

TP N° 38

Fiabilité et durée de vie d'un satellite

La fiabilité et la durée de vie font souvent l'objet de confusion car elles évoquent toutes deux un fonctionnement dans la durée. La fiabilité renvoie à une notion probabiliste de réussite de mission alors que la durée de vie caractérise l'aptitude du produit à fonctionner pendant un temps durant lequel il va subir diverses dégradations.

Ce TP porte sur la fiabilité et la durée de vie de satellites et propose de modéliser ces derniers dans le cadre d'une étude de constellation.

1 – Expliquer la différence entre fiabilité et durée d'un satellite et proposer un modèle de mortalité.

2 – Evaluer la fiabilité d'une mission de 15 ans nécessitant 8 satellites opérationnels en orbite, assurée par 4 lancements multiples de 5 satellites chacun.



1 - Fiabilité et durée de vie d'un satellite

Un satellite est constitué principalement d'équipements électroniques.

Il fait l'objet d'une exigence de durée de vie (10 ans par exemple) et de fiabilité (0,7 à 10 ans par exemple, ce qui signifie que le satellite a 30 % de malchance de ne pas achever la mission prévue).

1.1 Fiabilité

L'exigence de fiabilité permet de dimensionner l'architecture du satellite en conception (intégration, qualité des composants, choix des redondances...).

Elle est fondée sur une hypothèse de taux de défaillance constant des composants (loi exponentielle) qui suppose l'absence de tout phénomène d'usure.

Acceptable pendant la période de durée de vie, durant laquelle il est démontré par analyse ou par essais que l'usure reste compatible avec les performances de la mission, cette hypothèse revient à considérer que le satellite reste à l'état neuf tant qu'il n'a pas été affecté par une panne.

1.2 Durée de vie

Outre les pannes aléatoires des composants électroniques, la durée de vie d'un satellite est conditionnée par de multiples phénomènes d'usure :

- Incertitudes et aléas affectant le bilan d'ergol (injection, passages en mode survie...)
- Usure des mécanismes (motorisation des générateurs solaires...)
- Fatigue de certains matériaux
- Dégradation des éléments extérieurs du satellite subissant l'effet des micrométéorites et de l'oxygène mono atomique (générateur solaire, radiateur, couverture thermique...)
- Dérives des caractéristiques des composants électroniques en fonction des doses cumulées de radiations reçues (beaucoup plus intenses que sur Terre)
- Limitation du nombre d'activations ON/OFF des éléments de commutation (relais, transistors...)
- Limitation du nombre de cycles de charge/décharge des batteries
- Dégradation des pièces d'étanchéité (joints, propulseurs...)
- Etc.

Après de multiples analyses et essais couvrant l'ensemble de ces phénomènes, le fournisseur peut s'engager sur la conformité à une exigence de durée de vie.

Cependant, les marges de dimensionnement prises pour pallier les incertitudes et la méconnaissance des phénomènes d'usures peut laisser espérer, sans aucune certitude, une durée de vie plus longue que celle qui a été prévue.

1.3 Modèles de mortalité

Un modèle de mortalité du satellite complet pourrait être bâti à partir de modèles de composants intégrant chacun une éventuelle usure. Couplant une loi exponentielle, pour modéliser la vie utile, à une loi de Weibull, pour tenir compte d'une usure tardive, la loi de Bertholon est ainsi utilisée dans le domaine ferroviaire pour modéliser des équipements électroniques exploités pendant plus d'une vingtaine d'années.

Mais outre que la fiabilité du satellite ne pourrait être alors évaluée que par simulation de Monte-Carlo, la construction des multiples modèles élémentaires s'avérerait impossible faute de données précises sur chacun d'eux.

Aussi apparaît-il plus judicieux de tronquer la courbe de fiabilité du satellite fondée sur l'hypothèse de taux de défaillance constants par la durée de vie de celui-ci.

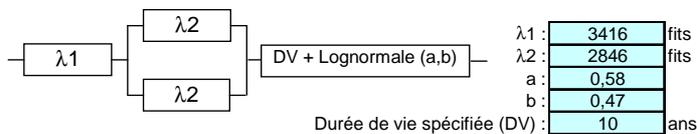
Résultant d'une architecture plus ou moins complexe en terme de redondance, le modèle de fiabilité du satellite peut être utilisé tel quel (sous une forme non paramétrique) ou remplacé par un modèle simplifié facile à extrapoler (un élément en série avec deux éléments en redondance par exemple) dans une étude de niveau supérieur (système satellitaire ou constellation).

La durée de vie peut être considérée de manière déterministe à la valeur d'engagement du fournisseur ou de manière probabiliste par ajout à celle-ci d'une loi de probabilité, de type lognormale par exemple, fondée sur le retour d'expérience et les marges de dimensionnement.

La troncature à la valeur d'engagement du fournisseur est évidemment pessimiste et peut conduire à une surabondance de ressources dans le dimensionnement d'une constellation de satellites.

