

REFLEXIONS SUR L'ESTIMATION PRÉVISIONNELLE DE FIABILITÉ EN MÉCANIQUE

Panorama & Limites



Constat Les éléments mécaniques ou électromécaniques d'un satellite sont souvent en PPU mission ou vis-à-vis de la Loi sur les Opérations Spatiales



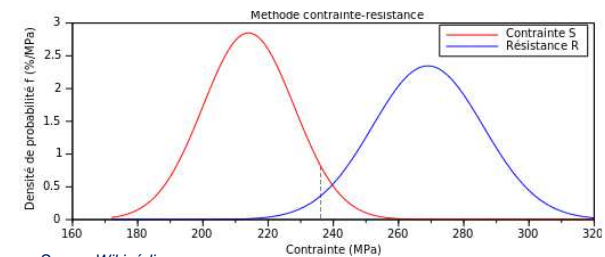
Art.40-6. La probabilité de pouvoir réaliser avec succès les manœuvres de retrait de service (...) doit être au moins de 0,85. Cette probabilité (...) doit être calculée avant le lancement (...) sur la durée de la phase de maîtrise pour laquelle le système a été qualifié et prend en compte tous les systèmes, sous-systèmes et équipements utilisables pour ces manœuvres, leurs niveaux de redondance éventuels et leur fiabilité.

Cela concerne :

- Structures porteuses, antennes, télescopes, etc. devant tenir les charges au lancement et résister aux contraintes d'utilisation (pression dans un réservoir d'ergol, etc.) et à celles de l'environnement spatial (radiations, oxygène monoatomique, cyclages / gradients thermiques, micro météorites ...)



Source ADS



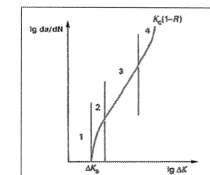
Source Wikipédia

- Dimensionnement avec marges et confiance à la qualification ($R \approx 1$!)
- Parfois méthode Résistance – Contrainte (résolution analytique ou tirage MC)

Pertinence des distributions des R et C ?



Aspects dynamiques peu considérés. Des modèles existent pourtant (défaillance par fatigue, propagation de fissures, etc.)

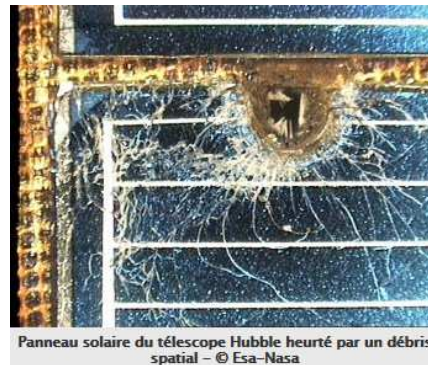


Loi de Paris : $\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^m$ Vitesse de propagation de fissure

