



UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE FACULTE DE DROIT ET DE SCIENCE POLITIQUE

PÔLE TRANSPORTS INSTITUT DE FORMATION UNIVERSITAIRE ET DE RECHERCHE DU TRANSPORT AERIEN (IFURTA)

MARCHE ET ECONOMIE DES MICRO-LANCEURS DE SATELLITES OU

LA COMPLEXITE DU MARCHE ET DE L'ECONOMIE

DES MICRO-LANCEURS SPATIAUX ET SES BARRIERES A L'ENTREE

QUELS AJUSTEMENTS ET STRATEGIES POSSIBLES ?

Mémoire pour l'obtention du Master 2 de Droit et Management du Transport Aérien

par

Clément MAUFENE-GAMBIER

Sous la direction de

Mme. le Professeur Valérie LAMULLE et Mme. le Tuteur Julie LABORDE-DIT-BOURIAT

Année universitaire 2019-2020

AVERTISSEMENT

L'IFURTA n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans le cadre de ce travail. Ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteur et ne peuvent faire l'objet d'aucune considération hors du contexte de ce rapport.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement ma Directrice de mémoire, Madame le Professeur Valérie LAMULLE, pour son intérêt pour mon sujet mêlant les domaines de l'aérospatial, du droit et de l'économie. Je la remercie également de l'aide à la réflexion qu'elle m'a proposée ainsi que des cours d'économie qu'elle dispense et sur lesquels je me suis appuyé pour ce mémoire.

Je remercie grandement ma tutrice, Madame Julie LABORDE DIT BOURIAT, Directrice de l'IFURTA et Professeur de droit aérien, pour m'avoir donné la chance de participer à la formation de Master ainsi qu'au Diplôme d'Etudes Supérieures Universitaires en Management du Transport Aérien alors que ma formation initiale a pour spécialité l'ingénierie aéronautique. J'ai grandement apprécié l'écoute et la bienveillance dont elle a fait preuve à mon égard ainsi que ses conseils et ses recommandations tout au long de l'année universitaire.

Je tiens tout particulièrement à remercier ici deux camarades de promotion de l'Institut Polytechnique des Sciences Avancées, François FELISIAK et Timothée GERLINGER d'OPUS AEROSPACE, sans qui je n'aurais sans doute jamais été amené à m'intéresser au sujet.

J'adresse également mes chaleureux remerciements à Mesdames Lia BACHET SILVA, Marjorie VIAL et Stéphanie GLAVNIK pour leur implication dans l'organisation du quotidien de la formation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	8
PARTIE 1 – LE MARCHÉ DES MICRO-LANCEURS ET SES PARTICULARITÉS : UN TRANSPO DÉDIÉ DONC TRÈS DÉPENDANT AUX FORTES CONTRAINTES D'ENTRÉE	
Chapitre 1 – Un marché de niche caractérisé par une interrelation offre/demande dissymétrique et un multiplicité d'acteurs	
Section 1 – Un marché très spécialisé	12
Section 2 – Une totale dépendance au marché des microsatellites	27
Section 3 – Une multitude de parties prenantes	32
Chapitre 2 – Un marché soumis à de fortes barrières d'entrée	49
Section 1 – Une industrie capitalistique engendrant des risques financiers majeurs très pénalisants	s49
Section 2 – Un dispositif législatif de plus en plus contourné	54
Section 3 – Une concurrence protéiforme permanente	58
PARTIE 2 – L'ÉCONOMIE DES MICRO-LANCEURS ET SES CONTRAINTES : MUTATIONS TECHNIQUES ET ADAPTATION DES STRATÉGIES D'EXPLOITATION	64
Chapitre 1 – Rappel sur l'évolution des politiques spatiales et éclairage sur la répartition des coûts interférants dans le lancement d'un engin	64
Section 1 – De l'essor des politiques spatiales à une « normalisation » de l'économie spatiale	64
Section 2 – La répartition des coûts d'un lancement d'un micro-lanceur	69
Chapitre $2 - \grave{A}$ la recherche constante d'une diminution des coûts de revient	76
Section 1 – Des mutations techniques	76
Section 2 – De nouvelles stratégies d'exploitation ambitieuses	
CONCLUSION	89

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGNIFICATION

AFE Agence France Entrepreneur

AMF Autorité des Marchés Financiers

BRI Banque des Règlements Internationaux

CNES Centre National d'Études Spatiales

CUPEEA Comité des Nations Unies pour l'Utilisation Pacifique de l'Espace Extra-Atmosphérique

DARPA Defense Advanced Research Projects Agency,

Agence pour les Projets de Recherche Avancée de Défense des Etats-Unis d'Amérique

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,

Centre Allemand pour l'Aéronautique et l'Astronautique

EBIT Earnings Before Interest and Taxes,

Bénéfice avant Intérêts et Impôts (BAII)

ESA European Space Agency,

Agence Spatiale Européenne

ETHZ Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,

École Polytechnique Fédérale de Zürich

GEO Geosynchronous Orbit,

Orbite Géosynchrone

GPS Global Positionning System,

Système Mondial de Positionnement

GTO Geostationary Transfert Orbit,

Orbite de Transfert Géostationnaire

ISRO Indian Space Research Organisation,

Organisation Indienne de Recherche Spatiale

ISS International Space Station,

Station Spatiale Internationale

LEO Low Earth Orbit,

Orbite Terrestre Basse

MTCR Missile Technology Control Regime,

Régime de Contrôle de la Technologie des Missiles

NAMMO Nordic Ammunition Company,

Société Nordique de Munitions

NASA National Aeronautics and Space Administration,

Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace

ONERA Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales

PDG Président Directeur Général

PWC PriceWaterhouseCoopers (société)

SAS Société par Actions Simplifiée

SPACE Spurring Private Aerospace Competitiveness and Entrepreneurship,

(Act) Loi visant à stimuler la compétitivité et l'esprit d'entreprise dans le secteur aérospatial

privé

SSO Sun-Synchronous Orbit,

Orbite Héliosynchrone

SSTO Single Stage To Orbit,

Lanceur à étage unique jusqu'à l'orbite

ULA United Launch Alliance

URSS Union des Républiques Socialistes Soviétiques

USA United States of America,

États-Unis d'Amérique

INTRODUCTION

La conquête de l'espace a toujours été un rêve intime de l'être humain et il a imaginé très tôt des moyens pour y parvenir.

Ainsi, dès le 1^{er} siècle, au cours des guerres menées par les empereurs de Chine de la dynastie Han, les troupes utilisent les premières formes de fusées d'artillerie¹.

Au cours des siècles, mais notamment lors du conflit de la 2^e guerre mondiale, la fusée telle que nous la connaissons aujourd'hui prend peu à peu forme : elle se compose d'un corps assurant la propulsion et d'une charge utile qui est souvent meurtrière tel, par exemple, dans le missile balistique V2 développé par l'Allemagne nazie.

L'apogée de la conquête spatiale est sans doute atteinte avec la réussite du programme américain Apollo en 1969. Mais, progressivement, l'intérêt pour la conquête spatiale et l'accès à l'espace régresse.

Toutefois, à partir du début des années 2000, une transformation profonde de l'industrie spatiale se met en œuvre sous l'impulsion du développement des hautes technologies, notamment de la miniaturisation des satellites et de besoins nouveaux d'applications, par exemple, en télécommunication et cartographie. Aujourd'hui, nous avons recours, sans le savoir, plus de 36 fois par jour à un satellite! Le marché aérospatial devrait ainsi connaître une croissance impressionnante dans les prochaines années. Cette expansion attire de nouveaux acteurs économiques privés qui impulsent des dynamiques nouvelles : rentabilité et optimisation des coûts deviennent le souci majeur. Ils touchent tous les domaines de cette industrie mais particulièrement celui, très spécifique, du transport spatial donc du lancement.

C'est ainsi que, depuis quelques d'années, au côté des lanceurs habituels, se développent et apparaissent des lanceurs d'un nouveau genre, les micro-lanceurs.

Le terme de « lanceur » désigne tout véhicule spatial capable de transporter une charge utile de la surface de la terre jusqu'à une orbite de travail lors d'une opération appelée lancement.

_

¹ P. JUNG, *History of Spaceflight*, présentation de séminaire IFURTA 2019-2020.



Fig. 1 – Le micro-lanceur Electron au décollage (Source : www.astronaut.com)

L'adjonction spécifique de « micro » fait référence à une catégorie de lanceurs ne dépassant pas 25 mètres de haut pour un poids total au décollage de moins de 30 tonnes et capable de satelliser une charge utile allant jusque 500 kg à une altitude de 300 km.

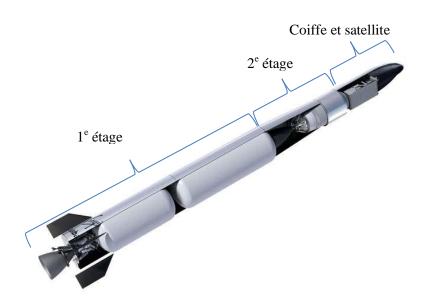


Fig. 2 – Vue éclatée d'un micro-lanceur « standard » (Source : www.futura-sciences.com)

L'avènement des micro-lanceurs et des microsatellites² auquel nous verrons qu'il est étroitement corrélé, constitue clairement une rupture dans la conduite des opérations spatiales de lancement.

Mon expérience d'ingénieur aéronautique et aérospatial m'a amené à m'y intéresser de très près. En effet, souhaitant développer un programme de micro-lanceur, j'ai eu, avant tout, à m'interroger sur l'intérêt et les débouchés économiques d'un tel projet. Cette réflexion sous-tend l'objet de ce mémoire.

Ainsi, il s'agit de questionner la nature et la pertinence tant du marché que de l'économie très complexes des micro-lanceurs d'autant qu'elles se heurtent à de nombreuses « barrières à l'entrée ».

Il doit être précisé ici, d'une part, que le terme « marché » est envisagé comme un équilibre entre une demande émanant d'un besoin et une offre de produit ou de service. D'autre part, que le terme « économie » désigne les moyens visant à l'optimisation des coûts financiers du lancement.

Par ailleurs, l'expression « barrières à l'entrée » désigne, l'ensemble des obstacles à surmonter par une entreprise souhaitant se lancer sur un nouveau marché. Elles peuvent être :

- Soit naturelles, lorsqu'elles ne dépendent pas des acteurs déjà présents sur le marché. Par exemple, les forts investissements nécessaires pour démarrer toute activité commerciale spatiale, plutôt décourageants pour des acteurs potentiels.
- Soit artificielles, lorsqu'elles relèvent d'obstacles mis en place par les acteurs déjà présents sur le marché qui ont, bien sûr, tout intérêt à limiter au maximum la concurrence. Nous verrons que, dans l'industrie aérospatiale, particulièrement dans le domaine du micro-lancement, la principale barrière à l'entrée artificielle est une course effrénée aux nouvelles technologies.

Afin de répondre à la problématique posée par le mémoire, nous avons exploré tout d'abord les différentes facettes du marché des micro-lanceurs et déterminer ses constitutifs fondamentaux à savoir une forte dépendance et une concurrence effrénée.

.

² Soit généralement, un satellite dont le poids ne dépasse pas 500 kg. Par ailleurs, il est à noter que, bien que les données du marché des microsatellites ne soient pas l'objet du mémoire, elles seront parfois citées et utilisées afin d'éclairer ou d'expliciter le marché des micro-lanceurs.

L'étude de ses principales contraintes financières mais aussi de pistes possibles d'amélioration, tant technologiques que stratégiques, permet ensuite d'en évaluer les capacités d'ajustement aux réalités économiques actuelles.

Enfin, afin de circonscrire le périmètre de ce mémoire, il est important de préciser que, bien que traitant d'un domaine très technique, nous nous sommes attachés à ce que cet aspect ne soit pas prédominant. Il n'est développé que lorsqu'il présente un intérêt pour l'objet du mémoire.

PARTIE 1 – LE MARCHÉ DES MICRO-LANCEURS ET SES PARTICULARITÉS : UN TRANSPORT DÉDIÉ DONC TRÈS DÉPENDANT AUX FORTES CONTRAINTES D'ENTRÉE

Les marchés des différentes composantes de l'industrie spatiale sont en pleine mutation et celui du transport spatial vit une transformation intensifiée par une rude compétition technologique.

Le marché du micro-lancement n'y échappe pas d'autant que son analyse met en évidence de fortes particularités.

Le Chapitre 1 démontre qu'il s'apparente à un marché pouvant être qualifié « de niche » puisqu'il répond aux besoins d'une charge à déplacer exclusive, un microsatellite, dont il est totalement dépendant. Pluralité et diversité des acteurs compliquent encore la situation.

Le Chapitre 2 met en perspective les différentes barrières à l'entrée auquel il doit faire face, tant au plan financier que législatif et concurrentiel.

Chapitre 1 – Un marché de niche caractérisé par une interrelation offre/demande dissymétrique et une multiplicité d'acteurs

Très innovant, le marché du micro-lanceur est un marché très spécialisé d'autant qu'il occupe une mince frange du marché global du lancement (Section 1). Il est, par ailleurs, totalement dépendant de sa charge à transporter et donc d'un tiers marché, celui des microsatellites (Section 2). Pour autant, ce marché marginal du lancement attire à lui beaucoup de projets et d'acteurs dont nous dresserons le panorama. Attirés par son potentiel développement, il semble aussi l'affaiblir par leur nombre, leur nature et leur intérêt souvent contradictoires (Section 3).

Section 1 – Un marché très spécialisé

Pour prendre la juste mesure de la nouveauté du marché du micro-lanceur et sa place actuelle, voire future, il est important de rappeler tout d'abord les fondamentaux techniques et les caractéristiques du marché du transport de charges spatiales (Paragraphe I.) puis, de le repositionner dans l'industrie du lancement spatial (Paragraphe III.) et d'en analyser les principaux indicateurs de référence (Paragraphe III.).

³ Définition : Un marché de niche est un marché très étroit correspondant à un produit ou service très spécialisé. (www.definitions-marketing.com)

I. – Les fondements du transport spatial

A. – Sa place dans la chaîne de valeur de l'industrie spatiale

Le transport spatial, activité de service de mise en orbite de charges utiles, opère comme l'élément clé de l'exploitation spatiale. Il est en effet le lien unique et direct entre la Terre et le lieu où vont se dérouler les opérations spatiales.

Cependant, il ne représente qu'une part très marginale du secteur du marché et de la chaîne de valeur des acteurs spatiaux comme le montre le tableau suivant :

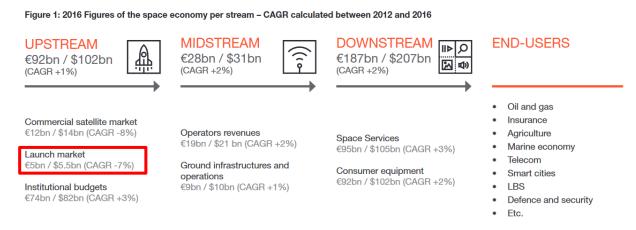


Fig. 3 – Représentation de la chaîne de valeur des acteurs spatiaux selon le cabinet PWC en 2016 (Source : www.pwc.fr)

En encadré, nous voyons qu'en 2016, sur un secteur évalué à 340 milliards de dollars américains, le marché du lancement ne représentait que 5.5 milliards de dollars américains, soit en relatif, 1,7% du marché de l'industrie spatiale.

Ce secteur du lancement spatial est donc minime dans la chaîne de valeur des différents acteurs composant l'industrie spatiale du fait du déséquilibre du ratio :

Part de marché général
Intérêt dans la chaîne de valeur

B. - Quelques éléments de compréhension

Le transport spatial consiste à propulser un satellite entre un point de départ, la surface de la Terre, et un point d'arrivée, son orbite de travail. Selon la nature et les fonctions du satellite, le type d'orbite de travail ainsi que le point d'injection⁴ sur cette orbite sont différents.

Il existe 4 familles d'orbites de travail :

L'orbite basse (aussi appelée en anglais Low Earth Orbit ou LEO) :

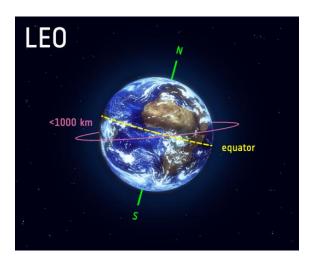


Fig. 4 – Exemple d'une orbite LEO sur le globe terrestre (Source: www.esa.int)

Comme son nom l'indique, la zone des orbites basses est composée de l'ensemble des orbites proches de la terre. Il s'étend de la frontière de l'espace, à savoir la ligne de Karman⁵ située de 100 km d'altitude de la surface terrestre au niveau de la mer, jusqu'à une altitude de 1000 km. Une orbite basse est orientée dans le même plan que l'équateur, ligne géographique de référence.

C'est une orbite particulièrement utilisée car :

- Elle est peu limitée dans l'utilisation de l'inclinaison spatiale. Ainsi, il existe autant d'orbites qu'il existe d'angles d'inclinaison sur cette orbite basse.
- Elle est d'accès facile tant techniquement qu'économiquement.

Définition : Point de passage d'un engin spatial de sa trajectoire de lancement à sa première orbite.

Définition de la ligne de Karman par la Fédération Aéronautique Internationale. (www.fai.org)

En conséquence, elle est propice au développement des satellites d'imagerie et d'observation de la Terre mais également de recherche tel que, par exemple, la station spatiale internationale ou ISS (International Space Station).

Cependant, la principale difficulté d'exploitation présentée par cette orbite est que les satellites doivent s'y déplacer à des vitesses angulaires relatives à la terre importantes (7,5 km/s) du fait des forces de mécanique spatiale. Ils ne peuvent donc rester stationnaires comme le nécessitent, par exemple, les satellites de télécommunications à couverture permanente.

Cependant, cette difficulté peut être contournée par le déploiement de très nombreux satellites travaillant de concert : les « constellations de satellites ».

 L'orbite polaire et héliosynchrone (aussi appelée en anglais Sun-Synchronous Orbit ou SSO):

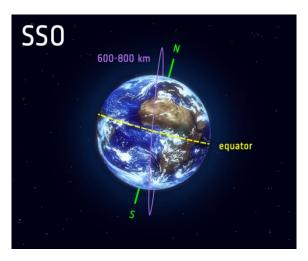


Fig. 5 – Exemple d'une orbite SSO sur le globe terrestre (Source : www.esa.int)

Les orbites polaires et héliosynchrones sont les seules orbites dont le plan est perpendiculaire à celui de l'Équateur. Opérant à des altitudes comparables à celles des orbites basses, de 100 à 1000 km de la surface de la terre, ces deux types d'orbite sont principalement dédiés à des satellites d'observation qu'ils soient civils ou militaires, notamment pour réaliser des relevés d'évolution topographique. En effet, elles permettent le survol systématique, à un même temps de la journée, d'un point ou d'une région particulière au sol et donc le suivi régulier de son évolution. Par exemple, en orbites polaires, des satellites effectuent des relevés de fonte des glaces aux pôles, ce qui en détermine l'évolution. De même, en orbite héliosynchrone, un satellite

peut, durant toute sa vie opérationnelle, si sa trajectoire orbitale comporte un passage sur Paris, survoler cette capitale toutes les 24 heures.

- L'orbite géostationnaire (aussi appelée en anglais Geosynchronous Orbit ou GEO) :

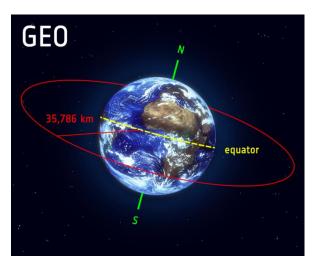


Fig. 6 – Exemple d'une orbite GEO sur le globe terrestre (Source : www.esa.int)

L'orbite géostationnaire est située à près de 35 000 km de la surface de la Terre avec une orbite circulaire parfaite dont l'anneau est à la verticale de l'équateur. Tous les satellites qui y sont positionnés suivent parfaitement la rotation de la Terre et restent donc parfaitement immobiles par rapport à un référentiel terrestre.

Ces caractéristiques sont parfaites pour le positionnement de satellites de télécommunication, que ceux-ci soient civils ou militaires. C'est également sur cette orbite que sont situés les satellites destinés au géo-positionnement terrestre (système GPS...).

- L'orbite de transfert géostationnaire (aussi appelée en anglais Geostationary Transfert Orbit ou GTO) :

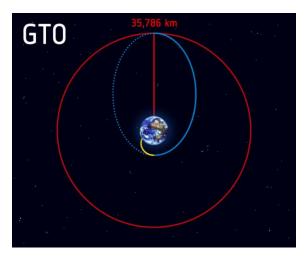


Fig. 7 – Exemple d'une orbite GTO sur le globe terrestre (Source : www.esa.int)

Cette orbite est de forme elliptique. En effet, sa trajectoire emprunte une orbite basse (en jaune), puis rejoint l'orbite géostationnaire (en rouge) par une orbite de transfert (en bleu).

Un positionnement sur cette orbite associé aux mécanismes de mécanique spatiale permet d'accélérer progressivement la vitesse d'un satellite et ainsi, d'arriver à le propulser en dehors du champ gravitationnel terrestre. Cette orbite est principalement destinée aux satellites de recherche et d'exploration spatiale : par exemple, c'est ainsi que les engins spatiaux quittent les orbites terrestres pour la Lune ou Mars.

En corollaire, il faut retenir que :

- Plus une orbite est éloignée de la terre, plus elle requiert d'énergie pour l'atteindre. Il en est de même pour les orbites polaires et SSO, perpendiculaires au plan de l'équateur, car elles ne bénéficient pas de l'aide énergétique apportée par la rotation de la Terre autour de son axe.
 - Nous voyons donc que les caractéristiques orbitales prédéfinissent la puissance énergétique du lanceur, l'un des paramètres essentiels de son type.
- Un lancement ne peut desservir qu'une seule orbite et ce, quel que soit le type de lanceur. Chaque orbite correspond donc à un transport et une unique mission.

Le type de lanceur est déterminé en fonction des caractéristiques du satellite devant être lancé (type d'orbite à atteindre en fonction de sa mission, taille, poids, durée de vie, sensibilité aux interférences électromagnétiques). Les constructeurs sont donc amenés à proposer 3 gammes de lanceurs qui peuvent être présentées synthétiquement :

Type de lanceurs	Légers	Intermédiaires et moyens	Lourds et super lourds	
Masse de satellite orbitable en LEO	De quelques kilos à 2 tonnes	De 2 à 7 tonnes	À partir de 10 tonnes	
Poids au lancement	140 tonnes	350 tonnes	750 tonnes	
Prix moyen du lancement	25 à 30 millions US\$ ⁶	50 millions US\$ ⁷	Plus de 100 millions US\$ ⁸	
Exemple de Vega, Rockot, lanceurs Kuaizhou 1		Soyouz, PSLV, Falcon 9	Ariane 5, Falcon 9 Heavy, Proton, CZ-3	

Fig. 8 – Présentation synthétique des gammes actuelles de lanceurs

Tous les lanceurs sont des véhicules de lancement dont la valeur est totalement consommée. En effet, ils sont généralement conçus et utilisés pour une seule mission et vont être totalement détruits lors du lancement.

Afin de réduire cette part de dépense importante, des techniques de récupération partielle ont vu le jour⁹.

Le marché du lancement est mondial, à fort ancrage territorial : s'y retrouvent des acteurs historiques mais aussi des puissances avec un développement de programme spatial aussi rapide que leur essor économique (notamment la Chine et l'Inde).

⁹ Cf. PARTIE 2 – Chapitre 2 – Section 2 – Paragraphe III.

⁶ Référence de prix. (www.spacenews.com)

⁷ Référence de prix. (www.ruaviation.com)

⁸ Référence de prix. (www.space.com)

Rocket +	Origin +	First launch +	2010 \$	2011 \$	2012 \$	2013 \$	2014 \$	2015 \$	2016 \$	2017 \$	2018 \$	2019 \$
Ariane 5	Europe	1996	12	8	12	6	10	12	10	10	9	8
Proton-M	Russia	2001	8	7	11	8	8	7	3	3	0	3
Soyuz-2	Russia	2006	1	5	4	5	8	6	5	5	5	6
PSLV	India	2007 ^[a]	1	2	2	2	1	3	3	2	3	3
Falcon 9 / Heavy	United States	2010	0	0	0	2	4	5	8	12	16	8
Electron	United States	2017	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0	3	6
Vega	Europe	2012	N/A	N/A	0 [p]	1	1	2	2	4	2	2
Kuaizhou 1A	China	2017 ^[c]	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1	1	4
Others ^[d]	-	-	7	10	5	7	5	6	6	4	5	1
	Total market		29	32	34	31	37	41	37	41	44	40

a. A First launch of the competitive PSLV-CA and PSLV-XL versions (2007 and 2008)

Fig. 9 – Fréquence annuelle de lancements de 2010 à 2019 par type de lanceur et territoire d'origine (Source : en.wikipedia.org)

Comme le présente le tableau ci-dessus, le nombre moyen de lancements est en légère croissance annuelle sur les 10 dernières années. Il reste cependant encore inférieur à 50 par an.

