

UNIVERSITÉ D'AIX-MARSEILLE

PÔLE TRANSPORTS

INSTITUTION DE FORMATION UNIVERSITAIRE ET DE
RECHERCHE DU TRANSPORT AÉRIEN (IFURTA)



LES LANCEURS SPATIAUX RÉUTILISABLES : LA NORME DE DEMAIN ?

MASTER II DROIT ET MANAGEMENT DU TRANSPORT AÉRIEN

présenté par

Gabriel VOISIN

Sous la direction du Professeure Julie LABORDE DIT BOURIAT

Année Universitaire 2020 - 2021

Faculté de Droit et Science Politique de Marseille-Aix Université
MASTER II DROIT ET MANAGEMENT DU TRANSPORT AÉRIEN

**LES LANCEURS SPATIAUX RÉUTILISABLES :
LA NORME DE DEMAIN ?**

Mémoire présenté par Gabriel VOISIN

Sous la direction du Professeure Julie LABORDE DIT BOURIAT

Année Universitaire 2020 - 2021

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je tiens à remercier ma directrice, la Professeure Julie Laborde Dit Bouriat, pour sa disponibilité et le partage de sa passion pour le droit aérien tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je remercie également tous les professeurs et intervenants de l'IFURTA ; ainsi que tous les professeurs de la Faculté de Droit et Science politique de Montpellier, qui m'ont dispensé leurs enseignements durant les années de mon cursus universitaire : tous ont contribué à construire l'étudiant et le juriste que je suis devenu.

Je souhaite remercier particulièrement ma tutrice d'alternance, Bénédicte Vascaut, pour m'avoir appris tant de choses cette année et aidé chaque fois que j'ai pu faire appel à elle.

Je remercie enfin ma famille, mes amis et ma conjointe qui n'ont jamais cessé de croire en moi, ainsi que les étudiants de la promotion 2020-2021 du Master II Droit et Management du Transport Aérien, sans qui cette année n'aurait jamais pu être aussi belle.

SOMMAIRE

Remerciements

Sommaire

Introduction

PARTIE I : UNE SOLUTION QUI S’AFFIRME SUR LE MARCHÉ DU SPATIAL

Titre 1 - Une rupture technologique qui s’inscrit dans le temps

Titre 2 - Le réutilisable en réponse aux problématiques actuelles

PARTIE II : UNE SOLUTION A LA PÉRENNITÉ ENCORE INCERTAINE

Titre 1 - Une rentabilité économique encore controversée

Titre 2 - Des risques nouveaux qui demeurent élevés et difficiles à maîtriser

Conclusion

Bibliographies

Annexes

Tables des matières

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DoD	Department of Defense
ESA	European Space Agency
GTO	Orbite de transfert géostationnaire
ISS	Station Spatiale Internationale
ITAR	International Traffic in Arms Regulations
NASA	National Aeronautical and Space Administration
NSSL	National Security Space Launch
OMB	Office of Management and Budget
OPECST	Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
ULA	United Launch Alliance
URSS	Union des Républiques Socialistes Soviétiques
USAF	United States Air Force

INTRODUCTION

« Depuis qu'il est sapiens, sans doute, l'homme contemple les cieux : il y trouve le rêve et la fascination d'un monde aux limites extrêmes »¹. Tels sont les mots qui viennent à l'esprit d'Hubert Curien, ancien Ministre de la Recherche et de l'Espace, lorsqu'il évoque l'immensité et l'infinité de ce qui se situe au-delà de l'atmosphère terrestre. Si l'Homme est parvenu à déceler certains mystères de ce monde au fil de son histoire, il est encore bien loin de percer à jour sa complexité et son fonctionnement dans son ensemble. L'espace et le temps sont pourtant des principes physiques qui, jusqu'à preuve du contraire, sont à la base de tout dans l'Univers. Cela explique pourquoi la volonté de se rendre dans l'espace n'a jamais cessé de croître dans l'esprit humain.

Avant le XXème siècle, la conquête de l'espace ne s'apparente qu'à un rêve démesuré, notamment parce que les connaissances sur le domaine sont extrêmement pauvres mais également parce qu'on ne sait absolument pas comment s'y rendre. En effet, les observations scientifiques de l'espace ne peuvent se faire que depuis la surface de notre planète et avec des instruments manquant parfois de précisions. Il faudra des siècles d'imagination et de créativité pour que l'homme parvienne à maîtriser le secret de la propulsion et vaincre la force gravitationnelle pour placer une charge en orbite autour de la Terre. Parmi nos prédécesseurs, condamnés à ne pouvoir contempler les cieux que d'en-bas, beaucoup d'avant-gardistes ont écrit sur le voyage spatial, décrivant toutes sortes de moyens d'y accéder. C'est ainsi que les ouvrages de Cyrano de Bergerac² ou encore Jules Verne³, pour ne citer qu'eux, ont fini par influencer les travaux des scientifiques de l'époque, mélangeant à terme fiction et réalité pour ensuite poser les bases de l'aéronautique. La fusée moderne devient alors une idée plus

¹ P. DE LA COTADIÈRE, J.-P. PENOT, *Dictionnaire de l'astronomie et de l'espace*, Paris, Larousse-Bordas, 1997, Préface.

² S. CYRANO DE BERGERAC, *Histoire comique des états et empires de la Lune*, Paris, 1657.

³ J. VERNES, *De la Terre à la Lune*, Paris, Pierre-Jules Hetzel, 1865.

concrète que jamais et ouvre directement la porte des étoiles aux ingénieurs du siècle dernier.

L'histoire des lanceurs spatiaux est étroitement liée à celle de la guerre, portée par la rivalité grandissante entre les deux super puissances que sont les Etats-Unis et l'Union Soviétique à la fin de la Première Guerre mondiale. Chez les soviétiques, Constantin Tsiolkovski (1857-1935) s'affirme comme le premier grand théoricien de l'aéronautique moderne avec les premiers concepts de fusées à étages, moteurs, vitesses cosmiques et évoquera même celui de stations spatiales⁴. Côté américain, on retrouve le physicien Robert H. Goddard (1882-1945) que l'on considère comme le premier véritable expérimentateur de fusées. C'est en 1926 qu'il parvient à faire décoller la première fusée à carburant liquide de l'histoire, atteignant une hauteur de douze mètres. Mais c'est réellement à l'issue de la Seconde Guerre mondiale que le concept de lanceur spatial va se concrétiser. En effet, l'un des acteurs majeur de ce changement est le physicien allemand Vernher Von Braun (1912-1977) qui participe durant la guerre à la création du *missile balistique V2*⁵. C'est en s'appropriant cette technologie militaire qu'américains et soviétiques vont concevoir leurs premières fusées dans un contexte de Guerre froide rythmée par les tensions et une course à l'armement. Car si c'est missiles offrent à leur détenteur une force de dissuasion, voire une force de frappe nucléaire, certains distinguent à travers leur longue portée un moyen efficace de mettre en orbite un satellite. L'ère de la conquête de l'espace s'ouvre alors le 4 Octobre 1957 avec le lancement de la fusée *R-7 Semioroka* et la mise sur orbite par l'URSS du premier satellite artificiel de la Terre : *Sputnik 1*.