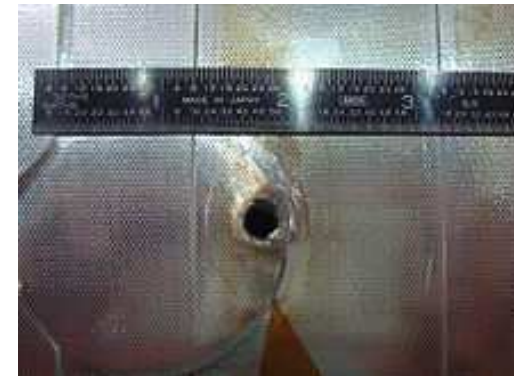
Débris et micro météorites



Satellite CERISE heurté par un débris du 3^{ème} étage Ariane 1



Panneau solaire du télescope Hubble heurté par un débris spatial - © Esa-Nasa

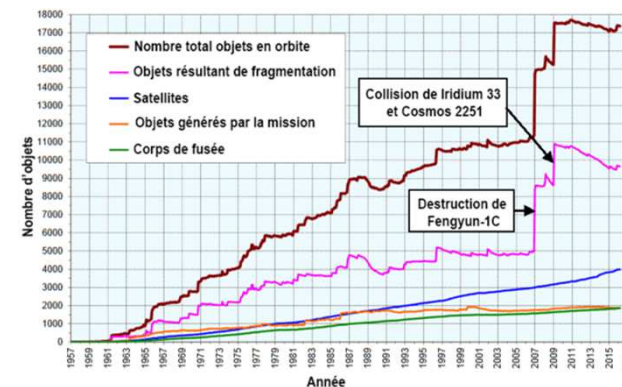


Trou dans le radiateur de la navette spatiale américaine Endeavour provoqué par un débris durant la mission ST-118. Le diamètre de l'orifice d'entrée est de 6,4 mm et celui de sortie est le double. Source Wikipédia

Évitement pour taille débris > 10 cm en orbite basse et > 1 m en GEO

mais peu ou pas de quantification du risque pour les tailles inférieures. Difficulté de connaître les flux de débris en fonction de l'altitude...

Risque de réaction en chaîne (syndrome de Kessler)



Source Wikipédia

Panorama & Limites



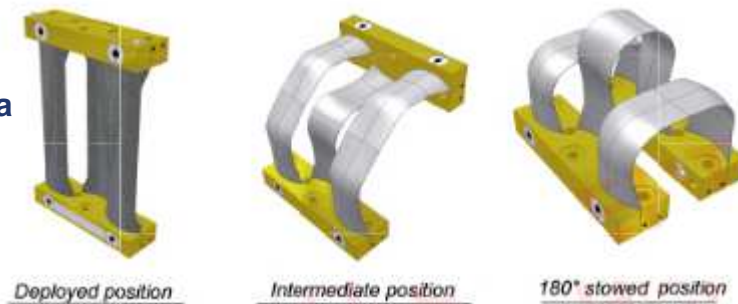
▪ Articulations / Guidage

- Dimensionnement avec marges de sécurité et confiance à la qualification ($R \approx 1$!)

- Ou parfois méthode Résistance – Contrainte

Pertinence des distributions des R et C ?

Prise en compte des phénomènes de dégradation (fatigue, etc.) ?



Source CNES

▪ Dispositifs pyrotechniques (vannes, cisailles, boulons, etc.)

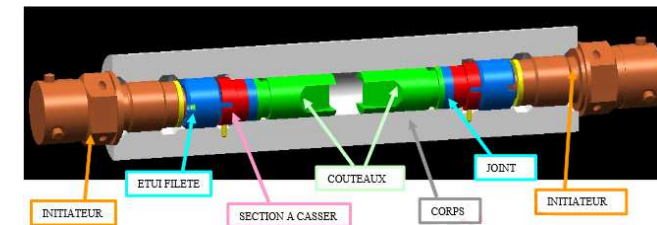
Essais de fiabilité (Neyer, OneShot, CABOUM, etc.) + Redondance initiateur

Pertinent mais couteux (même si essais optimaux)...

Autres méthodes de fiabilité prévisionnelle envisageables ?

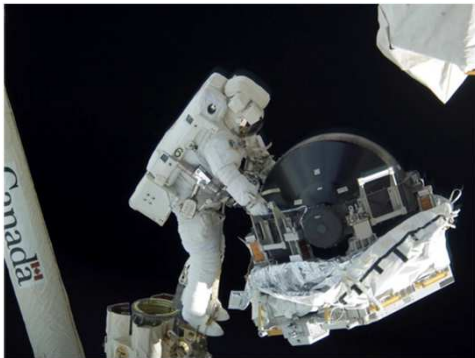


Source CNES



Source CNES

- Mécanismes d'entraînement GS, roues à inertie ou à réaction, gyromètres, machines cryogéniques, etc. Qualifiés pour fonctionner durant leur mission et supporter les efforts au lancement, les mécanismes se dégradent principalement par les frottements et la dégradation de la lubrification au cours du temps



Control Moment Gyroscope replacement, NASA photo
Two CMG's have failed, one in 2002 and the other in 2004.



