
FIABILITÉ DU LANCEUR ARIANE

Jean LEFORT
IREM de Strasbourg

Il y a quelque temps ⁽¹⁾, après le lancement réussi de la 100^e fusée Ariane, les différents journalistes se sont extasiés à grand renfort de cocorico, sur le taux élevé de succès de notre lanceur de satellites. Et d'avancer le nombre de 96,2%. Bizarre ! Je pense qu'en divisant par 100 on obtient un nombre entier en pourcentage. J'ai voulu en avoir le cœur net et j'ai été me renseigner du côté de l'Agence Spatiale Européenne (ESA).

D'énormes intérêts financiers sont en jeu (entre autres le marché de l'assurance). Le lancement d'un satellite coûte une petite fortune. Le marchandage dans tous les domaines est de rigueur et tous les arguments doivent être utilisés pour

diminuer ce coût afin de rester compétitif sur un marché concurrentiel. Tout le monde sait qu'un échec bien analysé est source de progrès puisque le risque de panne correspondant est fortement diminué. Il est donc normal de s'attendre à une augmentation du taux de réussite. Mais comment évaluer le taux de réussite du prochain lancement et en tirer un argument de vente ? Une théorie mathématiquement très simple est utilisée pour cette évaluation. Malheureusement exploitée hors de son domaine de validité elle a surtout un rôle psychologique et publicitaire.

Évolution du taux de réussite

Le **taux de réussite** est tout simplement le rapport du nombre de lancements réussis au nombre total de lancements. La

(1) Une première version de cet article a été rédigée début 1998.

FIABILITÉ DU LANCEUR ARIANE

figure ci-contre donne l'évolution du taux de réussite en fonction du nombre de lancements pour Ariane 1, 2, 3, 4 et 5 jusqu'et y compris le 105^e vol.

Après le 100^e vol le taux de succès est de

$$(100 - 7) / 100 = 93.$$

(Après le 105^e vol il est de 93,1).

L'objectif que s'étaient fixé les concepteurs d'Ariane 4 d'un taux supérieur à 90% est largement atteint puisque pour ce seul lanceur le taux est de 95%. Pour Ariane 5, les concepteurs se fixent un but à 98,5%, mais les vols de qualification n'entrent pas en compte pour ce calcul.

Les échecs concernent les vols L02, L5, V15, V18, V36, V63 et V70 (ainsi que le vol 88 qui est le premier vol de qualification d'Ariane 5). Il est toutefois faux de considérer qu'à l'avenir le taux de réussite restera aux environs de 95%. En effet, ce taux concerne les vols réalisés et n'est rien d'autre que la moyenne des réussites passées. Or ce qui intéresse l'utilisateur est la probabilité de réussite du prochain vol et non pas celle des vols antérieurs. Ce taux de réussite moyen ne tient pas compte du fait que les faiblesses qui ont entraîné l'échec sont corrigées et que par conséquent la fiabilité du lanceur augmente.

