

**FUEL PINS IN-PILE RELIABILITY AND END-OF-LIFE
FAILURE PROBABILITY ESTIMATE**

**(Fiabilité en exploitation des éléments combustibles
et estimation de la probabilité de ruptures)**

J. TRUFFERT

*C.E.A.-Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache,
Département de Développement des Eléments Combustibles,
B.P. No. 1, F-13115 Saint-Paul-lez-Durance, France*

The Weibull statistical failure model is used to describe the in-pile reliability. The driving parameter is a mechanical damage function which merges strains and the mechanical property of the can under irradiation.

The fitting is based on :

- some attribute of this damage function
- and the good behaviour of a large number of Fortissimo driver fuel pins.

Assuming the same kind of failure, the extrapolation, in the near future, allows to estimate the rupture rate rise.

For example a peak burn-up increase from 8.2 to 11 at% leads to expect a doubling of the end of life failure probability.

1 - OBJECTIF

Dans ce document, nous étudions la fiabilité a posteriori d'un ensemble d'assemblages fissiles standards irradiés dans RAPSODIE.FORTISSIMO.

Cette étude est faite dans le but d'augmenter le taux de combustion opérationnel des assemblages nourriciers. Cette augmentation est bien sûr "payée" par un risque supplémentaire de rupture de gaine; toutes choses égales concernant le fonctionnement du réacteur et la fabrication des éléments combustibles, nous essayons d'évaluer ce risque dans le cadre des hypothèses suivantes :

- La dégradation du gainage est bien décrite par la fonction de dommage.
- Le fonctionnement du réacteur (niveau des températures, nombre de manutentions et cyclages) ne sera pas sensiblement modifié.

2 - L'APPROCHE THEORIQUE

2.1. Première méthode

Un assemblage est caractérisé par le dommage maximum D_m qui est subi par l'une des gaines.

Il est supposé que D_m décrit entièrement la probabilité de rupture de gaine dans tout l'assemblage : D_m est la variable "moteur de dégradation" pour l'assemblage.

Dans ce cas, en utilisant les représentations classiques de la fiabilité F . (Lois de Weibull)

$$F(D_m) = 1 - e^{-\left(\frac{D_m}{D_0}\right)^\beta}$$

avec

$F(D_m)$ probabilité cumulative de défaillance entre le début de l'irradiation et l'instant où le dommage maximum est égal à D_m .

D_0 et β sont des coefficients à évaluer.

Pour un ensemble de J assemblages, la probabilité de n'avoir aucune rupture de gaine s'établit ainsi :

Prob. (non rupture sur J assemblages)

$$\begin{aligned} &= \text{Prob. (non rupture sur l'assemblage 1)} \\ &\times \text{Prob. (" " " 2)} \\ &\times \text{Prob. (" " " J)} \\ &= \left[1 - F(D_{m1}) \right] \times \left[1 - F(D_{m2}) \right] \times \dots \times \left[1 - F(D_{mj}) \right] \end{aligned}$$

$$= \prod_{i=1}^J e^{-\left(\frac{D_{mi}}{D_0}\right)^\beta} = e^{-\sum_{i=1}^J \left(\frac{D_{mi}}{D_0}\right)^\beta}$$

La probabilité d'avoir au moins une rupture sur les J assemblages est :

$$P(\text{rupt.} / J \text{ assemblages}) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^J \left(\frac{D_{mi}}{D_0}\right)^\beta}$$

2.1.1. Evaluation de D_0

La fonction dommage est normée et a été établie de façon à garantir un bon fonctionnement si $D \leq 1$

Il convient de prendre $D_0 = 1$

2.1.2. Evaluation de β

Nous utilisons le fait expérimental :

"Pour les J assemblages il n'y a pas eu de ruptures".

La probabilité d'une rupture sur l'ensemble des assemblages pour D_0 fixé peut s'écrire en fonction de β , et nous savons qu'elle est faible.

au seuil de confiance 0.632

$$\sum^J \left(\frac{D_{mi}}{D_0} \right)^\beta < \sum^J \left(\frac{D_{mi}}{D_0} \right)^{\beta_0}$$

β_0 étant la solution de :

$$\sum \left(\frac{D_{mi}}{D_0} \right)^\beta = 1$$

Dans tous les cas étudiés $D_{mi} < D_0$ donc toute loi avec $\beta > \beta_0$ peut représenter le phénomène. $\beta = \beta_0$ est l'évaluation la plus pessimiste, et nous la conservons.

2.2. Seconde méthode

Le cumul des dommages se fait avec une pondération par les longueurs; le résultat est une probabilité linéique (par unité de longueur) ψ .