Par ailleurs, le nombre moyen de lancements par opérateur dépasse rarement le chiffre de 15 par an, avec une moyenne établie à moins de 5. Cet effet de concentration sur quelques acteurs fragilise le marché, mais est une condition *sine qua non* tant de développement que de préservation des intérêts stratégiques de chaque pays développeur de lanceurs.

b. ^ Maiden flight of Vega was non-commercial

c. A Excluding two demo flights of Kuaizhou-1 version in 2013 and 2014

d. A Atlas + Delta excluding military missions and GPS; Dnepr, Rokot, Zenit

Number of Spacecraft Launched, 1957-2017

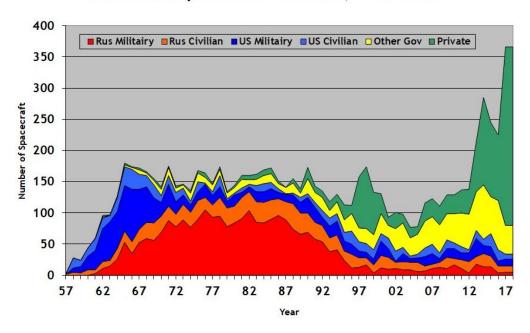


Fig. 10 – Nombre total de lancements annuels de satellites et répartition par activité de 1957 à 2017

(Source: www.claudelafleur.qc.ca)

Le graphique de le Fig. 10 montre que le nombre de satellites envoyés par an stagne de 1965 à 2005. A compter de 2010, il se développe très fortement puisqu'il triple, notamment dans le secteur civil public et dans le secteur privé.

Par ailleurs, les chiffres montrent clairement que le nombre de satellites orbités par an est bien supérieur au nombre de lancements. En effet, la majorité des lanceurs, notamment lourds et super lourds, sont en capacité d'envoyer plusieurs satellites à la fois sur des orbites identiques.

C'est dans ce contexte de marché qu'apparaît une nouvelle frange de service subsidiaire, celle des micro-lanceurs.

II. – La place actuelle des micro-lanceurs dans le transport spatial

Le marché des micro-lanceurs est dépendant des mêmes facteurs que celui des autres lanceurs. Il s'adresse principalement à des opérateurs de satellites désirant atteindre les orbites LEO, le cas échéant, les orbites polaires et SSO, plus rarement les orbites GEO et GTO.

Il concerne des charges satellitaires allant de quelques grammes jusqu'à 500 kg mais son cœur de marché principal se situe entre 50 et 200 kg. Cependant, la plupart des études fragmente leur analyse sur une échelle allant soit de 10 à 100 kg, soit de 50 à 150 kg.

Les micro-lanceurs sont donc calibrés et optimisés pour la mise en orbite basse. Ainsi, la majorité des acteurs déjà présents, comme la société RocketLab avec son lanceur Electron, propose une charge utile en LEO de 150 kg maximum.

Comme le montre l'encadré dans le tableau ci-dessous, le marché des micro-lanceurs se développe à la marge de celui des lanceurs légers, pour des poids de zéro à 300 kg (la frange allant de 300 à 500 kg étant souvent récupérée par le marché des lanceurs légers).

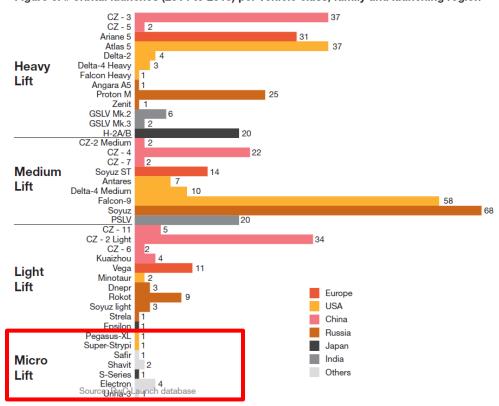


Figure 6: # orbital launches (2014 to 2018) per vehicle class, family and launching region

Fig. 11 – Graphique du nombre de lancements par famille de lanceurs de 2014 à 2018 réalisé par le cabinet de conseils PWC en 2018

(Source: www.pwc.fr)

Ce graphique met en évidence que, sur la période étudiée, seuls 10 lancements sur 458 concernent des micro-lanceurs, soit moins de 2.5% du marché en volume de lancement. Cela prouve que ce marché reste donc encore très confidentiel.

Toutefois, les opérateurs de micro-lanceurs souhaitent démocratiser l'accès à l'espace en pratiquant un prix au lancement avantageux. En effet, les offres de lancement actuellement disponibles se situent toutes sous les 10 millions US\$.

Nous verrons que ce marché croît très rapidement avec actuellement plus d'une centaine de projets à l'étude ou en développement partout dans le monde. Par ailleurs, comme présenté plus loin dans ce mémoire, le micro-lanceur permet un transport dédié individuellement où l'ensemble des paramètres de l'orbite est défini par le client opérateur et exploitant du satellite.

Or, comme le montre le graphique suivant, le nombre de microsatellites à orbiter augmente fortement depuis le début des années 2000 et devrait continuer à croître du fait du déploiement des constellations de satellites.

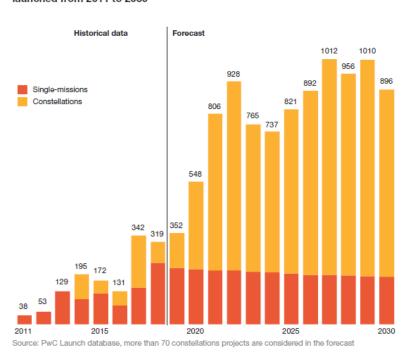


Figure 7: #smallsats (<500 kg) for single missions and constellations to be launched from 2011 to 2030

Fig. 12 – Évolution du nombre de micro satellites à lancer de 2011 à 2030 réalisé par le cabinet de conseils PWC en 2018 (Source : www.pwc.fr)

Cette augmentation du nombre de microsatellites est donc bénéfique au développement des micro-lanceurs, sous réserve qu'ils soient en mesure d'assurer l'essentiel du service orbital (type

d'orbite, délais d'accès au lancement) mais aussi, de rester compétitifs financièrement par rapport aux autres types de lanceurs. Nous y reviendrons en détail dans la section 2 de ce chapitre.

Le marché des micro-lanceurs apparaît donc comme un épiphénomène dans le marché des lancements spatiaux. Nous allons maintenant en identifier et en détailler les principaux indicateurs de référence.

III. – Étude de quelques indicateurs de référence

Afin de compléter notre analyse générale du marché, nous rappellerons ici sa valeur globale et son volume, puis nous en développerons les principaux indicateurs d'intérêt et de comparaison économiques.

A. – Analyse contradictoire de deux paramètres essentiels

1° – Le prix au kilo orbité

Comme vu précédemment, le marché général du lancement était évalué, en 2016, à un montant de 8,6 milliards US\$ pour un total de 37 lancements.

Avec pour hypothèse que tous les lanceurs soient identiques, il est facile de calculer que **le prix moyen d'un lancement** est :

$$\frac{8,6 \text{ milliards US}}{37 \text{ lancements}} = 232 \text{ millions US} / \text{lancement}$$

Par ailleurs, nous avons vu précédemment que le marché des micro-lanceurs représente 2,5 % (Cf. Fig. 11) du volume global du marché de lancement soit, en 2016, un peu plus de 200 millions US\$.

Comme le montre la Fig. 12, sur cette même période, 131 microsatellites et donc, relevant théoriquement de la famille des micro-lanceurs, ont été envoyés.

Avec pour hypothèse que les 131 microsatellites aient été lancés par des micro-lanceurs, il est facile de calculer le prix moyen d'un lancement par micro-lanceur :

$$\frac{200 \text{ millions US\$}}{131 \text{ microsatellites}} = 1,5 \text{ million US\$} / \text{lancement de micro} - \text{lanceur}$$

Dès lors, avec pour hypothèse que chaque satellite ait un poids de 100 kg, **le prix moyen au kilo orbité** est :

$$\frac{\textit{Prix au lancement}}{\textit{Nombre de kilos orbit\'es}} = \frac{1,5 \textit{ million US\$}}{100 \textit{ kg}} = \textbf{15 000 US\$} \textit{/ kilo orbit\'e}$$

Or, nous verrons ultérieurement, que le prix moyen / kilo orbité sur micro-lanceur atteint aujourd'hui généralement de 30 000 à 35 000 US\$¹⁰!

Ces chiffres interrogent sur :

- la possibilité pour les micro-lanceurs de réduire leur prix moyen / kilo orbité,
- la valorisation du différentiel de prix de l'offre qu'ils proposent,
- voire, la réalité de leur marché.

2° – La quantité globale ou volume de satellites

Comme le montre la Fig. 12, le nombre de microsatellites devant être lancés annuellement devrait passer de 300 à plus de 1000 par an en 10 ans, donc plus que tripler.

Avec pour hypothèse une captation par les micro-lanceurs de 10% de ces lancements, il est facile de calculer une moyenne de 65 lancements par an. Ce chiffre serait alors bien supérieur à celui annoncé dans la Fig. 9 de 40 lancements en 2019 tous lanceurs confondus.

Par ailleurs, nous verrons ultérieurement qu'il existe aujourd'hui plus d'une centaine de projets de construction de micro-lanceurs à travers le monde. Avec pour hypothèse que tous atteignent le stade de commercialisation, il est alors facile de calculer le nombre moyen de lancement annuel qui serait effectué pour chaque lanceur :

$$\frac{\textit{Nombre de microsatellites}}{\textit{Nombre de projets de micro} - \textit{lanceurs}} = \frac{65}{100} = \textbf{0,65 lancement / an / lanceur}$$

Avec cette hypothèse, le volume de microsatellites annuellement orbitable par des micro-lanceurs ne suffirait donc pas à assurer une activité économique suffisante pour chacun!

-

¹⁰ Référence de prix opérateur de lancement : RocketLab. (www.rocketlabusa.com)

B. – Indicateurs de comparaison

Nous avons choisi de présenter ici des indicateurs homogènes, c'est-à-dire que leur nature, leur structure et leur fonction sont semblables. Ils sont également tous secondaires, c'est-à-dire qu'ils dépendent de deux variables indépendantes.

Par ailleurs, au préalable, il est important de définir que :

- la masse orbitable (en kg) est la masse pouvant être mis en orbite par un lanceur,
- la masse orbitée ou à orbiter (en kg) est la masse réelle d'un microsatellite à mettre en orbite.

De plus, afin de faciliter notre étude, nous utilisons toujours la même orbite de référence, l'« isoorbite ».

Ces indicateurs sont des données essentielles tant pour l'opérateur du micro-lanceur que pour celui du satellite.

1° – Pour l'opérateur du satellite

Il se doit de prendre en compte :

- Le prix / kilo orbitable à iso-orbite : c'est-à-dire le prix / kilo de masse pouvant être orbitée par le micro-lanceur.

$$Prix \ / \ kilo \ orbitable \ \grave{a} \ iso \ orbite = \frac{Prix \ total \ du \ lancement}{Masse \ orbitable}$$

Par exemple, RocketLab commercialise le micro-lanceur Electron, capable de mettre en orbite LEO 225 kg pour 5 millions US\$, soit un :

Prix / kilo orbitable à iso orbite =
$$\frac{5000000}{225}$$
 = 22 200 US\$ /kg

- Le prix / kilo orbité à iso-orbite : c'est-à-dire le prix / kilo de masse de satellite à orbiter par le micro-lanceur.

$$Prix \ / \ kilo \ orbit\'e \ \grave{a} \ iso \ orbit\'e = \frac{Prix \ total \ du \ lancement}{Masse \ orbit\'ee}$$

Toujours en prenant pour exemple le micro-lanceur Electron, si sur les 225 kg disponibles, seuls 185 sont nécessaires au satellite, le prix au kilo orbité à iso-orbite est alors de :

Prix / kilo orbité à iso orbite =
$$\frac{5\,000\,000}{185}$$
 = 27 000 US\$ /kg

2° – Pour l'opérateur du lanceur

Il se doit de prendre en compte :

- Le coût / kilo orbitable à iso-orbite : c'est-à-dire le coût / kilo de masse pouvant être orbitée par le micro-lanceur.

$$Coût / kilo orbitable à iso orbite = \frac{Coût total du lancement}{Masse orbitable}$$

Il est à noter que le coût total du lancement reste le plus souvent une donnée confidentielle.

Pour autant, le secteur aérospatial admet un taux de marge brute similaire à celui des technologies d'innovation, à savoir 15 à 30 % ¹¹ du prix de commercialisation connu. Par exemple, pour un lancement commercialisé à 5 millions US\$, le coût total du lancement peut être estimé entre 3,5 et 4,25 millions US\$, soit :

Coût du lancement = Prix de commercialisation $\times (1 - \text{Taux de marge})$

Malgré leur intérêt, l'ensemble de ces indicateurs n'indiquent que des moyennes. De plus, s'ils offrent à l'opérateur de satellite de bons éléments de comparaison, il n'en est pas de même pour l'opérateur du micro-lanceur qui doit les compléter par des valeurs techniques et énergétiques prenant en compte, trois paramètres essentiels :

- La dépense énergétique représentée par l'architecture même du lanceur ¹²: il existe en effet un équilibre optimum à trouver entre le nombre d'étages du lanceur et sa dépense énergétique. De fait, un lanceur, au fur et à mesure qu'il s'élève, s'allège par la consommation de ses produits de propulsion. Pour autant, le poids des réservoirs, même

26

¹¹ Référence de marge moyenne. (www.csimarket.com)

¹² Référence technique – Equation de Tsiolkovski.

vides, demande toujours de l'énergie d'où leur nécessaire largage qui permet de se défaire de leur poids tout au long du vol propulsé. Cependant, cette opération reste toujours un moment de risque majeur du lancement. Il est aujourd'hui admis des lanceurs commerciaux de 2 à 4 étages tandis que les micro-lanceurs possèdent généralement de 2 à 3 étages (Cf. Fig. 2).

- Le rapport Masse orbitable / Masse au décollage : celui-ci est d'autant plus élevé que le lanceur est énergétiquement performant, donc de plus faibles dimensions et donc plus économique à produire. A titre d'exemple, pour les micro-lanceurs, ce rapport varie de 0,5% à 1,5%; pour les lanceurs lourds et super lourds, il varie de 0,8% à 2,7%.
- L'impulsion spécifique, ou Isp¹³, est une grandeur utilisée pour mesurer la force exercée par les moteurs-fusées en fonction de la quantité de carburant consommée par unité de temps. Elle indique la durée pendant laquelle un kilogramme de carburant produit la poussée nécessaire pour soulever une masse d'un kilogramme dans le champ gravitationnel terrestre. L'Isp permet de comparer l'efficacité d'un système de propulsion : plus elle est élevée, plus le lanceur est énergétiquement performant, donc de plus faibles dimensions et donc plus économique à produire.

Ces trois paramètres peuvent être utilisés pour réduire les coûts. Nous y reviendrons ultérieurement (PARTIE 2 – Chapitre 1 – Section 2).

Comme nous avons pu le remarquer tout au long de cette section, un lien indéfectible existe entre le lanceur et sa charge, le satellite. En effet, le marché des micro-lanceurs est totalement dépendant de celui des microsatellites (PARTIE 1 – Chapitre 1 – Section 2).

Section 2 – Une totale dépendance au marché des microsatellites

Comme nous l'avons vu, les satellites envoyés par les micro-lanceurs sont uniquement de petite taille et de faible poids. Ils sont donc seuls clients des micro-lanceurs et placent ces derniers en situation de dépendance qui s'apparente à une forme de monopsone¹⁴: les opérateurs de

¹⁴ Définition : Régime de formation des prix dans lequel un acheteur unique trouve en face de lui une multitude de vendeurs. (www.larousse.fr)

¹³ Définition : L'impulsion spécifique (notée généralement Isp), est une grandeur utilisée pour mesurer l'efficacité des moteurs à réaction et des moteurs-fusées. (www.propulsionspatiale.e-monsite.com)

micro-lanceurs ne s'adressent qu'à une gamme unique de satellites, tandis que ceux-ci peuvent utiliser tous les types de lanceurs.

Il faut étudier maintenant le développement du marché des microsatellites (Paragraphe I.) et comprendre son impact sur l'évolution de l'offre de lancement (Paragraphe II.).

I. – Le développement du marché satellitaire

Le développement des microsatellites et de leur marché est directement lié aux évolutions technologiques, notamment à la miniaturisation (Paragraphe A.), et au fort développement d'applications spatiales entraînant des modifications de l'exploitation spatiale (Paragraphe B.).

A. – Progrès technologiques et miniaturisation

Depuis le premier lancement de satellite artificiel en orbite terrestre, Spoutnik¹⁵ en 1957, par l'URSS, plus de 2000 satellites¹⁶ tournent quotidiennement autour de la terre.

Cette forte augmentation découle de la miniaturisation des systèmes et donc d'une diminution considérable des poids et volumes. Ainsi, en 1977, les équipements de mesures des sondes d'exploration spatiale Voyager 1 et Voyager 2 pesaient, chacun, plus de 100 kg. Aujourd'hui, un tel matériel pèse moins de 20 kg et tient dans une boîte à chaussures.

Par ailleurs, outre la miniaturisation, les technologies nouvelles ont permis d'accroître la redondance des systèmes, donc leur fiabilité.

L'ensemble de ces innovations a amené le développement de très petits satellites pesant moins de 50 kg.

Au cours du temps, leur construction a vu se mettre en place un standard mondial de volume et de poids : le CubeSat, désigné par l'abréviation 1U où chaque U ou unité correspond à un cube de 10 cm de côté avec un poids de 1 kg à 1,5 kg.

-

¹⁵ Traduction : « Spoutnik », signifie satellite en russe.

¹⁶ Référence de donnée. (www.futura-sciences.com)



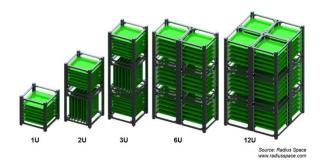


Fig. 13 – Structure unitaire et gamme de CubeSat (Sources : fr.wikipedia.org et www.reves-d-espace.com)

Les microsatellites sont donc généralement des multiples d'unité U, à savoir 1U, 2U, 3U, puis 6U, 12U, 18U, plus rarement, 24U et plus (le dernier multiple en usage de ce standard est 36U).

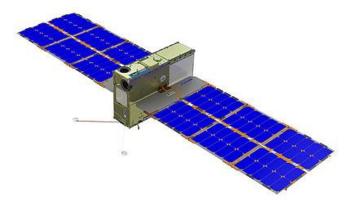


Fig. 14 – Exemple de déploiement d'un CubeSat 6U (Source : space.skyrocket.de)

Cette simplification d'architecture, modulable et flexible, a drastiquement réduit les coûts de fabrication. Ainsi, le coût d'un satellite 1U varie de 30 000 US\$ à 150 000 US\$.

Bien entendu, la réduction des coûts de ces microsatellites retentit sur l'ensemble des coûts de fabrication de ceux de poids supérieur.

Il en résulte une multiplication de l'usage des microsatellites à l'origine de changements profonds en matière d'exploitation spatiale et aboutissant à un véritable maillage spatial (Paragraphe B.).

B. – Vers un maillage spatial

Les premiers programmes d'exploitation spatiale ont été essentiellement militaires et destinés à l'observation. Il s'agissait alors de gros satellites, positionnés sur des trajectoires leur étant propres, et n'étant pas forcément coordonnés les uns avec les autres. De plus, ils devaient être

régulièrement repositionnés depuis le sol sur de nouvelles orbites afin qu'ils puissent observer des points terrestres différents. Cette logique d'exploitation s'est progressivement étendue au domaine civil avec l'apparition des premiers satellites de télécommunications.

Dans les années 80, les premiers systèmes satellitaires interconnectés (via le sol) apparaissent : c'est, entre autres, l'avènement du GPS. Le principe d'un changement architectural d'exploitation est posé : les satellites doivent être en mesure de communiquer entre eux et, pour cela, ils doivent être relativement proches les uns des autres.

À la fin des années 90, les opérateurs de télécommunication poursuivent le déploiement d'Internet à l'échelle mondiale. Une nouvelle théorie d'exploitation voit alors le jour, celle d'une couverture permanente nécessitant le déploiement d'un maillage satellitaire aussi appelé « constellation ».

Les constellations sont composées d'un grand nombre de satellites identiques de petite taille et de faible poids. Ils sont déployés sur des orbites basses et la trajectoire de chacun est définie de sorte que le balayage de l'ensemble couvre en continue une grande partie de la surface terrestre. Ainsi, le service satellitaire apporté au sol est homogène où que l'on se situe dans la zone balayée.

Cette stratégie d'exploitation spatiale requiert des outils de mise en orbite différents. Le déploiement d'une constellation requiert, en effet, un positionnement très précis de chacun des satellites et nécessite donc, soit un lancement groupé avec un déploiement unique, soit une multitude de lancements destinés à placer satellite par satellite.

L'exploitation d'une constellation de satellites a cependant un inconvénient majeur : l'obligation en cas de défaillance d'un des satellites, d'une intervention rapide, afin de ne pas compromettre le bon fonctionnement de l'ensemble de la constellation.

Les obligations posées par ces modifications dans l'exploitation satellitaire sont à l'origine de besoins nouveaux dans l'offre de lancement (Paragraphe II.).

II. – Le retentissement sur l'évolution et le développement de l'offre de lancement

Afin d'orbiter sa charge utile, l'opérateur de microsatellites se trouve aujourd'hui devant 2 possibilités de solutions de lancement :

- L'une, la plus répandue, consiste en un transport partagé (Paragraphe A.),

- L'autre est une solution de transport flexible, adaptée aux besoins du client, donc très individualisée (Paragraphe B.).

A. – Le transport partagé : une offre de substitution

Principale offre de lancement encore très utilisée actuellement, ce transport est en fait une offre de substitution puisqu'il consiste à utiliser un lanceur d'une gamme supérieure à celle des micro-lanceurs. Le microsatellite ou charge secondaire, est alors placé sous un satellite plus gros, appelé charge principale.

Pour l'opérateur de microsatellites, cette solution de co-lancement présente un certain nombre d'avantages :

- Le prix au kilo est particulièrement faible. Par exemple, l'entreprise Space X commercialise les quelques kilos restant lors d'un lancement pour moins de 5000 US\$/kilo en LEO¹⁷. Le prix du lancement revient, en effet, entièrement à l'opérateur de la charge principale. Pour l'opérateur du lanceur, le coût marginal du lancement de la charge secondaire est quasi nul et sa facturation représente un bénéfice quasi total.
- Il bénéficie de l'expertise et de la sécurité d'un lanceur déjà éprouvé, lui permettant de bénéficier de clauses d'assurance favorables, donc moins onéreuses.

Pour autant, cette solution présente des inconvénients notables :

- Les paramètres de l'orbite sont définis par l'opérateur du satellite principal, tandis que l'opérateur du microsatellite doit réaliser un compromis entre faible coût de lancement et adaptation de sa mission à ces paramètres. Dès lors, la réussite de la mise en orbite comporte plus de risques.
- De plus, la proximité des satellites entre eux, dans la coiffe de lanceur, crée un danger d'interactions électromagnétiques ou mécaniques pouvant les endommager. Ainsi, certains opérateurs de charge principale s'opposent à la commercialisation du résiduel de charge.
- Enfin, les délais d'attente de lancement sont très longs, en moyenne de 2 à 5 ans. En effet, le faible prix/kilo attire de très nombreux opérateurs de satellites.

_

¹⁷ Référence de prix opérateur de lancement : Space X. (www.spacex.com)

Le transport partagé ne répond donc pas pleinement aux besoins des opérateurs de microsatellites. Aussi, se développe-t-il une offre complémentaire de lancement : l'offre dédiée et individualisée (Paragraphe B.).

B. – Le transport individualisé : l'offre des micro-lanceurs

L'offre dédiée fait le pari d'un service exclusif que l'on peut qualifier de « premium » 18, basé sur :

- L'utilisation d'un unique lanceur pour envoyer un seul microsatellite avec une mise en orbite « personnalisée » dont les paramètres sont définis en totalité par l'opérateur de satellite et correspondent donc totalement à ses besoins d'exploitation.
- Un délai d'attente de lancement réduit, soit actuellement une durée moyenne de 1 à 1,5 an (temps de fabrication du lanceur, d'intégration du satellite sur le lanceur, fenêtre de tir...).

Pour autant, si ce type de transport constitue une solution optimale pour les opérateurs de microsatellites, il implique :

- Un prix moyen / lancement supérieur à celui d'un lancement non dédié et donc, un prix moyen / kilo orbité à iso-orbite supérieur.
- Un coût d'assurance au lancement plus élevé compte tenu des risques de fiabilité des micro-lanceurs mais aussi, le plus souvent, de la fragile assise économique de leurs opérateurs.

Nous voyons que le micro-lancement est un marché naissant et à fort potentiel de développement. Il met en jeu une multitude d'acteurs ou parties prenantes ¹⁹ (Section 3).

Section 3 – Une multitude de parties prenantes

Le marché du micro-lancement fait appel, depuis toujours, à une combinaison d'acteurs, souvent enchevêtrés et confondus :

- développeurs de lanceurs à proprement parler,
- mais surtout, développeurs de microsatellites, instigateurs principaux du marché puisque sans eux, pas de micro-lanceurs,

-

¹⁸ Définition : Bien ou service haut de gamme, sur-mesure.

¹⁹ Définition : Les parties prenantes sont l'ensemble des personnes physiques et des personnes morales qui sont concernées et qui peuvent influencer les décisions d'une entreprise.