Les années 50 et 60 sont considérées comme l'âge d'or des lancements spatiaux, notamment en raison de la course à l'espace qui se déroule entre les Etats-Unis et l'URSS durant la Guerre froide. Mais avant d'aller plus loin et maintenant qu'ils commencent à ressembler à ce qu'on connaît actuellement, attardons nous à définir le lanceur spatial. D'après le *Dictionnaire de l'astronomie*

⁴ C. TSIOLKOVSKI, *L'exploration de l'espace cosmique par des engins à réaction*, URSS, 1903.

⁵ J.-F. CLERVOY, F. LEHOT, *Histoire de la conquête spatiale*, De Boeck Supérieur, 2017, p. 16.

et de l'espace de Philippe de La Cotadière et Jean-Pierre Penot⁶, un lanceur spatial est un « *véhicule aérospatial propulsif capable d'envoyer une charge utile dans l'espace. La fonction du lanceur consiste à amener sa charge utile en un « point » donné de l'espace, le point d'injection, avec la vitesse précise définie en grandeur et en direction qui correspond à la mission prévue* ». La plupart des lanceurs spatiaux affichent une silhouette longue et cylindrique d'une hauteur variant entre 30 et 60 mètres. En son sommet, on retrouve la charge utile, c'est-à-dire, la partie de l'engin destinée à remplir la mission, comme un satellite, tandis qu'à la base, on retrouve un groupe de moteurs⁷.

En théorie, le fonctionnement d'un lanceur est simple et répond à des principes physiques de base. Les moteurs-fusée puisent leurs ergols⁸ dans de grands réservoirs aux parois très fines qui forment la structure du lanceur. La puissance dégagée lors de l'allumage entraîne une force opposée mais égale qui le propulse dans les airs suivant la troisième loi de Newton, aussi appelé « *principe d'action-réaction* »⁹, permettant un décollage vertical. Durant son ascension, le lanceur va accroître sa vitesse jusqu'à atteindre celle qui lui permet de rester dans l'espace, soit 7,9 km/s. C'est ce que l'on nomme la vitesse de satellisation. Sans cette vitesse, tout corps lancé dans l'espace retomberait avant d'avoir accompli un cercle complet autour de la Terre. Bien entendu, dans la pratique, le fonctionnement d'un lanceur est bien plus complexe à appréhender et nécessite la prise en compte de nombreux paramètres. L'essentiel est d'atteindre la vitesse nécessaire et pour cela, il est impératif de suivre un ensemble de règles, celles-ci pouvant s'appliquer à n'importe quelle fusée. L'une d'elles consiste notamment à quitter l'atmosphère terrestre le plus vite possible et l'autre à s'alléger tout aussi

⁶ P. DE LA COTADIÈRE, J.-P. PENOT, *op. cit.*, p. 252.

⁷ ArianeSpace, https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2020/06/Arianespace_Brochure_Ariane6_Sept2019.pdf, consulté le 25 Juin 2021 ; Pour une vision complète, se référer à l'Annexe I.

⁸ Un ergol, dans le domaine de l'aéronautique, est une substance homogène employée seule ou en association avec d'autres substances et destinée à fournir de l'énergie. Les ergols sont les produits initiaux, séparés, utilisés dans un système propulsif à réaction. Ils sont constitués d'éléments oxydants (comburant) et réducteurs (carburant ou combustible). Dans le cas des liquides, les couples les plus utilisés sont oxygène-hydrogène, oxygène-kérosène et peroxyde d'azote-UDMH.

⁹ I. NEWTON, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Londres, 1687.

rapidement. Les ergols contenus dans les réservoirs de la fusée constituent l'essentiel de la masse totale du lanceur au moment du décollage. Au cours du vol, ces derniers sont brûlés par les moteurs et les réservoirs, désormais vides, deviennent un poids mort qui empêche inévitablement le lanceur d'atteindre sa vitesse de satellisation. C'est pour cette raison qu'un lanceur comporte quasiment systématiquement plusieurs étages, le plus souvent trois, intervenant de manière successive durant la phase de propulsion et largués une fois complètement vidés. On comprend alors que les lanceurs ont une durée de fonctionnement relativement brève, généralement entre dix et quinze minutes selon les missions. Les lanceurs spatiaux se caractérisent donc par la valeur de la masse qu'ils peuvent emporter : plus ils sont lourds au moment du décollage et emploient des ergols performants, plus ils sont puissants. Depuis, de nombreux modèles de lanceurs ont été développés, certains plus efficaces que d'autres, et le nombre de lancements s'est multiplié de manière exponentielle.

La maîtrise de l'accès à l'espace a ouvert un champ de possibilités infinies chez l'homme qui depuis plus d'un demi siècle, ne cesse d'enchaîner les découvertes et d'accomplir des prouesses scientifiques qui parfois échappent encore à certains tant elles paraissent révolutionnaires. Après avoir envoyé des satellites dans l'espace, c'est au tour de l'être humain. Si le soviétique Yuri Gagarine est le premier à s'y rendre le 21 Avril 1961¹⁰, ce succès est rapidement éclipsé par celui des missions américaines *Apollo* et notamment par l'évènement qui restera probablement le plus marquant du XXème siècle : les premiers pas de l'homme sur la Lune le 20 Juillet 1969 lors de la mission *Apollo 11*¹¹. Pour le programme lunaire *Apollo*, la *NASA* développe le lanceur spatial super lourd *Saturn V*¹² qui, entre 1967 et 1973, place en orbite terrestre les différents vaisseaux qui déposeront les astronautes américains sur le sol de notre satellite naturel. C'est au cours des années suivantes que le secteur de spatial va prendre de

¹⁰ S. BRUHNS, *Yuri Gagarin : The Spaceman*, Hyperink, 2012.

¹¹ L. VIGLIETTI, *Apollo confidentiel : Mémoires d'hommes sur la Lune*, De Boeck Supérieur, Paris, 2019, p. 53.

¹² R. E. BILSTEIN, *Stages to Saturn : A Technological History of the Apollo/Saturn Launch Vehicles*, University Press of Florida, 2003.

plus en plus d'ampleur, notamment avec l'arrivée au pouvoir de Ronald Reagan aux Etats-Unis. L'espace devient alors un véritable enjeu de puissance, un vaste échiquier sur lequel se joue une guerre d'ordre militaire dans un premier temps entre américains et soviétiques, rapidement rejoints par d'autres nations.