Cryocooler Air Liquide Turbo-Brayton monté sur ISS



Solar Array Drive Mechanism SEPTA-24 de RUAG



Motorisation : Les taux de panne des bobinages des moteurs et électroniques de commande sont estimés classiquement à partir des **BdD de fiabilité prévisionnelle EEE**, par prise en compte du REX (Khi2) + Facteurs d'accélération (Arrhenius – **Ea ?**), ou hybridation (méthode bayésienne)

Panorama & Limites

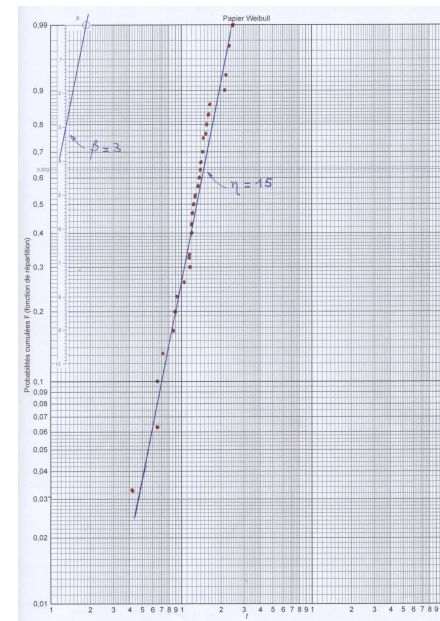
➔ Pour la partie mécanique :

En l'absence d'observation des phénomènes de dégradation, et si essais en durée de vie ou REX disponible → modélisation paramétrique de la fiabilité (Weibull, etc.)

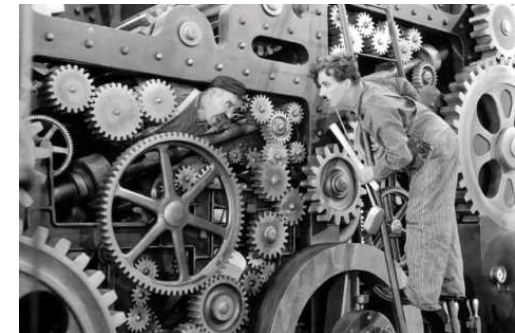
➔ Représentativité du REX ? Bien que des modèles d'accélération existent, la transposition dans d'autres conditions d'environnement ou d'utilisation n'est pas aisée

$$MRL(T) = \frac{\int_T^{+\infty} R(t) dt}{R(T)} = \frac{\frac{\eta}{\beta} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right) R_z(t^\beta)}{\exp\left(-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right)}$$

Mean Remaining Life pour une loi de Weibull



Source CNES

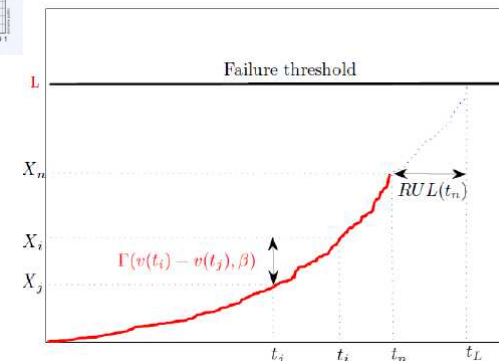


Si observation de la dégradation, un processus temporel peut être établi soit basé sur la physique (lois d'usure, d'abrasion, etc.), soit à partir d'un modèle stochastique de trajectoires (Gamma / Wiener etc.), ou à partir de modèles multi-états markoviens. Les résultats seront comparés à un seuil limite de fonctionnement pour estimer la RUL

Prometteur mais peu utilisé aujourd'hui dans le spatial

$$U = k \cdot \frac{Q \cdot d}{H}$$

U : Volume usé
k : Coefficient d'usure
Q : Charge appliquée au contact
d : Distance parcourue
H : Dureté du corps le plus tendre



Panorama & Limites

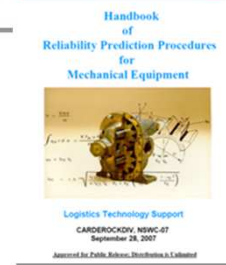
➔ Pour la partie mécanique (suite) :

En pratique, les estimations de fiabilité prévisionnelle mécanique se font souvent à partir de bases de données (publiques ou propriétaires) de défaillances de pièces élémentaires, jugement d'ingénieur, analogies, etc.