- et enfin, instances publiques institutionnelles, toujours très impliquées et, selon la situation, tour à tour, accélératrices, régulatrices ou pondératrices.

I. – Les développeurs de lanceurs

Afin de faciliter la compréhension, nous avons choisi de :

- n'en présenter que quelques exemples représentatifs classés par tableau selon leur temporalité :
 - o Acteurs historiques (Paragraphe A.)
 - o Nouveaux acteurs et acteurs opérationnels (Paragraphe B.)
 - o Programmes en développement (Paragraphe C.)
- dégager de ces tableaux des logiques générales d'approche.

A. – Les acteurs historiques

EXEMPLES D'ACTEURS HISTORIQUES								
NOM DU MICRO- LANCEUR ET DATES D'EXPLOITATION	PAYS D'ORIGINE	NOM DE L'OPÉRATEUR	ANNÉE DU 1er LANCEMENT	FILIATION AVEC MISSILE	CAPACITÉ EN CHARGE UTILE	COMMENTAIRES		
SCOUT (1961-1994)	USA	US Air Force/ Douglas Aircraft	1960	Sur les 4 étages du lanceur, les deux premiers sont issus des missiles Jupiter et Sergeant.	Selon les versions, de 59 à 220 kg en LEO	A été construit et commercialisé par le complexe industriel Vought Corporation. Surtout utilisé pour lancer des satellites scientifiques et militaires. Dernier vol en 1994.		
BLACK ARROW (1964-1971)	United Kingdom	Royal Aircraft Establishment	1969	Blue Steel et Blue Streak Missile	100 kg en LEO	Son 1 ^{er} et seul vol est le lancement orbital réussi du satellite scientifique Prospero.		
DIAMANT (1961-1975)	France	Centre National d'Études Spatiales	1965	Issu des études balistiques des missiles M1 et S2	150 kg à 200 km	Développement industriel confié à Nord et Sud Aviation. Douze vols jusqu'en 1975, date à laquelle le programme est supprimé en faveur du lanceur européen Ariane.		
KAYSER 1 (1975-1987)	Germany	OTRAG (Orbital Transport und Raketen AG)	1 ^{er} tir en 1977			1ère entreprise privée à concevoir des lanceurs. 4 tirs ont eu lieu mais aucune réussite.		

PEGASUS (1990-2019)	USA	Orbital Sciences Corporation aujourd'hui incluse dans Northrop Grumman Innovation Systems	5 avril 1990	450 kg en LEO 200 kg en SSO	Proposé en réponse à un appel d'offres de la DARPA (agence de recherche militaire américaine chargée de mettre au point des techniques innovantes) à la recherche d'un lanceur pouvant mettre en orbite de petits satellites militaires. Lancé depuis un avion gros porteur pour une plus grande flexibilité opérationnelle. 44 tirs ont eu lieu et ont conduit à la mise en orbite de satellites militaires américains mais aussi de satellites scientifiques de la NASA et de satellites commerciaux de télécommunication. La dernière mise en orbite remonte à octobre 2019 pour un satellite d'étude de l'ionosphère terrestre.
ATHENA 1 (1993-2001)	USA	Lockheed Martin Astronautics	1997	795 kg en LEO	3 mises en orbite réussies. Dernier vol en 2001.

Il est possible de dégager de ce tableau les logiques historiques qui ont guidé le monde du microlancement :

- La conquête spatiale est alors l'apanage exclusif d'acteurs gouvernementaux, soit militaires, soit civils : largement marquée par des enjeux stratégiques et géopolitiques, elle est surtout un outil de souveraineté. Par exemple, les satellites de reconnaissance sont clairement des outils de sécurité nationale.
- Le développement des micro-lanceurs est à l'origine de tous les programmes d'accès à l'espace. Ainsi, nombre d'entre eux sont directement issus des programmes militaires de la « guerre froide » : expérience technologique acquise pour la construction de missiles, réutilisation de stock de missiles balistiques... De plus, les micro-lanceurs sont souvent considérés comme des entrées de gamme appelées à évoluer vers des lanceurs plus lourds.
- L'utilisation de l'espace est alors entre les mains de quelques nations, les plus avancées technologiquement et économiquement. Ainsi, au début des années 1980, le « club » très fermé des puissances spatiales reconnues est au nombre de 6 : Union soviétique, États-Unis, France et Europe, Japon, Chine et Inde.
- Ce n'est qu'à la fin des années 1980, dans le sillage de l'émergence du marché des télécommunications par satellites, qu'apparaît une société purement privée.
- La plupart des programmes sont gérés par des agences spatiales, organismes nationaux ou supranationaux, totalement dédiés à la gestion de l'activité spatiale Ainsi, la NASA, 1ère agence spatiale créée, voit le jour en 1958, aux États-Unis. Toutes les activités spatiales répondant à des fins civiles lui sont confiées. L'objectif est d'améliorer l'efficacité des projets dont la responsabilité est jusque-là dispersée entre plusieurs acteurs (Armée de l'Air, Armée de Terre, Marine, instituts de recherche) mais également de développer les applications potentielles techniques ou scientifiques.

Ces agences subventionnent largement des complexes industriels privés qui commercialisent ensuite le fruit des travaux. Les bases de ce partenariat public-privé va servir d'étalon mondial, y compris pour les autres gammes de lanceurs et pour le domaine satellitaire.

- Le modèle partenariat public-privé prévaut jusqu'au début des années 2000. Par la suite, au fur et à mesure du développement spatial, les différents acteurs impliqués (États, agences spatiales, industriels...) se désengagent des activités devenues suffisamment matures pour

être confiées à des structures plus spécialisées ou au secteur privé : télécommunications, météorologie, observation de la Terre ...

Ces évolutions, au 1^{er} rang desquelles la pression sur les coûts de lancement, redessinent les politiques et les stratégies. Peu à peu, on assiste donc à une redistribution des rapports public/privé d'autant que, nous allons le voir, dans le même temps, de nouveaux acteurs privés mais aussi des nations autres que les puissances spatiales historiques bouleversent l'ordre établi. Le paradigme économique du monde du micro-lancement s'inverse donc peu à peu : historiquement poussée par les avancées technologiques, il semble, depuis le milieu des années 2000, mené par la loi du marché et ses usages.

B. – Les nouveaux acteurs et les acteurs opérationnels

	EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS						
NOM DU MICRO- LANCEUR ET DATES D'EXPLOITATION	PAYS D'ORIGINE	FILIÈRE d'APPARTENANCE ET NOM DE L'OPÉRATEUR	ANNÉE DU 1er LANCEMENT	FILIATION AVEC MISSILE	CAPACITÉ EN CHARGE UTILE	COMMENTAIRES	
MINOTAUR 1	USA	Privée - Orbital Sciences Corporation aujourd'hui incluse dans Northrop Grumman Innovation Systems	Janvier 2000	Minuteman	550 kg en LEO 440 kg en SSO	10 tirs orbitaux de cette version ont eu lieu jusqu'en août 2013 et ont placé avec succès en orbite des petits satellites militaires. Un tir civil a eu lieu avec des satellites de recherche taïwannais.	
FALCON 1	USA	Privée - SPACE X Créée en 2002 par le célèbre entrepreneur Elon Musk	Mars 2006		460kg en LEO 430 en SSO	5 lancements dont 3 échecs. Dernier vol en juillet 2009.Le projet de Falcon 1E, version plus performante du lanceur, a été abandonné pour des lanceurs plus lourds.	
SAFIR 1	Iran	Publique - Iranian Space Agency	1 ^{er} tir connu : Août 2008	Shabab-3	50 kg en LEO	À février 2019, 9 lancements dont 5 échecs.	
LONG MARCH 11	Chine	Publique - AASPT (Académie Chinoise de Technologie de Propulsion Solide): conglomérat d'entreprises d'État.	Septembre 2015		700 kg en LEO 450 kg en SSO	À janvier 2019, 6 lancements.	

ELECTRON	USA	Privée - Rocket Lab Créée en 2006, par Peter Beck, ingénieur néo-zélandais. Financement, évalué à 300 millions US\$, fourni par des sociétés de capital-risque américaines et néo- zélandaises.	Mai 2017		LEO		n À juillet 2020, 13 lancements dont 2 échecs. n Coût /lancement = 5 millions US\$. A terme, objectifs de 100 lancements/an. Leadership actuel sur le marché du micro- lancement.
HYPERBOLA -1	Chine	Privée - Start-up Ispace créée suite à l'ouverture en 2014 par les autorités chinoises du marché du lancement de satellites à la concurrence.	Juillet 2019	Dérivé des programmes de missiles balistiques chinois	LEO		n Un seul vol inaugural et réussi.
JIELONG-1	Chine	Privée - Chinarocket, branche commerciale de l'Académie chinoise de la technologie des véhicules de lancement	Août 2019		200 SSO	kg e	n Un seul vol inaugural et réussi. Coût /lancement = 6 millions US\$.

Bien que ce tableau montre avant tout que les organisations ayant aujourd'hui la capacité à exploiter des micro-lanceurs restent rares, il met surtout en évidence une véritable ouverture, plutôt révolutionnaire.

En effet:

- Il rend bien compte de l'émergence, dans les années 2000, aux États-Unis, de nombreux acteurs privés qui dénote d'une très forte confiance dans la croissance du secteur.

La plupart sont issus de générations d'entrepreneurs issus de la transformation numérique :

- o Fortement influencés par les « business models » de la Silicon Valley,
- Soutenus par des investisseurs prêts à prendre des risques financiers élevés, cherchant à investir dans des entreprises innovantes et prometteuses,
- Appuyé par des personnalités médiatiques de 1^{er} rang, comme Elon Musk (fondateur de PayPal et de Tesla), Jeff Bezos (fondateur et PDG d'Amazon), Marc Zuckerberg (actionnaire majoritaire et PDG de Facebook)...
 - Ce mouvement de fond appelé « New Space » ²⁰ indique plusieurs objectifs dont les principaux sont d'une part, une baisse importante des coûts de production et, d'autre part, une rentabilité d'exploitation. La pression concurrentielle sur le marché augmente donc largement.
- Les acteurs historiques institutionnels paraissent plus réservés quant aux perspectives à court et moyen terme. Leur intervention se limite généralement à supporter l'utilisation de leurs lanceurs, soit directement pour des fins militaires, soit en encourageant les entreprises nationales privées à développer ou à améliorer des lanceurs via des politiques partenariales de soutien à l'innovation ou de partage des coûts/risques.
- Progressivement, de nouveaux pays se dotent d'agences spatiales et de lanceurs. En effet, la conquête spatiale affirme, aux yeux du monde, l'avancée technologique d'un pays et son rayonnement. C'est en quelque sorte une autre arme de dissuasion, l'affirmation de la prédominance scientifique d'une nation. De plus, il est plus facile de s'essayer à la construction et au tir d'une petite fusée que d'un engin plus lourd. C'est ainsi que, par exemple l'Iran figurant dans les exemples du tableau, mais également Israël en 1988, la Corée du Nord en 2012, la Corée du Sud en 2013, se dotent de micro-lanceurs.
- Enfin, il est à noter qu'aucune entreprise européenne n'est présente.

²⁰ Définition : Le New Space désigne l'industrie spatiale dont le développement est favorisé par un cadre juridique adapté aux activités spatiales commerciales. (www.futura-sciences.com)

C. – Les programmes en développement

	EXEMPLES DE PROGRAMMES EN DÉVELOPPEMENT					
NOM DU PROGRAMME	PAYS D'ORIGINE	FILIÈRE d'APPARTENANCE ET NOM DE L'OPÉRATEUR	ANNÉE PRÉVUE DE 1er LANCEMENT	CAPACITÉ EN CHARGE UTILE	COMMENTAIRES	
ERIS	Australie	Privée - Gilmour Space Technologies	2021-2022	380 kg en LEO		
VLM 1	Brésil	Publique - Agence Spatiale Brésilienne	2019	150kg en LEO	L'agence spatiale allemande, la DLR participe au projet.	
LANDSPACE 1	Chine	Privée - Land Space Technology		400 kg en LEO	La société a été créée en 2015 par l'université de Pékin Tsinghua. La société fait partie de la dizaine de start-up chinoises, telles que iSpace (cf. tableau EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS).	
ALTAIR	Union Européenne et Suisse	Publique/Privée ONERA et 7 autres organismes de 6 pays: CNES/ETHZ/ Bertin Technologies/ Piaggio Aérospace/ NAMMO/SpaceTec.		150 kg en LEO	Projet démarré fin 2015 à hauteur de 3,5 millions € par l'Union Européenne et 0,5 millions € par la Suisse. Lancement aéroporté expérimenté avec succès. Propulsion hybride écologique et bas-coût, structure composite, avionique très innovante.	
NORTH STAR	Norvège	Publique/Privée NAMMO (détenu à 50 % par le Ministère norvégien de l'Industrie et du	Vol d'essai initialement prévu en septembre 2019	50 kg en LEO 10 kg en SSO	Projet démarré en janvier 2013. Propulsion hybride. NAMMO, entreprise d'armement, a l'expérience de la conception et de la fabrication de missiles.	

		Commerce et à 50 % par Patria (détenu lui-même à 50 % par l'État finlandais et par le groupe Kongsberg)			
BLOOSTAR	Espagne	Privée Zéro 2 Infinity (créée en 2009) Soutenue, entre autres, par l'ESA		140 kg en LEO 75 kg en SSO	Lancement depuis un ballon stratosphérique. Lanceur réutilisable. Tests réussis.
ARION 2	Espagne	Privée PLD Space (créée en 2011) Subventionné par l'ESA et par la Commission européenne (à hauteur de 2 millions €).	Vol d'essai initialement prévu en 2019		Lanceur réutilisable
HAAS 2 CA	USA	Privée ARCA Space Corporation (créée en 1999) Contrats avec l'ESA et l'état roumain.	Vol d'essai initialement prévu en 2018	100 kg en LEO 50 kg en SSO	Prix annoncé/lancement : 1million US\$.
LAUNCHER ONE	USA	Virgin Galactic Virgin Orbit (créée en 2017 par l'homme d'affaires Richard Branson) Filiale du groupe Virgin	2020	500 kg en LEO 300 kg en SSO	Projet démarré en 2012. Lancement aéroporté. Lanceur réutilisable. 1 vol d'essai en mai 2020 soldé par un échec. Prix annoncé/lancement : 12 millions US\$, soit un prix / kg orbité à iso-orbite à 23000 US\$ donc dans la moyenne du

					marché. Contrat signé en 2016 avec le constructeur de la constellation de satellites OneWeb pour 39 lancements mais le 27 mars 2020, OneWeb se déclare en faillite.
FIREFLY ALFA	USA	Firefly Space Systems (créée en 2014 au USA, puis ferme ses portes et réouvre sa Recherche et Développement technique, en Ukraine)	Vol d'essai initialement prévu au 2ème semestre 2020	1000 kg en LEO 600 kg en SSO	Coût/lancement annoncé : 15 millions US\$.
ROCKET 3.0	USA	Astra Space Inc. (créée en 2005)	Tir d'essai réalisé sans succès en mars 2020. 3 autres tirs sont prévus d'ici fin 2021.	150 kg en LEO	Prix annoncé/lancement : 1 million US\$, soit proche du prix/kilo orbité à iso-orbite pratiqué par des lanceurs de gamme supérieure. L'échec du tir d'essai prive le lanceur d'une subvention de la DARPA, agence américaine en charge des projets de recherche avancés de défense, dans le cadre de son concours de lancement « Launch Challenge » doté de 12 millions US\$.
PRIME	United Kingdom	ORBEX (créée en 2015)	2022	150 kg en SSO	En juillet 2018, levée de 39.6 millions US\$ de fonds publics et privés. Projet de lanceur 20 % plus efficace mais surtout 30 % plus léger que n'importe quel autre petit lanceur de cette catégorie. Par exemple, 2° étage fabriqué avec un matériau composite de fibre de carbone et

				d'aluminium, ainsi que moteur-fusée fabriqué en une pièce, sans joints.
SSLV (Small Satellite Launch Vehicule)	Publique ISRO (agence spatiale indienne) et Antrix Corporation (entreprise détenue à 100% par le gouvernement indien).	Vol d'essai initialement prévu début 2020	500 kg en LEO 300 kg en SSO	Annonce de coût réduit par l'utilisation de composants déjà existants et d'une conception modulaire. Prix annoncé/lancement : 4 millions US\$ Objectif de 8 lancements/an.

- Ce tableau, très fourni, montre que les projets foisonnent : plus de 100 programmes de micro-lancements sont actuellement répertoriés dans le monde.
- Ils sont issus soit :
 - o d'entités purement privées, y compris dans des pays jusqu'alors peu concernés par le spatial (Australie, Canada, Espagne, Portugal, Royaume-Uni, Singapour, Afrique du Sud...).
 - o de partenariats public-privé notamment indispensables à des institutions publiques qui jusqu'alors n'avaient pas les moyens de se lancer comme, par exemple, des universités qui y voit le moyen d'élargir leur enseignement et leur recherche à l'opérationnel.
 - o de coopérations internationales mais aussi de « petits pays » qui, de façon autonome, visent une approche de développement de filière nationale appelée à monter en gamme (Argentine, Brésil, Indonésie, Pologne, Turquie, Taïwan, Suède). En effet, disposer d'un petit lanceur permet de garantir une autonomie d'accès à l'espace.
- Ainsi, la répartition géographique mondiale des acteurs se modifie progressivement : bien entendu, les grandes puissances spatiales (notamment États-Unis) restent très présentes mais apparaissent nombre d'européens et d'asiatiques.
- La plupart de ces projets ne porte aucune filiation missile. Bien au contraire, face à la pression forte de la concurrence, le but essentiel de réduction des coûts amènent les opérateurs à proposer des solutions innovantes de construction ou de propulsion qui seront développées dans la 2^{ème} partie du mémoire.

Malheureusement, le tableau met aussi en évidence des projets largement retardés dans leur échéance, voire non aboutis.

Ainsi, le lanceur Vector est une des plus grosses victimes connues du New Space. Mis au point par la société américaine Vector Aerospace en 2015, il est prévu pour une mise en orbite LEO de 50 kg de charge utile. Ses essais se déroulent avec succès et le modèle inaugural retient l'attention de l'US Air Force qui commande une dizaine de lanceurs. L'entreprise ne pourra cependant jamais convaincre d'autres financeurs et fait officiellement faillite fin 2019.

Les origines de projets avortés sont multiples :

- complexité technologique et non maturité des innovations proposées, tel l'avion spatial réutilisable Lynx de la société américaine XCOR Aerospace,

- absence de financement pour continuer le développement et la recherche,
- coût au kilo orbité à iso-orbite dépassant le prix au kilo orbité à iso-orbite entraînant une non viabilité économique,
- mais aussi, sans doute, une difficile lecture d'une réalité de marché atteignable (capacité à capter le marché dans l'hypothèse d'un marché ouvert, c'est-à-dire, avec une libre concurrence réelle) détournant les investisseurs financiers, privés ou institutionnels.

Ce paragraphe montre que l'offre de micro-lanceurs est pléthorique. Son foisonnement semble mondial. Mais le secteur semble parfois davantage répondre à des impératifs de développement et de démonstration technologique qu'à des préoccupations purement économiques.

II. - Les opérateurs de satellites : des instigateurs incontournables

À première vue, le secteur des micro-lanceurs et celui des microsatellites semblent complémentaires et interdépendants.

Cette approche est renforcée par la multiplication du déploiement de constellations de microsatellites de télécommunications privés et à but commercial. Elle demande une très grande capacité de lancement pouvant apparaître comme le cœur de cible du marché des micro-lanceurs,

Cependant, l'essentiel de ce marché se concentre sur quelques gros projets et, pour les mêmes raisons que pour les micro-lanceurs, beaucoup ne vont pas à terme.

Ainsi, l'entreprise OneWeb a pour objectif la mise en orbite LEO d'une constellation d'environ 600 satellites de télécommunication afin de fournir un accès Internet haut débit à des régions non desservies par liaisons terrestres. Le projet, compte-tenu de la taille de l'investissement (de 3 à 6,5 milliards US\$) et des incertitudes sur le marché visé (concurrence d'autres constellations ou de réseaux terrestres) comporte de grands risques financiers. Six satellites sont placés en orbite début 2019, mais en mars 2020, OneWeb dépose le bilan!

Pour rester compétitifs, certains industriels repensent donc leur démarche industrielle. Par exemple, Elon Musk et sa société Space X développent une production intégrée verticalement, allant de la chaîne logistique jusqu'à la livraison de service, soit une solution « clefs en main » constituée non seulement du développement du lanceur et de l'infrastructure de lancement, mais aussi du développement des satellites de communication, de leur réseau au sol et de l'exploitation de l'ensemble. C'est ainsi qu'en 2019, la 1ère phase du déploiement de

la constellation Starlink (prévoyant à terme plus de 12000 satellites de communication) a commencé avec l'utilisation du lanceur de gamme moyenne Falcon 9 pouvant emporter plusieurs microsatellites. Autant de lancements potentiels qui échappent aux micro-lanceurs!

Il existe donc une déconnexion évidente entre le marché des microsatellites commerciaux de télécommunication, mieux identifié aujourd'hui, et celui des micro-lanceurs.

Les microsatellites d'observation de la Terre (météorologie, champs électromagnétiques...) ne constituent pas un marché commercial comparable à celui des microsatellites de télécommunications. En effet, leur commande est souvent passée par des acteurs publics et institutionnels dépendant de décisions budgétaires étatiques parfois lourdes et conditionnelles. Cependant, la vente des données ou des images récoltées ainsi que leur exploitation (comme par exemple, l'analyse spectrale en agriculture...) représentent une forte valeur ajoutée et connaissent aujourd'hui un fort potentiel de croissance commerciale. De plus, les missions de ces satellites requièrent des mises en orbite spécifiques, difficiles à effectuer depuis des lanceurs lourds. Ils sont donc d'excellents clients pour les micro-lanceurs!

Il en est de même pour les microsatellites à usage militaire destinés à la reconnaissance, l'écoute électronique, l'alerte de lancement de missile, la navigation, les télécommunications, voire la réduction à l'incapacité de satellites gênants.

En effet, leur sensibilité stratégique et la nécessité de mises en orbite particulières sont autant d'atouts essentiels pour les micro-lanceurs.

Par exemple, l'État d'Israël a choisi de concevoir son propre micro-lanceur, Shavit, pour lancer ses satellites de reconnaissance et ce, malgré de difficiles contraintes. Shavit avait l'obligation d'être tiré depuis Israël et vers l'ouest afin d'éviter le survol de tout pays voisin. Le satellite se retrouvait ainsi en orbite rétrograde, c'est-à-dire à l'inverse du sens de rotation de la Terre.

Cet exemple illustre bien que la notion de coût est ici peu prise en compte et que seules, sécurité et efficacité semblent compter ! Cependant, là encore, des contraintes budgétaires étatiques peuvent venir contrarier inopinément de tels projets !

Ce panorama des acteurs du micro-lancement ne serait pas complet sans évoquer les instances institutionnelles régulatrices qui encadrent l'ensemble de l'activité.

III. – Les instances institutionnelles : un rôle régulateur

Les instances institutionnelles des États (ministères, agences spatiales....), tout en se gardant d'intervenir de manière trop visible dans le marché des micro-lanceurs, y jouent un rôle primordial de stimulation ou d'encadrement réglementaire national. Elles disposent de mécanismes pour soutenir l'innovation technologique au plan national ou pour faire évoluer les dispositifs réglementaires ou juridiques.

Les agences spatiales, au nombre d'une soixantaine aujourd'hui dans le monde, ont pour mission la gestion et la cohérence de l'activité spatiale d'un pays. Les plus importantes et les mieux dotées financièrement disposent d'une palette de leviers d'action qui apparaissent clairement à l'étude des tableaux « EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS » et « EXEMPLES DE PROGRAMMES EN DÉVELOPPEMENT » :

- Subvention financière directe de programmes pilotes de recherche et développement. Par exemple, l'ESA soutient aujourd'hui directement 5 sociétés européennes de microlanceurs avec ce type de contrat.
- Passage d'appels d'offres, voire dotation de concours comme par exemple, le DARPA Launch Challenge²¹. Dans ce cas, le montant financier accordé au projet retenu est directement versé aux fonds propres de l'entreprise qui en est l'auteur.
- Participation à la création de structures intermédiaires, soit totalement publiques, soit privées à participation publique, soit encore à la stimulation de la création de partenariats privés.

Le nombre impressionnant de parties prenantes et de projets recensés dans ce paragraphe interpelle d'autant que, malgré la stimulation de certains organes nationaux régulateurs, la faible solvabilité économique et le grand nombre d'acteurs d'offre et de demande, ne permettent pas de présager clairement du marché à venir.

Certes, le marché des micro-lanceurs apparaît protégé par les préférences nationales et donc à concurrence non ouverte, car l'accès à l'espace reste avant tout stratégique. Mais il est possible de douter de sa réalité économique et de sa viabilité à long terme comme domaine d'activité privée démocratisée. L'ensemble de ces éléments structurels font que ce marché semble précaire et fragile!

De plus, pour chaque opérateur de lancement, les barrières à l'entrée à surmonter sont particulièrement nombreuses et polymorphes (Chapitre 2).