Si maîtriser la technologie spatiale se révèle être important pour s'imposer sur la scène internationale et intimider les puissances ennemies, tous les pays n'en sont pas capables. En effet, en plus de disposer d'un emplacement stratégique pour les lancements, la mise en place d'un programme spatial requiert de mobiliser des moyens financiers et humains exceptionnels. Aujourd'hui, seulement onze pays ont la capacité d'effectuer des lancements de manière autonome : les Etats-Unis, la Russie, la France, la Chine, le Japon, l'Inde, le Royaume-Unis, la Corée du Sud, Israël, l'Iran ainsi que la Corée du Nord. Le rayonnement de ces pays dans l'espace varie considérablement en fonction de la disparité des budgets alloués. A titre d'exemple, les Etats-Unis consacrent deux fois plus au secteur spatial que toutes les autres pays réunis, soit l'équivalent d'environ 25 milliards de dollars par an, 12% de plus qu'en 2020¹³. En ce qui concerne l'Iran, Israël et la Corée du Nord, même s'ils ont un budget plus restreint, la volonté de prouver l'efficacité de leur technologie spatiale peut se lire selon une stratégie de menace et de dissuasion réciproque semblable à celle qui prenait place durant la Guerre froide. D'ailleurs, il n'est pas anodin que la liste des puissances spatiales recoupe en grande partie celle des grandes puissances nucléaires reconnues. Avec la chute de l'Union soviétique en 1989, les enjeux politiques et stratégiques des nations changent. Si son importance sur un plan militaire ne diminue que très peu, désormais, l'espace est le théâtre d'une autre grande guerre, celle de l'information et de la surveillance, celle du *soft power* et du prestige¹⁴.

Ce qui motive les grandes puissances à s'imposer dans l'espace c'est surtout d'avoir accès à ce point de vue global sur la Terre qu'offrent les satellites. En

¹³ Note du CNES, France-Science, <https://france-science.com/budget-de-2327-md-284-pour-la-nasa-pour-lexercice-2021/>, consulté le 25 Juin 2021.

¹⁴ V. DOUMERC, *Les bases spatiales dans le monde : les interfaces Terre-espace*, Géoconfluences, 2021, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/articles/bases-spatiales>, consulté le 2 Juillet 2021.

effet, si l'intrusion d'un avion espion sur l'espace aérien d'un pays constitue une violation patente de sa souveraineté, les satellites eux, peuvent surplomber n'importe quel lieu de la planète sans aucune restriction légale¹⁵. Le perfectionnement des systèmes d'imagerie et de télécommunications explique donc l'énorme avantage stratégique d'occuper l'espace circumterrestre. C'est pourquoi, à l'aube du XXIème siècle, le nombre de lancements spatiaux dans le monde n'a fait qu'augmenter. La coopération internationale a permis de recentrer les programmes de lancements vers des buts communs, que ce soit pour assurer les télécommunications partout autour du globe, pour la recherche scientifique ou encore, la création puis l'amélioration d'une station spatiale internationale (ISS). En 2019, on décompte 102 tentatives de lancement orbital, dont 97 succès. Mais 2020 s'avère être une année record depuis les années 90. Malgré la crise sanitaire de la *Covid-19* qui frappe l'ensemble de la planète, on comptabilise 114 tentatives de lancement dont 104 ont été menées à bien¹⁶. Quelques 1272 satellites ont été mis en orbite par une fusée ou déployés dans l'espace, soit une augmentation de 120% par rapport à 2019. En terme de répartition, la Chine occupe la première place avec 35 lancements spatiaux réussis et quatre échecs, suivi de très près par les Etats-Unis avec 34 lancements dont trois échecs. L'activité de la Russie quant à elle est en déclin avec 15 lancements, tous réussis cependant. Enfin, l'Europe se place au pied du podium avec seulement 6 lancements fructueux et un échec, celui de la fusée *Vega*. Ces chiffres témoignent tout de même d'une nouvelle course à l'espace entre la Chine et les Etats-Unis cette fois-ci¹⁷. Elle s'inscrit notamment

¹⁵ M. COUSTON, *Liberté spatiale, la norme juridique de l'extrême*, in *Revue Française de Droit aérien et spatial*, III, 2000, p. 181 ; 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 célestes, conclu le 27 janvier 1967 et entré en vigueur le 10 octobre 1967, dit « *le Traité de l'Espace* », prévoit qu'aucun État ne peut se voir imposer des restrictions ou des conditions par un autre État pour explorer et utiliser l'espace conformément au droit international. Ainsi, le survol du territoire d'un État par un satellite de reconnaissance est, en principe, libre.

¹⁶ GÉDÉON, *L'année spatiale 2020 : le bilan des lancements orbitaux*, in *Satellites et lancement, New Space, économie du spatial*, 2021, <http://un-regard-sur-la-terre.org/2021/01/1-annee-spatiale-2020-le-bilan-des-lancements-orbitaux.html>, consulté le 28 Juin 2021.

¹⁷ Pour une meilleure vision de cette course à l'espace, se référer à l'Annexe 3.

dans cette nouvelle ère du spatial, autrement surnommé le *New Space*¹⁸, symbolisant la reprise des envies de conquêtes spatiales chez l'homme avec l'émergence de nouveaux acteurs au sein de l'industrie.

Depuis la dernière décennie, l'espace n'est plus le terrain de jeu réservé de quelques grandes agences étatiques. Alors que la quasi totalité des missions, militaires ou civiles, étaient décidées et financées par les gouvernements, plusieurs dizaines de projets financés par le secteur privé voient désormais le jour. Ces nouveaux acteurs ont su s'imposer grâce à des nouvelles technologies, en rupture avec ce qui pouvait être utilisé jusqu'à présent, accompagnées d'une chute exceptionnelle du coût de l'accès à l'orbite extra-atmosphérique¹⁹. Le marché commercial du lancement spatial est en plein essor et c'est ce qui pousse probablement les différents gouvernements à collaborer avec ces nouvelles entreprises privées aux ambitions semble-t-il infinies. Comment évoquer ce sujet sans parler de *SpaceX*, dont le fondateur Elon Musk est devenu en 2008 l'un des premiers entrepreneurs privés à concevoir un lanceur réutilisable?²⁰ Depuis 2010, le milliardaire américain a révélé son projet de faire de l'homme une espèce interplanétaire en colonisant la planète Mars. Avec 26 lancements en 2020, *SpaceX* signe aussi le retour des vols habités depuis le sol américain au départ de la mythique base de lancement de Cap Canaveral en Floride, opéré pour la première fois par un groupe privé. Peu à peu, les acteurs du genre se multiplient et prennent de plus en plus d'importance. Les différentes puissances spatiales revoient leurs ambitions à la hausse et tentent de se positionner de nouveau dans la course. Le secteur fourmille de projets d'ampleur tels que le retour de l'homme sur la Lune, la construction d'une nouvelle station spatiale internationale ou encore l'exploration d'exo-planètes. Le bureau d'études Euroconsult prévoit que le

¹⁸ Le *New Space* désigne la combinaison de la baisse du coût d'accès à l'espace, de la multiplication du nombre des acteurs privés, des financements et des ruptures technologiques – comme la miniaturisation des composants, la motorisation électrique, l'impression 3D ou la réutilisation des lanceurs.

¹⁹ A. BAUER, *2010-2019 : les dix ans qui ont transformé l'espace en Far West*, Les Echos, 2019, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/2010-2019-les-dix-ans-qui-ont-transforme-lespace-en-far-west-1159269>, consulté le 9 Mai 2021.

