donc essentielle. Par ailleurs, il s'agit d'un domaine particulièrement difficile ; en effet les comportements humains présentent des caractéristiques qui rendent impossible un traitement systématique et logique comme dans le cas des matériels. Nous résumons ci-dessous la modélisation de l'échec du comportement humain qui a été mise en place ; elle résulte d'un travail considérable s'étendant sur des années.

Séquences

L'échec du comportement humain est modélisé en plusieurs séquences qui se succèdent chronologiquement :

1. le comportement de l'équipe de conduite ;
2. le comportement de l'ingénieur de sûreté ;
3. l'intervention des équipes de crise.

Dans chaque cas on quantifie la probabilité d'échec en faisant appel à différents types de résultats tels que :

- des courbes élaborées par EDF à partir des essais de mise en situation réelle ;
- les valeurs spécifiques obtenues par retour d'expériences ;
- des modèles élaborés par jugement d'expert ;
- des données de simulation.

Pour l'équipe de conduite sont calculées les probabilités suivantes :

- la probabilité de non prise de la consigne en fonction du temps;
- la probabilité d'une erreur d'exécution en cours d'application d'une consigne.

Pour ce qui concerne le rôle de l'ingénieur de sûreté, les probabilités suivantes sont prises en compte :

- la probabilité d'absence de l'ingénieur de sûreté ;
- la probabilité d'échec.

Comportement de l'équipe de conduite

Probabilité de non prise de la consigne en fonction du temps

Des courbes donnent la probabilité de non prise en compte de la consigne en fonction du temps T dont dispose l'équipe opérateur pour réaliser le diagnostic et choisir la consigne adaptée à l'accident. Cette probabilité s'exprime ainsi :

$$P(T) = 1 - \frac{n(t < T)}{N}$$

Où :

- n correspond au nombre de fois où la consigne a été prise,
- N correspond au nombre d'observations.

Les courbes qui donnent la probabilité de non prise de la consigne en fonction du temps T utilisées pour quantifier l'échec de diagnostic figurent ci-dessous. Le choix de la courbe se fait en fonction des signaux d'alarme utilisés.

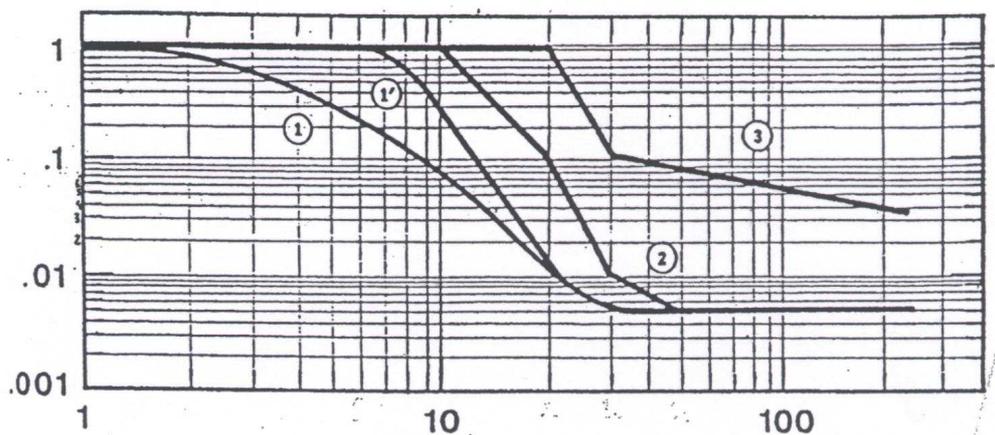


Figure 8 Probabilité de non prise de la consigne au bout du temps T (travail Swain)

Erreur d'exécution en cours d'application d'une consigne

La probabilité d'une erreur d'exécution correspond au produit suivant :

$$pE = pB \times kF \times pNR$$

Où :

- pB correspond à la probabilité de base de l'ordre de 10^{-2} ;
- kF coefficient de contexte : ce coefficient est destiné à représenter les conditions dans lesquelles se déroule l'accident il prend des valeurs discrètes (1/3;1;3;9) suivant que les conditions sont défavorables, moyennes ou favorables ;
- pNR correspond à la probabilité de non récupération par l'équipe, elle est élaborée par jugement d'expert.