_

²¹ Référence du concours DARPA. (www.darpa.mil)

Chapitre 2 – Un marché soumis à de fortes barrières d'entrée

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, le marché du micro-lanceur reste très marginal. Son économie est donc relativement peu connue d'autant qu'elle est en pleine transformation avec une actuelle réorganisation complète des filières :

- Institutionnelles et stratégiques, recouvrant les programmes gouvernementaux, militaires et scientifiques. Ces marchés sont captifs même si la diminution des budgets étatiques encourage les partenariats entre public et privé ou les coopérations bi voire multilatérales.
- Commerciales, avec une privatisation croissante mais devant faire face à des barrières à l'entrée²² bien davantage naturelles qu'artificielles avec :
 - Une industrie capitalistique²³ engendrant des risques financiers majeurs très pénalisants (Section 1),
 - o Un dispositif législatif de plus en plus contourné (Section 2),
 - o Une concurrence protéiforme permanente (Section 3).

Section 1 – Une industrie capitalistique engendrant des risques financiers majeurs très pénalisants

Nous avons vu que de multiples initiatives privées ont vu le jour, ces dernières années, pour développer des micro-lanceurs. L'un de leurs objectifs est, sans aucun doute, de répondre à ce qui peut être perçu comme un marché potentiellement prometteur. L'enthousiasme des investisseurs n'est pas sans fondement mais, pour autant, de nombreux défis sont à relever en matière de viabilité économique.

En effet, chacun de ses projets comporte une forte caractéristique capitalistique à savoir que l'opérateur désirant entrer sur ce marché doit mobiliser un capital d'investissement de départ considérable. Par exemple, le coût du programme de développement de Black Arrow, (cf. tableau «EXEMPLES D'ACTEURS HISTORIQUES») est d'environ 65 millions UK£²⁴ et il semble qu'aujourd'hui, développer un micro-lanceur pour un coût inférieur à 50 millions d'US\$ soit mission impossible.

Ce montant de capital de départ très élevé s'explique par le fait que le secteur spatial reste marqué par un perpétuel haut degré de risque technologique (Paragraphe I.) qui induit des répercussions significatives sur ses modes de financement privé (Paragraphe II.).

²² Cf. Définition dans l'introduction.

²

²³ Définition : Se dit d'une activité de production utilisant davantage de capital technique – machines, matières premières donc nécessité de financement important - que de main d'œuvre.

²⁴ Montant actuel corrigé de l'inflation. (www.curious-droid.com)

I. – Des techniques continuellement à haut niveau de risque

Comme le montrent précédemment les différents tableaux d'exemples de programmes de micro-lanceurs, leur programme de recherche et développement est une entreprise de très longue haleine, de 5 à 10 ans, même si cette durée a tendance aujourd'hui à se réduire. Par exemple, la société RocketLab a mis plus de 7 ans à développer son lanceur Electron (Cf. Tableau « EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS »). Pendant toute cette période, les fonds financiers doivent être sécurisés, ce qui entraîne une véritable inertie financière!

Par ailleurs, tout le long du programme de recherche et de développement, le risque technologique est présent et conséquent : ainsi, la société Space X a connu cinq échecs²⁵ dans la mise au point de son programme Falcon, et une estimation du coût par échec d'environ 90 millions d'US\$.

De plus, les programmes prennent fréquemment du retard soit, comme nous venons de le voir, en raison d'échecs dus à une impossibilité de maîtrise totale des techniques utilisées, soit, au contraire, par la recherche d'une extrême fiabilité de celles-ci conduisant à la mise en place de systèmes redondants. C'est ainsi qu'à ce jour, RocketLab n'a réalisé que 13 lancements alors qu'elle prévoyait une exploitation de 100 lancements par an.

Enfin, même des programmes notoires, bien reconnus et établis ne sont jamais infaillibles.

Par exemple, le lanceur léger Vega de la société Arianespace, pourtant réputé pour sa fiabilité avec 15 lancements et mises en orbite réussis, a connu, en juillet 2019, une perte totale et celle de sa charge satellitaire, soit un coût estimé à près de 200 millions US\$.

Il est à noter que l'historique et la fiabilité des lanceurs influencent lourdement à la fois le choix des opérateurs de satellites mais surtout le coût des assurances requises.

Par exemple, le lanceur Soyouz est actuellement le lanceur le plus sûr au monde. À fin 2017, plus de 1880 lancements avaient eu lieu avec un taux de réussite proche de 98 %. Ces chiffres permettent de réduire le montant des assurances qui peut atteindre 35 % du prix du lancement.

-

²⁵ 5 échecs : 3 avec le démonstrateur Falcon 1, 2 avec le lanceur Falcon 9.

II. – Des répercussions significatives sur les modes de financement privé

Nous l'avons vu, les investissements et immobilisations financières nécessaires au développement d'un micro-lanceur sont très spécifiques, tant par leur montant considérable que par leur terme très prolongé, parfois incertain.

Ces besoins relèvent des fonds propres de toute entreprise et émanent habituellement d'origines internes : capacité d'autofinancement, souscription d'emprunts bancaires.... toutefois peu mobilisables pour de tels projets. En effet :

- L'autofinancement est inabordable compte-tenu du montant des sommes à investir,
- L'emprunt auprès de banques de dépôt reste difficilement praticable. Peu de banque accepte de faire confiance à une entreprise naissante, dans un domaine innovant et ce, même si son futur est prometteur. De plus, elles s'appuient sur un échéancier de remboursement, donc requièrent des recettes. Or, celles-ci ne seront générées qu'à la fin du programme de développement.

Il est cependant à noter que l'abaissement des taux d'intérêt (parfois proche de 0%) qui ont suivi la crise financière de l'été 2007 a largement favorisé les emprunts. Cette situation inédite a eu pour conséquence de faciliter les financements. Malheureusement, elle fait également perdurer des projets non viables par le biais de rachats, de fusions.... Ces entreprises sont dites « zombies », c'est-à-dire, selon la Banque des Règlements Internationaux (BRI) qu'elles « existent depuis plus de 10 ans et que le *ratio* entre l'EBIT²⁶ et la charge des intérêts qu'elle supporte est inférieur à 1 »²⁷. Ce sont donc des entreprises non rentables, à tel point qu'elles sont incapables de payer les intérêts sur leur dette à partir des résultats de leur activité. Elles sont donc en réalité en faillite, mais maintenues artificiellement en activité par les banques qui acceptent de continuer à leur prêter de l'argent afin qu'elles puissent payer les intérêts sur les emprunts existants.

Elles sont particulièrement néfastes pour leur secteur industriel d'origine. En effet :

- Leur survie mobilise des capitaux qui pourraient être attribués à des entreprises à l'avenir plus favorable,
- Elles impactent la crédibilité du secteur concerné, pouvant générer une vraie crise de confiance financière.

_

²⁶ Cf. Table des abréviations.

²⁷ Référence de donnée. (www.la-chronique-agora.com)

- Aujourd'hui, la plupart des programmes de développement de micro-lanceur préfère donc faire appel à une participation au capital social de l'entreprise. Il s'agit d'ouvrir celui-ci à des typologies d'investisseurs de long terme assurés d'une certaine permanence de leurs ressources. En effet, depuis quelques années, le temps est devenu une dimension essentielle des activités financières et les problématiques liées à l'investissement de long terme connaissent un regain d'intérêt. Certains investisseurs qualifiés s'engagent donc sur les carences du marché en supportant des risques non assumés par d'autres acteurs. Ce sont :
 - Les « business-angels » (littéralement « anges des affaires ») : Derrière ces « investisseurs providentiels » se cachent des personnes physiques, souvent anciens cadres supérieurs ou entrepreneurs fortunés, qui souhaitent investir une partie de leur patrimoine financier dans des sociétés innovantes. « Seuls ou à plusieurs, sous forme de réseaux, ils sont susceptibles de financer des investissements de 50 à 700 000 € », explique la Fédération Nationale France Angels. « En général, ils restent minoritaires au capital de l'entreprise (part inférieure à 20 %) mais participent activement à sa vie et aux prises de décision, en apportant conseils et carnet d'adresses grâce à leur expérience», précise l'Agence France Entrepreneur (AFE). Tous poursuivent un même objectif : dégager une plus-value conséquente de leur investissement.
 - Les bailleurs de fonds en capital-risque qui prennent des participations au capital de l'entreprise (plus communément appelées « prise de participation » ou « levée de fonds »), sous forme de parts sociales, en contrepartie des bénéfices générés si le projet réussit. Les principaux risques pour les investisseurs sont, si l'entreprise ne se développe pas, de ne jamais trouver acquéreur pour revendre leurs parts ou, si l'entreprise est dissoute, de tout perdre. Néanmoins, les gains dont ils peuvent bénéficier sont susceptibles de dépasser leurs espérances si l'entreprise connaît le succès.

Ces fonds d'investissement n'exigent pas les cautions et garanties requises par les établissements bancaires et ont donc pour avantage, pour la société concernée, de pouvoir lever un montant de fonds important sans avoir à en supporter la charge financière.

Cependant, ils contraignent à une répartition du pouvoir de décision au sein du comité exécutif de l'entreprise, analogue à la répartition d'un capital social entre actionnaires. De plus, ce mode de financement est particulièrement

pointé du doigt par des autorités de régulation comme, en France, l'Autorité des Marchés Financiers (AMF). En effet, les entreprises concernées adoptent le plus souvent un statut social proche de la Société par Actions Simplifiées (SAS) française. Ainsi, afin d'augmenter leur capital social, elles peuvent décider de la création d'un nombre illimité de parts sans être restreintes par le nombre de « levées de fonds » ou « tours de table ». Au cours de ces opérations, le nombre de parts peut donc augmenter, la valeur de la part peut être réévaluée et le pouvoir que chaque investisseur détient en fonction de son nombre de parts être redéfini. Certains ont donc la surprise de connaître une dilution de participation, c'est-à-dire une diminution de leur poids relatif au capital. D'autres, en revanche, conservent le même poids relatif en recevant mécaniquement plus de parts.

Par ailleurs, si la valorisation des actifs d'une entreprise correspond à l'ensemble de la valeur de ses parts, l'évaluation financière de celle-ci n'est pas uniforme : elle peut être comptable, indexée sur la revalorisation future des parts ou encore, indexée sur les profits potentiels et ultérieurs. Si les apports en nature peuvent être soumis à réglementation et qu'un commissaire aux apports vérifie, dans certains cas, la valeur attribuée au projet, cette diversité d'évaluation reste source de dérives et de bulles spéculatives : chacun des actionnaires a, en effet, intérêt à ce qu'à chaque tour de table, à défaut de changer la répartition du capital, la valorisation de la part augmente. Ce phénomène a notamment touché quelques sociétés du « New Space »²⁸. Il représente un risque majeur pour la viabilité financière à long terme des opérateurs de micro-lanceurs, et donc, pour la structuration de cette filière spatiale.

- Ces risques ont incité certains développeurs de micro-lanceurs à imaginer d'autres dispositions de financement. Ils font ainsi évoluer leur relation avec l'opérateur de microsatellite vers un engagement financier réciproque reposant :
 - o soit sur une avance de paiement par l'opérateur de satellite qui, en quelque sorte, « réserve » le micro-lanceur. Il s'engage alors à verser un acompte sur la somme du lancement afin de permettre à l'opérateur du lanceur de poursuivre

-

 $^{^{28}}$ Cf. Note de bas de page, PARTIE 1 – Chapitre 1 – Section 3 – Paragraphe I. B.

et conclure le programme. Souvent, les contrats sont établis en conditions économiques forfaitaires évaluées sur un montant « à prix coûtant ».

o soit sur le regroupement micro-lanceur/microsatellite sous l'entité d'un seul et même opérateur : c'est la solution choisie par Space X pour déployer sa constellation de satellites²⁹. Cette dernière solution nécessite toutefois des ressources considérables, tant sur le plan technologique que financier.

Cet engagement réciproque peut certainement être source d'une synergie positive de développement. Cependant, en cas d'échec de l'une des deux partis, ne devient-il pas un engrenage destructeur pour l'ensemble ?

Nous l'avons vu, le programme de recherche et de développement d'un micro-lanceur reste aujourd'hui complexe au plan financier. Il est vrai que le domaine spatial traverse toutes les sphères de l'économie et qu'il est source d'enjeux politiques majeurs. Si ces raisons ont conduit très tôt, dans son histoire, à mettre en place un dispositif législatif veillant à préserver son utilisation à des fins pacifiques, il se voit aujourd'hui de plus en plus souvent contourné (Section 2).

Section 2 – Un dispositif législatif de plus en plus contourné

Quoique qu'inspiré du droit maritime très ancien ainsi que du droit aérien, le droit spatial reste récent puisque ce n'est qu'en 1957 et la mise en orbite de Spoutnik, que s'organisent les prémices d'un cadre juridique. Il a pour spécificité d'être international et indique que de l'espace « est complètement exclus toute revendication de souveraineté territoriale ou toute proclamation de juridiction nationale exclusive »³⁰.

À cette époque de « guerre froide », il s'agit de préserver l'espace de toute forme de militarisation, notamment de l'arme atomique, et d'en faire un terrain neutre. Cependant, nous verrons que depuis, certains États créent leur propre législation afin de s'en approprier l'accès, voire les potentielles ressources économiques.

Dans ce chapitre, nous chercherons à identifier les répercussions du droit spatial sur le secteur du micro-lancement. Pour cela, nous avons choisi de nous centrer essentiellement sur les textes juridiques concernant le marché des micro-lanceurs et ses composantes, directes ou indirectes.

-

²⁹ Cf. PARTIE 1 – Chapitre 1 – Section 3 – Paragraphe II.

³⁰ Cf. ANNEXE 1.

Nous verrons que le droit de l'espace a pour objectif essentiel d'y protéger la paix et d'en promouvoir une utilisation pacifique (Paragraphe I.). Toutefois, il reste le terrain de tels enjeux idéologiques et économiques qu'ils ont entraîné la création d'un cadre légal à son exploitation (Paragraphe II.).

I. – D'un espace pacifique à une utilisation stratégique et tactique

Comme nous l'avons rappelé, l'exploitation du domaine spatial apparaît dans un moment de tension historique. Nous verrons que, si le souhait des instances internationales était de faire de l'espace un lieu neutre à l'abri de conflits territoriaux (Paragraphe A.), les grandes puissances se le sont toutefois rapidement réapproprié pour en faire le nouveau lieu d'affrontement de leur suprématie (Paragraphe B.).

A. – Une volonté initiale de neutralité

Dès 1959, sous l'égide de l'Assemblée Générale des Nations Unies et du vote de la Résolution 1472, est créé le Comité pour l'Utilisation Pacifique de l'Espace Extra-Atmosphérique (CUPEEA). Il a pour but d'« examiner l'étendue de la coopération internationale et d'étudier les moyens pratiques et applicables d'exécuter des programmes touchant les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique ». Comprenant un souscomité dédié aux aspects juridiques, le CUPEEA contrôle la mise en œuvre de traités et d'accords, dont le *Traité sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes³¹, traité international ratifié et entré en vigueur en 1967³².*

Les 2 premiers articles de ce traité prévoient la liberté d'accès des états signataires à l'espace extra-atmosphérique sans entrave possible de la part d'un tiers mais également sans possibilité de se l'approprier.

De plus, l'article 4 instaure l'interdiction pour les états signataires de la mise en place d'armes nucléaires et de toute autre forme d'armes de destruction massive sur l'orbite terrestre, sur les autres astres célestes, ainsi que toute forme de stockage de celles-ci dans l'espace.

Enfin, ce texte instaure un principe de responsabilité des états signataires pour les activités pratiquées dans l'espace extra-atmosphérique en leur nom, par exemple par des entités gouvernementales ou non gouvernementales dont ils seraient responsables.

_

³¹ Cf. Site internet des Nations Unis. (www.unoosa.org)

³² Cf. ANNEXE 1.

Ce premier traité a donc pour vertu d'instaurer l'espace comme une zone non militarisée et non militarisable, mais aussi, comme un territoire neutre et normalement dépourvu d'activités militaires d'armement. De plus, ce traité, toujours en vigueur, considère l'espace comme un bien commun, et par là même, en interdit l'appropriation à des fins personnelles par des personnes physiques ou morales.

Cependant, ces textes ne limitent pas son utilisation à des fins de stratégie nationale et internationale (Paragraphe B.) et les conflits terrestres entre États s'y répercutent.

B. - Un lieu de suprématie et d'inévitable affrontement

Le traité cité au chapitre précédant rend impossible l'utilisation de l'espace à des usages d'armement. Pour autant, il n'aborde ni les problématiques liés aux vecteurs balistiques, ni celles liées aux satellites de télécommunications ou d'observation terrestre à des fins militaires.

Concernant le vecteur balistique, c'est-à-dire le développement de lanceurs comme les missiles, c'est en 1987 que le Missile Technology Control Regime (MTCR³³) ou Régime de Contrôle de la Technologie des Missiles, instaure les *Directives pour les transferts sensibles se rapportant aux missiles*³⁴. Par « missile », ce contrôle multilatéral des exportations désigne toute fusée ayant une portée supérieure ou égale à 300 km : les micro-lanceurs sont donc directement concernés par ces directives et doivent s'y conformer. Elles ont, entre autres, pour but de réduire, entre États, l'accès à l'information de conception, à l'achat de matériel ou de technologie propres à développer des fusées ou lanceurs pouvant servir de vecteur pour des armes à longue portée. Ces dispositions sont l'une des raisons de l'important retard pris dans le développement des micro-lanceurs nationaux du Brésil.

Aucun texte spécifique ne s'applique à l'usage spécifique des satellites militaires. Il relève uniquement du Traité de 1967 sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes. Leur déploiement, leur nombre, leur utilisation ne sont donc pas restreints, ce qui est largement bénéfique au secteur des micro-lanceurs.

La chute de l'URSS en 1991, entraînant l'effondrement du bloc de l'Est, modifie l'affrontement des grandes puissances dans l'espace extra-atmosphérique. Toutefois, le

-

³³ Définition : Régime multilatéral de contrôle des exportations créé en 1987 et visant à limiter la prolifération des armes de destruction massive en contrôlant les transferts des missiles pouvant servir de vecteur pour ces armes

³⁴ Cf. ANNEXE 2.

développement des nouvelles technologies et de leurs applications, dès les années 2000, font de celui-ci un nouveau théâtre d'affrontement, cette fois d'ordre économique (Paragraphe II.).

II. – Vers un nouvel enjeu : l'exploitation privée des ressources spatiales

À compter des années 1980, l'avènement massif des multimédias et d'Internet impose l'espace extra-atmosphérique comme le nouveau terrain privilégié d'enjeux stratégiques et l'affrontement entre puissances se déplace sur le terrain économique.

Dès lors, les lois internationales ayant peu de caractère contraignant, il est facile de les outrepasser. Chaque État restant souverain, il en est fait fi au profit de textes et cadres juridiques nationaux permettant à des sociétés privées à usage commercial de s'établir dans l'espace.

C'est ainsi qu'en 1984, les États-Unis d'Amérique, sous la présidence de Ronald Reagan, outre leur initiative de défense stratégique du « bouclier spatial »³⁵, promulguent la loi fédérale du Commercial Space Launch Act conçue pour privilégier l'entreprise privée américaine dans la commercialisation des technologies spatiales. C'est le tout premier texte encadrant l'exploitation économique et commercial de l'espace.

D'autres textes vont encore plus loin. En fin d'année 2015, le SPACE Act (Spurring Private Aerospace Competitiveness and Entrepreneurship Act)³⁶ spécifie que les « citoyens américains peuvent entreprendre l'exploration et l'exploitation commerciales des ressources spatiales, à savoir l'eau et les ressources minières (métaux rares, gaz, hélium, platinium...) ». Bien qu'il y soit précisé que « les États-Unis n'affirment pas leur souveraineté, règne ou droits exclusifs ou prioritaires, ni la possession, d'aucun corps céleste », cette loi transgresse clairement le Traité international de l'espace de 1967³⁷.

Si les États-Unis d'Amérique sont précurseurs dans le domaine, d'autres pays ont également mis en place leurs propres textes et dispositifs juridiques :

- En Europe, le Grand-Duché de Luxembourg se dote d'une loi permettant, tout comme les États-Unis d'Amérique, l'implantation de sociétés privées dans l'espace visant son exploitation et son utilisation économique : c'est la loi du 20 juillet 2017 sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace³⁸.

³⁵ Référence à l'Initiative de défense stratégique américaine – 1984.

³⁶ Cf. Liste des abréviations.

³⁷ Cf. ANNEXE 1.

³⁸ Cf. ANNEXE 3.

– En Asie, le projet de « grande renaissance » de la République Populaire de Chine, porté par Xi Jinping, s'appuie sur le symbole fort de la conquête de l'espace. Le régime a donc publié un plan législatif, il y quelques années, pour ouvrir le marché à la concurrence privée. Depuis, plusieurs start-up se sont lancées³⁹.

Le cadre juridique pouvant s'appliquer au marché du micro lancement est encore relativement récent et est appelé à se développer dans les décennies prochaines. Cependant, des dispositifs législatifs nationaux semblent peu à peu se substituer au cadre réglementaire international. C'est une réelle révolution juridique qui prévaut à la naissance d'une nouvelle industrie. Nul ne sait s'il faut s'en réjouir ou fortement s'en inquiéter!

De plus, outre le contexte juridique évolutif, une dernière barrière à l'entrée est redoutable : celle d'une concurrence protéiforme permanente (Section 3).

Section 3 - Une concurrence protéiforme permanente

Nous avons vu que la durée de développement d'un système de lancement est conséquente ⁴⁰. Elle impose donc d'anticiper les besoins du marché à long terme. Cet exercice prospectif est très délicat et s'est encore complexifié, ces toutes dernières années, par une compétition engendrée par des technologies toujours plus novatrices. Il s'agit des seules barrières à l'entrée du marché des micro-lancements pouvant être qualifiées d'artificielles et elles concernent tant les micro-lanceurs que les microsatellites.

Ainsi, de nouvelles solutions de lancement partagé apparaissent avec des politiques de prix très agressives (Paragraphe I.). Par ailleurs, la compétition au niveau des composants des satellites permet de diminuer à la fois leur coût et leur durée de vie opérationnelle, impactant donc directement le secteur du lancement (Paragraphe II.). Enfin, de nouveaux moyens pour atteindre l'espace sont à l'étude et leur réussite serait un coup de frein brutal au microlancement (Paragraphe III.).

I. – Une nouvelle approche « hyper low cost » des gros lanceurs

Nous avons vu que les lanceurs de gamme supérieure aux micro-lanceurs, bien que n'offrant pas aux opérateurs de microsatellites les conditions optimum de mise en orbite, restent particulièrement compétitifs par leur faible coût d'accès à l'espace tant dans le domaine :

- du prix de lancement avec un faible prix/kg orbité,

³⁹ Cf. Tableau « EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS ».

⁴⁰ Cf. PARTIE 1 – Chapitre 2 – Section 1 – Paragraphe I.

- du prix des contrats d'assurance, notamment si le lanceur est fiable.

En quelques années, cette tendance s'est encore accentuée par de nouvelles avancées technologiques permettant une approche qui se veut délibérément « *low cost* » (avec un prix moyen de lancement réduit de 35 à 40 %) et, à bien des égards, inspirée du monde aéronautique civil.

Par exemple, le modèle économique de commercialisation du lanceur Falcon 9 de Space X s'appuie sur :

- une production en série,
- sur un seul et même site industriel,
- avec une intégration verticale poussée à l'extrême (l'entreprise fabrique et commercialise),
- et peu ou pas de sous-traitants.

Space X garde ainsi le contrôle de l'ensemble de la chaîne de conception et de fabrication de son lanceur. De plus, elle a mis en œuvre des techniques jusqu'ici jamais pratiquées :

- une réduction du nombre d'étages et du nombre de moteurs,
- la réutilisation du 1^{er} étage avec deux avantages essentiels :
 - La réduction du coût de lancement car le 1er étage équivaut à environ 60 % de son montant.
 - o La possibilité d'augmenter la cadence de lancement sans investissement important.

La multiplication de la cadence des tirs a pour conséquence l'augmentation du volume non utilisé sur chaque lanceur, donc disponible pour les charges secondaires. Space X étudie ainsi une possibilité de mise en orbite uniquement réservée à des charges secondaires à un prix ne dépassant pas les 2000 US\$/kg (voire, à terme, réduit à 1000 US\$/kg).

En conséquence, il semble donc que la tendance à la baisse des prix déjà observée puisse encore se renforcer. Dès lors, difficile pour les micro-lanceurs de rivaliser avec de tels prix de lancement!

La fragilisation de leur marché commercial risque donc de s'amplifier et ce, d'autant que certaines améliorations technologiques des satellites, comme l'allongement de leur durée de vie opérationnelle (Paragraphe II.), viennent accentuer sa vulnérabilité.

II. - L'allongement du cycle de vie des satellites

Si la mission de Spoutnik n'a pas excédé les 90 jours, les satellites actuels, même de petite taille, ont généralement des durées de vie opérationnelle de 3 à 5 ans voire, pour certaines missions spécifiques, pouvant atteindre 10 ans. L'obligation de les renouveler est une source non négligeable d'alimentation du marché des micro-lanceurs.

Cependant, là encore, les progrès de la recherche technologique permettent peu à peu d'améliorer le maintien opérationnel des microsatellites en orbite.