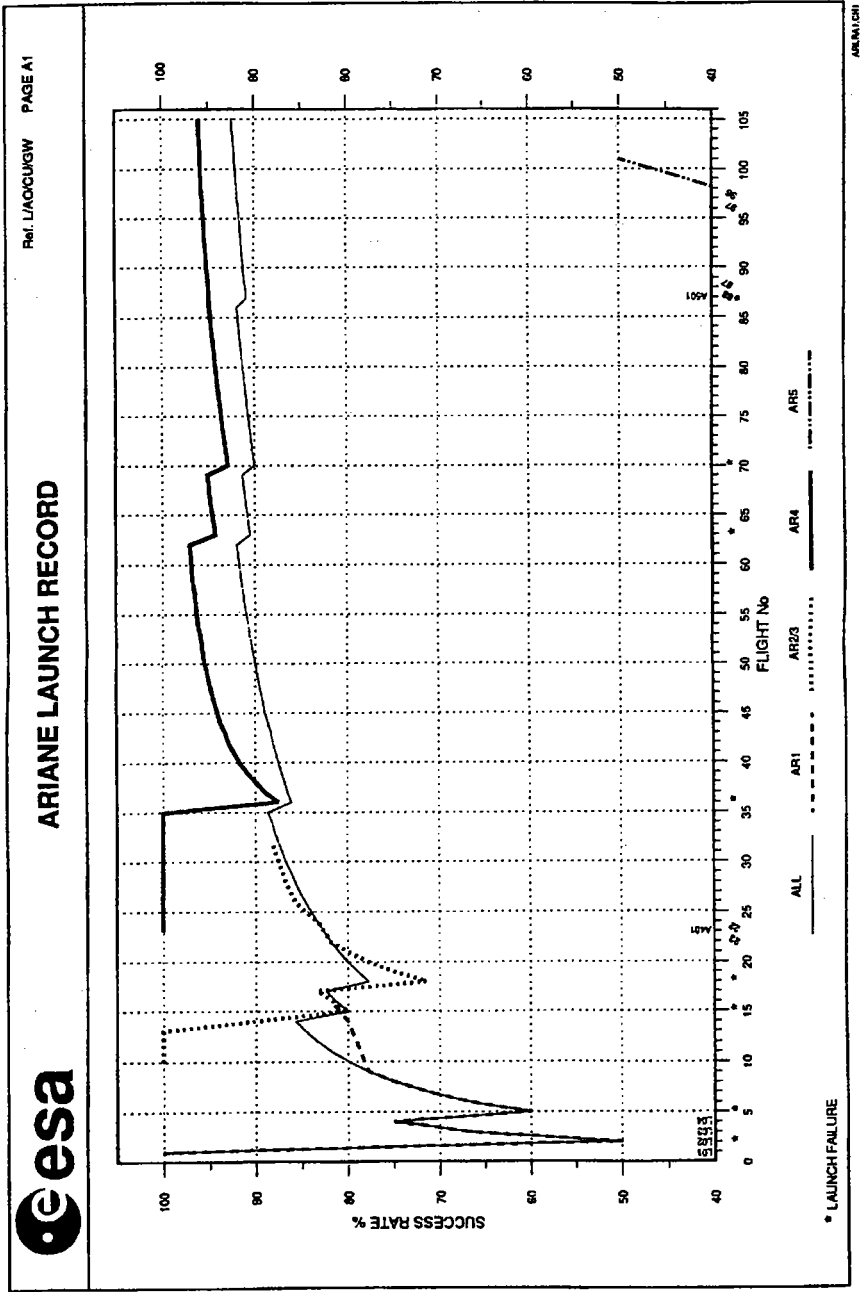
La figure ci-contre montre que le taux de réussite de la fusée Ariane augmente, bien que les débuts n'aient pas été des plus faciles. Cela confirme le fait que les échecs ne sont pas distribués uniformément sur l'ensemble des vols. Le tableau ci-dessous montre d'une autre manière la fiabilité de plus en plus grande d'Ariane. Il s'agit des taux de succès d'Ariane 1, d'Ariane 2 ou 3 et d'Ariane 4. Au fur et à mesure que le lanceur augmentait en puissance et en dépit du fait que cela impliquait une complexité croissante de la fusée, le taux de succès passait de moins de 82% à plus de 94%. Cette comparaison n'est valable que parce qu'il s'agit de la même population de lanceurs, utilisant la même technologie dans le même environnement industriel (cf. tableau ci-dessous).

Évaluation de la fiabilité

La **fiabilité** est la probabilité de réussite du prochain vol. Il s'agit là d'une prévision voire d'une prédiction. Le calcul repose sur de nombreuses hypothèses. Nous en avons vu quelques unes dans le paragraphe précédent. Nous allons en donner d'autres ici. Ce qui est important c'est que ces hypothèses sont suffisamment simples pour être admises par tous et en particulier par les clients ce qui permet de négocier convenablement les prix de vente

	Lancements	Échecs	% de réussite
Ariane 1	11	2	81,8
Ariane 2 ou 3 (2)	17	2	88,2
Ariane 4	53	3	94,4

(2) Le regroupement s'explique car Ariane 3 n'est autre qu'Ariane 2 équipée de 2 propulseurs d'appoint à poudre.



FIABILITÉ DU LANCEUR ARIANE

et d'essayer d'avoir des assurances moins chères.

Les hypothèses que nous développons conduisent au modèle de Weibüll qui est le plus courant.