2.2.1. Définition de $\psi(D)$

La probabilité de rupture $P(D, dx)$ d'un élément de gaine de longueur dx et irradié jusqu'au dommage D est :

$$P(D, dx) = dx \times \psi(D)$$

Relation entre P et ψ pour une longueur élevée.

Pour une longueur L de gaine

$$P(D, L) = 1 - Q(D, L)$$

Q étant la probabilité de non rupture

$$\text{or } Q(D, L) = \prod_1^{L/dL} Q(D, dL) \text{ probabilités composées.}$$

La probabilité de non rupture sur la longueur L est le produit des probabilités de non rupture sur chacun des éléments de longueur dL .

$$Q(D, L) = \prod_1^{L/dL} (1 - P(D, dL))$$

$$\begin{aligned} \text{Log } Q(D, L) &= \sum_1^{L/dL} \text{Log}(1 - P(D, dL)) &= \frac{L}{dL} \text{Log}(1 - \psi(D) \cdot dL) \\ &= \frac{L}{dL} \left(-\psi(D) \cdot dL + \frac{\psi^2(D)}{2} dL^2 + \dots \right) \end{aligned}$$

et donc à la limite pour $dL \rightarrow 0$ $\text{Log } Q(D, L) \rightarrow -L \psi(D)$

$$Q(D, L) = e^{-L \cdot \psi(D)}$$

$$P(D, L) = 1 - e^{-L \cdot \psi(D)}$$

2.2.2. Probabilité de rupture pour un assemblage

L'état de dommage de l'assemblage est décrit par un histogramme.

L_1	mètres de gaine au dommage	D_1
L_i	"	D_i
L_n	"	D_n

En employant la même méthode que précédemment et en désignant par P_A la probabilité de rupture pour un assemblage

$$P_A = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n L_i \cdot \Psi(D_i)}$$

2.2.3. Probabilité de rupture pour J assemblages

Le cumul des longueurs et des dommages se fait de la même manière; l'histogramme des longueurs L_i à un dommage D_i s'applique à l'ensemble des assemblages.

P (1 rupture / J assemblages)

$$= 1 - e^{-\sum_{i=1}^m L_i \Psi(D_i)}$$

Ψ est cherché sous la forme

$$= 1 - e^{-\left(\frac{D}{D_1}\right)^\gamma}$$

Ψ est la probabilité linéique (M^{-1})

D_1 et γ sont des coefficients à déterminer.

3 - FONCTION DOMMAGE - SON CALCUL

Définition actuelle de la Fonction Dommage

Nous utilisons une fonction de dommage qui tient compte des propriétés de l'acier sous irradiation et des sollicitations mécaniques subies par la gaine. C'est une fonction croissante au cours du temps. Son évaluation est faite à l'aide d'un code de calcul.

L'ensemble des assemblages est décrit au tableau 1, nous nous sommes limités aux assemblages standards gaines d'acier 316 hypere trempé.

Pour tenir compte des cyclages du combustible, sans utiliser l'historique exact des irradiations, nous avons imposé un cyclage de puissance tous les 22 Jerc, soit environ deux cyclages par campagne.

La description de l'irradiation est faite à partir de l'historique d'irradiation et des caractéristiques thermiques moyennes par position à puissance réacteur nominale.

Le calcul de la fonction dommage est fait pour 12 niveaux régulièrement distribués le long de la colonne fissile.

4 - EVALUATION DES COEFFICIENTS

Le calcul de la fonction dommage a été fait pour 55 assemblages standards de 61 aiguilles.

Le résultat de ce calcul est fourni pour les assemblages les plus sollicités dans le tableau 1.

Il est manifeste que les valeurs maximales pour une aiguille sont atteintes dans la zone de flux max.; dans cette partie des aiguilles, c'est le dommage de cyclage qui est prépondérant. Le dommage de fluage est généralement faible à l'exception de l'assemblage N2.

4.1. Première méthode

Le choix du coefficient β est fait à partir de la relation P_r fonction de β pour le groupe d'assemblage pris en compte (Fig,1).

Nous avons pris $P_r = 1 - e^{-1} = 0,632$

Valeur arbitraire mais compatible avec le fait qu'il n'y a pas eu de ruptures de gaines.

Il est possible de faire un choix plus conservatif par exemple $P_r = 0,8$ mais dans ce cas l'extrapolation des lois trouvées risque de n'avoir aucun intérêt, la prudence étant alors

excessive. De plus, cette attitude serait en contradiction avec notre idée de départ qui est rappelons-le :

Le bon comportement des assemblages nourriciers dans FORTISSIMO incite à augmenter le taux de combustion.

4.2. Deuxième méthode

Le choix du seuil $P_r = 0,632$ conduit à la définition d'un couple γ , D_1 et à priori rien ne permet de définir D_1 .

Cependant, puisque nous cherchons des défauts de vieillissement, γ doit être supérieur à 1. (Probabilité de rupture qui augmente avec D).