²⁰ *Ibid.*

chiffre d'affaires spatial mondial passera de 298 milliards de dollars en 2018 à 485 milliards en 2028. Mais le secteur n'aurait probablement jamais connu un tel développement sans le bouleversement de l'écosystème spatial initié par *SpaceX* en 2010 et qui repose dans la réutilisation de ses lanceurs.

En 2014, après treize tentatives soldées par un échec, Elon Musk parvient à récupérer le premier étage de sa fusée *Falcon 9*. On peut définir un lanceur réutilisable comme « *le lanceur conçu pour être récupéré ou pour revenir sur Terre par ses propres moyens en vue de servir à d'autres lancements* ». Désormais, la réutilisation de ses lanceurs devient en quelque sorte la marque de fabrique de l'entreprise américaine. Mais cette réutilisation n'est que partielle. Il existe en effet trois différents types de lanceurs. Le lanceur consommable est celui décrit précédemment avec *Saturn V*, dont les deux premiers étages sont largués une fois vidés de leur ergols et retombent à la surface ou sont détruits en vol. Vient ensuite le lanceur semi-réutilisable dont une partie est consommée au cours de l'ascension mais qui parvient par ailleurs à faire revenir une autre partie intacte sur Terre. Enfin, il y a les lanceurs entièrement réutilisables qui eux, reviennent en totalité au sol après le lancement. Même si l'on parle généralement de « *lanceur réutilisable* », cet abus de langage désigne réellement un lanceur semi-réutilisable pour le *Falcon 9* de *SpaceX* : seul le premier étage de la fusée revient sur le pas de tir ou sur une barge en mer, de manière verticale grâce à ses moteurs-fusée. Ce premier étage, également appelé « *booster* », est alors remis en état pour être de nouveau utilisé lors d'un prochain lancement. Le 9 mai 2021, le premier étage d'une *Falcon 9* avait bouclé son dixième aller-retour entre la Terre et l'espace, preuve que le géant américain n'en est pas à son coup d'essai²¹.

Dès les débuts de l'ère spatiale, les fusées employées pour placer en orbite des engins sont perdues après leur lancement car les récupérer pour un usage ultérieur soulève directement de nombreux problèmes. À la fin des années 1960, la *NASA* tente de faire baisser les coûts des lancements en créant un système de

²¹ J. LAUSSON, *SpaceX établit un nouveau record d'utilisation avec la Falcon 9*, Numerama, 2021, <https://www.numerama.com/sciences/710226-spacex-etablit-un-nouveau-record-utilisation-avec-la-falcon-9.html>, consulté le 14 Avril 2021.

lancement partiellement réutilisable : la navette spatiale américaine. Mais ce programme repose sur un lanceur extrêmement complexe dont les coûts de lancement s'avèrent au final plus élevés que ceux d'un lanceur classique. Par la suite, plusieurs études sont menées, notamment aux États-Unis, autour du concept de lanceur orbital mono-étage, c'est-à-dire sans séparation lors de l'ascension, mais ces projets ne verront jamais le jour car les technologies nécessaires dans des domaines fondamentaux comme la propulsion et la conception de structures légères ne sont pas encore développées. Depuis 2016, la version réutilisable du lanceur *Falcon 9* de la société *SpaceX*, qui a recours à des technologies plus classiques, à savoir un lanceur bi étages, un atterrissage vertical et un deuxième étage non récupéré, a atteint une phase opérationnelle et démontré *a priori* la viabilité de la solution. Cette prouesse technologique vient alors remettre en cause toute la manière de concevoir et de financer un lancement spatial. En effet, réutiliser un lanceur permettrait de réduire drastiquement le coût des lancements, puisqu'on conserve la partie la plus chère de celui-ci²², mais aussi d'en accélérer la cadence. De ce fait, on comprend pourquoi la grande majorité des entreprises concurrentes, telle que *Blue Origin*, ont commencé à se tourner vers ce type de technologie, certes difficile à maîtriser, mais si attrayante financièrement. Du moins, nous le verrons, c'est ce que laisse entendre *SpaceX* qui depuis peu se penche sur un nouveau prototype impressionnant de lanceur entièrement réutilisable, *Starship*, qui aura pour but de livrer Mars aux astronautes sélectionnés pour cette mission à l'envergure délirante dont la réalisation reste encore incertaine à ce jour.

A l'heure où l'activité spatiale connaît un véritable deuxième souffle depuis la fin de l'ère de la navette spatiale américaine, ce mémoire a pour but de faire le point sur la question des lanceurs réutilisables. Les sources qui évoquent ce sujet sont encore relativement faibles, notamment parce que c'est un sujet qui reste assez récent mais aussi parce qu'il connaît un développement foudroyant. La réutilisation d'une fusée mono-étage, performance qui restait impossible il y a vingt ans, devient réalité en 2021 et les progrès de l'industrie spatiale ne cessent

²² Falcon 9, SpaceX, <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/> ; Pour une description du Falcon 9, se référer à l'Annexe 1.

d'épater et de passionner. Longtemps réticentes au modèle réutilisable, la plupart des agences spatiales étatiques, à commencer par l'Agence spatiale européenne (ESA), envisagent enfin à le considérer sérieusement pour leurs prochaines flottes de lanceurs. Mais il reste tout de même quelques points à éclaircir. Sur la forme, faire revenir un lanceur sur Terre semble réalisable sans trop de difficultés à partir du moment où l'on sait comment faire, de manière scientifique. Mais sur le fond, tout le monde n'est peut-être pas capable de faire du réutilisable. En effet, le modèle économique instauré par cette nouvelle génération de fusées récupérables apparaît encore comme instable et repose sur de nombreux facteurs qui sont propres à chacun des acteurs du spatial. C'est pourquoi il semble intéressant de plonger dans les rouages de cette industrie et d'essayer de comprendre pourquoi cette technologie, alors qu'elle semble si bien marcher pour *SpaceX*, fait encore l'objet de tant débats quant à sa rentabilité. Finalement, y a-t-il un réel intérêt à se tourner vers le réutilisable en matière de lanceur spatial ? Afin de répondre à cette interrogation, il importe de comprendre pourquoi le lanceur récupérable a tendance à s'affirmer sur le marché du spatial (**Partie 1**), tout en réalisant à quel point il demeure à la fois une solution à la pérennité encore incertaine (**Partie 2**).

PARTIE I : UNE SOLUTION QUI S’AFFIRME SUR LE MARCHÉ SPATIAL :

Depuis plus d’une décennie maintenant, le réutilisable tente clairement de s’imposer parmi les différents modèles de lanceurs employés par les opérateurs du milieu spatial. Si c’est une technologie qui ne date pourtant pas d’hier (*Titre 1*), elle semble néanmoins être une réponse sérieuse aux problématiques rencontrées aujourd’hui par ces nouveaux acteurs privés, voire institutionnels (*Titre 2*).