Soit $e(n)$ le nombre d'échec après le n^e lancement. Le taux d'échec vaut $t(n) = \frac{e(n)}{n}$. Nous allons supposer que ce taux décroît vers zéro quand n augmente indéfiniment. La famille de fonctions la plus simple qui permet de décrire un tel phénomène est

$$t(n) = \frac{e(n)}{n} = \alpha n^\beta$$

où β est négatif, ce qui conduit à

$$e(n) = \alpha n^{\beta+1}.$$

Il n'est pas illogique de supposer que le nombre d'échecs augmente avec n et par suite il se peut que $\beta + 1$ soit positif. De plus nous n'accepterons cette formule qu'après un nombre suffisant de lancements de façon que $t(n)$ soit inférieur à 40%. Toute la question est de déterminer les paramètres α et β . En fait, seul ce dernier nous intéresse comme nous allons le voir.

Ce que nous voulons calculer c'est le risque d'échec du prochain vol. Or le risque sur p vols consécutifs à partir du n^e est $\frac{e(n+p) - e(n)}{p}$. Par conséquent le risque sur

le prochain vol est tout simplement la quantité $e(n+1) - e(n)$, quantité qui n'a aucune raison d'être entière dans le modèle adopté ; c'est même un nombre strictement plus petit que 1. En utilisant la formule

des accroissements finis, nous pouvons remplacer $e(n+1) - e(n)$ par la dérivée en n de e

$$\alpha(\beta+1)n^\beta = (\beta+1)\frac{e(n)}{n} = (\beta+1)t(n).$$

Ce remplacement n'est pas rigoureux, mais ce que nous cherchons ce sont des ordres de grandeurs et nous ne voulons pas ici justifier tous les calculs par des encadrements fins.

Nous posons $R = (\beta+1)t(n)$ et nous admettons que R est le **risque** sur le prochain vol. Le taux d'échecs étant connu, il nous suffit de connaître β .

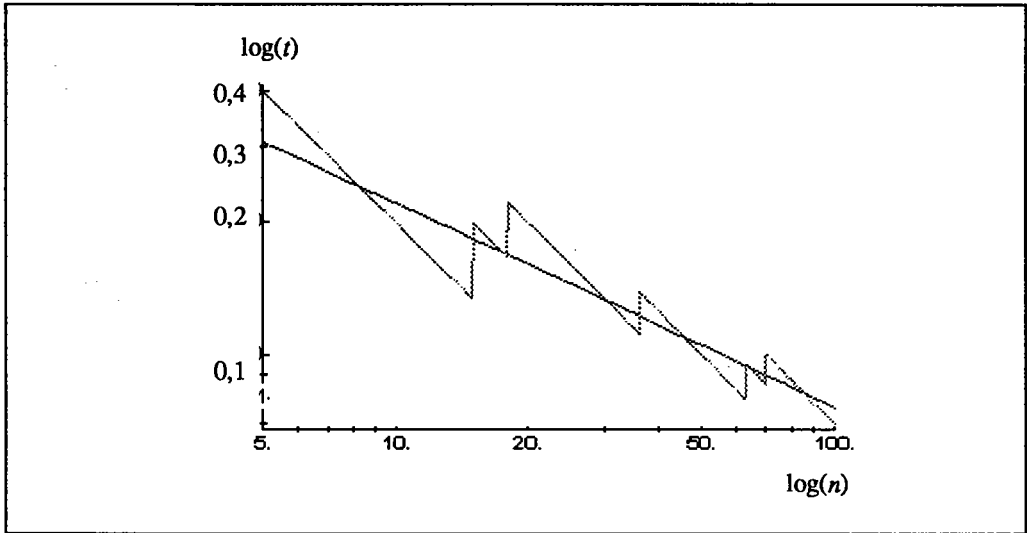
Pour évaluer β nous utilisons une régression linéaire. Pour cela il nous faut trouver une transformation simple qui permette de passer de la loi $e = \alpha n^{\beta+1}$ à une loi affine. Le logarithme répond à la question. Nous avons