Dans les tableaux ci-dessous, nous donnons quelques exemples de valeurs de ces probabilités.

Erreur de base	pB
Test logique	$2 \cdot 10^{-2}$
Omission	$6 \cdot 10^{-2}$

Tableau 6 Exemples de valeurs de la probabilité de base pB

Situation	kF
Action bien connue	1/3
Situation nominale de référence	1
Stress aigu	3
Stress aigu et EA	9

Tableau 7 Correspondance entre situations et évaluations du coefficient de contexte kF

Facteur de récupération	pNR (délai < 30 minutes)
Pas de facteur de récupération	$6 \cdot 10^{-1}$
Redondance explicite	10^{-1}
Signal	$3 \cdot 10^{-2}$

Tableau 8 Exemples de valeurs de la probabilité de non récupération pNR

Probabilité de non récupération par l'ingénieur de sûreté

La probabilité de non récupération par l'ingénieur de sûreté est la somme de la probabilité de son absence et de la probabilité d'échec de la consigne.

La probabilité d'absence de l'ingénieur de sûreté au bout d'un certain temps T se déduit à partir de courbes obtenues à partir de simulations.

La probabilité d'échec de l'action de l'ingénieur de sûreté se déduit à partir de résultats d'essais de mise en situation réelle, sa valeur est de l'ordre de 10^{-1} .

Probabilité d'échec globale

La probabilité d'échec globale correspond au produit des probabilités d'échec de l'équipe de conduite et d'échec de l'ingénieur de sûreté.

Exemple

Pour illustrer la démarche utilisée pour la prise en compte du facteur humain, nous présentons l'exemple de la perte totale de l'eau alimentaire.

Action des opérateurs

Diagnostic

Suivant l'initiateur, le diagnostic peut être rendu plus ou moins difficile. Dans ce cas la courbe moyenne du modèle de diagnostic est utilisée.

Si on prend en compte un délai compris entre 0 et 60 minutes, la probabilité d'échec de diagnostic est égale à :

$$P = 5 \cdot 10^{-3}$$

Probabilité de non exécution de l'action

La probabilité de non exécution de la mise en service manuelle de l'IS est :

$$P = 6 \cdot 10^{-2} \times 1 \times 3 \cdot 10^{-2} = 1.8 \cdot 10^{-3}$$

Avec :

- $6 \cdot 10^{-2}$ probabilité d'omission d'une action importante ;
- 1 facteur de contexte ;
- $3 \cdot 10^{-2}$ probabilité de non récupération.

Au final la probabilité d'échec par les opérateurs est égale à :

$$P = 5 \cdot 10^{-3} + 1.8 \cdot 10^{-3} = 6.8 \cdot 10^{-3}$$

Action de l'ingénieur de sûreté

La probabilité d'absence de l'ingénieur de sûreté à 1 heure est de $7.1 \cdot 10^{-2}$, la probabilité de non détection du dépassement d'un critère est de 0.1, d'où la probabilité d'échec de l'action de l'ingénieur de sûreté:

$$p = 7.1 \cdot 10^{-2} + 0.93 \times 0.1 = 0.16$$

Probabilité d'échec globale

La probabilité d'échec globale de l'action de l'opérateur et du CEI si l'on prend un délai entre 0 et 60 minutes est égale au produit des deux probabilités :

$$P = 6.8 \cdot 10^{-3} \times 0.16 = 1.1 \cdot 10^{-3}$$

b) Critique

Ces documents représentent un travail considérable en ce qui concerne l'identification des situations à risque, leur typologie, leur déroulement et les différents scénarios possibles. Nous sommes plus réservés en ce qui concerne le traitement mathématique qui est fait après cette identification.