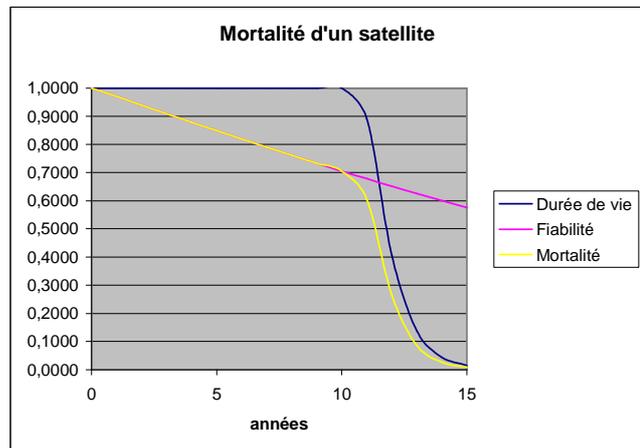
Un modèle de mortalité de satellite est proposé, ci-dessous, à titre d'exemple. Un ajustement de type moindre carré, effectué au moyen de l'outil GEN CAB, permet de calculer les paramètres du modèle de fiabilité simplifié et ceux de la loi lognormale utilisée pour modéliser un surcroît de durée de durée de vie de 2 +/- 1 ans ($E(t) = \exp(a+b^2/2)$ et $Var(t) = (\exp(b^2)-1)\exp(2a+b^2)$ pour la loi lognormale).

Modèle de mortalité d'un satellite



	Lognormale	REX	
m :	2	2	1,9624E-20
σ :	1	1	2,7752E-20
			Σ : 4,7376E-20

T (ans)	Fiabilité	Modèle simplifié	Erreur ²
0	1	1,0000	0
1	0,97	0,9699	4,3618E-09
2	0,94	0,9397	9,9036E-08
3	0,909	0,9094	1,6067E-07
4	0,879	0,8792	4,3697E-08
5	0,849	0,8492	4,9194E-08
6	0,82	0,8195	2,1522E-07
7	0,79	0,7902	5,5423E-08
8	0,762	0,7614	3,7061E-07
9	0,733	0,7331	4,104E-09
10	0,705	0,7053	9,2868E-08
		Σ :	1,0952E-06
		Σ :	1,0952E-06



Mortalité

Cliquer sur l'icône pour obtenir le fichier Excel correspondant :

2 – Fiabilité d’une mission de 15 ans nécessitant 8 satellites opérationnels en orbite, assurée par 4 lancements multiples de 5 satellites chacun.

2.1 Durée de vie déterministe

Une constellation utilisée pour une mission de 15 ans apparaît mal dimensionnée avec des satellites de 10 ans de durée de vie. En effet, les satellites de rechange ne pourront être lancés qu’après 5 ans et avant 10 ans pour garantir la continuité de la mission.



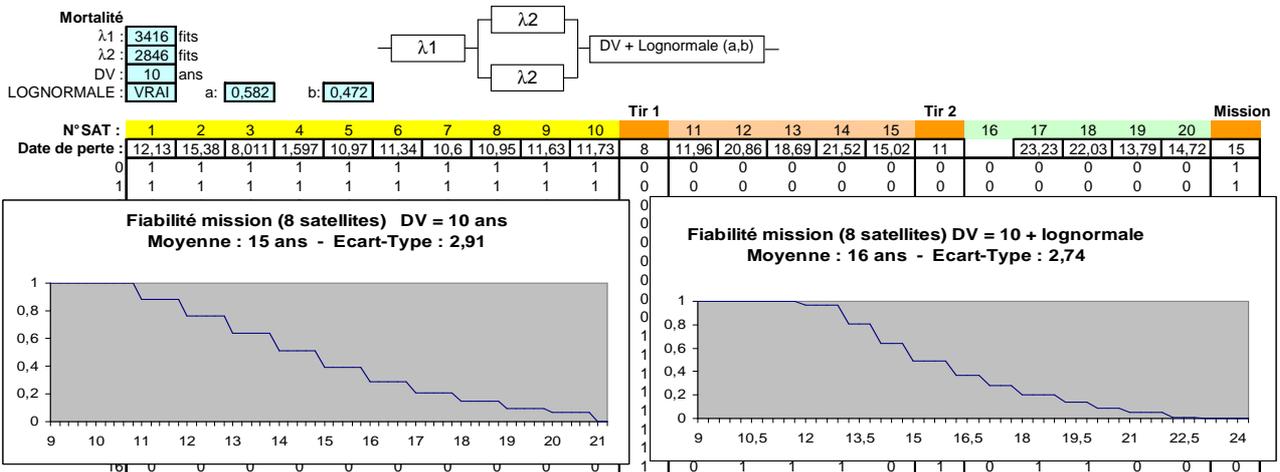
Si le service doit être pérenne, son coût annuel serait plus faible en considérant un dimensionnement sur 20 ans ou mieux encore sur un horizon glissant.

2.2 Durée de vie probabiliste

La fiabilité de la mission a été simulée, ci-dessous, en considérant une stratégie de renouvellement. L’absence de rechange en orbite conditionne la décision de renouvellement en anticipant la fin de vie des satellites et le délai avant tir. Ce délai a été toutefois négligé, ce qui correspond à un pire cas de la fiabilité mission sans interruption de celle-ci, et la fiabilité des lanceurs n’a pas été considérée (échec couvert par une assurance).

Constellation de 8 satellites

Lancements : 2 * 5 SAT à T0 + 5 SAT à T1 + 5 SAT à T2
Remplacement : ≤ 8 SAT opérationnels



La constellation a été modélisée directement sur une feuille Excel (table avec un pas d’une année) sans utiliser une méthode plus élaborée telle que les modèles de simulation récursive (l’outil SIMCAB permet d’obtenir des résultats sous forme de distribution et de tirer la loi lognormale).

La prise en compte d’une durée de vie probabiliste a ici pour effet de prolonger la durée moyenne de la mission d’environ 1 an et de faire passer la fiabilité de la mission à 15 ans de 39 % à 50 %.