$$\log(e) = (\beta+1)\log(n) + \log(\alpha)$$

ou encore

$$\log(t) = \beta \log(n) + \log(\alpha).$$

La quantité β est donc intimement liée à la pente de la droite de régression obtenue. En fait suivant la méthode de calcul de cette droite, moindre carré, axe principal d'inertie... chacune des deux formules ne donnera pas tout à fait le même résultat ce qui n'est pas très important puisque nous ne nous intéressons qu'à des ordres de grandeur. Dans le modèle de Weibüll on utilise la deuxième formule qui donne directement β . Sur le graphique ci-contre, nous avons représenté $\log(t)$ en fonction de $\log(n)$ à partir de $n = 5$, pour avoir $t < 40\%$, jusqu'à $n = 100$ et tracer la droite de



régression (les calculs ont été fait à l'aide du logiciel Maple). La pente est très voisine de $-0,464$. Le risque sur le 101^e vol était donc de $0,536 \times \frac{7}{100}$ voisin de $0,038$ soit une fiabilité de $96,2\%$. C'est bien le taux annoncé par les journalistes. Au 105^e vol le risque est descendu aux environs de $0,526 t(n)$ (et une fiabilité de $96,5\%$) ce qui veut dire que le risque sur le prochain vol est sensiblement moitié moindre que ne le laisse supposer la simple valeur $t(n)$ (cf. figure ci-dessus).

Conclusion mathématique

Nous venons d'évaluer la fiabilité d'une production industrielle. Cette évaluation correspond-elle à la réalité, autrement dit, les simplifications et les hypothèses faites sont-elles justifiées après coup par l'adéquation des prévisions à la réalité ? Malheureusement nous ne pouvons répondre à cette question, car si le modèle de

Weibüll a fait ses preuves dans de nombreux domaines industriels où l'on sort des milliers de pièces identiques, il est impossible de le justifier dans le présent cas sur moins d'une centaine d'expériences. Les lois statistiques sont telles qu'on ne peut conclure à la pertinence de ce modèle sur un tel nombre car l'écart n'est que d'environ 3% (3).

Cette étude montre aussi qu'il faut se méfier des affirmations des journalistes, même des journalistes scientifiques. Mais çà, on le savait déjà et c'est une excellente attitude scientifique que de mettre en doute chaque affirmation !

Le seul intérêt de ce modèle est sa simplicité et le fait que tous les acteurs

(3) À titre de comparaison, une pièce de monnaie qui, lancée 100 fois, indique pile 56 fois est-elle plus juste que celle qui indique pile 49 fois dans ce même type d'expérience ? Les lois statistiques ne permettent pas de répondre.

FIABILITÉ DU LANCEUR ARIANE

sont d'accord pour admettre que la fiabilité augmente avec le nombre de lanceurs. Le modèle de Weibull fonctionne un peu comme une note qui permet de classer différents objets d'une même classe sans que l'on ait pu toujours expliciter tous les critères qui entrent en jeu.

Conclusion technique

Le modèle mathématique, même utilisé hors contexte, n'est qu'un indice parmi d'autres de l'augmentation de la fiabilité. Tous les acteurs, touchant de près ou de loin à la fusée Ariane, sont au courant de bien d'autres éléments qui montre que l'entreprise cherche à obtenir une fiabilité maximum en mettant tout en œuvre pour y arriver. Cela implique :

- un suivi régulier auprès des industriels qui fabriquent le lanceur tant en ce qui concerne le cahier des charges qui est régulièrement précisé, qu'en ce qui concerne les contrôles en fabrication et les tests de recette,
- une analyse détaillée et sans complaisance des moindres incidents en vol, bien sûr, mais aussi dans les différentes phases de préparation du lanceur,
- des tests simulés ou en vraie grandeur à tous les stades,
- une coordination de toutes les activités...

Le risque nul n'existe pas ne serait-ce qu'en raison de la difficulté à quantifier certaines causes ou à effectuer certains tests ou enfin à évaluer correctement certains effets. Dans la bataille commerciale qui s'engage l'Europe part avec un avantage évident, mais elle ne doit pas se reposer sur ses lauriers si elle veut continuer à dominer un marché en plein

développement. Ainsi Arianespace négocie actuellement un deuxième contrat auprès des industriels européens en recherchant une économie de 30% sur la fabrication du lanceur. La recherche d'un abaissement des coûts et d'une augmentation de la fiabilité sont une nécessité vitale dans ce type d'entreprise.

Conclusion économique

Combien coûte un lancement de satellite ?