Titre 1 : Une rupture technologique qui s’inscrit dans le temps :

C’est difficile à croire, mais la réutilisation des engins permettant d’envoyer un objet dans l’espace n’est pas une idée récente. En effet, dès les débuts de l’ère spatiale, les ingénieurs ont bien pris conscience des bénéfices qui pourraient découler de la récupération des lanceurs après leur utilisation : un gain de temps et d’argent en somme. Pourtant, si un véritable intérêt pour la réutilisation semble émerger depuis peu (*Chapitre 2*), il faut avouer qu’elle a connu des débuts modestes, parfois très compliqués (*Chapitre 1*).

Chapitre 1 : Des débuts plutôt compliqués :

Avant de refaire surface, on peut dire que la technique de la réutilisation des lanceurs spatiaux a traversé deux phases. La première est celle du questionnement, des prémices (*Section 1*). Est-il possible scientifiquement de faire revenir une fusée quasiment intacte après l’avoir envoyé au-delà de ce que nos yeux sont capables de voir lorsqu’ils sont tournés vers les cieux? La deuxième phase vient, dans une certaine mesure, en réponse à la première. L’ère de la navette spatiale américaine, lanceur semi-réutilisable probablement le plus célèbre, a permis d’accomplir de grandes choses mais s’est soldée par un échec qui laisse encore un souvenir douloureux (*Section 2*).

Section 1 - Les prémices des lanceurs spatiaux réutilisables :

Christophe Bonnal, responsable des lancements au Centre national d'études spatiales (CNES), affirme que « *l'on sait faire du réutilisable depuis toujours, ou presque* »²³. Selon lui, la récupération et la réutilisation des lanceurs spatiaux demandent de maîtriser des éléments techniques complexes, certes, mais ce n'est pas quelque chose d'insurmontable. En effet, dès les années 60, l'industrie spatiale américaine, avec le soutien de la *NASA*, a commencé à imaginer des lanceurs recyclables pour deux raisons : abaisser les coûts de production et augmenter la fréquence de lancements²⁴. Les premiers concepts sont alors réalisés et trois architectures différentes sont nées. On retrouve le classique lanceur multi-étages capable d'atteindre l'orbite terrestre en larguant ses étages propulsifs. Puis vient le lanceur mono-étage qui lui n'a pas besoin de largué quoique ce soit pour l'atteindre. Enfin, il existe le lanceur aéroporté, moins connu mais toujours actif, capable d'atteindre l'orbite après largage depuis un avion en vol. Nous verrons que tous ont pu être développés, avec une progression différente et une fin tragique pour certains.

Les principaux obstacles à la réutilisation d'un lanceur spatial sont évidemment d'ordre technique dans un premier temps. En effet, avec la technologie de l'époque, même si les avancées sont fulgurantes, il reste encore difficile de pouvoir faire atterrir un engin après l'avoir envoyé dans l'espace à une vitesse de 9,6 kilomètres par seconde. Pour se faire, cela demande de maîtriser entre autre des moteurs réallumables avec poussée modulable, une protection thermique lors de la rentrée atmosphérique, mais également un moyen de piloter et de contrôler le véhicule en plein vol. La complexité de la manoeuvre de redescente a pris énormément de temps aux ingénieurs pour la comprendre et la mettre en œuvre. Enfin, la question de l'usure de moteurs est également un point clé qu'il faut résoudre avant de se lancer dans l'aventure du réutilisable. Si on

²³ Interview de Christophe Bonnal, responsable des lancements au CNES, par Gabriel Voisin, 2021 ; Pour une retranscription de l'interview, se référer à l'Annexe 11.

²⁴ Note du CNES, France-Science, *Les lanceurs réutilisables américains au 1er mars 2021*, <https://france-science.com/les-lanceurs-reutilisables-americains-au-1er-mars-2021/>, consulté le 12 Juin 2021.

veut qu'ils tiennent le coup, ils doivent être surdimensionnés donc complexifiés et alourdis. Or cela entraîne forcément la nécessité d'une structure plus lourde aux parois plus épaisses. Pour Christophe Bonnal, le principal frein au réutilisable est ici : « *on pouvait se donner les moyens de réaliser un tel lanceur mais au lieu d'envoyer dix tonnes de charges utiles, par exemple, on en enverrait beaucoup moins* »²⁵. Car on l'oublie facilement mais un lanceur a pour but principal d'emmener une charge utile, un satellite le plus souvent, en orbite autour de la Terre. Si aujourd'hui certains satellites ne pèsent que quelques kilogrammes²⁶, d'autres pèsent plus de sept tonnes et ont donc une forte incidence sur les conditions du lancement.

La réutilisation du lanceur serait donc synonyme d'une baisse systématique de performance. Le but recherché étant d'abaisser les coûts du lancement, on comprend alors que le volet technico-économique n'est pas encore parfaitement maîtrisé. Nous le verrons, le modèle économique de la réutilisation des fusées reste un point d'ombre qui ne peut pas être surmonté par tout le monde. Durant la période de développement des concepts de lanceurs récupérables, le nombre de lancements n'était pas encore aussi élevé qu'aujourd'hui et il semblerait que l'on préfère envoyer la charge utile que l'on souhaite en y mettant le prix plutôt que de la réduire en même temps que les coûts. En outre, il faut également comprendre que les problématiques qui font surface à l'époque sont différentes. La course à l'espace entre les Etats-Unis et l'Union soviétique bat son plein et surveiller l'ennemi ainsi que l'état de son arsenal devient primordial. Aussi, chaque décollage se doit d'être une réussite pour les uns comme les autres. Sans oublier que cette période est celle des premiers vols habités, le risque qu'implique la réutilisation a pu être un frein à son développement et à son passage en phase opérationnelle. Pourtant, si les débuts du réutilisable paraissent mitigés, l'hésitation laisse rapidement place à la confiance au début des années 70. Un tout

²⁵ Interview de Christophe Bonnal, Responsable des lancements au CNES, 2021, se référer à l'Annexe 11.

²⁶ Le projet *Cubes in Space* organisé par la NASA et *Idoodle Learning* a permis à un groupe d'étudiants de concevoir un mini satellite imprimé en 3D. Ce groupe de l'Université de Technologies et Sciences de Hindustan a mis au point un appareil très léger de 33,39 grammes seulement avec le spécialiste indien de l'impression 3D, *3Ding*.

nouveau programme américain, propulsé dans l'espace par une fusée et capable de revenir sur Terre comme un avion, est censé donner suite au programme Apollo. Ce lanceur semi-réutilisable innovant, symbole de la puissance spatiale américaine de l'époque, va pourtant connaître de nombreux rebondissements.