Par exemple, l'utilisation de très petits et très légers moteurs ioniques, fabriqués et commercialisés par la start-up française Exotrail, permet aujourd'hui aux microsatellites les plus petits de se repositionner sur leur orbite d'origine et donc de prolonger leur mission en doublant au moins, leur durée d'existence.

De plus, l'allongement constaté du cycle de vie des microsatellites est largement lié à :

- l'amélioration de la connaissance et de la réaction des matériaux, ainsi que de leurs interactions entre eux,
- l'utilisation courante de matériaux composites, tels que la fibre de carbone ou de kevlar, qui amène à la fabrication de pièces avec des propriétés de flexibilité, de tenue en température, de conductivité électrique et thermique, d'inertie chimique... bien plus légères et résistantes,
- une qualité des matériaux de mieux en mieux maîtrisée.

Avec pour hypothèse que la phase de mission d'un satellite est aujourd'hui, au minimum, multipliée par 2, il est aisé de déduire que le besoin en lancement de microsatellites est diminué du même nombre, réduisant d'autant le nombre de lancements potentiels de microlanceurs.

Par ailleurs, de nouvelles solutions prospectives d'accès à l'espace et de mise en orbite voient peu à peu le jour (Paragraphe III.).

III. – Des solutions prospectives : du SSTO à la catapulte magnétique

Des initiatives alternatives d'accès à l'espace s'amorcent peu à peu. Nous présentons ici trois d'entre elles que nous avons retenues en fonction de leur caractère plus abouti et donc, de leur capacité potentielle à venir se substituer aux actuelles techniques de lancement :

Le Single Stage To Orbite (SSTO) : ce concept de «lanceur à étage unique jusqu'à l'orbite » a été étudié dans les années 80 et 90 par la firme américaine Lockheed Martin. Elle développe un lanceur mono-étage, le X-33, totalement réutilisable, proche de l'avion spatial. Les coûts de mise en orbite annoncés sont drastiquement réduits et séduisants avec un prix/kilo orbité de 500 US\$ à 1500 US\$.

Toutefois, la réutilisation du lanceur est d'une grande complexité technique et la dépense énergétique demandée par le système est considérable. Un nouveau type de moteur est utilisé avec une tuyère expérimentée sur les moteurs-fusées à ergols liquides qui optimise l'efficacité de la propulsion quel que soit l'altitude : l'Aerospike⁴¹. Il fournit un rendement supplémentaire de 10 à 15% de poussée sur l'ensemble d'un cycle d'utilisation, permettant une égale augmentation de la charge utile.

- La mise en orbite d'un lanceur depuis un avion porteur ou « lancement aéroporté » : il se déroule dans une opération en deux temps :
 - Le premier consiste à amener une fusée aux confins de la stratosphère grâce à un avion spécialement configuré.
 - o Le second est le largage du lanceur afin qu'il réalise sa mise en orbite.

Cette solution utilise au mieux les spécificités des différentes couches de l'atmosphère en bénéficiant de la propulsion à chaque fois la plus adaptée :

- O Les couches basses, jusqu'à une altitude de 20 à 25 km, très denses, n'offrent qu'un rendement modéré des moteurs de fusée alors que les moteurs d'avion sont spécialement conçus et optimisés pour celles-ci.
- Par contre, dans les hautes couches de l'atmosphère puis dans le vide spatial,
 les moteurs de fusée sont les seuls à pouvoir assurer une propulsion.

Ce type de lancement vise à une réduction du prix/kilo orbité de 25 à 37% selon les estimations de la société Stratolaunch⁴². Bien que non aboutie à ce jour, cette solution intéresse nombre d'acteurs. Ainsi, l'ONERA a mis au point, en partenariat avec le CNES et la société Aviation Design, un projet de démonstrateur à échelle réduite de système de lancement aéroporté de petits satellites. Baptisé Éole⁴³, son premier vol a eu lieu en septembre 2019.

61

⁴¹ Cf. PARTIE 2 – Chapitre 2 – Section 1 – Paragraphe III.

⁴² Référence : site de la société Stratolaunch. (www.stratolaunch.com)

⁴³ Référence : site de l'ONERA. (www.onera.fr)

La catapulte électromagnétique : le principe est d'accélérer à très grande vitesse, grâce à des électroaimants, une capsule abritant un satellite. Celle-ci est initialement accélérée le long d'un rail en forme de boucle, puis elle est propulsée par l'énergie cinétique ainsi accumulée et poursuit, le long d'une rampe de guidage, en direction du ciel.

Ce concept est très ancien puisqu'il est déjà détaillé, en 1897, dans le roman *A Trip to Venus* (Un voyage vers Vénus). Il est actuellement repris par la start-up américaine SpinLaunch⁴⁴, soutenue par des fonds de capital-risque comme, par exemple, Airbus ou Google Ventures : 35 millions US\$ ont ainsi été levés en janvier 2020⁴⁵.

Bien que très prometteuse, cette solution est au stade des essais et semble techniquement difficile à réaliser : par exemple, les forces d'accélération, les contraintes mécaniques et thermiques s'appliquant sur le rail ou sur la capsule sont encore peu connues et de nombreuses interrogations restent sans réponse. Toutefois, si les problématiques techniques venaient à être surmontées, le prix/kilo orbité serait alors, non plus de quelques milliers d'US\$, mais seulement de quelques centaines d'US\$ (soit une division du prix par un facteur 10).

À l'issue de cette première partie, il est maintenant possible d'établir les contours du marché des micro-lanceurs.

Il relève avant tout d'un créneau commercial très étroit, totalement dépendant du marché des microsatellites.

Son activité et sa dynamique ont été largement influencés, tout comme l'ensemble du secteur spatial, par des facteurs macroéconomiques comme les dépenses publiques de nombreux États. Les gouvernements et leur agence spatiale sont à la fois du côté de la demande (acheteurs de satellites donc de lancement) et du côté de l'offre puisque les agences spatiales travaillent de concert avec les entreprises privées nationales du secteur.

Cependant, aujourd'hui, le net recul des budgets de Défense met sous pression le marché d'autant qu'il est, dans le même temps, impacté par la privation croissante du secteur. L'arrivée récente d'entreprises très innovantes provoque un vrai bouleversement et renforce la concurrence.

-

⁴⁴ Référence : site de la société SpinLaunch. (www.spinlaunch.com)

⁴⁵ Référence : article publié le 18/06/2018, site internet. (www.usinenouvelle.com)

Le marché économique des micro-lanceurs est donc en pleine transformation, face à une vive adversité, exerçant sans cesse une pression à la baisse des prix.

La deuxième partie de ce mémoire doit permettre l'analyse des contraintes économiques rencontrées par le secteur et la mesure de ses capacités d'adaptation en terme de réduction du coût de mise en orbite. Des modifications tant de la technologie que des stratégies d'exploitation sont au cœur de cette compétition!

PARTIE 2 – L'ÉCONOMIE DES MICRO-LANCEURS ET SES CONTRAINTES : MUTATIONS TECHNIQUES ET ADAPTATION DES STRATÉGIES D'EXPLOITATION

La première partie de ce mémoire tend à démontrer que le marché des micro-lanceurs ne semble guère susceptible de se développer compte-tenu de leur coût d'accès à l'espace, peu voir non concurrentiel. Une drastique réduction de celui-ci est donc indispensable !

L'objet de cette partie est donc de considérer l'évolution des politiques spatiales et d'en évaluer brièvement les répercussions financières (Chapitre 1) puis d'analyser et d'évaluer des solutions potentielles de diminution du coût de production d'un micro-lanceur (Chapitre 2).

Il est important de noter ici que les données sur le secteur spatial sont rarement isolées de celles du secteur aéronautique et/ou de celui de la défense. Les études lui étant exclusivement consacrées sont relativement peu nombreuses et les données chiffrées actualisées permettant des comparaisons ou des analyses précises sont rares.

Chapitre 1 – Rappel sur l'évolution des politiques spatiales et éclairage sur la répartition des coûts interférants dans le lancement d'un engin

Deux préalables nous ont paru nécessaires et font l'objet de ce chapitre. En effet, il est important de remettre ici en perspective que :

- Les enjeux politiques étatiques ne sont plus de convaincre du caractère extraordinaire de l'espace mais bien de sa possible exploitation et de retombées économiques rentables (Section 1).
- L'une des étapes essentielles à toute démarche d'amélioration de la maîtrise, voire de réduction, des coûts de lancement d'un engin spatial consiste à l'identification de ceux imputables à chaque système et phase du processus (Section 2).

Section 1 — De l'essor des politiques spatiales à une « normalisation » de l'économie spatiale

Les valeurs traditionnelles attachées à l'espace semblent avoir été le fruit d'une conjonction de circonstances exceptionnelles exposées en bref rappel historique (Paragraphe I.). Elles semblent avoir aujourd'hui perdu leurs raisons d'être au profit d'un principe « d'utilitarisme et de normalisation de l'économie spatiale » (Paragraphe II.).

I. – Bref rappel historique

Nous avons vu que les financements des premiers programmes spatiaux ont été l'apanage d'institutions étatiques liées soit à la Défense, soit à la Recherche. À cette époque, le développement de l'accès à l'espace répond à des objectifs purement stratégiques et non à des logiques économiques. Les budgets de recherche et développement sont considérables.

Pour les États concernés, ces investissements ont un double objectif :

- Conserver une autonomie d'accès à l'espace et donc préserver leur souveraineté,
- Créer et structurer une nouvelle filière industrielle en s'inspirant de l'aide apportée par celle de la production des missiles balistiques.

Par exemple, la France dépense l'équivalent de 180 millions US\$ pour le développement de sa première fusée Diamant⁴⁶ dont le premier lancement a lieu en 1965. Certes, cet investissement est, à l'époque, très élevé mais son résultat est à envisager à très long terme. Sans doute a-t-il en effet permis, 50 ans plus tard, l'avènement de sociétés comme Arianespace ou MBDA (ex MATRA), ainsi que de groupes comme Thalès ou Safran, fleurons de l'industrie spatiale mondiale, et dont les retombées économiques impactent aujourd'hui directement la France ?

Aux États-Unis, comme le montre le graphique ci-dessous (Cf. Fig. 15), le budget de la NASA, rapporté au pourcentage du budget fédéral est hautement croissant jusqu'à la réussite du programme Apollo.

65

⁴⁶ Référence : en valeur actualisée, hors programme des « Pierres précieuses ». (www.nospremieresannees.fr)

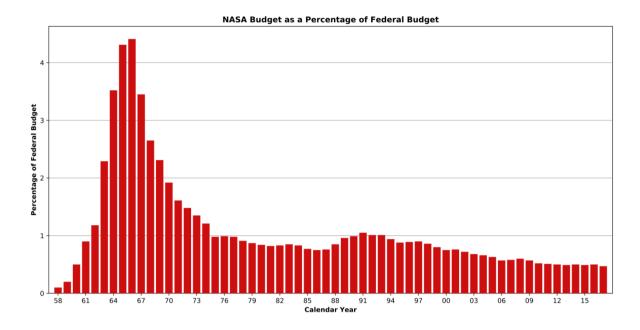


Fig. 15 – Evolution du budget annuel de la NASA en pourcentage du budget fédéral américain (Source : en.wikipedia.org)

Il est à son apogée en 1966 et représente alors plus de 4% du PIB. Il décroît ensuite fortement et inexorablement.

La période d'accroissement budgétaire est aussi mise à profit pour améliorer la structuration et donc, renforcer l'industrie aérospatiale américaine : par exemple, des sociétés comme Boeing, Lockheed Martin ou encore Vought, développent de nouvelles technologies avec l'aide de contrats gouvernementaux.

Ce n'est qu'en 2011, date de fin du programme de la navette spatiale américaine, que s'observe une réelle rupture dans le programme américain qui perd ainsi une partie de son autonomie d'accès à l'espace. Les spationautes américains rejoignant l'ISS deviennent dépendants du vaisseau russe Soyouz!

Le graphique Fig. 15 confirme bien que la contribution budgétaire allouée à la NASA a eu pour but essentiel de réaliser une preuve concrète de la suprématie des États-Unis d'Amérique face aux « pays de l'Est ». Ainsi, le Président Kennedy formule, au début des années 1960, qu'un américain marchera sur la Lune avant la fin de la décennie. Son discours est éminemment stratégique. Il joue sur l'esprit pionnier qui domine le folklore américain et la nécessaire coopération de chacun, mais aussi, sur l'urgence de maîtriser son destin pour

remporter « *la bataille qui se joue à travers le monde entre la liberté et la tyrannie* »⁴⁷. Il s'agit donc bien de reprendre le leadership à l'URSS! Toutefois, dans le même temps, le Président plaide aussi pour la pleine mobilisation des ressources nationales et en profite pour demander des financements pour développer un réseau de satellites de télécommunication et d'observation.

L'objectif étant atteint, un recentrage des politiques spatiales s'opère vers des considérations plus pratiques entraînant une inévitable limitation budgétaire.

A travers cet exemple, la quête de légitimité sociale des projets spatiaux s'avère très sensible et le deviendra d'autant plus dans la période de crise économique qui va suivre! A l'heure où les budgets s'amenuisent, l'enjeu n'est donc plus de convaincre du caractère exceptionnel de l'espace mais de le faire entrer dans une démarche progressive de réorganisation et de normalisation (Paragraphe II.).

II. – Vers une « normalisation » de l'économie spatiale

À partir de cette époque, certaines puissances spatiales, soucieuses du coût engendré par l'industrie spatiale, cherchent à développer d'autres façons de faire :

- Aux États-Unis d'Amérique, le programme de la « navette spatiale » démarre en 1971.
 Son innovation majeure réside dans sa réutilisation partielle puisque :
 - La « navette » ou orbiteur revient se poser comme un planeur sur une piste d'atterrissage et peut être de nouveau utilisée pour un nouveau vol.
 - Les propulseurs d'appoint sont également conçus pour une récupération et une nouvelle utilisation.

De fortes économies sont espérées dont une division par 2 des coûts de lancement. Malheureusement, compte-tenu de la non-maturité de certaines technologies utilisées, ce programme se soldera par une augmentation des coûts de lancement qui avoisineront 1,5 milliards US\$ par lancement au début des années 2000.

_

⁴⁷ Référence : Discours du président américain John Fitzgerald Kennedy, le 12 septembre 1962.



Fig. 16 – Atterrissage de la navette spatiale (Source : upload.wikimedia.org)

En Europe, peu avant les années 1960, de nombreuses nations européennes se sont essayées individuellement au développement de lanceur. Il n'y avait alors entre elles aucune concertation, stratégique ou technologique, et chacune assumait l'entièreté des coûts.

Une stratégie commune allait toutefois naître peu à peu et aboutir, dans les années 1960, au 1^{er} projet de lanceur spatial européen, Europa⁴⁸. Son objectif était de permettre à l'Europe de placer en orbite ses satellites sans dépendre des conditions imposées par les deux seules puissances spatiales disposant de lanceurs opérationnels, les États-Unis d'Amérique et l'URSS. Ce programme est un échec mais les leçons tirées de son déroulement et l'expérience acquise sont en grande partie à l'origine de la compétitivité technique mais aussi financière du programme européen Ariane qui débute en 1973. Par exemple, c'est à Europa que l'on doit la création d'un unique interlocuteur institutionnel, l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et d'une maîtrise d'œuvre industrielle confiée à une seule entreprise, ArianeGroup. Par ailleurs, le projet a été découpé en lots de travaux (en anglais work packages) afin d'assigner les responsabilités de chaque pays participant en fonction de ses compétences préférentielles : c'est ainsi, par exemple, que l'Allemagne œuvre principalement aux propulseurs et au corps des lanceurs...

Il est à noter que la France joue un rôle particulier puisque le positionnement géographique de la Guyane, l'un de ces départements d'outre-mer très proche de l'Équateur, permet de réaliser de substantielles économies d'énergie lors du lancement.

_

⁴⁸ Référence : site internet Destination Orbite. (www. lanceurs.destination-orbite.net)

- En URSS et en Chine, les financements publics perdurent et il ne semble pas exister de logique de diminution des coûts de production des lanceurs. Il est vrai que les capacités industrielles de ces pays à produire en quantité des fusées ou missiles, sont telles que les seules logiques des séries et de production de masse réduisent considérablement les coûts. Un exemple est très parlant : la conception initiale du lanceur actuel Soyouz date des années 50. Elle a certes été améliorée, mais peu de changements profonds ont eu lieu alors que le nombre total de tirs, toutes versions confondues, dépasse 2800 !

C'est à cette même époque que les progrès techniques et la forte croissance de l'activité font apparaître de nouveaux systèmes de télécommunications qui s'accompagnent de la mise en orbite géostationnaire de satellites privés de télécommunications (Intelsat en 1964, Inmarsat en 1979). Dès lors, la demande va se multiplier très rapidement.

Cette privatisation va progressivement dynamiser le secteur du lancement en introduisant de nouvelles logiques purement économiques dont une quête de retour sur investissement plus immédiate. L'activité spatiale devient alors un outil au service d'une proposition de valeur tournée vers l'usager et est, dès lors, gérée et évaluée comme tel. C'est une démarche inédite dans ce secteur, peut-être le signe d'une normalisation, voire d'une maturation enfin atteinte!

L'acteur public, lui, poursuit graduellement son désengagement financier de l'industrie spatiale mais conserve largement la main sur les aspects stratégiques de la recherche et développement, ainsi que les problématiques d'exploitation de l'espace.

Repositionner historiquement les modèles économiques de l'industrie spatiale a permis de mieux comprendre les enjeux actuels de l'objectif de réduction de leurs coûts.

Il s'agit maintenant de pouvoir identifier et estimer les coûts imputables à chaque système et phase du processus depuis la conception jusqu'au lancement (Section 2).

Section 2 – La répartition des coûts d'un lancement d'un micro-lanceur

Il s'agit ici de récapituler, à grands traits, les différents types de coûts inhérents au lancement d'un micro-lanceur. Cet éclairage a, entre autres, pour objet d'apporter des éléments d'amélioration à la compréhension du Chapitre 2.

Tout d'abord, comme pour toute entreprise quelle que soit la nature de son activité, la structuration des coûts générés par un lancement comporte :

- des coûts ou charges fixes aussi appelées charges structurelles, soit l'ensemble des coûts qui évoluent indépendamment du niveau d'activité de l'entreprise mais que celle-ci doit assurer pour son bon fonctionnement⁴⁹. Elles représentent un coût pour l'entreprise même si cette dernière ne génère pas de chiffre d'affaires.

Ils sont évalués à un montant pouvant atteindre jusqu'à 70 % des coûts de lancement d'un lanceur lourd, et jusqu'à 60 % de ceux d'un lanceur plus léger dont les microlanceurs.

- des coûts ou charges variables aussi appelées charges opérationnelles ou charges d'activité qui varient en fonction du volume d'activité de l'entreprise⁵⁰.

Cette logique comptable semble simple mais elle ne permet pas de calculer au plus près le prix de commercialisation du produit ou du service, ici le micro-lanceur et son lancement. Pour ce faire, il est nécessaire de faire « basculer » certaines charges fixes, telles certaines infrastructures ou matériels utilisables plusieurs fois, en charges variables

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons à deux typologies de coûts entourant le lancement à savoir, ceux inhérents au lanceur (Paragraphe I.) et ceux liés à l'infrastructure de lancement (Paragraphe II.).

I. - Les coûts inhérents au lanceur

En appliquant le modèle précédant de structuration des coûts à une entreprise de lancement de lanceur, il est possible de classer :

- En coûts fixes, l'ensemble des coûts de recherche et développement (Paragraphe A.) : de l'étape de conception à la mise au point, au test et la phase de réalisation.
- En coûts variables, l'ensemble des coûts d'exploitation (Paragraphe B.).

A. – Les coûts de recherche et développement

Dans tout programme de lanceur, les coûts de recherche et développement sont considérables et majoritaires. Par exemple, le montant du développement complet du micro-lanceur Falcon 1 de Space X^{51} s'est élevé à plus de 85 millions US\$. Par ailleurs, cette étape dure

⁵⁰ Définition : site internet Debittor. (www.debitoor.fr)

⁴⁹ Définition : site internet Debittor. (www.debitoor.fr)

⁵¹ Cf. Tableau « EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS ».

souvent plusieurs années, voire dizaines d'années, sans pour autant garantir la certification du lanceur puis sa fiabilité.

Il est donc indispensable d'intégrer les frais de recherche et développement au montant final du coût du lancement. Deux méthodes de calcul sont utilisables pour cela :

- soit annuelle : en répartissant le coût de recherche et développement par le nombre d'années d'utilisation du lanceur :

$$\textit{Coût de développement annuel} = \frac{\textit{coût de développement}}{\textit{nombre d'années d'utilisation du lanceur}}$$

 soit par nombre de lancements à effectuer, afin de définir un prix de commercialisation, en répartissant les coûts de recherche et développement par le nombre de lancements prévus :

Coût de développement par lancement (prévu) =
$$\frac{\text{coûts de développement}}{\text{nombre total de lancements prévus}}$$

 soit par nombre de lancements effectués, afin de mesurer un équilibre financier pour calculer la rentabilité ou le déficit du programme, en répartissant les coûts de recherche et développement par le nombre de lancements réalisés :

Coût de développement par lancement (réel) =
$$\frac{\text{coûts de développement}}{\text{nombre total de lancements réalisés}}$$

Le montant obtenu par l'une ou l'autre des méthodes est à incorporer aux coûts variables de lancement. Il suffit ensuite d'ajouter la marge de l'opérateur de lanceur pour déterminer le prix de commercialisation du lancement.

Les coûts de recherche et développement sont un enjeu capital pour la production de lanceur : ils conditionnent directement le montant d'investissement nécessaire et entrent dans le ratio du calcul de rentabilité.

B. - Les coûts d'exploitation

Ils sont liées tant à la construction et à la production du micro-lanceur qu'à son tir et comprennent, entre autres :

- Les coûts propres au lanceur :

Avec l'hypothèse d'un lanceur de 2 étages, ces coûts se répartissent selon le tableau suivant :

Dénomination de l'étage	1 ^{er}	2 ^e	Proportion / entièreté du lanceur
Structure	20%	10%	15%
Motorisation/Propulsion (Tuyère, chambre de combustion, pompes, table d'injection)	70%	80%	75%
Système embarqué	10%	10%	10%
Part de l'étage/entièreté du lanceur	70%	30%	-

Fig. 17 – Tableau de répartition relative des coûts d'un lanceur à 2 étages⁵²

Grâce à ce tableau, il est simple de calculer rapidement la part revenant à un constituant structurel de micro-lanceur. Ainsi, en prenant l'exemple du coût du micro-lanceur Electron⁵³ d'environ 2,3 millions US\$, le prix du 1^{er} étage est d'1,6 millions US\$ et celui du 2^e de 0,7 millions US\$.

- Les coûts propres aux carburants : Bien que le carburant constitue 95 % du poids du lanceur au décollage, il n'équivaut, pour un lanceur lourd, qu'à moins de 5 % du coût du lancement.

Deux types de carburant existent et leur principe de propulsion est identique : la mise en commun du carburant et d'un oxydant produit une réaction chimique qui engendre les gaz nécessaires à une très forte poussée du moteur.

Les carburants liquides, maintenus sous forme de gaz liquéfiés par cryogénie, sont peu onéreux (quelques US\$/ kg) mais leur production requiert une infrastructure au sol particulièrement lourde et donc, par conséquent, très onéreuse. À titre d'exemple, la production d'un kilo d'hydrogène liquide coûte moins de 5 US\$. Par contre, l'installation obligatoire à celle-ci coûte plusieurs dizaines de millions d'US\$.

72

⁵² Établi avec des données communément admises par la communauté de l'industrie spatiale.

⁵³ Cf. Tableau « EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS ».

De plus, s'ajoute à ces montants celui des structures de stockage. Par exemple, les moteurs de certains lanceurs utilisent du peroxyde d'hydrogène, produit hautement instable et donnant lieu à des réactions énergétiques violentes au contact de la moindre impureté pouvant conduire à une brusque et puissante explosion. Par contre, le peroxyde se dilue très facilement dans l'eau sans aucune réaction thermique. Ainsi, au Centre Spatial Guyanais, afin d'éviter les réactions au contact de la surface bétonnée, un bassin a été positionné directement sous les containers de stockage. De ce fait, en cas de fuite, le peroxyde tombe directement dans l'eau.

Les carburants solides sont un peu plus onéreux : par exemple, 1 kg de polybutadiène hydroxytéléchélique coûte environ 10 US\$. Leur production ne nécessite pas d'infrastructures lourdes. Toutefois, leur stockage demande une grande précaution car, mélangeant à la fois comburant et carburant, ils sont très instables et hautement inflammables, pouvant à tout moment déclencher une réaction explosive impossible à maîtriser.

Ce ne sont pas des carburants très performants puisque leur impulsion spécifique⁵⁴ est relativement faible. Ils sont donc préférentiellement utilisés sur les micro-lanceurs.

II. - Les coûts de l'infrastructure de lancement

Ce terme désigne l'ensemble des installations-support destinées à permettre le lancement et le suivi des premières phases de vol d'un lanceur. Il se compose de différents ensembles servant donc plusieurs fois, à de multiples lancements. Ce sont des charges structurelles, donc des coûts fixes comptables. Mais afin de calculer au plus juste, le coût d'un lancement, elles sont à prendre en compte dans les coûts de développement du lanceur.