La loi 2 a été définie avec un coefficient γ du même ordre que le coefficient β de la loi 1. (Même allure de croissance de la probabilité de rupture que la loi 1).

Cela conduit à prendre $\gamma = 1,72$ $D_1 = 3,62$ (voir figure 3)

5 - PROJECTION DANS UN FUTUR PROCHE DE CES LOIS

Compte-tenu de la diversité de "vie en pile", puisque rares sont les assemblages qui suivent le même cheminement, nous nous sommes restreints à l'étude simplifiée des assemblages qui passent toute leur vie dans la même couronne,

L'évaluation du nombre moyen de ruptures par année calendaire (250 Jepc) est faite en pondérant la probabilité de rupture individuelle par le nombre moyen d'emplacements utilisés par les assemblages nourriciers (voir tableau 2). Pour des assemblages gainés avec un acier 316 hypertrempé, le nombre moyen de ruptures attendu tous les 250 Jepc est reporté Figure 4.

Pour le centre du coeur (Position 000, 101, 201, 202) les 2 lois sont reportées.

La loi 1 semble la plus sévère,

L'évaluation finale est faite en prenant la moyenne des deux lois.

En acceptant environ une rupture par année calendaire, nous limiterons donc le Taux à 11 at% s'il n'est pas fait de distinction par couronne. Si par contre l'on admet une modulation du taux en fonction de la couronne, la limitation

Taux = 10,4 at % au centre et pour les couronnes 1 et 2

Taux = 11,9 at % pour les couronnes 3, 4 et 5 conduit au même risque.

TABLEAU 1

FONCTION DOMMAGE (EN 10^{-3}) POUR LES ASSEMBLAGES LES PLUS CHARGES

ASSEMBLAGE	Niveau (cm)	par rapport au plan médian du coeur. Longueur de la colonne fissile 32 cm.											
	Nb. Jepc	- 16	- 13,1	- 10,2	- 7,3	- 4,4	- 1,4	+ 1,4	+ 4,4	+ 7,3	+ 10,2	+ 13,1	+ 16
N1	369	28	25	26	49	280	285	318	163	67	12	10	17
N2	293	9	8	9	34	151	201	246	141	81	88	157	195
N3	308	15	17	18	54	221	223	175	82	24	2	8	11
N4	390	22	18	9	11	91	174	146	95	42	6	0	0
N5	334	13	17	17	20	167	152	122	69	20	0	3	5
N6	430	10	24	21	17	11	92	99	156	86	34	29	35
N7	347	12	15	18	11	98	154	126	80	31	2	0	0
N8	437	29	27	18	18	59	94	104	75	36	13	0	0
N9	482	32	28	24	19	34	80	111	89	51	14	1	0
N10	495	32	28	21	21	23	65	106	90	54	20	1	0
N11	480	28	26	22	28	29	98	121	94	52	19	0	0

TABLEAU 2

POSITIONS UTILISEES

Couronne	STANDARD 1		STANDARD 3		TOTAL 1 + 3		
	Nb. JEPc réalisés	Nb. Moyen de positions utilisées	Nb. JEPc réalisés	Nb. Moyen de positions utilisées	Nb. JEPc réalisés	Nb. Moyen de positions utilisées	Nb. de positions par type
0000	292	.29	86	.09	378	.38	1
0101	4 536	4,53	642	0.64	5 178	5.17	6
0201	2 783	2.78	279	0.28	3 062	3.06	6
0202	970	0.97	101	0.1	1 071	1.07	6
0301	8 118	8.11	1 739	1.74	9 857	9.85	12
0302	1 291	1.29	84	0.08	1 375	1.37	6
0402	7 211	7,20	262	0.26	7 473	7.47	12
0403	3 924	3,92	283	0.28	4 207	4,20	6
0501	8 580	8.57	412	0.41	8 992	8.98	12
0502	1 648	1,64	226	0.22	1 874	1,87	12