Section 2 - L'échec du programme de la navette spatiale américaine :

La navette spatiale américaine est sans aucun doute l'engin spatial réutilisable le plus utilisé au XX^{ème} siècle²⁷. Elle est développée dans l'euphorie du succès d'*Apollo 11*, quelques années après les premiers pas de Neil Armstrong et Buzz Aldrin sur la Lune, car la *NASA* voit dans ce programme un moyen d'abaisser enfin considérablement les coûts de ses lancements, durant lesquelles toutes les fusées utilisées sont perdues. C'est d'ailleurs ce qui motive les dirigeants politiques des Etats-Unis à accepter ce nouveau type de lanceur. En effet, à la suite de l'effondrement du programme spatial soviétique, ces derniers ne voient plus vraiment l'intérêt de rassembler un budget colossal dans l'établissement de vols habités ou de tout autre projet d'envergure comme l'a pu être *Apollo* auparavant. Ce qui parvient à faire pencher la balance en la faveur de la navette, c'est la promesse d'une cadence de lancement extrêmement élevée. Ainsi, le coût du kilogramme placé en orbite est ramené à un tarif très avantageux comparé à celui d'un tir par un lanceur consommable. Initialement prévu pour être entièrement réutilisable, le Bureau du Budget (OMB) annonce à la *NASA* en 1971 qu'elle devra se contenter d'une enveloppe de 3,2 milliards de dollars ce qui contraint l'agence à abandonner cette option.

L'agence spatiale américaine se tourne alors vers le semi-réutilisable. Celle-ci est composée de trois sous-ensemble. L'orbiteur est la partie qui abrite la charge utile et les astronautes, tandis que le réservoir externe et les deux propulseurs d'appoint sont largués durant le vol. L'orbiteur, que l'on appelle souvent « *navette* », est donc la partie réutilisable, censée revenir sur Terre tel un planeur

²⁷ De 1981 à 2011, la navette spatiale américaine a effectué un total de 135 vols.

sur une piste d'atterrissage, prêt pour un nouveau décollage²⁸. On compte cinq exemplaires d'orbiteur au cours du programme. Si la navette ressemble en quelque sorte à un avion avec ses ailes, elle décolle verticalement comme un lanceur traditionnel et pèse au total plus de 2 000 tonnes. Ce qui est intéressant c'est que sa capacité d'emport est assez exceptionnelle. Elle est capable de placer en orbite basse 24,5 tonnes de charges utiles et huit astronautes, ce qui la rend extrêmement polyvalente lors des missions qui lui sont confiées. Les premiers vols de la navette spatiale américaine sont des vols non propulsés, c'est-à-dire qu'elle est larguée du dos d'un *Boeing-747* avant d'effectuer un vol plané. Il faudra attendre le 12 avril 1981 pour que la navette *Columbia* effectue son premier décollage vertical. Le coût du développement du programme s'élève finalement à 6,744 milliards de dollars, soit à peine un quart du coût du programme *Apollo*²⁹.

En dix ans, la *NASA* semble avoir mis au point un lanceur spatial semi-réutilisable défiant toute concurrence. En effet, il faut noter que la navette détient par décret un monopole sur le marché américain des lancements de satellites publics, civils et militaires, ainsi que des satellites privés. En comptant sur cela, la *NASA* prévoit la cadence exceptionnelle d'un lancement par semaine. Les débuts de la phase opérationnelle semblent plutôt positifs avec un succès sur le sol américain mais aussi à l'étranger, avec des satellites commerciaux lancés pour d'autres pays que les Etats-Unis. Malheureusement, la navette spatiale montre rapidement ces faiblesses sur un plan financier. A partir de 1985, le bilan économique du programme s'alourdi et la *NASA* admet qu'il sera difficile d'effectuer plus d'un seul lancement par mois. En réalité, la conception de la navette spatiale résulte de compromis techniques directement liés à la restriction budgétaire du spatial au début des années 70 qui rendent les opérations de maintenance beaucoup plus onéreuses que prévu. La remise en état du bouclier thermique de l'engin retarde énormément les réparations après chaque lancement et tout ceci porte les coûts de développement et d'exploitation à 450 millions de

²⁸ Pour mieux visualiser la navette spatiale américaine, se référer à l'Annexe 4.

²⁹ M. WADE, *Shuttle*, Astronautix, 2003.

dollars par lancement. Pour couronner le tout, les tarifs pratiqués par la *NASA* sont figés jusqu'en 1988 ce qui agrandi fortement le gouffre financier³⁰.

Ce qui marque le début du déclin du programme de la navette spatiale américaine est sans aucun doute lié aux deux accidents mortels qui entachent son histoire. Le premier est l'explosion de la navette *Challenger* au décollage le 28 Janvier 1986. Si une mauvaise gestion du programme est pointée du doigt, le rapport d'enquête met en lumière les risques sous-évalués auxquels sont exposés les astronautes lors de l'ascension et du retour dans l'atmosphère. Le lanceur réutilisable commence à montrer ses limites. Tellement que désormais, la loi américaine prévoit que la navette réalisera uniquement les missions qui nécessitent un équipage et met fin à son expérience de lanceur commercial³¹. Le 1er février 2003, c'est au tour de l'orbiteur *Columbia* de s'embraser lors de son retour sur Terre. Ce second drame met la *NASA* dos au mur. Après le décès de quatorze astronautes, le président George W. Bush annonce en 2004 le remplacement de la flotte des navettes spatiales. Avec un dernier vol en 2011, il est clair que le programme est un véritable échec. Dans le même temps, il met à mal la réputation des lanceurs réutilisables que ne sont finalement pas parvenus à abaisser les coûts de lancement en orbite. En 2008, on estime que chaque vol de la navette spatiale se chiffre à 1,5 milliards de dollars, soit un prix bien plus élevé que le prix d'un lancement classique avec étages consommables. Enfin, sans doute en raison de sa complexité, la cadence de lancement n'a atteint que 5% de celle prévue par ces concepteurs³². Désormais dans l'impasse, la réutilisation des lanceurs ne parvient toujours pas à trouver l'équilibre qui lui permettrait de s'imposer sur la scène internationale de l'industrie spatiale. Il faudra attendre 2010 pour qu'une entreprise privée du nom de *SpaceX* lui redonne une chance.

³⁰ D. R. JENKINS, *Space Shuttle : The history of the National Space Transportation System the first 100 missions*, Midland Publishing, 2006, p.288.

³¹ *Ibid.*

³² P. DUGGINS, *Final Countdown : NASA and the End of the Space Shuttle Program*, American Scientist, 2007.

Chapitre 2 : La renaissance de l'intérêt pour les lanceurs réutilisables :

L'ère de la navette spatiale américaine, même si elle ne représente pas l'ensemble des activités spatiales qui prennent place durant cette période, n'a pas laissé que des bons souvenirs aux acteurs du milieu et au grand public. Si le réutilisable a connu suite à cela une période de creux, il revient néanmoins en force notamment grâce à *Space X* qui en fait son porte étendard (**Section 1**). Dès lors, une flopée de lanceurs réutilisables nouvelle génération sont en projet chez nombre d'entreprises du secteur spatial qui semblent emboîter le pas à la société californienne (**Section 2**).