Une infrastructure de lancement se compose le plus souvent comme suit :

- Un « pas de tir » ou plate-forme à partir de laquelle est lancée la fusée. C'est une infrastructure particulièrement lourde et technique dont le coût avoisine plusieurs dizaines de millions US\$ pour les lanceurs lourds. Pour les micro-lanceurs, ce coût peut être réduit à quelques centaines de milliers US\$.
- Une « table de lancement » ou socle sur lequel le lanceur est assemblé et d'où il quitte le sol. Sa conception est complexe : elle doit, entre autres, résister, à des chocs

_

 $^{^{54}}$ Cf. PARTIE 1 – Chapitre 1 – Section 1 – Paragraphe III. B. 2°

vibratoires et thermiques intenses puisque c'est elle qui maintient par la base le lanceur à la verticale avant que ses moteurs ne s'allument et le propulsent. Son architecture généralement complexe pour les lanceurs lourds peut toutefois être minimaliste comme celle de Minotaur sur la photo suivante, et parfois sembler ne consister qu'en un ensemble de plaques métalliques renforcées.



Fig. 18 – Encadrée en rouge, la table de lancement minimaliste de Minautor (Source : en.wikipedia.org)

- Une « tour de service » ou infrastructure de desserte, très proche du lanceur et permettant d'intervenir sur ce dernier. C'est par ce biais, doublé de l'usage de bras déployables, que le chargement des carburants ou l'asservissement des ordinateurs de bord, sont réalisés jusque quelques secondes avant le décollage.
- Une zone de production et/ou de stockage des carburants : elle est, dans la mesure du possible, éloignée des autres installations pour des raisons de sécurité. Elle permet la production puis le stockage sécurisés des éléments explosifs ou inflammables avant qu'ils soient chargés dans les réservoirs et le corps du lanceur puis utilisés à sa propulsion.
- Un « réseau de refroidissement hydraulique » qui inonde à grands volumes d'eau le pas de tir et la table de lancement dès le début de l'allumage et du décollage afin :
 - o d'atténuer les ondes de choc et les vibrations sur le pas de tir et le lanceur,
 - o de diminuer la température de la table de lancement et donc de limiter la détérioration de son infrastructure.

Ce système est crucial. Bien que simple de fonctionnement, il doit fournir une parfaite réactivité et une remarquable synchronisation avec l'allumage des moteurs, leur poussée... Sa technologie sophistiquée est onéreuse puisque, sur le pas de tir du lanceur Véga⁵⁵, elle est estimé à près de 2 millions US\$.

- Une « salle de lancement » ou centre nerveux de la mission. C'est une véritable tour de contrôle où la gestion de tous les moyens menant au décollage et au suivi des phases de vol est centralisée, qu'ils concernent le lanceur ou le sol (télémesure, radars, stations météo, énergie....).
- Des « stations émettrices-réceptrices télémétriques » installées le long de la trajectoire du lanceur et permettant de communiquer avec lui durant les phases de préparation, de décollage et de lancement. Leur coût est élevé, puisqu'une antenne de communication à grande distance avoisine les 100 000 US\$. Elles sont pourtant d'une importance majeure : en effet, si une anomalie grave est détectée, elles doivent permettre, en ultime recours, la destruction du lanceur!

Il est à noter que, si les infrastructures les plus proches du lanceur, donc celles de la zone de tir, sont spécifiques et adaptées à chaque lanceur, la salle de lancement et les stations télémétriques sont réutilisables pour chaque lancement.

Au total, pour un micro-lanceur, une infrastructure de lancement complète avoisine les 2 millions US\$.

Aujourd'hui, le secteur spatial des micro-lanceurs a pris conscience des enjeux de la réalité économique. La pression financière à laquelle il doit faire face l'oblige à une incessante recherche d'une diminution des coûts de revient (Chapitre 2).

_

⁵⁵ Cf. Article P.-F. Mouriaux, « Remise du rapport d'enquête sur l'accident de Vega VV15 », *Air et Cosmos*, 05/09/2019.

Chapitre 2 – À la recherche constante d'une diminution des coûts de revient

Les opérateurs de micro-lanceurs, notamment ceux du « New-Space », ont bien compris que leur succès ne pouvait passer que par une recherche permanente et acharnée de compétitivité des prix. Elle passe par des choix complexes portant essentiellement sur deux domaines :

- Des mutations techniques (Section 1),
- Des stratégies d'exploitation plus adaptées voire avant-gardistes (Section 2).

Nous avons retenu, dans ce chapitre, les solutions les plus marquantes ainsi que celles qui paraissent détenir, pour l'avenir, un vrai potentiel. Afin d'en évaluer au plus près l'impact budgétaire, nous tentons d'indiquer, pour chacune d'entre elles, une donnée chiffrée, précise ou estimée.

Section 1 – Des mutations techniques

Elles prennent leur source, soit dans des avancées technologiques récentes, soit dans l'appropriation de modes de production plus anciens mais jusqu'alors jamais appliqués dans l'industrie spatiale. Elles concernent tant les choix de fabrication des lanceurs tels la standardisation du matériel et sa production en série (Paragraphe I.), l'impression additive en lieu et place d'un usinage traditionnel (Paragraphe III.) ou l'optimisation de la propulsion (Paragraphe III.), que l'environnement du lancement notamment son infrastructure (Paragraphe IV.).

I. – Du « Design to cost » à la standardisation et la production en série

Comme mentionné dans le chapitre précédant, la recherche et développement représentent un poids financier considérable lors de la conception d'un nouveau lanceur. Par ailleurs, le nombre toujours réduit de lancements en prévision conduit à une fabrication de pièces en nombre très limité, ce qui engendre un coût unitaire par pièce élevé.

Ainsi, par exemple, la conception et la construction du bloc de propulsion-motorisation d'un lanceur pose la difficulté d'une réalisation et d'un fonctionnement complexes, longs à mettre au point et contraints à certification. Cela explique, sans aucun doute, la part largement majoritaire de son coût par rapport au coût de lancement d'un lanceur estimée à 75% dans le tableau de répartition relative des coûts d'un lanceur à 2 étages (Cf. Fig. 17).

Certains opérateurs du « New Space » ont résolu cette difficulté par l'application de la « Conception à coût objectif » ou « Design To Cost ». Cette technique de gestion des coûts, déjà utilisée dans d'autres domaines industriels, renverse la logique de développement d'un

produit : on ne déduit plus les coûts en partant des contraintes techniques, mais on conditionne la construction de la solution technique aux contraintes de marché : coût, délai... tout en prenant en compte les attentes du client telles que la fonctionnalité et la qualité. Le coût de fabrication du produit est ainsi optimisé et contrôlé.

C'est une profonde transformation pour l'industrie spatiale. La volonté de diminution du prix unitaire d'une pièce, voire d'un ensemble de pièces, aboutit à une modification du mode de production : une obligatoire fabrication en plus grand nombre, donc en série même si celle-ci reste restreinte, et donc une indispensable standardisation.

Ainsi, non seulement les étages supérieurs des lanceurs de Space X sont conçus avec le même assemblage de propulsion-motorisation (tuyère, chambre de combustion, plaque d'injection, pompe...) à chaque étage, mais ce même bloc équipe aussi le 1^{er} étage où il est multiplié afin d'en augmenter la puissance.

Une logique identique est utilisée par la société RocketLab pour la fabrication de leurs groupes propulsifs.

Ainsi, le micro-lanceur Electron est propulsé par plusieurs moteurs-fusées, baptisés Rutherford, tous identiques. Tel que le montre la photo suivante :

- le premier étage est conçu avec un ensemble de neuf moteurs similaires dont huit disposés en cercle et un situé au milieu,
- le second étage est propulsé par un unique moteur, optimisé pour le fonctionnement dans le vide spatial.



Fig. 19 – Partie propulsive du 1er étage du lanceur Electron équipé de ses 9 moteurs Rutherford dont l'un est présenté par le fondateur de la société RocketLab, Peter Beck (Source : www.toistudent.timesofindia.indiatimes.com)

Ainsi, 10 moteurs Rutherford sont nécessaires pour chaque lanceur Electron. Comme RocketLab envisage 100 tirs/an⁵⁶ cela équivaut à une production prévisionnelle annuelle de 1000 groupes de propulsion.

Cette standardisation des pièces et leur production en série permettent d'en diviser le coût de revient de plus de 50%.

Mais un autre corolaire de ce mode de production est d'augmenter le niveau de résultat : en effet, il contribue à l'élimination des variations, toujours source d'erreur dans le processus de fabrication. Or, celles-ci ont un coût, car leur correction consomme de la matière, du temps et des ressources. De cette manière, la standardisation rend les opérations plus efficaces et participe à la fiabilité du lanceur, l'un des paramètres décisifs aux yeux de l'opérateur de satellite.

Cette modification de mode de production n'a été rendue possible que par l'abandon de l'usinage traditionnel pour l'impression 3D ou fabrication additive, véritable révolution pour l'industrie spatiale (Paragraphe II.), tel qu'en témoigne Peter Beck, par exemple sur la photo précédente, en soulevant sans effort l'un des moteurs d'Electron!

_

 $^{^{56}}$ Cf. Tableau « EXEMPLES DE NOUVEAUX ACTEURS ET D'ACTEURS OPÉRATIONNELS » PARTIE 1 — Chapitre 1 — Section 3 — Paragraphe I. B.

II. - L'extension de l'impression 3D ou fabrication additive

L'impression 3D donc tridimensionnelle ou fabrication additive sont deux termes synonymes désignant les procédés permettant de fabriquer un objet par superposition de couches successives, donc par ajout ou agglomération de matière, à partir d'un modèle numérique en 3 dimensions. Elle s'oppose aux méthodes traditionnelles de fabrication soustractive où l'on enlève de la matière pour atteindre la forme désirée.

Utilisée dans le domaine spatial depuis 2015, cette technologie permet de créer des pièces à géométrie complexe (creux, courbes, entrelacement, alvéoles, cavités, ...), difficiles voire impossibles à fabriquer traditionnellement, comme par exemple les pièces de moteur-fusée, en intégrant même des fonctionnalités à l'intérieur de la pièce.

Ce type de fabrication a aussi pour avantage de limiter les frais fixes : elle supprime les étapes de pré-industrialisation, de fabrication de moules, de gabarit ou d'outillage spécifique. Elle limite aussi les stocks de pièces puisqu'il est alors possible de les fabriquer à la demande.

Un autre atout majeur de ce procédé pour l'industrie spatiale est le gain de poids qu'il procure : les composants allient en effet légèreté et solidité ce qui améliore les performances orbitales du lanceur.

Enfin, la rapidité de réalisation accélère les cycles de développement, non seulement des prototypes, mais également des pièces fonctionnelles. Des cadences de production élevées peuvent être tenues réduisant d'autant le coût de fabrication unitaire.

L'utilisation de la technologie 3D est donc source d'avantages sans pareil pour l'industrie spatiale : Thales Alenia Space indique des gains de l'ordre de 22% sur la masse, de un à deux mois sur le planning de fabrication et d'environ 30% sur les coûts.

Ce procédé de fabrication et ses capacités collent donc parfaitement au marché de niche des micro-lanceurs avec une production de pièces, soit de série restreinte, soit unique, à forte valeur ajoutée.

Par ailleurs, de nouveaux progrès sont encore attendus : ainsi sont actuellement expérimentés de nouveaux matériaux avec des propriétés de stabilité accrues tel que recherchées dans le spatial.

Les atouts de l'impression 3D en font donc aujourd'hui la technologie rêvée pour l'industrie spatiale du micro-lancement.

Néanmoins, une autre solution de minimisation des coûts consiste en l'optimisation de la propulsion et de la motorisation en fonction des besoins du lanceur (Paragraphe III.).

III. - L'optimisation de la motorisation

Nous avons vu précédemment⁵⁷ qu'il existe schématiquement deux types de carburants propulseurs, l'un liquide, l'autre solide. Ni l'un, ni l'autre ne constitue l'idéal et il est de règle que le choix du mode de propulsion d'un lanceur cherche toujours à optimiser le rapport poids/puissance/coût.

Un propulseur à carburant solide tend à une simplicité technologique de conception et d'utilisation, ce qui a pour conséquence de réduire le coût de revient du lancement. Il ne faut pas oublier que 75% de celui-ci revient au groupe motorisation-propulsion⁵⁸.

Cependant, le carburant solide présente une densité énergétique faible : son Isp ou impulsion spécifique⁵⁹ est environ 2 fois plus faible que celle du carburant liquide. Pour une même poussée attendue, il nécessite donc plus de poids et de volume, soit la nécessité d'un lanceur en moyenne 1.5 fois plus volumineux donc une évidente répercussion à la hausse sur son coût de fabrication.

Ce type de propulseur convient parfaitement pour fournir une forte poussée à des coûts relativement bas. Il est aujourd'hui principalement utilisé pour des lanceurs militaires pour sa capacité à pouvoir être utilisé après de longues périodes de stockage et à être rapidement mis en œuvre sans long et délicat remplissage de carburant juste avant la mise à feu. Dans les autres lanceurs, il est souvent utilisé comme propulseur d'appoint du 1^{er} étage en fournissant jusqu'à 90 % de la poussée initiale.

Il est toutefois notable que le choix de motorisation-propulsion se porte généralement sur le carburant liquide. Nous avons vu précédemment⁶⁰ d'une part, qu'il est nettement moins onéreux et que, d'autre part, l'utilisation d'un propulseur à carburant liquide permet de conserver un lanceur de petite dimension et de faible poids. Une recherche de diminution des coûts oriente donc largement vers l'utilisation de ce type de carburant même si, nous l'avons vu⁶¹, son stockage nécessite de coûteuses mesures de sécurité.

⁵⁷ Cf. PARTIE 2 – Chapitre 1 – Section 1 – Paragraphe I. B.

⁵⁸ Cf. Fig. 17 – Tableau de répartition relative des coûts d'un lanceur à 2 étages.

⁵⁹ Cf. PARTIE 1 – Chapitre 1 – Section 1 – Paragraphe III.

⁶⁰ Cf. PARTIE 2 – Chapitre 1 – Section 1 – Paragraphe I. B.

⁶¹ Cf. PARTIE 2 – Chapitre 1 – Section 1 – Paragraphe I. B.

Par ailleurs, le développement et la mise en œuvre opérationnelle d'un ensemble propulseur à carburant liquide reste une opération technologiquement complexe dont la réussite garantit la maîtrise de l'opérateur du lanceur. Elle renforce donc sa crédibilité, notamment vis-à-vis d'investisseurs potentiels, voire d'assureurs!

Outre l'adaptation du meilleur rapport poids/puissance/coût, l'optimisation du groupe de motorisation-propulsion passe aussi par la poursuite permanente de l'amélioration de ses éléments structurels : par exemple, la tuyère « en forme de cloche » reste très utilisée car elle est de fabrication simple, bien connue et fiable. Cependant, des tuyères de type Aerospike 62 sont actuellement à l'étude : s'adaptant automatiquement au changement de pression rencontré au cours du vol, elles permettent un gain de 5 à 10% d'énergie de propulsion. Il est vrai cependant que, si le concept a été testé sur des prototypes, il n'a à ce jour jamais été utilisé sur un lanceur opérationnel en raison de problèmes de refroidissement.

Certes, la motorisation-propulsion se pose donc en enjeu crucial, source de multiples solutions dans la course à la diminution du coût d'un micro-lanceur. Cependant, d'autres voies, comme par exemple celles de l'environnement de lancement, ont été explorées et revisitées (Paragraphe IV.).

IV. – Vers une minimalisation de l'infrastructure de lancement

Si la dimension et la complexité des gros lanceurs ne peuvent se passer d'une infrastructure de lancement importante, la tendance pour les micro-lanceurs est de minimiser largement celle-ci. Plusieurs approches sont pratiquées :

- La plus efficace mais cependant la plus coûteuse, consiste en la construction d'installations fixes spécialement dédiées aux micro-lancements : compte-tenu de la taille réduite du lanceur, cette solution ne demande que peu d'espace d'implantation. C'est celle retenue initialement par RocketLab pour les lancements d'Electron. Elle oblige pour autant à la construction de l'ensemble des installations donc à un fort investissement initial de l'opérateur du lanceur.

-

⁶² Cf. Travaux d'études de la société FireFly. (www.firefly.com)



Fig. 20 – L'exemple des infrastructures de micro-lancement de la société RocketLab (Source : www.spaceitbridge.com)

- Une solution plus avantageuse consiste en la remise en état et à l'adaptation d'une installation-support précédemment utilisée quoique non initialement dédiée aux microlanceurs. Cette pratique est courante dans les centres spatiaux américains. Elle permet notamment d'économiser la construction des coûteuses fondations du pas de tir et de la tour de service.
- Enfin, la plus flexible est l'utilisation d'une infrastructure mobile spécialement adaptée aux micro-lanceurs : le lanceur est assemblé dans un hangar puis arrimé à son pas de tir, l'ensemble ainsi que le centre de contrôle et les stations de télémétrie sont ensuite transportés par camion jusqu'au lieu retenu pour le lancement. Cette technique a l'intérêt d'un déploiement très rapide, sur une grande variété de sites, si nécessaire au plus près du client opérateur du satellite. Elle contraint cependant à l'utilisation de carburant solide plus facile à transporter que le carburant liquide, même si le micro-lanceur Vector, lancé depuis ce type d'installation, utilisait un carburant liquide cryogénique. Il est important de préciser ici que cette solution est soumise aux directives du MTCR car elle se rapproche fortement des systèmes d'armes mobiles.



Fig. 21 – Le lanceur Vector sur son pas de tir mobile (Source : www.space.com)

Nous venons de voir que le secteur spatial du micro-lanceur accélère son évolution technologique et traverse une profonde transformation de sa chaîne de valeurs. Cette effervescence à inviter les acteurs du secteur à revoir leurs stratégies d'exploitation (Section 2).

Section 2 – De nouvelles stratégies d'exploitation ambitieuses

Le business-model du secteur du micro-lancement est en pleine restructuration et ébullition. Certains opérateurs poursuivent ainsi des stratégies novatrices et ambitieuses. Relatives au délai de développement d'un programme (Paragraphe I.), aux cadences de lancement (Paragraphe II.), à la réutilisation (Paragraphe III.) ou à la modularité des lanceurs (Paragraphe 4), elles s'immiscent très en amont de la chaîne de développement et les risques à maîtriser ne sont pas négligeables.

I. - Un raccourcissement du « Time to market »

Venant du lexique anglo-saxon des affaires, le « Time to market » désigne « le délai nécessaire pour le développement et la mise au point d'un projet ou d'un produit, avant qu'il puisse être lancé sur le marché » ⁶³.

.

⁶³ Définition : site internet e-marketing. (www.e-marketing.fr)

Pour un opérateur de micro-lanceur, il est primordial de tendre à réduire au minimum ce délai afin :

- D'augmenter la rentabilité de l'entreprise en :
 - O Diminuant les montants d'investissements liés aux charges et aux immobilisations pesantes de la période de recherche et développement,
 - Crédibilisant la démarche et le projet mené auprès de la communauté de l'industrie spatiale (opérateurs de satellites, investisseurs, financeurs...).
- De devancer la concurrence :
 - En respectant au mieux les attentes des opérateurs de satellites, tout en conservant l'avantage de la situation actuelle avec peu de possibilité de lancement et de longs délais.
 - En maintenant la cohérence de l'offre sans érosion malgré le grand nombre de concurrents et le contexte d'avancées technologiques abondantes et compétitives.

D'autres leviers d'exploitation sont directement liés à la temporalité comme, par exemple, la vitesse de la cadence de lancement, facteur non négligeable de diminution des coûts de lancement (Paragraphe II.).

II. – Une accélération de la cadence de lancement

Comme étudié précédemment dans le tableau de répartition des coûts d'un lanceur (Cf. Fig. 17), ses coûts variables restent bien inférieurs à ses coûts fixes.

L'augmentation de la cadence de tir a donc pour effet :

- de diminuer le coût unitaire de chaque lancement en augmentant le nombre de lancements, suivant une logique de réduction des coûts de production en série,
- d'augmenter la masse et le volume orbitables offerts sur une même période de temps donné,
- de fiabiliser le lanceur en améliorant ses statistiques de tir et ainsi :
 - o de renforcer sa crédibilité technologique auprès de clients potentiels,
 - o de limiter ses coûts d'assurance et donc, de le rendre plus attrayant financièrement.

Enfin, cette stratégie est compatible avec une réutilisation et un recyclage du lanceur (Paragraphe III.). Une combinaison des 2 approches peut aboutir alors à une très significative réduction du coût de lancement.

III. – Une montée en puissance de la récupération et du recyclage

Depuis toujours, l'une des approches de l'industrie spatiale utilisées pour réduire les coûts et simplifier le processus de développement, est la réutilisation de techniques déjà maîtrisées. Cette démarche apparaît pour la toute première fois dans le secteur des micro-lanceurs, avec la conception de BlackArrow⁶⁴. Son groupe propulsif est en effet directement issu du missile nucléaire britannique Blue Steel et de son moteur Gamma 8.

Ces techniques sont aujourd'hui moins fréquemment utilisées mais elles ont donné lieu à de nouvelles approches. Ainsi, initialement développée dans les années 70, et nous l'avons vu, appliquée dès les années 80 à la navette spatiale américaine partiellement réutilisable, il faut attendre la société Space X pour voir apparaître la première solution efficace de récupération partielle de son lanceur Falcon 9.

Cette technique ne concerne pour l'instant que la récupération de l'étage inférieur, soit le 1^{er} étage, mais il constitue le plus gros assemblage du lanceur et en représente, à lui seul, 70% des coûts totaux (Cf. Fig. 17). Il contient, en effet, les éléments dont la construction est la plus onéreuse, dont le groupe de propulsion qui équivaut à 80% des coûts du 1^{er} étage et à 60% des coûts de l'entièreté du lanceur.

À eux seuls, ces chiffrent plaident en faveur de logiques de récupération et de recyclage. Leur multiplication est actuellement rapide, notamment dans la gamme des lanceurs lourds et ainsi :

- Le consortium américain ULA développe une solution de largage et de récupération dédiée aux systèmes propulsifs du 1^{er} étage de son lanceur lourd Vulcain⁶⁵.
- La société russe à l'origine du lanceur Energia prévoit une version améliorée, nommée Energia II Uragan, dont l'ensemble des propulseurs sera récupéré grâce à un retour au sol en vol plané autonome.
- Le lanceur Adeline d'Airbus Defense & Space, malheureusement abandonné, proposait un retour au sol de la partie propulsive de son 1^{er} étage par vol sustenté par hélices propulsives.

La mise en place de ces solutions de récupération concerne essentiellement, à ce jour, des lanceurs lourds, onéreux ou à long délai de fabrication et reste quasiment inexistante pour des lanceurs de gamme inférieure.

_

⁶⁴ Cf. Tableau « EXEMPLES D'ACTEURS HISTORIQUES ».

⁶⁵ Cf. Présentation lanceur Vulcain sur le site internet de la société ULA. (www.ulalaunch.com)

Pour autant, la société RocketLab a annoncé, fin 2019, l'étude de la récupération du 1^{er} étage du micro-lanceur Electron sous parachutes. Ce projet semble guidé par 2 logiques, certes la réduction des coûts de lancement, mais aussi l'augmentation de la cadence annuelle de tir. Un rapide calcul prenant pour base la réutilisation de l'ensemble des « 1^{er} étage » amène à une économie estimée à 1,5 millions US\$/lancement. Si cette réduction était répercutée totalement sur le prix du lancement, RocketLab deviendrait alors l'opérateur de micro-lanceur le plus compétitif!

IV. – Une quête d'architecture modulaire et de flexibilité d'usage

L'architecture modulaire désigne la conception d'une construction, formée d'éléments pouvant être assemblés, ajoutés voire retirés, sans impacter le fonctionnement des autres éléments.

Intervient donc d'emblée la notion de module et de répétition à laquelle, toujours dans un souci initial de gain financier, se sont intéressés les opérateurs de micro-lanceurs.

La configuration modulaire d'un engin spatial se caractérise donc par un « corps central standardisé» auquel il est possible d'ajouter des propulseurs standards supplémentaires afin d'augmenter la capacité du lanceur. Il est ainsi possible d'obtenir un engin ayant la capacité d'un lanceur lourd pour un coût bien inférieur à celui-ci puisque cette conception s'affranchit de toute fabrication spécifique. Par contre, cette stratégie de construction nécessite de penser en système à la fois standardisé et évolutif, ce qui suppose une prise en compte de la manière dont l'assemblage sera effectué, dès les premiers pas conceptuels du programme.

La société de micro-lanceurs américaine Firefly Aerospace réfléchit actuellement à un tel programme de lanceur léger à 2 étages, Firefly Alpha, capable de positionner jusqu'à 1000 kg en LEO. En y ajoutant deux autres modules Firefly Alpha, on obtient un assemblage dénommé Firefly Beta, capable alors de positionner plus de 4000 kg en orbite LEO. Cette modularité est exceptionnelle puisqu'elle permet réellement de changer de gamme de lanceur à partir d'une structure initiale légère!