Ariane 4 existe en plusieurs versions. La version de base (Ariane 40) est capable de placer 2,6 T en orbite de transfert géostationnaire (4) ; La version la plus puissante (Ariane 44L avec 4 boosters d'appoint) permet d'emporter 4,8 T dans les mêmes conditions. Le lancement d'un satellite coûte environ 26 millions d'euros la tonne, tarif auquel il faut ajouter le prix du satellite lui-même qui est du même ordre de grandeur. Ainsi les satellites commerciaux de télécommunication coûtent de 75 à 150 millions d'euros, mais les satellites de recherche ou expérimentaux sont bien plus chers. Par exemple SPOT revient à 500 millions d'euros, Hubble à 1,2 milliards, etc.

À cela il faut ajouter le coût de l'assurance. Il se décompose en trois parties : L'assurance sur le lanceur, dont nous avons évalué les risques, l'assurance sur le

(4) C'est-à-dire une orbite elliptique dont l'apogée (le point le plus haut) est à 36.000 km. C'est au satellite de disposer d'un moteur (dit moteur d'apogée) lui permettant de circulariser l'orbite à l'altitude de 36 000 km où son mouvement propre est exactement compensé par la rotation de la Terre.

satellite et l'assurance responsabilité civile pour couvrir d'éventuels dommages créés par la retombée du lanceur au sol. En fait le marché des lanceurs est relativement étroit et pratiquement la concurrence ne se joue encore qu'entre américains, européens et russes et les assureurs ont tendance à considérer globalement l'ensemble des lanceurs (russes, américains ou européens) (5). Ils proposent d'assurer les vols et le matériel européen pour 17% du prix. C'est un tarif peu avantageux (même par rapport au taux d'échec de 7%) pour Arianespace qui dispose, comme nous l'avons vu, d'une très grande fiabilité (la meilleure ?). C'est pourquoi cette société négocie actuellement une baisse des taux sur la base des calculs précédents en essayant de mettre en place un système de bonus-malus. Pour appuyer sa démarche, elle propose aux clients une assurance sur le seul lancement à un tarif nettement plus avantageux. C'est aussi une façon de montrer que la société croit en ses calculs de fiabilité même s'ils ne sont pas justifiables mathématiquement. Rappelons que le risque est inférieur à 4%. Le client doit toutefois trouver un assureur autre pour la charge utile.

Notons enfin qu'aucun assureur ne prend en charge les vols de qualification. Le premier vol d'Ariane 5 qui s'est achevé

par une perte de contrôle au bout de 37 secondes et une explosion à la 42^e seconde à la suite d'une prise d'incidence trop importante, n'était pas assuré. Les satellites de recherche qui étaient à bord ont été perdus et le coût de remplacement est à la charge des organismes qui les avaient fait construire (finalement à la charge des états). Le deuxième vol d'Ariane 5 emportait deux maquettes de satellites instrumentées permettant de connaître l'environnement vu par les satellites, la maquette supérieure à été mise à poste, la seconde, nominalement est restée sur l'étage supérieur. De plus ce vol a embarqué un satellite expérimental entièrement conçu par l'université de Delft permettant de faire différentes mesures et photographies durant le vol et une expérience avait pour objectif de mesurer la concentration de l'oxygène atomique ; l'ensemble de ces expériences a parfaitement fonctionné à la grande satisfaction des opérateurs. Il faut toutefois remarquer que si les causes de l'échec du premier vol ont été rapidement analysées, comprises et corrigées, les très nombreux incidents du deuxième vol ont posé bien plus de problèmes. Le troisième vol de qualification qui a eu lieu le 21 octobre 98 montre qu'on a su pallier les différentes faiblesses mises en évidence. La récupération d'un des deux boosters et du module de retour (ARD) permettront des analyses fines qui laissent bien augurer de l'exploitation commerciale d'Ariane 5.

(5) Peut-être d'autres, mais je ne sais si quelqu'un est prêt à assurer un lanceur chinois ? Si les Chinois ont lancé un Intelsat, ce n'est qu'à la suite d'une forte pression politique. Rappelons qu'il y a eu quelques centaines de morts lorsque le lanceur est retombé sur un hôtel qui n'avait pas été évacué (mais 7 morts officiels !).

Bibliographie : Eric Lefort (ESA, Paris) : *Increase in Ariane's Reliability*, Bulletin de l'ESA.