

Modélisation du coût d'un Lanceur de Mini Satellite

Pascal Pempie

Consultant

pascal.pempie@Wanadoo.fr

Reçu le : 12/11/2019

Accepté le : 09/02/2020

Abstract :

Le marché des lanceurs de mini satellites (MLV) est en pleine croissance générant une forte concurrence. Il est donc nécessaire de disposer dès le début d'un projet de MLV de modèles prédictifs des coûts. Cet article présente les différents modèles économétriques permettant de prévoir le coût d'un Lanceur spatial. En effet il est considéré que le coût appartient à l'ensemble des valeurs numériques appelé performances. Ces modèles sont soit Képlériens issus de bases de données soit Newtoniens utilisant des lois générales avec des variables universelles Une bibliographie critique des différentes relations est présentée

Une prédiction des coûts de Mini Lanceurs (M.L.V) capables de mettre en orbite SSO 100kg mais utilisant soit un étage pressurisé, soit propulsé par un moteur à Générateur de Gaz ou par un Bleed Froid est présentée.

The market for mini-satellite launchers (MLV) is growing rapidly with consequent strong competition. It is therefore necessary to have at the beginning of a MLV project predictive costs models of. This article presents the different econometric models to predict the cost of a space launcher. It is considered that the cost belongs to the set of numerical values called performances. These models are either Keplerian from databases or Newtonians using general laws with universal variables A critical bibliography of different relations is addressed. The costs prediction of a Mini Launchers (M.L.V) able to put into orbit SSO 100kg but using either a pressurized stage, or propelled by a Gas Generator engine or a Cold Bleed is presented.

First a critical bibliography of different Cost Estimation Relation Ships (CERs) is addressed

Cost analysis dealing to Nano Launch Vehicles is addressed. These Launch Vehicles able to orbit 100kg on SSO differ by their Engines: Pressure Fed versus Cold Bleed versus Gas Generator. ,

1. Introduction:

Le coût appartient à l'ensemble des valeurs numériques appelé « performances » au même titre que la masse au décollage (Glow) et la capacité d'emport.

Le coût suit des lois déterministes (Cost Estimating RelationShip (CER)

Ces lois peuvent être incluses dans un logiciel d'optimisation multidisciplinaire (MDO) [1]

La détermination du coût est une activité technique ; »Design to Cost » .Quant au prix il fait partie de la négociation commerciale L'estimation des coûts fait partie du processus de conception. [2]



COST

L'estimation du coût doit permettre au stade de l'avant projet d'apprécier en termes de coûts récurrents les différentes alternatives de conception : choix des ergols, nombre d'étages, technologie de motorisation.

Le coût estimé permet de situer le projet vis-à-vis du marché et de la concurrence.

Les coûts prédits doivent être suffisamment précis ; sous évalués en début de projet ils peuvent le mettre en péril en cas de dérive.

2. Définitions : Coût versus Prix

La notion de coût et de prix sont souvent confondus.

, Nous définirons

- **Coût**

Le coût est la somme des coûts d'approvisionnement fabrication d'essais et de contrôle Il est exprimé en « man.year » équivalent au labeur annuel horaire d'un homme rendant ainsi cette variable universelle

Pour information selon [3] 1 ManYear vaut 12k\$ 2018

Lors de la production le coût bénéficie de l'apprentissage acquis Il est donc pertinent de distinguer le coût du premier article (C.F.U, Cost of first Unit) des exemplaires suivants pour aboutir au coût récurrent

Cet apprentissage s'exprime par la « courbe d'apprentissage »

$$C_N = CFU \cdot N^b \quad C_N. \text{ Coût du rang } N$$

$$b = L_N(S)/L_N(2)$$

S représente la réduction de coût lorsque la quantité est doublée.

A titre d'exemple les valeurs de S sont les suivantes

Structures $S=0.87$

Propulsion liquide $S=0.96$

Propulsion Solide $S=0.93$

Structures $S=0.87$

$S=0.88$ Pour Ariane4 :113 lancements

Prix

Le prix d'un lancement est la somme du coût, du lanceur, des opérations de lancement, des taxes et du bénéfice auquel s'ajoute le coût éventuel des assurances. Les prix sont des valeurs monétaires \$ ou Euros.

Les coûts sont internes à l'entreprise, les prix sont « publics »

L'ouvrage d'Isakovitz [4] compile les prix des lanceurs de leurs caractéristiques et de leurs capacités d'emport.

- **3 Modèles numériques**

[2] et [5] Adressent les modèles de coûts documentés

Ceux-ci sont de deux natures

- **Képlériens**

Les CER Cost Estimating Relationships (CERs)

Sont extraits de bases de données

On citera

[6] Transcost un seul Paramètre: la Masse

$$C=a \cdot M^b$$

[7] LVCM (Launch Vehicle Cost Model



Très complet prend en compte :

Les structures, la motorisation, le système électrique la coiffe, l'intégration

Etage « liquide » (k\$₉₄)

$$C1 = 0.0525 F_{(lb)}^{0.8925} \cdot 2.47^{LH2} \cdot 1.5204^{Pf}$$

LH2=1 pour la cryo sinon 1

Pf=1 pour étage pressurisé

Moteur à ergols liquide :

$$C = 0.0011 F_{(lb)}^{0.3937} \cdot ISP^{1.9291} \cdot 2.2926^{MSC}$$

MSC=1 Moteur à combustion étagée

La précision de la prédiction par des modèles Képlériens dépend de la base d'extraction ; Il est risqué d'estimer un cout d'un article hors famille de la base.

- Newtoniens

Modèles utilisant des lois générales avec des variables universelles nécessitant d'être calibrées.