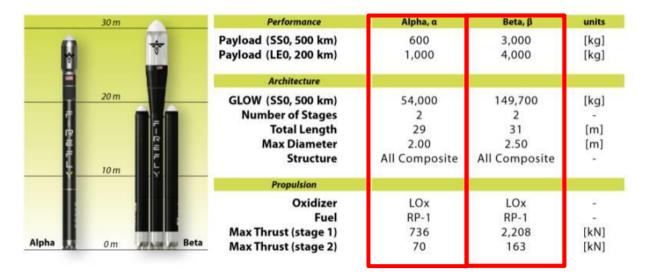


Fig. 22 – Illustration et paramètres des lanceurs Firefly Alpha et Beta (Source :www.b14643.de/)

L'impact de cette modularité sur le coût du développement du lanceur est incontestable : le coût de Firefly Beta est réduit car il consiste en un assemblage de modules FireFly Alpha.

Cette modularité, notamment d'augmentation de capacité, se retrouve dans d'autres gammes de lanceur. Par exemple, la nouvelle Ariane 6 peut se voir adjoindre 2 à 4 propulseurs supplémentaires (issus du lanceur léger Vega), en fonction de la masse de la charge à orbiter et de l'orbite à atteindre.

Si la baisse des coûts est l'un des avantages indéniables de cette construction modulaire, la standardisation des modules assure aussi :

- Une plus grande rapidité des délais de fabrication et leur plus grande maîtrise,
- Une meilleure qualité de production.

En matière de flexibilité d'usage, l'objectif est de proposer des micro-lanceurs pouvant répondre à des contraintes, soit civiles, soit militaires.

Cette flexibilité passe soit :

- par la création d'une base standard de lanceur qui est complétée en fonction de sa mission finale,
- par la réutilisation après modification de tout ou partie de lanceur militaire.

Ainsi, Taurus, un lanceur à 4 étages, utilise un premier étage directement issu du missile balistique Peacekeeper ou dérivé de celui-ci, puis les étages de la fusée aéroportée Pegasus d'Orbital.

Il est à noter que s'il existe des exemples de conversion d'usage militaire vers un usage civil, l'inverse n'existe pas encore!

À l'issue de cette deuxième partie, il est possible de dresser à grands traits le profil idéal d'un micro-lanceur en matière de compétitivité de coût de production. Celui-ci devrait suivre quelques grandes tendances :

- Une conception technique et architecturale prévoyant :
 - Une standardisation des pièces afin de pouvoir en développer une production en série,
 - o Leur modularité,
 - La récupération et le recyclage d'un maximum d'éléments, notamment des étages de propulsion.
- Un cadre d'exploitation privilégiant :
 - o De courts délais de commercialisation,
 - O Une fréquence de lancements soutenue,
 - o L'usage d'infrastructures de lancement préexistantes voire mobiles.

Bien entendu, ce profil tient du rêve inatteignable. En effet, une solution « optimale » réelle ne peut être indissociable des attentes du client, exploitant du satellite, ainsi que des contraintes technologiques engendrées par l'accès à l'espace!

CONCLUSION

Ce mémoire avait pour ambition d'améliorer notre compréhension du marché des microlanceurs puis d'en mesurer, au vu de ses contraintes, sa pertinence d'adaptation et sa capacité d'organisation à faire face aux réalités économiques d'aujourd'hui et à se structurer pour demain.

Après avoir redéfini le transport spatial, nous avons dégagé et examiner les spécificités propres au domaine du micro-lancement. Son créneau commercial s'est révélé très restreint, s'apparentant à un monopsone, totalement dépendant du marché des microsatellites. De plus, la pression concurrentielle est forte, voire écrasante, fruit non seulement de la rivalité avec d'autres familles de lanceurs plus conséquents mais aussi du perpétuel challenge des avancées technologiques qui entraîne l'ensemble de la filière dans une dynamique de croissance et d'innovation. La réutilisation et le recyclage des lanceurs en sont l'un des meilleurs témoignages.

Un bref rappel historique a permis de témoigner de la forte implication, jusque encore récemment, des institutions étatiques. Aujourd'hui, elle perdure pleinement dans certains pays souhaitant autonomiser leur accès à l'espace mais s'ouvre et évolue dans la plupart des États vers des partenariats public-privé qui bouleversent les relations.

Le secteur du micro-lancement est donc en pleine mutation d'autant que, dans le même temps, comme l'a montré une analyse des projets en cours et en voie de développement, il est pleinement touché par l'irruption d'acteurs privés du New Space et d'investisseurs intéressés.

Cela dénote de leur très forte confiance dans le potentiel de croissance de ce secteur dans les prochaines années. Peut-être visent-ils la multiplication de micro-lanceurs dédiés aux constellations de satellites d'autant que, comme nous l'avons constaté, la situation économique actuelle autorise plus facilement une prise de risque financier.

De manière étonnante, cette conviction est largement partagée par ces nouveaux entrants dans le domaine spatial alors que les acteurs historiques ou établis de longue date, demeurent en général beaucoup plus réservés quant aux perspectives à court et moyen terme.

La question cruciale est donc de savoir si ce marché saurait résister à un contexte très adverse et se montrer suffisamment vigoureux à long terme. A ce stade, rien ne permet de l'affirmer, ni d'écarter la possibilité que cet engouement ne soit pas la conséquence, au moins partielle,

d'un mouvement résultant au final d'une « bulle spéculative » avec un risque d'effondrement à moyen terme.

Certes, le marché privé des micro-lanceurs semble avoir un vrai potentiel et la multiplication effrénée des projets en cours est frappante. Cependant, une analyse de la prévision et de la demande en lancements potentiels de microsatellites, uniques clients, montre qu'elles ne sont pas encore clairement établies et restent relativement incertaines. Ainsi, face à une demande aussi volatile qu'aujourd'hui, seuls quelques opérateurs de micro-lanceurs pourraient suffire dans des conditions économiques acceptables.

Par ailleurs, le véritable enjeu économique est celui de la rentabilité d'exploitation mais il est, malgré les informations données par cette étude, bien difficile de disposer d'éléments fiables permettant de se prononcer. C'est l'une des limites de cette analyse.

De plus, nous avons vu que le niveau des risques, tant de recherche et développement que d'exploitation, est important, soumis continuellement tant aux innovations technologiques qu'à la mise en place de solutions sans cesse flexibles et adaptées aux besoins des opérateurs de microsatellites.

La seule hypothèse fondatrice d'une vraie réduction des coûts de production est celle de la flexibilité des marchés spatiaux. Cela signifie une croissance de la demande proportionnellement à l'abaissement des coûts, comme cela est le cas dans les modèles de consommation de masse. Dans ce secteur de très haute technologie et à très forte valeur ajoutée, elle reste encore, comme démontrée, balbutiante.

Le bilan apparaît donc très mitigé. Une restructuration du marché des micro-lanceurs est bien en marche mais ce mouvement ne semble pas encore bouleverser véritablement les équilibres bien établis d'autant que son agitation est également entretenue par les acteurs institutionnels avec de nombreux appels à projets.

La dépense publique et institutionnelle va donc sans aucun doute continuer à jouer un rôle clef sur la dynamique du secteur. Finalement, la rentabilité et le réel potentiel commercial des entreprises privées du secteur du micro-lancement dépendront sans doute plus de la stabilité et de la prévisibilité des différentes politiques publiques des pays concernés que des prix qu'elles factureront.

BIBLIOGRAPHIE

I. – Traités et manuels

Textes internationaux:

- Traité sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, 1967
- Régime de contrôle de la technologie des missiles (MTCR) Lignes directrices pour les transferts sensibles liés aux missiles, 1987

Texte national:

- Loi du 20 juillet 2017 sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace, Luxembourg, 2017

II. – Ouvrages généraux et spécialisés

- M. COUSTON, *Droit spatial économique Régimes applicables à l'exploitation de l'espace*, Ed. Sides, 1993
- G. LAFFERANDERIE / D. CROWTHER, *Outlook on space law over the next 30 years*, Ed. Kluwer Law International, 1997
- Rapport de la Commission Espace, L'Europe de l'Espace Enjeux et perspectives, Ed. Académie Nationale de l'Air et de l'Espace, Dossier n°27, 2006
- L. RAVILLON, *Droit des activités spatiales Adaptation aux phénomènes de commercialisation et de privatisation*, Lexis-Nexis Litec, Volume 22, 2004

III. – Rapports et mémoires publics

- L. CHIRON, L'adaptation du cadre juridique de l'espace aux conflictualités du XXIème siècle Propositions pour l'utilisation pacifique et durable de l'espace, Mémoire de fin d'études, Chaire Défense & Aérospatial | Université de Bordeaux, Master II Expertise en affaires européennes, 2019
- N.T. DRENTHE, B.T.C. ZANDBERGEN & M.O. VAN PELT, Cost Estimating of Commercial Smallsat Launch, 7th EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS), July 12, 2012
- L.A. CURTIS, M.K. VAN DYKE, R.M. LAJOIE, and G.R. WOODCOCK, *Affordable In-Space Transportation*, NASA Technical Memorandum 108521, October 1996

- F. GAILLARD-SBOROWSKY / I. FACON / X. PASCO / I. SOUBRÈS-VERGER /
 P. CHILLEAS, Sécuriser l'espace extra-atmosphérique Éléments pour une diplomatie spatiale, Rapport n° 152/FRS/SEEA, Fondation pour la recherche stratégique et Conseil Supérieur de la Formation et de la Recherche Stratégiques, 28 février 2016
- F. GAILLARD-SBOROWSKY / I. SOUBRÈS-VERGER / J.-J. STORTORA, Petits satellites Petits lanceurs PSPL / Étude des évolutions technologiques et économiques et analyse de leurs implications sur la sécurité spatiale et le positionnement français/européen sur le marché international, Rapport n° 144/FRS/PSPL, Fondation pour la recherche stratégique et Conseil Supérieur de la Formation et de la Recherche Stratégiques, 2 mai 2018
- G. FIORASO, OpenSpace: L'ouverture comme réponse aux défis de la filière spatiale, Rapport au premier ministre, juillet 2016
- P. PEMPIE, Reusable expandable launcher cost analysis, 36th American Institute of Aeronautics and Astronautics,17-19 July, 2000
- G. POSTEL-VINAY, Les nouveaux horizons de l'Europe spatiale, Réalités Industrielles, Série Annales des Mines, Mai 2019
- S. PRIMAS / J.-M. Bockel, Rapport d'information fait au nom de la commission des affaires économiques et de la commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées sur la politique des lanceurs spatiaux, N° 131 Sénat, 19 novembre 2019
- M. RAGAB, Launch Vehicle Recovery and Reuse, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014
- Rapport du groupe de travail « Espace », STRATÉGIE SPATIALE DE DÉFENSE,
 Ministère des Armées, 2019
- L. SCATTI, Main trends and challenges in the space sector, PWC Space, June 2019
- P. WOHRER, Disrupting launch systems The rise of SpaceX and European access to space, Thesis submitted to the International Space University in partial fulfillment of the requirements of the M. Sc. Degree in Space Studies, International Space University, August 2017

IV. - Séminaire

- P. JUNG, *History of Spaceflight*, présentation de séminaire IFURTA 2019-2020.

V. – Sites internet

- Abgi France: www.abgi-france.com,
- CNES: www.cnes.fr
- DARPA: www.darpa.mil
- Destination Orbite: www.destination-orbite.net
- FireFly Aerospace : www.firefly.com
- Institut InSpace : www.inspace-institute.com
- NASA: www.nasa.gov
- Nos premières années : www.nospremieresannees.fr
- ONERA: www.onera.fr
- Organisation des Nations Unis : www.unov.org
- OTAN: www.nato-pa.int
- RocketLab: www.rocketlabusa.com
- Space Launch Vehicles: www.b14643.de
- Space News: www.space.com
- Space X: www.spacex.com
- SpinLaunch: www.spinlaunch.com
- StratoLaunch Systems: www.stratolaunch.com
- Usine nouvelle : www.usinenouvelle.com
- Village Justice: www.village-justice.com
- Wikipedia : fr.wikipedia.org

TABLE DES FIGURES

Fig. 1 – Le micro-lanceur Electron au décollage	
Fig. 2 – Vue éclatée d'un micro-lanceur « standard »	9
Fig. 3 – Représentation de la chaîne de valeur des acteurs spatiaux selon le cabinet PWC en 2016	13
Fig. 4 – Exemple d'une orbite LEO sur le globe terrestre	14
Fig. 5 – Exemple d'une orbite SSO sur le globe terrestre	15
Fig. 6 – Exemple d'une orbite GEO sur le globe terrestre	
Fig. 7 – Exemple d'une orbite GTO sur le globe terrestre	17
Fig. 8 – Présentation synthétique des gammes actuelles de lanceurs	18
Fig. 9 - Fréquence annuelle de lancements de 2010 à 2019 par type de lanceur et territoire d'origin	ne 19
Fig. 10 - Nombre total de lancements annuels de satellites et répartition par activité de 1957 à 201	7.20
Fig. 11 - Graphique du nombre de lancements par famille de lanceurs de 2014 à 2018 réalisé p	ar le
cabinet de conseils PWC en 2018	21
Fig. 12 - Évolution du nombre de micro satellites à lancer de 2011 à 2030 réalisé par le cabine	et de
conseils PWC en 2018.	22
Fig. 13 – Structure unitaire et gamme de CubeSat	
Fig. 14 – Exemple de déploiement d'un CubeSat 6U	29
Fig. 15 – Evolution du budget annuel de la NASA en pourcentage du budget fédéral américain	66
Fig. 16 – Atterrissage de la navette spatiale	68
Fig. 17 – Tableau de répartition relative des coûts d'un lanceur à 2 étages	72
Fig. 18 – Encadrée en rouge, la table de lancement minimaliste de Minautor	74
Fig. 19 – Partie propulsive du 1er étage du lanceur Electron équipé de ses 9 moteurs Rutherford	dont
l'un est présenté par le fondateur de la société RocketLab, Peter Beck	78
Fig. 20 – L'exemple des infrastructures de micro-lancement de la société RocketLab	82
Fig. 21 – Le lanceur Vector sur son pas de tir mobile	83
Fig. 22 – Illustration et paramètres des lanceurs Firefly Alpha et Beta	87

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 - Traité sur les principes régissan	nt les activités des Etats en matière d'exploration	et
d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique,	e, y compris la lune et les autres corps céleste	es,
International, 1967		96
Annexe 2 - Régime de contrôle de la technolo	ogie des missiles (MTCR) - Lignes directrices pour	les
transferts sensibles liés aux missiles, Internation	onal, 19871	02
Annexe 3 – Loi du 20 juillet 2017 sur l'ex	exploration et l'utilisation des ressources de l'espace	зe,
Luxembourg 2017	1	04

ANNEXE 1 – Traité sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, International, 1967

Texte original 0.790

Traité

sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes

Conclu à Washington, Moscou et Londres le 27 janvier 1967 Signé par la Suisse le 27 janvier 1967 Approuvé par l'Assemblée fédérale le 2 octobre 1969 Instrument de ratification déposé par la Suisse le 18 décembre 1969 Entré en vigueur pour la Suisse le 18 décembre 1969 (Etat le 12 avril 2005)

Les Etats parties au présent Traité,

S'inspirant des vastes perspectives qui s'offrent à l'humanité du fait de la découverte de l'espace extra-atmosphérique par l'homme,

Reconnaissant l'intérêt que présente pour l'humanité tout entière le progrès de l'exploration et de l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique à des fins pacifiques,

Estimant que l'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique devraient s'effectuer pour le bien de tous les peuples, quel que soit le stade de leur développement économique ou scientifique,

Désireux de contribuer au développement d'une large coopération internationale en ce qui concerne les aspects scientifiques aussi bien que juridiques de l'exploration et de l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique à des fins pacifiques,

Estimant que cette coopération contribuera à développer la compréhension mutuelle et à consolider les relations amicales entre les Etats et entre les peuples,

Rappelant la résolution 1962 (XVIII), intitulée «Déclaration des principes juridiques régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique», que l'Assemblée générale des Nations Unis a adoptée à l'unanimité le 13 décembre 1963,

Rappelant la résolution 1884 (XVIII), qui engage les Etats à s'abstenir de mettre sur orbite autour de la terre des objets porteurs d'armes nucléaires ou de tous autres types d'armes de destruction massive et d'installer de telles armes sur des corps célestes, résolution que l'Assemblée générale des Nations Unies a adoptée à l'unanimité le 17 octobre 1963.

Tenant compte de la résolution 110 (II) de l'Assemblée générale des Nations Unies en date du 3 novembre 1947, résolution qui condamne la propagande destinée ou de nature à provoquer ou à encourager toute menace à la paix, toute rupture de la paix ou tout acte d'agression, et considérant que ladite résolution est applicable à l'espace extra-atmosphérique,

RO 1970 90; FF 1969 I 865 1 RO 1970 89 0.790 Droit spatial

Convaincus que le Traité sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, contribuera à la réalisation des buts et principes de la Charte des Nations Unies².

Sont convenus de ce qui suit:

Art. I

L'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, doivent se faire pour le bien et dans l'intérêt de tous les pays, quel que soit le stade de leur développement économique ou scientifique; elles sont l'apanage de l'humanité tout entière.

L'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, peut être exploré et utilisé librement par tous les Etats sans aucune discrimination, dans des conditions d'égalité et conformément au droit international, toutes les régions des corps célestes devant être librement accessibles.

Les recherches scientifiques sont libres dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, et les Etats doivent faciliter et encourager la coopération internationale dans ces recherches.

Art. II

L'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, ne peut faire l'objet d'appropriation nationale par proclamation de souveraineté, ni par voie d'utilisation ou d'occupation, ni par aucun autre moyen.

Art. III

Les activités des Etats parties au Traité relatives à l'exploration et à l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, doivent s'effectuer conformément au droit international, y compris la Charte des Nations Unies, en vue de maintenir la paix et la sécurité internationales et de favoriser la coopération et la compréhension internationales.

Art. IV

Les Etats parties au Traité s'engagent à ne mettre sur orbite autour de la terre aucun objet porteur d'armes nucléaires ou de tout autre type d'armes de destruction massive, à ne pas installer de telles armes sur des corps célestes et à ne pas placer de telles armes, de toute autre manière, dans l'espace extra-atmosphérique.

Tous les Etats parties au Traité utiliseront la lune et les autres corps célestes exclusivement à des fins pacifiques. Sont interdits sur les corps célestes l'aménagement de bases et installations militaires et de fortifications, les essais d'armes de tous types et l'exécution de manœuvres militaires. N'est pas interdite l'utilisation de personnel

2 RS 0.120

militaire à des fins de recherche scientifique ou à toute autre fin pacifique. N'est pas interdite non plus l'utilisation de tout équipement ou installation nécessaire à l'exploration pacifique de la lune et des autres corps célestes.

Art. V

Les Etats parties au Traité considéreront les astronautes comme des envoyés de l'humanité dans l'espace extra-atmosphérique et leur prêteront toute l'assistance possible en cas d'accident, de détresse ou d'atterrissage forcé sur le territoire d'un autre Etat partie au Traité ou d'amerrissage en haute mer. En cas d'un tel atterrissage ou amerrissage, le retour des astronautes à l'Etat d'immatriculation de leur véhicule spatial devra être effectué promptement et en toute sécurité.

Lorsqu'ils poursuivront des activités dans l'espace extra-atmosphérique et sur les corps célestes, les astronautes d'un Etat partie au Traité prêteront toute l'assistance possible aux astronautes des autres Etats parties au Traité.

Les Etats parties au Traité porteront immédiatement à la connaissance des autres Etats parties au Traité ou du Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies tout phénomène découvert par eux dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, qui pourrait présenter un danger pour la vie ou la santé des astronautes.

Art. VI

Les Etats parties au Traité ont la responsabilité internationale des activités nationales dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, qu'elles soient entreprises par des organismes gouvernementaux ou par des entités non gouvernementales, et de veiller à ce que les activités nationales soient poursuivies conformément aux dispositions énoncées dans le présent Traité. Les activités des entités non gouvernementales dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, doivent faire l'objet d'une autorisation et d'une surveillance continue de la part de l'Etat approprié partie au Traité. En cas d'activités poursuivies par une organisation internationale dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, la responsabilité du respect des dispositions du présent Traité incombera à cette organisation internationale et aux Etats parties au Traité qui font partie de ladite organisation.

Art. VII

Tout Etat partie au Traité qui procède ou fait procéder au lancement d'un objet dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, et tout Etat partie dont le territoire ou les installations servent au lancement d'un objet, est responsable du point de vue international des dommages causés par ledit objet ou par ses éléments constitutifs, sur la terre, dans l'atmosphère ou dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, à un autre Etat partie au Traité ou aux personnes physiques ou morales qui relèvent de cet autre Etat.

0.790 Droit spatial

Art. VIII

L'Etat partie au Traité sur le registre duquel est inscrit un objet lancé dans l'espace extra-atmosphérique conservera sous sa juridiction et son contrôle ledit objet et tout le personnel dudit objet, alors qu'ils se trouvent dans l'espace extra-atmosphérique ou sur un corps céleste. Les droits de propriété sur les objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique, y compris les objets amenés ou construits sur un corps céleste, ainsi que sur leurs éléments constitutifs, demeurent entiers lorsque ces objets ou éléments se trouvent dans l'espace extra-atmosphérique ou sur un corps céleste, et lorsqu'ils reviennent sur la terre. Les objets ou éléments constitutifs d'objets trouvés au-delà des limites de l'Etat partie au Traité sur le registre duquel ils sont inscrits doivent être restitués à cet Etat partie au Traité, celui-ci étant tenu de fournir sur demande des données d'identification avant la restitution.

Art. IX

En ce qui concerne l'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, les Etats parties au Traité devront se fonder sur les principes de la coopération et de l'assistance mutuelle et poursuivront toutes leurs activités dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, en tenant dûment compte des intérêts correspondants de tous les autres Etats parties au Traité. Les Etats parties au Traité effectueront l'étude de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, et procéderont à leur exploration de manière à éviter les effets préjudiciables de leur contamination ainsi que les modifications nocives du milieu terrestre résultant de l'introduction de substances extra-terrestres et, en cas de besoin, ils prendront les mesures appropriées à cette fin. Si un Etat partie au Traité a lieu de croire qu'une activité ou expérience envisagée par lui-même ou par ses ressortissants dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, causerait une gêne potentiellement nuisible aux activités d'autres Etats parties au Traité en matière d'exploration et d'utilisation pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, il devra engager les consultations internationales appropriées avant d'entreprendre ladite activité ou expérience. Tout Etat partie au Traité ayant lieu de croire qu'une activité ou expérience envisagée par un autre Etat partie au Traité dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, causerait une gêne potentiellement nuisible aux activités poursuivies en matière d'exploration et d'utilisation pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, peut demander que des consultations soient ouvertes au sujet de ladite activité ou expérience.

Art. X

Pour favoriser la coopération internationale en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, conformément aux buts du présent Traité, les Etats parties au Traité examineront dans des conditions d'égalité les demandes des autres Etats parties au Traité tendant à obtenir des facilités pour l'observation du vol des objets spatiaux lancés par ces Etats.

La nature de telles facilités d'observation et les conditions dans lesquelles elles pourraient être consenties seront déterminées d'un commun accord par les Etats intéressés.

Art. XI

Pour favoriser la coopération internationale en matière d'exploration et d'utilisation pacifiques de l'espace extra-atmosphérique, les Etats parties au Traité qui mènent des activités dans l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, conviennent, dans toute la mesure où cela est possible et réalisable, d'informer le Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies, ainsi que le public et la communauté scientifique internationale, de la nature et de la conduite de ces activités, des lieux où elles sont poursuivies et de leurs résultats. Le Secrétaire général de l'Organisation des Nations Unies devra être prêt à assurer, aussitôt après les avoir reçus, la diffusion effective de ces renseignements.

Art. XII

Toutes les stations et installations, tout le matériel et tous les véhicules spatiaux se trouvant sur la lune ou sur d'autres corps célestes seront accessibles, dans des conditions de réciprocité, aux représentants des autres Etats parties au Traité. Ces représentants notifieront au préalable toute visite projetée, de façon que les consultations voulues puissent avoir lieu et que le maximum de précautions puissent être prises pour assurer la sécurité et éviter de gêner les opérations normales sur les lieux de l'installation à visiter.

Art. XIII

Les dispositions du présent Traité s'appliquent aux activités poursuivies par les Etats parties au Traité en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, que ces activités soient menées par un Etat partie au Traité seul ou en commun avec d'autres Etats, notamment dans le cadre d'organisations intergouvernementales internationales.

Toutes questions pratiques se posant à l'occasion des activités poursuivies par des organisations intergouvernementales internationales en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, seront réglées par les Etats parties au Traité soit avec l'organisation internationale compétente, soit avec un ou plusieurs des Etats membres de ladite organisation qui sont parties au Traité.

Art. XIV

 Le présent Traité est ouvert à la signature de tous les Etats. Tout Etat qui n'aura pas signé le présent Traité avant son entrée en vigueur conformément au paragraphe 3 du présent article pourra y adhérer à tout moment. 0.790 Droit spatial

2. Le présent Traité sera soumis à la ratification des Etats signataires. Les instruments de ratification et les instruments d'adhésion seront déposés auprès des Gouvernements des Etats-Unis d'Amérique, du Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord et de l'Union des Républiques socialistes soviétiques, qui sont, dans le présent Traité, désignés comme étant les gouvernements dépositaires.

