



# Fiabilité des moteurs Fusée à propulsion liquide

Pascal Pempie

Consultant

[pascal.pempie@wanadoo.fr](mailto:pascal.pempie@wanadoo.fr)

**Résumé :** *Après avoir revu les différentes définitions de la Fiabilité, avoir présenté des méthodes d'évaluation il est décrit les impacts des exigences de fiabilité sur la conception sur le plan de développement et d'essais et son le lien consubstantiel avec l'assurance de la Qualité.*

**Abstract:** *After having reviewed the different definitions of Reliability, having presented evaluation methods, it is described the impacts of the reliability requirements on the design but especially on the development and testing plan and its consubstantial link with quality Assurance*

## 1. Introduction

*« Anything that can go wrong will go wrong! And « Murphy was an optimist!*

Il est trivial d'énoncer que la fiabilité est la qualité première d'un moteur fusée : Sa de-fiabilité est responsable de 66% des échecs Lanceur [1].

La fiabilité n'est pas uniquement une affaire de formules mathématiques mais est un paramètre de premier ordre pour la conception ; l'élaboration des plans de développement et d'essais.

## 2. Définitions

La fiabilité est une variable stochastique et est estimée par des méthodes relevantes de la probabilité



En effet **R** est la probabilité pour un moteur de remplir sa mission durant une période déterminée sous des conditions définies

$\lambda$  Taux de défaillance

$\lambda(t)$  t estimé par la relation suivante

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

On distinguera les définitions suivantes [2]

Fiabilité prédite sa valeur est estimée à partir de bases de données issues d'expériences et nécessite un savoir d'experts d'où souvent le recours à des techniques Bayésiennes

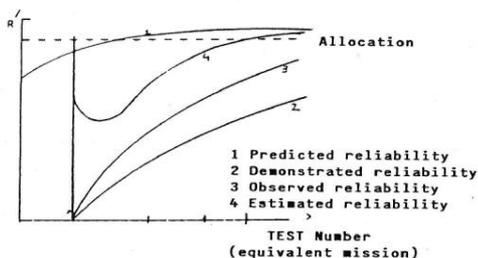
Fiabilité estimée : Estimation réalisée à l'aide de relations stochastiques (cf. infra)

Fiabilité Observée : Valeur déduite des essais

Fiabilité démontrée : Valeur déduite et consolidée à l'aide d'analyse stochastique de l'ensemble des essais.

Croissance de fiabilité Evolution de la fiabilité observée au cours du temps permettant d'apprécier la maturité du moteur.

Il est d'usage de relier l'évolution temporelle de ses fiabilités à la spécification :





Pour un moteur à generateur de gaz type Vulcain les allocations de fiabilité des differents composants se repartissent comme suit ;

Chambre propulsive :8%

Turbopompe Fuel :31%

Turbopompe Oxy :28%

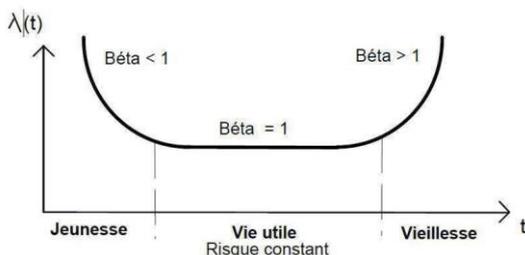
Générateur de gaz :11%

Redondance ? :La fiabilité globale étant le produit des fiabilités individuelles.Il serait tentant d'établir des redondances : cela n'est guere possible sauf pour les systemes electriques et capteurs

On observera par contre que pour le controle d'attitude il est d'usage de redonder les thrusters

### **Evolution temporelle du taux de défaillance**

L'experience révèle que l'évolution temporelle du taux de défaillance suit une loi en « baignoire »



Trois périodes sont à distinguer

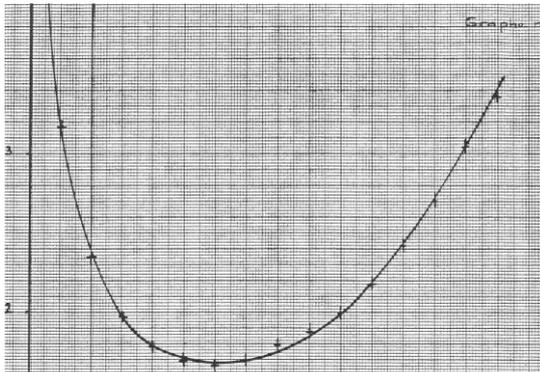
Jeunesse: avec ses défaillances enfantines

Vie opérationnelle  $\lambda$  =constante

Fin de vie : associée à ses défaillances mortelles

En conséquence reconnaissant, sauf ré-usabilité ; que la mission d'un moteur est unique sa phase de réception doit permettre de détecter ses défaillances enfantines.