Les données de probabilités, qui nous sont fournies par le moyen de tableaux et courbes, ne sont pas accompagnées par le détail des données et des calculs utilisés. De ce fait l'estimation de l'incertitude associée à ces probabilités n'est pas possible.

Par ailleurs nous remarquons que les valeurs présentées dans les deux documents demeurent inchangées, bien que le premier document soit de dix ans antérieur au second.

Ceci signifie que, bien que la modélisation ait été rendue plus complexe, le retour d'expériences n'a pas été exploité afin de valider les lois de probabilité proposées dans le premier document. Or cette confrontation des valeurs proposées, qui nous paraissent artificielles, avec le retour d'expériences est essentielle.

La validation des lois de probabilité utilisées pour la prise en compte du facteur humain ne peut se faire que par exploitation d'un retour d'expériences. Pour une meilleure quantification de l'échec lié au comportement humain, nous suggérons donc la mise en place d'un retour d'expérience systématique tel que celui mis en place pour l'estimation des taux de défaillances ou des indisponibilités.

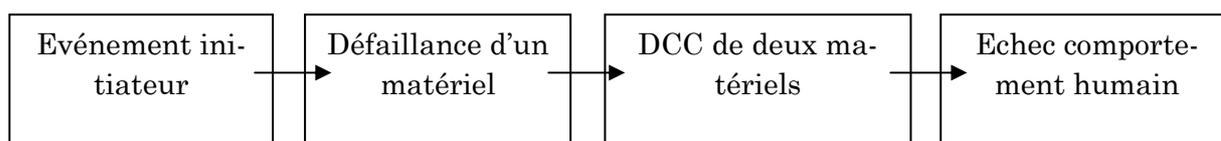
IV. Exemple de comparaison

Afin de présenter une comparaison plus globale des lois de probabilité actuellement utilisées par l'IRSN et des méthodes proposées par la SCM nous avons élaboré un exemple simple qui correspond à un enchaînement de plusieurs cas concrets présentés précédemment.

Scénario

Le scénario imaginé est représenté ci-dessous et consiste en l'enchaînement des étapes suivantes :

- Événement initiateur ;
- Défaillance d'un matériel ;
- Défaillance simultanée de deux matériels par DCC ;
- Echech du comportement humain;



Données

Les probabilités associées à chaque étape de ce scénario sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	Evaluation IRSN	Evaluation SCM	Borne supérieure SCM à 95%
Rupture d'un tube de générateur de vapeur (par an)	$6 \cdot 10^{-3}$	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-2}$
Défaillance du moteur 6.6 kV ANG (par jour)	$5 \cdot 10^{-5}$	$6.7 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-4}$
Défaillance simultanée des deux pompes RRA (par jour)	$9.3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$

Tableau 9 Valeurs utilisées

Pour la prise en compte du facteur humain, nous ne disposons pas de retour d'expérience, mais seulement de la valeur IRSN ; nous l'utilisons donc telle quelle : 10^{-3}

Résultats

En supposant que ces événements sont indépendants, la probabilité finale correspond au produit de la probabilité liée à chaque étape. Voici les résultats :

Evaluation IRSN : 2.8×10^{-15}

Evaluation SCM : 4.7×10^{-15}

Cette évaluation est obtenue en faisant le produit des espérances des différentes lois.

Borne supérieure SCM à 86 % : 1.2×10^{-13}

Cette borne supérieure est obtenue en faisant le produit des trois bornes supérieures à 0.95 pour les trois premières défaillances ($0.86 = 0.95^3$) ; pour le facteur humain, on utilise simplement la valeur nominale, puisque aucune autre estimation n'est disponible.

Les ordres de grandeurs sont les mêmes. La méthode SCM n'apporte pas des modifications importantes des résultats obtenus. Elle permet cependant d'obtenir des résultats plus rigoureux associés à une incertitude.