- 3. Le présent Traité entrera en vigueur lorsque cinq gouvernements, y compris ceux qui sont désignés comme étant les gouvernements dépositaires aux termes du présent Traité, auront déposé leurs instruments de ratification.
- 4. Pour les Etats dont les instruments de ratification ou d'adhésion seront déposés après l'entrée en vigueur du présent Traité, celui-ci entrera en vigueur à la date du dépôt de leurs instruments de ratification ou d'adhésion.
- 5. Les gouvernements dépositaires informeront sans délai tous les Etats qui auront signé le présent Traité ou y auront adhéré de la date de chaque signature, de la date du dépôt de chaque instrument de ratification du présent Traité ou d'adhésion au présent Traité, de la date d'entrée en vigueur du Traité ainsi que de toute autre communication.
- Le présent Traité sera enregistré par les gouvernements dépositaires conformément à l'article 102 de la Charte des Nations Unies.

Art. XV

Tout Etat partie au présent Traité peut proposer des amendements au Traité. Les amendements prendront effet à l'égard de chaque Etat partie au Traité acceptant les amendements dès qu'ils auront été acceptés par la majorité des Etats parties au Traité, et par la suite, pour chacun des autres Etats parties au Traité, à la date de son acceptation desdits amendements.

Art. XVI

Tout Etat partie au présent Traité peut, un an après l'entrée en vigueur du Traité, communiquer son intention de cesser d'y être partie par voie de notification écrite adressée aux gouvernements dépositaires. Cette notification prendra effet un an après la date à laquelle elle aura été reçue.

Art. XVII

Le présent Traité, dont les textes anglais, russe, espagnol, français et chinois font également foi, sera déposé dans les archives des gouvernements dépositaires. Des copies dûment certifiées du présent Traité seront adressées par les gouvernements dépositaires aux gouvernements des Etats qui auront signé le Traité ou qui y auront adhéré.

ANNEXE 2 – Régime de contrôle de la technologie des missiles (MTCR) - Lignes directrices pour les transferts sensibles liés aux missiles, International, 1987

Manuel d'annexe du régime de commande de technologie de missile (MTCR) - 2017

Annexe I - Régime de contrôle de la technologie des missiles (MTCR) - Lignes directrices pour les transferts sensibles liés aux missiles

- 1. Le but de ces directives est de limiter les risques de la prolifération des armes de destruction massive (c.-à-d. nucléaires, chimiques et biologiques), par le contrôle des transferts qui pourraient contribuer aux systèmes de livraison (autres que des avions pilotés) de telles armes. Les directives visent également à limiter le risque de voir des articles contrôlés et leur technologie tomber dans les mains de groupes et d'individus terroristes. Les directives ne sont pas conçues pour empêcher des programmes spatiaux nationaux ou la coopération internationale dans de tels programmes aussi longtemps qu'ils ne contribuent pas aux systèmes de livraison d'armes de destruction massive. Ces directives, y compris l'annexe jointe, forment la base pour le contrôle des transferts vers n'importe quelle destination indépendante de la juridiction de tous les systèmes de livraison (autres que les avions pilotés) capables de livrer des armes de destruction massive, de l'équipement et de la technologie concernant les missiles dont l'exécution en termes de charge utile et portée dépasse les paramètres indiqués. Une contrainte sera exercée dans la considération de tous les transferts d'articles dans l'annexe et tous ces transferts seront considérés au cas par cas. Le gouvernement mettra en application les directives conformément à la législation nationale.
- 2. L'annexe comporte deux catégories d'articles. Le terme «article» désigne les équipements et la technologie. Les articles de la catégorie I, à savoir les articles 1 et 2 de l'annexe, sont les plus sensibles. Tout système comportant un article de la catégorie I est également considéré comme appartenant à la catégorie I, sauf s'il ne peut être isolé, supprimé ou reproduit Une contrainte particulière sera exercée dans la considération des transferts de la catégorie I indépendamment de leur but. Il existera une présomption forte pour refuser de tels transferts. Une contrainte particulière sera également exercée dans la considération des transferts de tous les articles de l'annexe, ou de n'importe quels missiles (qu'ils soient dans l'annexe ou pas), si le gouvernement juge, sur la base de toute les informations disponibles et persuasives, évaluées selon des facteurs comprenant ceux du paragraphe 3, qu'ils sont censés être employés pour la livraison d'armes de destruction massive. Il existera une présomption forte pour refuser de tels transferts. Jusqu'à nouvel ordre, le transfert des installations productives de catégorie I ne sera pas autorisé. Le transfert d'autres articles de la catégorie I sera autorisé seulement à de rares occasions lorsque le gouvernement (a) obtient des engagements ayant force d'exécution de gouvernement-à-gouvernement incarnant les garanties du gouvernement destinataire réclamées dans le paragraphe 5 de ces directives et (b) assume la responsabilité de prendre toutes les mesures nécessaires pour s'assurer que l'article est utilisé uniquement aux fins indiquées. Il est entendu que la décision de transférer relève du jugement unique et souverain du Gouvernement.
- 3. Dans l'évaluation des demandes de transfert d'articles de l'annexe, les facteurs suivants seront pris en compte:
 - A. Les inquiétudes concernant la prolifération des armes de destruction massive,
 - Les possibilités et les objectifs des programmes de missile et des programmes spatiaux de l'État destinataire,
 - C. La portée du transfert en termes de développement potentiel de systèmes de livraison (autres que les avions pilotés) pour des armes de destruction massive
 - D. L'évaluation de l'utilisation finale des transferts, y compris les garanties appropriées des États destinataires visées aux paragraphes secondaires 5.A et 5.B ci-dessous,
 - E. L'applicabilité des accords multilatéraux appropriés; et
 - F. Le risque que les articles commandés tombent dans les mains de groupes et d'individus terroristes

- 4. Le transfert de la technologie de conception et de production directement liée à tous les articles de l'annexe sera également soumis à un examen et un contrôle minutieux de même que l'équipement luimême, jusqu'au degré autorisé par la législation nationale.
- 5. Dans les cas où le transfert pourrait contribuer à un système de livraison pour des armes de destruction massive, le gouvernement autorisera les transferts des articles de l'annexe seulement après réception des garanties appropriées du gouvernement de l'État destinataire que:
 - A. Les articles ne seront utilisés que pour les fins indiquées et une telle utilisation ne sera pas modifiée. Les articles ne seront pas modifiés ou reproduits sans l'assentiment préalable du gouvernement;
 - B. Ni les articles, ni les reproductions, ni les dérivés correspondants ne seront retransférés sans le consentement du gouvernement.
- 6. Dans la promotion de la mise en application effective des directives, le gouvernement, en fonction des besoins et des cas, devra échanger les informations importantes avec d'autres gouvernements appliquant les mêmes directives.

7. Le gouvernement:

- A. S'assurera que les contrôles de ses exportations nationales nécessitent une autorisation pour le transfert des articles hors-nomenclature si l'exportateur a été informé par les autorités compétentes du gouvernement que les articles peuvent être destinés, dans leur intégralité ou partiellement, à un usage en liaison avec des systèmes de livraison pour des armes de destruction massive autres que les avions pilotés;
- B. Et, si l'exportateur se rend compte que des articles hors-nomenclature sont destinés à contribuer à de telles activités, dans leur intégralité ou partie, veillera, conformément aux contrôles nationaux des exportations, à ce que l'exportateur notifie les autorités visées cidessus, qui décideront s'il est approprié d'effectuer l'exportation concernée sujette à autorisation.
- 8. L'adhésion de tous les États à ces directives dans l'intérêt de la paix et la sécurité internationales serait la bienvenue.

103

iii

ANNEXE 3 – Loi du 20 juillet 2017 sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace, Luxembourg, 2017

JOURNAL OFFICIEL



DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG

MÉMORIAL A

Nº 674 du 28 juillet 2017

Loi du 20 juillet 2017 sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace.

Nous Henri, Grand-Duc de Luxembourg, Duc de Nassau,

Notre Conseil d'État entendu:

De l'assentiment de la Chambre des Députés;

Vu la décision de la Chambre des députés du 13 juillet 2017 et celle du Conseil d'État du 14 juillet 2017 portant qu'il n'y a pas lieu à second vote;

Avons ordonné et ordonnons

Art. 1".

Les ressources de l'espace sont susceptibles d'appropriation.

Art. 2.

- (1) Aucune personne ne peut explorer ou utiliser les ressources de l'espace sans être en possession d'un agrément de mission écrit du ou des ministres ayant dans leurs attributions l'économie et les activités de l'espace (ci-après "les ministres").
- (2) Nul ne peut être agréé à exercer l'activité visée au paragraphe 1^{er} soit sous le couvert d'une autre personne, soit comme personne interposée pour l'exercice de cette activité.
- (3) L'exploitant agréé ne peut exercer l'activité visée au paragraphe 1^{er} qu'en conformité avec les conditions de son agrément et les obligations internationales du Luxembourg.
- (4) La présente loi ne s'applique pas aux communications par satellite, aux positions orbitales ou à l'usage de bandes de fréquence.

Art. 3.

L'agrément est accordé à un exploitant pour une mission d'exploration et d'utilisation des ressources de l'espace à des fins commerciales sur demande écrite adressée aux ministres.

Art. 4

L'agrément pour une mission ne peut être accordé que si le demandeur est une société anonyme, une société en commandite par actions ou une société à responsabilité limitée de droit luxembourgeois ou une société européenne ayant son siège social au Luxembourg.

Art. 5.

L'agrément est personnel et non cessible.

Art 6

La demande d'agrément doit être accompagnée de tous les renseignements utiles à son appréciation ainsi que d'un programme de mission.

Art 7

- (1) L'agrément est subordonné à la justification de l'existence au Luxembourg de l'administration centrale et du siège statutaire de l'exploitant à agréer, y inclus la structure administrative et comptable.
- (2) L'exploitant à agréer doit disposer d'un solide dispositif de procédures et modalités financières, techniques et juridiques par lesquelles la mission d'exploration et d'utilisation, y compris la commercialisation, des ressources de l'espace sont planifiées et mises en œuvre. Il doit encore disposer d'un solide dispositif de gouvernance interne comprenant notamment une structure organisationnelle claire avec un partage des responsabilités qui est bien défini, transparent et cohérent, des processus efficaces de détection, de gestion, de contrôle et de déclaration des risques auxquels il est ou pourrait être exposé, des mécanismes adéquats de contrôle interne, y compris des procédures administratives et comptables saines ainsi que des mécanismes de contrôle et de sécurité de ses systèmes et applications techniques.
- (3) Les dispositifs, les processus, les procédures et les mécanismes visés au présent article sont exhaustifs et adaptés à la nature, à l'échelle et à la complexité des risques inhérents au modèle d'entreprise de l'exploitant à agréer de même qu'à la mission pour laquelle l'agrément est demandé.

Art. 8.

(1) L'agrément est subordonné à la communication aux ministres de l'identité des actionnaires ou associés, directs ou indirectes, personnes physiques ou morales, qui détiennent une participation directe d'au moins 10 pour cent du capital ou des droits de vote dans l'exploitant, et du montant de ces participations ou, si ce seuil de 10 pour cent n'est pas atteint, de l'identité des vingt principaux actionnaires ou associés.

L'agrément est refusé si, compte tenu de la nécessité de garantir une exploitation saine et prudente, la qualité desdits actionnaires ou associés n'est pas satisfaisante.

- (2) La notion d'exploitation saine et prudente est appréciée à la lumière des critères suivants:
- a) l'honorabilité professionnelle de l'exploitant à agréer et des actionnaires et associés visés au paragraphe
 4*.
- b) l'honorabilité, les connaissances, les compétences et l'expérience de tout membre de l'organe de direction des actionnaires et associés visés au paragraphe 1°;
- c) la solidité financière des actionnaires et associés visés au paragraphe 1";
- d) l'existence de motifs raisonnables de soupçonner qu'une opération ou une tentative de blanchiment de capitaux ou de financement du terrorisme est en cours ou a eu lieu en rapport avec la mission d'exploration envisagée ou l'utilisation envisagée des ressources de l'espace ou que cette mission d'exploration ou cette utilisation pourrait en augmenter le risque.

L'honorabilité des membres de l'organe de direction des actionnaires ou associés visés au paragraphe 1^{er} s'apprécie selon les termes de l'article 9, paragraphe 1^{er}, se∞nde phrase.

Art 9

- (1) L'agrément est subordonné à la condition que les membres de l'organe de direction de l'exploitant disposent à tout moment de l'honorabilité, des connaissances, des compétences et de l'expérience nécessaires à l'exercice de leurs attributions. L'honorabilité s'apprécie sur base des antécédents judiciaires et de tous les éléments susceptibles d'établir que les personnes visées jouissent d'une bonne réputation et présentent toutes les garanties d'une activité irréprochable.
- (2) Les personnes chargées de la gestion de l'exploitant doivent être au moins à deux et doivent être habilitées à déterminer effectivement l'orientation de l'activité. Elles doivent posséder une expérience professionnelle adéquate par le fait d'avoir déjà exercé des activités analogues à un niveau élevé de responsabilité et d'autonomie dans le secteur de l'espace ou un secteur connexe.
- (3) Toute modification dans le chef des personnes visées au paragraphe 1^{er} doit être communiquée au préalable aux ministres.

Les ministres peuvent demander tous renseignements nécessaires sur les personnes susceptibles de devoir remplir les conditions légales d'honorabilité ou d'expérience professionnelles. Les ministres s'opposent au changement envisagé si ces personnes ne jouissent pas d'une honorabilité professionnelle adéquate, d'une expérience professionnelle adéquate ou s'il existe des raisons objectives et démontrables d'estimer que le changement envisagé risque de compromettre une exploitation saine et prudente.

(4) L'octroi de l'agrément implique pour les membres de l'organe de direction l'obligation de notifier aux ministres spontanément par écrit et sous une forme complète, cohérente et compréhensible tout changement concernant les informations substantielles sur lesquelles les ministres se sont fondés pour instruire la demande d'agrément.

Art. 10.

- (1) La demande d'agrément doit être accompagnée d'une évaluation des risques de la mission. Elle précise la couverture de ces risques par des moyens financiers propres, par une police d'assurance d'une entreprise d'assurances n'appartenant pas au même groupe que l'exploitant à agréer ou par une garantie d'un établissement de crédit n'appartenant pas au même groupe que l'exploitant à agréer.
- (2) L'agrément est subordonné à l'existence d'assises financières appropriées aux risques associés à la mission.

Art. 11.

- (1) L'agrément est subordonné à la condition que l'exploitant à agréer confie le contrôle de ses documents comptables annuels à un ou plusieurs réviseurs d'entreprises agréés qui justifient d'une expérience professionnelle adéquate.
- (2) Toute modification dans le chef des réviseurs d'entreprises agréés doit être autorisée au préalable par les ministres.
- (3) L'institution des commissaires pouvant former un conseil de surveillance, prévue dans la loi du 10 août 1915 sur les sociétés commerciales telle que modifiée, ne s'applique aux exploitants que dans les cas où la loi sur les sociétés commerciales la prescrit obligatoirement même s'il existe un réviseur d'entreprise.

Art. 12.

L'agrément décrit la manière dont l'exploitant à agréer satisfait aux conditions des articles 6 à 11, paragraphe 1°. Il peut contenir en outre des dispositions sur:

- a) les activités devant être exercées sur le territoire du Grand-Duché ou à partir de celui-ci;
- b) les limites dont pourrait être assortie la mission:
- c) les modalités de surveillance de la mission;
- d) les conditions servant à assurer le respect par l'exploitant à agréer de ses obligations.

Art. 13.

Pour chaque demande d'agrément, une redevance est fixée par les ministres pour couvrir les frais administratifs occasionnés par le traitement de la demande. Cette redevance varie entre 5.000 et 500.000 euros suivant la complexité de la demande et le volume du travail.

Un règlement grand-ducal détermine la procédure applicable à la perception de la redevance.

Art. 14.

- (1) L'agrément est retiré si les conditions de son octroi ne sont plus remplies.
- (2) L'agrément est retiré si l'exploitant n'en fait pas usage dans un délai de trente-six mois à partir de son octroi, y renonce ou a cessé d'exercer son activité au cours des six derniers mois.
- (3) L'agrément est encore retiré s'il a été obtenu au moyen de fausses déclarations ou par tout autre moyen irrégulier.

Art. 15.

Les ministres sont en charge de la surveillance continue des missions pour lesquelles un agrément a été accordé.

Art. 16.

L'exploitant qui a obtenu un agrément pour une mission est pleinement responsable des dommages causés à l'occasion de la mission, y inclus à l'occasion de tous travaux et devoirs de préparation.

Art. 17.

L'obtention d'un agrément pour une mission ne dispense pas de la nécessité d'obtenir d'autres agréments ou autorisations requis.

Art 18

- (1) Est puni d'un emprisonnement de huit jours à cinq ans et d'une amende de 5.000 à 1.250.000 euros ou d'une de ces peines seulement celui qui a contrevenu ou tenté de contrevenir à l'article 2.
- (2) Est puni d'un emprisonnement de huit jours à un an et d'une amende de 1.250 à 500.000 euros ou d'une de ces peines seulement celui qui a contrevenu ou tenté de contrevenir aux dispositions respectivement des articles 5, 9, paragraphe 3, alinéa 1^{et}, 11, paragraphe 1^{et} ou 2 ou aux termes de l'agrément.
- (3) Sans préjudice des paragraphes 1^{er} et 2, la juridiction saisie peut prononcer la cessation de l'exploitation contraire aux dispositions de la présente loi sous peine d'astreinte dont le maximum ne peut excéder 1.000.000 d'euros par jour d'infraction constatée.

Mandons et ordonnons que la présente loi soit insérée au Journal officiel du Grand-Duché de Luxembourg pour être exécutée et observée par tous œux que la chose concerne.

Le Ministre de l'Économie
Étienne Schneider

Cabasson, le 20 juillet 2017. Henri

Doc. parl. 7093; sess. ord. 2016-2017.



TABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	3
REMERCIEMENTS	4
SOMMAIRE	5
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGNIFICATION	6
NTRODUCTION	8
PARTIE 1 – LE MARCHÉ DES MICRO-LANCEURS ET SES PARTICULARITÉ FRANSPORT DÉDIÉ DONC TRÈS DÉPENDANT AUX FORTES CONTRAINTES D'ENT	
Chapitre 1 – Un marché de niche caractérisé par une interrelation offre/demande dissymé une multiplicité d'acteurs	_
Section 1 – Un marché très spécialisé	12
I. – Les fondements du transport spatial	13
A. – Sa place dans la chaîne de valeur de l'industrie spatiale	13
B. – Quelques éléments de compréhension	14
II. – La place actuelle des micro-lanceurs dans le transport spatial	20
III. – Étude de quelques indicateurs de référence	23
A. – Analyse contradictoire de deux paramètres essentiels	23
1° – Le prix au kilo orbité	23
2° – La quantité globale ou volume de satellites	24
B. – Indicateurs de comparaison	25
1° – Pour l'opérateur du satellite	25
2° – Pour l'opérateur du lanceur	26
Section 2 – Une totale dépendance au marché des microsatellites	27
I. – Le développement du marché satellitaire	28
A. – Progrès technologiques et miniaturisation	28
B. – Vers un maillage spatial	29
II. – Le retentissement sur l'évolution et le développement de l'offre de lancement	30
A. – Le transport partagé : une offre de substitution	31
B. – Le transport individualisé : l'offre des micro-lanceurs	32
Section 3 – Une multitude de parties prenantes	32
I. – Les développeurs de lanceurs	33
A. – Les acteurs historiques	34
B. – Les nouveaux acteurs et les acteurs opérationnels	38
C. – Les programmes en développement	41
II. – Les opérateurs de satellites : des instigateurs incontournables	46
III. – Les instances institutionnelles : un rôle régulateur	48
Chapitre 2 – Un marché soumis à de fortes barrières d'entrée	49

Section 1 – Une industrie capitalistique engendrant des risques financiers majeurs tro	•
I. – Des techniques continuellement à haut niveau de risque	
II. – Des répercussions significatives sur les modes de financement privé	51
Section 2 – Un dispositif législatif de plus en plus contourné	54
I. – D'un espace pacifique à une utilisation stratégique et tactique	55
A. – Une volonté initiale de neutralité	55
B. – Un lieu de suprématie et d'inévitable affrontement	56
II. – Vers un nouvel enjeu : l'exploitation privée des ressources spatiales	57
Section 3 – Une concurrence protéiforme permanente	58
I. – Une nouvelle approche « hyper low cost » des gros lanceurs	58
II. – L'allongement du cycle de vie des satellites	60
III. – Des solutions prospectives : du SSTO à la catapulte magnétique	60
PARTIE 2 – L'ÉCONOMIE DES MICRO-LANCEURS ET SES CONTRAINTES : N TECHNIQUES ET ADAPTATION DES STRATÉGIES D'EXPLOITATION	
Chapitre 1 – Rappel sur l'évolution des politiques spatiales et éclairage sur la répartit interférants dans le lancement d'un engin	
Section 1 – De l'essor des politiques spatiales à une « normalisation » de l'économie	spatiale64
I. – Bref rappel historique	65
II. – Vers une « normalisation » de l'économie spatiale	67
Section 2 – La répartition des coûts d'un lancement d'un micro-lanceur	69
I. – Les coûts inhérents au lanceur	70
A. – Les coûts de recherche et développement	70
B. – Les coûts d'exploitation	71
II. – Les coûts de l'infrastructure de lancement	73
Chapitre 2 – À la recherche constante d'une diminution des coûts de revient	76
Section 1 – Des mutations techniques	76
I. – Du « Design to cost » à la standardisation et la production en série	76
II. – L'extension de l'impression 3D ou fabrication additive	79
III. – L'optimisation de la motorisation	80
IV. – Vers une minimalisation de l'infrastructure de lancement	81
Section 2 – De nouvelles stratégies d'exploitation ambitieuses	83
I. – Un raccourcissement du « Time to market »	83
II. – Une accélération de la cadence de lancement	84
III. – Une montée en puissance de la récupération et du recyclage	85
IV. – Une quête d'architecture modulaire et de flexibilité d'usage	86
CONCLUSION	89
RIBI IOGRAPHIE	91

TABLE DES FIGURES	94
TABLE DES ANNEXES	95
ANNEXE 1 – Traité sur les principes régissant les activités des Etats en matière d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autre International, 1967	s corps célestes,
ANNEXE 2 – Régime de contrôle de la technologie des missiles (MTCR) - Lignes d transferts sensibles liés aux missiles, International, 1987	
ANNEXE 3 – Loi du 20 juillet 2017 sur l'exploration et l'utilisation des ressou Luxembourg, 2017	

Résumé

L'accès à l'espace représente, depuis 1957 et le lancement de Spoutnik, un enjeu majeur pour nos sociétés modernes. Filières initialement militaires et publiques, les industries qui sont alors créées autour du domaine spatial subissent une véritable révolution avec l'apparition d'acteurs et de capitaux privés dès les années 2000 : c'est l'ère du « New Space », qui touche l'ensemble des acteurs et des activités de cette industrie.

Le secteur du lancement spatial n'est pas en reste. Ainsi, de nombreux projets de microlanceurs sont actuellement en développement, voire en exploitation, à travers le monde. Pour autant, si le secteur semble prometteur, il n'en demeure pas moins très concurrentiel. En effet, bien que la demande de lancement de microsatellites soit, depuis une dizaine d'années, en augmentation croissante, le marché du micro-lancement ne semble ni être en mesure de capter une large part de cette demande, ni en capacité de se structurer autours de quelques acteurs de référence afin de consolider son marché.

Son coût d'accès très onéreux, rend impérative une réduction des coûts pour tendre à son large usage et à une réelle démocratisation. Ces variables sont intimement liées aux choix impactant tant la conception technologique des micro-lanceurs que leur exploitation.

Aussi, malgré un engouement certain du grand public, le marché des micro-lanceurs ne semble pouvoir se développer que pour des applications stratégiques, de défense ou de recherche, et non pour un usage privé, trop restreint.

Summary

Since 1957 and the launch of Sputnik, space access has been a major challenge for our modern societies. Initially military and public sectors, industries created around space are undergoing a real revolution with the emergence of both private players and capital in the 2000s: this is the era of "New Space", which affects all players and activities of this industry.

The space launch sector is not to be outdone. Many micro-launcher projects are currently under development, or even in operation, throughout the world. However, although the sector seems promising, it is nonetheless highly competitive. Indeed, even if the demand for microsatellite launches has been increasing for the past ten years, the micro-satellite launch market does not seem to be able to capture a large part of this demand, nor does it seem to be able to structure itself around a few reference players in order to consolidate its market.

Its very high cost of access makes it imperative to reduce costs in order to achieve widespread use and a real democratization of these launchers. These variables are intimately linked to the choices impacting both the technological design of the micro-launchers and their operation.

Thus, despite a certain enthusiasm from the general public, the micro-launcher market seems to be able to develop only for strategic, defense or research applications, and not for private use, which is too limited.

Mots-clés: Micro-lanceurs, Microsatellites, New Space, Espace, Accès spatial

Keywords: Micro-launchers, Microsatellites, New Space, Space, Space access