On citera

[8] Nafcom .Logiciel utilisé par la NASA Par exemple pour vérifier les coûts de SpaceX [9]

[10] Price

[11] Map H Modèle conceptuel

Ces modèles Newtoniens utilisent le principe de Freiman :

Le coût spécifique, par unité de taille, décroît avec la taille selon une loi puissance

$$C = a b^k M^{1-1/k}$$

C=Coût spécifique M=masse
k=complexité (2<k<10)

4. Modélisation du coût d'un Lanceur de Mini Satellite

N.T. Drenthe and all. [12] Présentent Une méthode d'évaluation des coûts d'un MLV utilisant les travaux de Koelle [6] c'est-à-dire en utilisant des CERs avec pour seul paramètre la masse $C=a \cdot M^b$; a et b dépendant des objets : réservoirs, moteurs, tuyauteries, systèmes électriques etc.

On remarquera que les valeurs de a et b sont très étendus : « a » variant de 90.72 (propulsion solide) ; 20 pour les réservoirs ; « b » variant de pour 1.07 pour le système de pressurisation à 0 ; 7 pour les réservoirs (*ceci sans tenir compte du système électrique*)

Koelle [6] propose b= 0,46 pour un étage liquide (*sans motorisation*) La limite basse de sa base est de 10 tonnes

5. Coûts versus technologies Lanceur

P Pempie [13] Propose le dimensionnement d'un Nano Lanceur capable d'orbiter 100kg sur une orbite 600 km héliosynchrone (SSO)

Trois variantes sont adressées

Pour le premier étage soit

1. Moteur « Pressure Fed »
2. Moteur à Générateur de Gaz
3. Moteur « Cold Bleed »

Le second étage est motorisé par un Moteur « Pressure Fed »

La réf. [14] adresse ces cycles

L'influence de ces technologies sur les coûts des étages 1 et 2 intégrés et motorisés est appréciée à l'aide du modèle « Launch Vehicle Cost Model » (LVCM) [7]

**COST**

Le tableau suivant présente les caractéristiques et les coûts associés

(Il s'agit du premier article)

	Pressure Fed	GG	Cold Bleed
GLOW(t)	21,5	12	17
F1kN	265	150	210
Isp1 (s)	309	340	322
Coût Mot1 (k\$94)	5305	5100	5242
F2kN	9	7	9
Isp2 (s)	324	324	324
Coût Mot2 (k\$94)	1535	1390	1534
Coût Etg1+2 (k\$94)	11154	9536	10174
Man Year(2001)	14	12	12,32
Couts relatifs	1,170	1	1,067

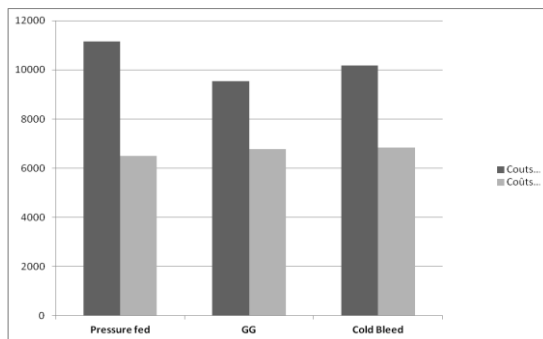


Figure Illustrant la hiérarchie des coûts étages et de leur motorisation

Analyse : Contre toute intuition la technologie « Pressure Fed » est quelque peu pénalisée, de 20% : Sa masse au décollage (GLOW) requiert un moteur plus puissant et LVCM applique une pénalité de 15% sur la partie structurale.

Par contre en termes de coûts de développement la technologie d'étage

pressurisé est moins risqué en l'absence de turbopompes.

Remarque : l'utilisation des CERs basées uniquement sur la masse GLOW pénalise lourdement la technologie « Pressure Fed » de l'ordre de 30 %

5 Conclusion :

Les estimations basées sur la masse sont pénalisantes .L'utilisation de moteur à Générateur de gaz apporte un faible gain en terme de coûts malgré sa complexité : organe de combustion supplémentaire et l'existence parties chaudes Tentrée Turbine de l'ordre de 900k nuisant à la durée de vie et à la réutilisation.

6. Bibliographie

[1] Han P. Bao Process Cost Modeling for Multi-Disciplinary Design Optimization
Old Dominion University
Department of Mechanical Engineering
Norfolk, VA

[2] Pascal Pempie . Thierry Le Fur.
Considérations on L.V Cost modeling
IAC – 03 – V.2. 08

[3] Occupational Employment and Wages May U.S State Department of Labor 2018

[4] S.J Isakovitz and all. International reference guide to Space Launch Systems . AIAA 1999

[5] O. Trivailo and all Review of hardware cost estimation methods, models and tools Progress in Aerospace Sciences



[6] Dr Koelle; Handbook of cost engineering for Space Transportation systems; Transcost 7.1

[7] Tecolote .Cost Risk and Uncertainty Analysis Metrics Manual (CRUAMM)
AIR FORCE COST ANALYSIS
AGENCY(AFCAA .2013

[8] SAIC. NAFCOM. Documentation and Users's Manual . Version 6 . 1999

[9]Falcon9 NAFCOM
CostEstimatesNASAAssociateDeputyAdministratorforPolicy August2011

[10]] Price www.perfectprice.com

[11] Foussier MapH From product description to cost : a practical approach SPRINGER to be published

[12] N.T Drenthe and all Cost Estimating of Commercial Smallsat Launch Vehicles EUCASS2017-286

[13] P.Pempie. Conception d'un Lanceur de mini satellite. COST Vol. 17 7 2016

[14] P.Pempie . Etude des cycles thermodynamiques des moteurs fusés à ergols liquides COST Vol 6 01/18