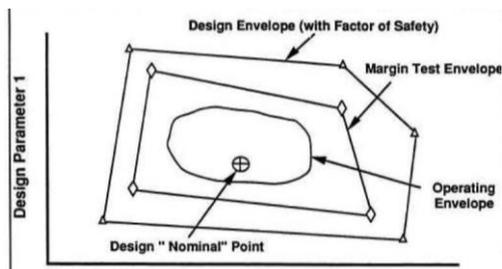
On notera que la forme de la courbe en « baignoire » dépend des taux de contraintes subits : [3] Présente l'évolution temporelle de  $\lambda$  d'une turbopompe spatiale :



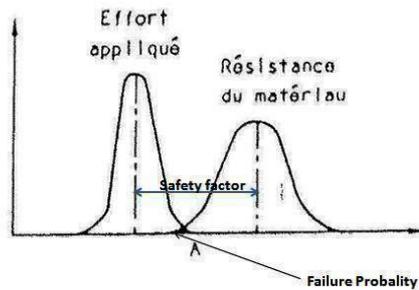
### Prise en compte de la fiabilité dans la conception :

Une haute valeur de fiabilité requiert lors de la conception :

- La connaissance des cas de charges dimensionnant
- L'établissement des différents domaines [4]



- La prise en compte de marges entre les charges appliquées et les contraintes admissibles



Warner Diagram [from Marty Conception des vehicules spatiaux]

[2] Propose les marges « mécaniques » suivantes

1,1 entre charge appliquée et limite élastique

1,25 entre charge appliquée et limite à la rupture

### 3. Méthodes d'estimation de la Fiabilité

Les « entrées » permettant d'estimer la fiabilité sont les suivantes :

- Les charges appliquées
- Les coefficients de sécurité
- La durée de la mission, les nombres d'activations
- La connaissance et la maîtrise des « événements redoutés (points critiques)

La variable principale est la mission équivalente [5] inspirée de la loi de Miner relative aux cumuls de charges.

$$MEQ = \alpha_1 \frac{\Sigma \text{ cycles tested}}{\text{Mission ignition quantity}} + \alpha_2 \frac{\text{Cumulated tested duration}}{\text{Mission duration}}$$

De nombreuses relations probabilistes peuvent être employées.

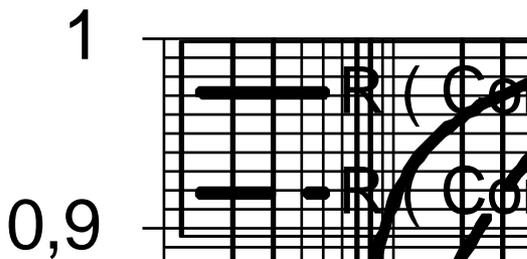


- La première : La plus simple

### Relation Binomial

$$\text{Reliability} = (1 - \text{Confidence Level})^{1/\text{MEQ}}$$

## Reliability



- La seconde : En accord avec la courbe en « baignoire »

### Weibull

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \delta}{\eta} \right)^{(\beta-1)}$$

$\eta$  paramètre d'échelle (ou durée de vie caractéristique),

$\delta$ : offset  $\delta=0$

$\beta$  paramètre de forme en relation avec le type de dégradation :

$\beta=0.5$ : Mortalité infantine

$\beta=2$ : HCF fatigue à grand nombre de cycles

$\beta=3$ : LCF fatigue oligocyclique

[4]

MTBF (mean time between failures)

$$\text{MTBF} = \delta + \eta \cdot \Gamma(1 + 1/\beta)$$



Les valeurs de la fonction  $\Gamma$  sont les suivantes :

$$\Gamma(\beta=3)=0.893 ; \text{LCF}$$

$$\Gamma(\beta=2)=0.886 : \text{HCF}$$

Ainsi si nous considérons que le moteur est soumis à des transitoires d'allumage et d'arrêt combinés (LCF) avec le temps de la mission (HCF) en utilisant la loi de cumul de Miner