Qty	Designation	Source	λ unit (Fit)	λ total (Fit)
1	COLD EXCHANGER	Eng. judgment	-	-
1	BRAZING CUSIL 1mm	100141982F-EN	0.04	0
1	PULSATION TUBE	REX aéro (Env: AIF, T°C=55°C)	10	10
840	GRID RING TYPE A	Eng. judgment	0.1	85
10	GRID RING TYPE A'	Eng. judgment	0.1	1
1000	GRID RING TYPE B	Eng. judgment	0.1	100
1	FLOW STRAIGHTENER COLD END	NPRD2011	-	-
1	FLOW STRAIGHTENER WARM END	NPRD2011	-	-
1	FLOW STRAIGHTENER LINER	NPRD2011	-	-
1	REGENERATOR TUBE PIN	NPRD2011	0.075	0.075
1	METALLIC SEAL Ø32.5 x 3.18	REX aéro (Env: AIF, T°C=55°C)	1	1
1	O-RING Ø9.95 x 1.30	Included in screw	-	-

Extrait Cryocooler - Source CNES

- Représentativité du REX et pertinence des lois statistiques utilisées lorsque des durées de fonctionnement sont disponibles (λ constant, Khi2, etc.) ?
- Transposition dans d'autres conditions d'environnement (température, vibrations) ou d'utilisation (vitesse de rotation, charge sur roulements, etc.) ? Si pas mieux, utilisation de la table de conversion de la MIL-HDBK-217F !



		To Environment										
From Environment		G_B	G_F	G_M	N_S	N_U	A_{IC}	A_{IF}	A_{UC}	A_{UF}	A_{RW}	S_F
	G_B	X	0.5	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	1.2
	G_F	1.9	X	0.4	0.6	0.3	0.6	0.4	0.2	0.1	0.2	2.2
	G_M	4.6	2.5	X	1.4	0.7	1.4	0.9	0.6	0.3	0.5	5.4
	N_S	3.3	1.8	0.7	X	0.5	1.0	0.7	0.4	0.2	0.3	3.8
	N_U	7.2	3.9	1.6	2.2	X	2.2	1.4	0.9	0.5	0.7	8.3
	A_{IC}	3.3	1.8	0.7	1.0	0.5	X	0.7	0.4	0.2	0.3	3.9
	A_{IF}	5.0	2.7	1.1	1.5	0.7	1.5	X	0.6	0.4	0.5	5.8
	A_{UC}	8.2	4.4	1.8	2.5	1.2	2.5	1.6	X	0.6	0.8	9.5
	A_{UF}	14.1	7.6	3.1	4.4	2.0	4.2	2.8	1.7	X	1.4	16.4
	A_{RW}	10.2	5.5	2.2	3.2	1.4	3.1	2.1	1.3	0.7	X	11.9
	S_F	0.9	0.5	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	X

Environmental factors as defined in MIL-HDBK-217

Conclusion



La décriée et pourtant toujours très utilisée MIL-HBK-217 n'est pas la seule à être discutable...

De par les faibles séries spatiales (peu de REX), et les contraintes budgétaires de plus en plus fortes (peu d'essais en durée de vie), les évaluations de fiabilité prévisionnelle en mécanique font souvent appel à des hypothèses non vérifiées, mais que l'on pense margées :

- $R = 1$ ou 0,9999 pour les structures (confiance au dimensionnement avec marges et aux tests de qualification)
- Transposition directe ou simplifiée de données disponibles dans d'autres domaines (aéro, BdD publiques, etc.)
- Appel au « jugement d'ingénieur » d'un expert du domaine

*« Nous souhaitons la vérité, et ne trouvons en nous qu'incertitude »
Blaise Pascal - Pensées*



MERCI POUR VOTRE ATTENTION