Section 1 - Le pari fou de Space X : l'émergence d'un nouveau standard :

En 2002, l'homme d'affaire Elon Musk, co-fondateur de *Paypal*, crée l'entreprise *SpaceX*. Ce dernier veut s'implanter sur le marché spatial en proposant des lanceurs modernes, capables de diminuer les coûts de mise en orbite de manière à participer à l'essor du spatial civil et commercial. Pour cela, il annonce que les lanceurs qui seront développés par *SpaceX* seront réutilisables, tandis que le programme de la navette spatiale américaine est sur la pente raide et qu'on a tendance à considérer la réutilisation des lanceurs comme une fausse bonne idée au regard du bilan financier qu'elle propose. Pourtant, Elon Musk ne se décourage pas et le premier prototype de lanceur entièrement produit par des fonds privés, le *Falcon 1*, voit le jour en 2006. Il se veut potentiellement réutilisable, mais il n'en fera jamais la preuve. Mais ce qui va réellement faire le succès de la société américaine, c'est son lanceur *Falcon 9* qui est d'une efficacité redoutable. Il réussit son premier vol en 2010 et fascine déjà car il n'a que deux étages au lieu de quatre pour *Ariane 5 et 6* et un seul type de moteur, *Merlin*, contre trois pour *Ariane*. Le *Falcon 9* devient le premier lanceur bi-étage capable de placer des charges utiles en orbite. Même dans sa version consommable, il commence à s'afficher comme un sérieux concurrent sur le marché en partie grâce à sa simplicité et à sa capacité à réaliser des missions variées avec une configuration unique de lanceur, dans une conception que l'on peut qualifier de

« *low cost* », fortement emprunté au secteur de l'aéronautique. Mais là où *SpaceX* prend tout le monde de court, c'est que son lanceur est censé également être décliné en version réutilisable et pouvoir revenir sur Terre intact, à l'endroit exact où il a quitté le sol.

Sans rentrer dans la technique, il peut être intéressant de s'attarder sur le fonctionnement du *Falcon 9*. La première méthode de recyclage prévu par *SpaceX* est relativement simple : des parachutes amortissent la chute des différents étages et on récupère le tout en mer. Mais c'est un échec car il s'avère que les différents étages ne survivent pas à la séparation avec le reste du lanceurs et sont trop endommagés en raison des contraintes thermiques lors du retour sur Terre. En 2011, l'entreprise se tourne vers une nouvelle technologie qui repose sur la récupération du premier étage, équipé d'un train d'atterrissage déployable, devant revenir sur le pas de tir à la suite d'un vol propulsé et d'un atterrissage vertical. Contrairement à un lanceur classique, cela signifie que l'étage conserve une partie du carburant pour sa phase de redescente³³. Le 21 Décembre 2015, *SpaceX* réussit l'impensable et fait atterrir une fusée *Falcon 9* à son point de départ sur la terre ferme³⁴. Cette date marque indéniablement le grand retour du réutilisable au sein du marché spatial et Elon Musk prouve alors à tous qu'il est capable de maîtriser cette technologie. D'ailleurs, s'il paraît assez rustique, le *Falcon 9* a su tout de même répondre à plusieurs problématiques qui, jusqu'alors, n'avaient pas réellement été résolues. Comme le souligne le CNES, « *la possibilité de réduire les coûts par la réutilisation de tout ou partie du lanceur est une idée aussi ancienne que les lanceurs, mais il faut reconnaître à SpaceX le mérite d'avoir démontré que c'était techniquement et économiquement possible, à condition de procéder par étapes* ». En effet, le premier étage emploie une propulsion pour annuler sa vitesse lors du retour et se stabiliser au cours d'une rotation assez spectaculaire avant de déployer ses panneaux cellulaires et son train d'atterrissage. Cet atterrissage vertical, dit « *toss back* », est une véritable prouesse et sera répété par la suite au cours d'autres lancements, ce qui prouve que la chance n'a rien à

³³ Sur les 411 tonnes d'ergols emportés, environ 50 tonnes ne sont pas consommés au moment du largage de l'étage, mais sont utilisés pour le retour sur Terre.

³⁴ E. MUSK, *Background on Tonight's Launch*, SpaceX, 21 décembre 2015.

voir là-dedans. S'en suit une ascension fulgurante pour *SpaceX* qui aujourd'hui domine clairement le marché spatial américain.

Mais qu'est ce qui fait que l'entreprise soit toujours en activité, avec à ce stade 64 réutilisations sur sa gamme *Falcon 9*³⁵, et sans que son bilan financier ne soit vraiment inquiété? En effet, la question est légitime lorsque l'on se remémore l'échec de la navette américaine. En réalité, tout repose sur le modèle économique de *SpaceX* qui passe par une production en série sur un même site, avec une intégration verticale poussée à l'extrême (l'entreprise fabrique et commercialise) et très peu ou pas de sous-traitants, ce qui lui permet de contrôler toute la chaîne de conception et de fabrication du lanceur, et ainsi d'être économiquement compétitif. Mais la grande force de *SpaceX*, c'est que c'est une entreprise privée, sans contrainte institutionnelle, à la différence de l'Europe par exemple dont les entreprises sont soumises à des contraintes de retour financier entre divers Etats. Grâce à cette liberté et à un lanceur réutilisable performant, sans oublier des fonds colossaux, elle parvient à casser les prix du marché et défier toute concurrence. Nous le verrons plus en profondeur par la suite, le coût du lancement grâce à la maîtrise de la réutilisation baisse grandement selon *SpaceX* qui réalise une économie de 34% sur le prix d'un lancement classique³⁶. Enfin, en démontrant sa fiabilité et avec ses prix attractifs, Elon Musk a pu décrocher de gros contrats avec la *NASA*, notamment ceux concernant le ravitaillement de la station spatiale internationale et récemment pour construire l'atterrisseur lunaire dans le cadre du programme *Artemis* qui prévoit le retour de l'homme sur la Lune³⁷. C'est également grâce à une fusée *Falcon 9* que l'équipage de l'ISS s'est relayé le 20 mai 2021 à bord de la capsule *Crew-Dragon*, deuxième vol habité fructueux au départ du sol américain depuis 2011. En parallèle, *SpaceX* développe son lanceur super lourd, *Falcon Heavy*, ainsi que son nouveau prototype de lanceur mono-

³⁵ Falcon 9, SpaceX, <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9/>, consulté le 12 juillet 2021.

³⁶ S. PRIMAS, J.-M. BOCKEL, *Rapport d'information n° 131 sur la politique des lanceurs spatiaux (2019-2020), fait au nom de la commission des affaires économiques et de la commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées*, déposé le 19 novembre 2019.

³⁷ Le Figaro, *La Nasa choisit SpaceX pour sa prochaine mission vers la Lune*, 16 avril 2021, <https://www.lefigaro.fr/sciences/la-nasa-choisit-spacex-pour-sa-prochaine-mission-vers-la-lune-20210416>, consulté le 21 Juin 2021.