[3] Indique que la valeur expérimentale de  $\beta$  pour le moteur Vulcain est entre 2 et 3

La fiabilité pourra être estimée par :

$$R_{\text{mission}} = R_{\text{cycle}} * R_{\text{time}}$$

Le tableau suivant compare les méthodes

engine	mission time	mission start	design life	design start	DL MEQ	R binom.	Rweibull
LEa	535	3	2920	15	5,2	0,83926	0,96840
Vinci	700	4	3750	30	6,4	0,86716	0,97140
RL10	700	2	4500	20	8,2	0,89445	0,99570
LE7	350	1	1720	12	8,5	0,89732	0,99300
Vulcain	600	1	6000	20	15,0	0,94074	0,98500
Vulcain2	540	1	5760	20	15,3	0,94199	0,99210
F1	165	1	2250	20	16,8	0,94698	0,99570
SSME	520	1	27000	55	53,5	0,98301	0,99970

On observera que les moteurs F1 et SSME étaient qualifiés « vol habité »

#### 4. Fiabilité et plan de développement

A titre d'illustration la figure suivante [6] présente la synthèse du plan de développement du moteur Vulcain



(Initialement prévu pour le vol Habité)

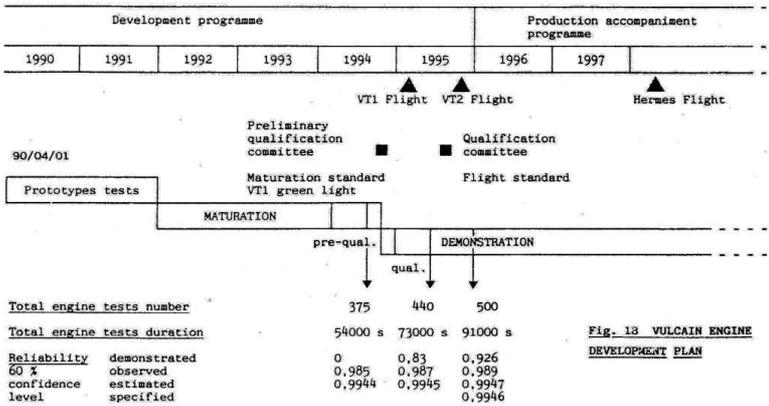
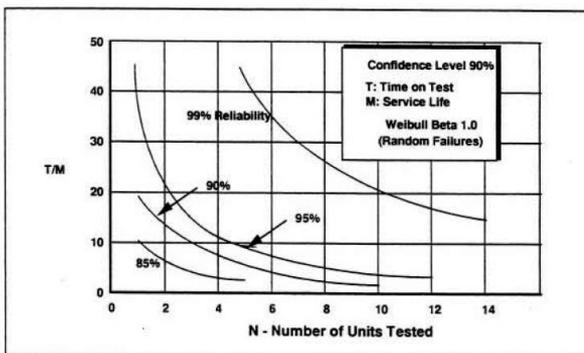


Fig. 18 VULCAIN ENGINE DEVELOPMENT PLAN

Les pratiques Nasa sont les suivantes

CERTIFICATION/QUALIFICATION TESTS

TEST ATTRIBUTE	SSME	F-1	J-2	JET	RL-10	LR87	LR91
NUMBER OF TESTS REQUIRED	10	20	30	N/A	20	12	12
TOTAL TEST DURATION REQ.	5000 S	2250 S	3750 S	150 H	4500 S	1992 S	2532 S
NUMBER OF SAMPLES	2	1	2	1	3	1	1
HARDWARE CHANGES ALLOWED	YES	YES	YES	YES	NO	YES	YES
FLEETLEADER CONCEPT USED	YES	NO	NO	YES	NO	NO	NO
OVERSTRESS TESTING	YES	NO	NO	NO	YES	NO	NO



On notera l'importance du nombre d'exemplaires à tester pour respecter une valeur élevée de fiabilité



La figure suivante présente les pratiques actuelles :