Fig.1

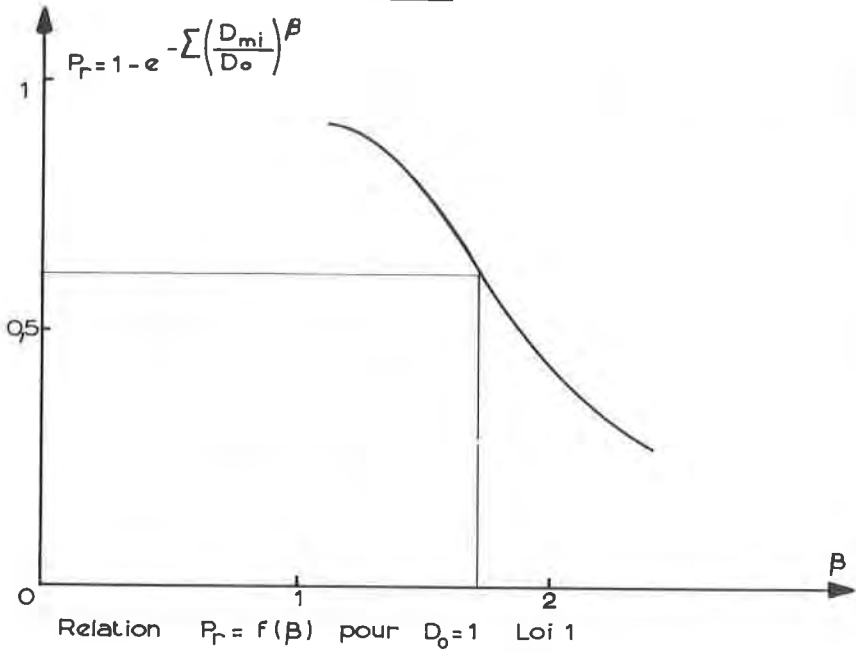


Fig. 2

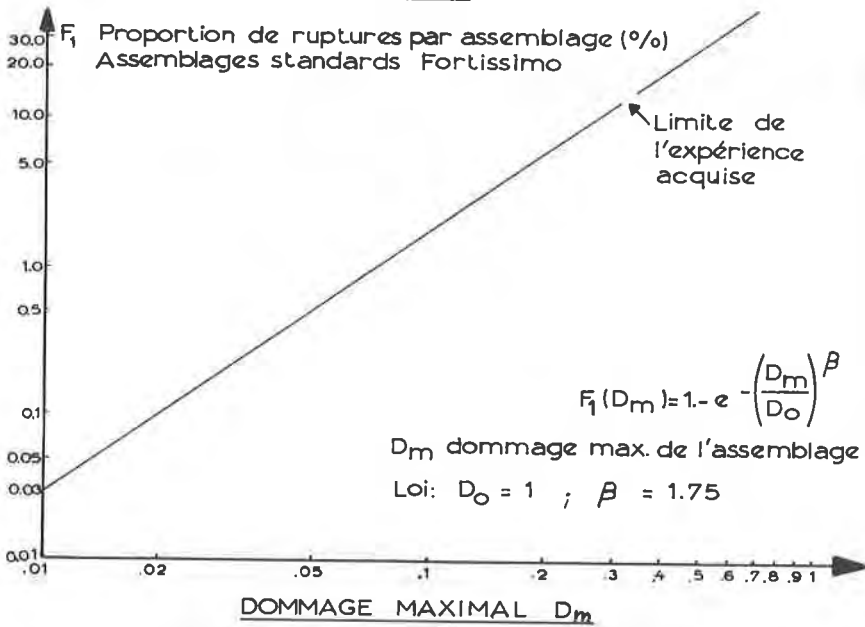


Fig. 3

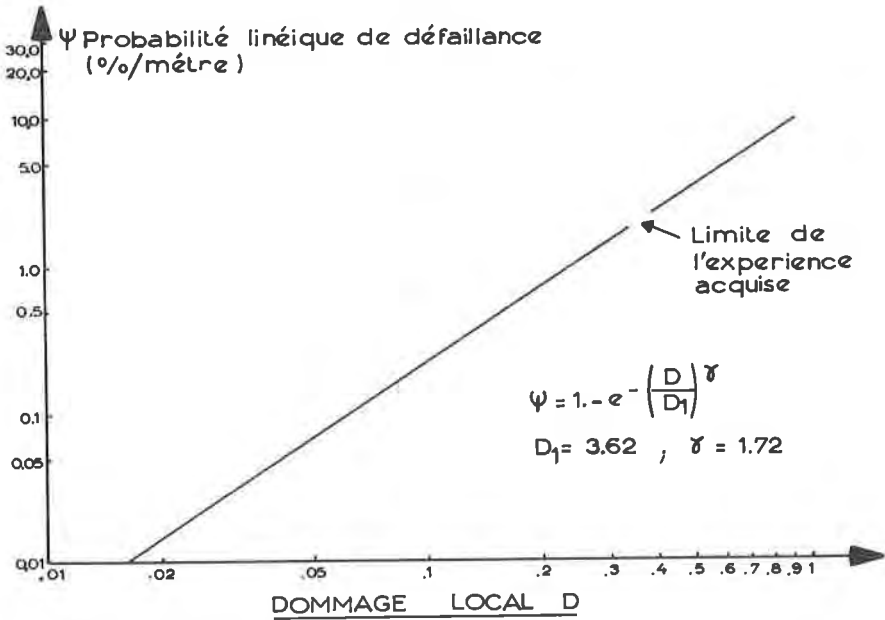


Fig. 4