	Nr of engine tested	Test Number	Cumulated duration (seconds)	Mission duration (s)	MEQ tested	Design Life	
						Cycles	Duration (seconds)
VULCAIN	15	261	78 538	600	196	20	6 000
VULCAIN 2	6	98	40 000	540	86	20	5 760
RD-180	29	113	18879	190	106	NA	NA
LE-7	4	281	15 281	350	162	12	1 720
LE-7A	5	81	8 471	390	51	NA	1 900
F1*	NA	2 626	215 700	170	1 947	20	2 250
SSME*	17	250	62 670	500	187	55	27 000
RS-68	12	300	26 400	327	190	NA	NA

\*Man Rated

## 5 Point critiques, événements redoutés

La démarche « fiabilité demande que les éléments redoutés issus de l'expérience du passé soient maîtrisés lors du développement.

La liste, hélas on exhaustive, est la suivante

Et pour illustrer la Loi de Murphy quelques exemples sont indiqués :

- Pollution premier candidat pour les échecs

*Ariane Vol 36 : Chiffon dans la ligne d'alimentation de la TP*

- Fuites (nombreux cas)

*Par exemple : mission Navette Challenger ; fuite d'un joint d'un booster à propulsion solide impactant le réservoir hydrogène entraînant l'explosion*

- Incendie en particulier dans un environnement LOX (oxygène liquide)

*Soyouz U / Progress MS-04: Contamination particulière dans la ligne Oxygène liquide*

- Grippage (maîtrise des couples tribologiques [8])



*Ariane Vol L05 : Grippage des engrenages du réducteur de vitesse*

- Allumage dur
- Instabilités Haute fréquence de combustion

*Ariane L02*

*F1*

- Dépôts de suie et coking (pour les ergols HxCy) ou Icing

*-Titan : perte de performance par dépôt de suie dans les turbines :  
[AIAA 89-2389]*

*-HII-A Gel dans le générateur de gaz du moteur cryotechnique LE-5*

- Cavitation

*HII-A Cavitation et rupture par fatigue de l'inducteur du moteur cryotechnique LE7A*

- Flambage structural

*Ariane 517 Flambage élasto plastique du divergent du Moteur Vulcain2*

- Eclatement enceinte sous pression appliquer la règle :  
leak before burst

*Delta II 7925-9.5 Explosion du GEM-40 solid rocket motor (fissure non détectée)*

- Pertes de mesures fonctionnelles

*Mission Navette STS-78 perte d'une température Turbine entraînant l'arrêt d'un des trois moteurs SSME.*



## Fiabilité et Assurance de la Qualité

Les objectifs de Fiabilité doivent être accompagnés par un plan d'assurance de la Qualité couvrant l'ensemble du développement, de la conception, la fabrication, la qualification et la mise en œuvre opérationnelle.

Plan permettant d'assurer que les actions en diminution de risque relatifs aux événements redoutés sont effectives ; que les approvisionnements sont conformes aux exigences, que les moteurs produits sont conformes aux exemplaires qualifiés, que les opérations sont conformes aux procédures déposées, que le personnel possède la formation adéquate.

### 4. Conclusion

La fiabilité n'est pas uniquement une affaire de calculs probabilistiques mais concerne l'ensemble de la vie du moteur et requiert une rigueur dans le travail en effet *"Failure Is Not an Option"* (Gene Kranz)

### Bibliographie:

- [1] Launch vehicle historical Reliability AIAA 98-3979 D Sauvageau B.Allen Thiokol]
- [2]CNES Liquid Propulsion General Spécification A5-SG-0-51]
- [3] T. LE FEVRE SNECMA CROISSANCE DE FIABILITE POUR SYSTEMES VIEILLISSANTS
- [4]SAE Liquid Rocket Engine Reliability Certification ARP 4900
- [5] Plan Liquid Rocket Engines Test Comparison AIAA 2001-3256 P.Pempie
- [6] Reliability and safety approach for Vulcain engine. IAF 88-228 J Borromée. P.Pempie J.P Leveque



[7] Lessons learned in Ariane 1 to 4 AIAA San Diego 1995 A Souchier P  
.Pempie:

[8] Pascal Pempie TRIBOLOGY OF ROCKET ENGINES STLE's 2005 Annual  
Meeting 2005 15-19 May Las Vegas