étage le *Starship*, dont le modèle SN15 est revenu intact sur Terre après un vol le 6 mai 2021. Le succès de l'entreprise, même si on comprend qu'il repose sur un modèle économique propre, a crédibilisé ce qu'on appelle le « *New Space* », ces jeunes acteurs du spatial qui se sont développés en partie sur des financements privés et qui s'appuient sur la réutilisation pour concrétiser leurs projets. Si *SpaceX* en est le leader, nous constaterons peut-être une tendance au sein du marché spatial à envisager le réutilisable comme une sérieuse option pour les lanceurs de demain.

Section 2 - L'avènement d'une nouvelle génération de lanceurs réutilisables :

Depuis l'émergence de *SpaceX* sur le marché du spatial, beaucoup d'autres entreprises ont décidé de se lancer dans l'aventure en se basant sur un financement privé. Certaines ont échoué à l'image de *Beal Aerospace* ou ont dû faire face à d'importantes difficultés comme *Rocketplane Kistler*. D'autres parviennent quand bien même à suivre la marche. C'est le cas de l'entreprise *Blue Origin* créée en 2000 par Jeff Bezos, également fondateur d'*Amazon*. Si elle voit le jour peu avant l'entreprise d'Elon Musk, le développement du lanceur réutilisable de *Blue Origin* suit celui du *Falcon 9* de très près et parvient même à effectuer un vol d'essai avec atterrissage un mois avant son concurrent, le 23 Novembre 2015. En effet, le lanceur *New Shepard* réalise l'exploit sans encombre. En revanche, la prestation est bien moins impressionnante que celle de *Falcon 9* car il est beaucoup plus léger et s'élève à une altitude plus basse : un engin plus facile à diriger en résumé. On comprend là que les ambitions des deux sociétés sont distinctes : *Blue Origin* semble destinée au divertissement et au tourisme spatial, dans une optique commerciale³⁸. Du moins, c'est ce qui était prévu au départ puisque depuis 2016, elle développe le *New Glenn*, un lanceur lourd capable de placer 45 tonnes en orbite basse et 13 tonnes en orbite de transfert géostationnaire. Son premier vol est programmé pour 2022 alors que Jeff Bezos a participé au premier vol habité

³⁸ P. MONNIER, usinenouvelle.com, *Pourquoi l'exploit d'Elon Musk avec SpaceX dépasse celui de Jeff Bezos avec Blue Origin*, 2015, <https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-l-exploit-d-elon-musk-avec-spacex-depasse-celui-de-jeff-bezos-avec-blue-origin.N370613>, consulté le 12 Juillet 2021.

exécuté par son *New Shepard 4* à l'occasion du 52ème anniversaire de la mission *Apollo 11*.

Si aux Etats-Unis, la voie du réutilisable semble ouverte, elle ne l'est pas encore partout. Dans un premier temps, il faut bien saisir que beaucoup d'entreprises, institutionnelles ou commerciales, fabricantes de lanceurs sont contraintes d'attendre leur prochaine flotte avant de se lancer dans le récupérable. En effet, pour que la réutilisation porte ses fruits, il faut bien entendu que le lanceur soit de base conçu pour être réutilisé. Un lanceur classique non prévu pour être récupéré engendrerait des coûts monstrueux et prendre l'initiative de le décliner en mode réutilisable serait trop chronophage, voir irréalisable. C'est le cas du lanceur *Ariane 6* qui, conçu en 2014, aura probablement une durée de vie moins longue que celle d'*Ariane 5*. En effet, il est à noter que les Européens ont fait le choix prudent du recours à des technologies maîtrisées par rapport à celui de la rupture technologique du réutilisable, à laquelle les acteurs européens ne croyaient pas en 2014. De ce fait, il existe indéniablement un risque que le lanceur ne soit pas durablement compétitif face à *SpaceX*. C'est pourquoi les acteurs du spatial européen commencent à étudier très sérieusement l'option de la réutilisation. Au sein de l'ESA, du CNES, du DLR et d'*ArianeGroup*, une série de projets liés à la réutilisation ont été lancés. Ils portent les noms de *Callisto*, *Themis* ou encore *Prometheus* et sont les premières pierres d'un éventuel lanceur récupérable. L'objectif affiché n'est pas encore de réaliser un lanceur de ce type mais plutôt de maîtriser les techniques qui y sont associés pour éventuellement décider d'ici quelques années si le jeu en vaut la chandelle. Le projet *Callisto*, proposé dès 2015, réunit les efforts des agences spatiales française, allemande mais aussi japonaise. Ce véhicule expérimental à très petite échelle permettrait de développer les logiciels nécessaires pour la phase d'un retour de premier étage réutilisable.

Callisto n'est cependant pas une plateforme suffisante pour appréhender tous les défis liés à la réutilisation. D'une part, il reste un démonstrateur très léger et d'autre part, sa motorisation n'est pas en ligne avec ce qui se dessine pour le futur de la propulsion spatiale européenne. En effet, l'Europe mise tout sur le

nouveau moteur *Prometheus* ultra polyvalent, économe et fonctionnant au méthane³⁹. Lors du dernier conseil interministériel dédié au budget de l'ESA, le projet a réussi un financement complet. Peu cher, à la fois lourd et léger, il est pensé dès le départ pour la réutilisation avec entre trois et cinq vols pour chaque moteur. L'ESA prévoit un coût d'un million d'euros à la fabrication, soit dix fois moins que les moteurs *Vulcain 2.1* que l'on trouve sur *Ariane 5* et *6*. Le but est d'ensuite ajouter trois de ces moteurs à un nouveau prototype de démonstrateur réutilisable appelé *Themis*, plus proche des premiers étages orbitaux réutilisables que l'on trouve sur le marché actuellement. L'ensemble de ces projets devraient amener l'ESA, le CNES et *ArianeGroup* à un bon niveau de maîtrise technologique de la récupération et de la réutilisation au milieu de la décennie. C'est alors que seront prises les décisions concernant les suites à donner à *Ariane 6*. La plus probable d'entre elles reste *Ariane Next*, une fusée bi-étage avec un premier étage réutilisable prévu pour 2030, et dont le coût de lancement, nous l'évoquerons plus tard, viendrait concurrencer ce qui se fait actuellement⁴⁰.

Outre l'Europe, la réutilisation prend position également en Chine, pays qui rappelons-le, a effectué le plus de lancement en 2021. Le 22 Décembre 2020 a eu lieu le premier décollage du lanceur *Longue Marche 8* depuis la base spatiale de Wenchang et confirme un peu plus la maîtrise de la réutilisation pour les chinois⁴¹. Lors de ses prochains vols, en 2021, des tests d'atterrissage vertical seront menés avec pour objectif d'obtenir à l'horizon 2025 un lanceur réutilisable, inspiré de la *Falcon 9* de *SpaceX*. Les Chinois, qui proposeront ce lanceur sur le marché international, prévoit un rythme de croisière de 10 à 20 lancements par an, soit une cadence plutôt soutenue. Tous ces projets internationaux témoignent donc de l'importance accordé à récupérer les lanceurs désormais. Il n'est donc pas illogique de parier que la réutilisation, *a minima* du premier étage, devienne le

³⁹ ESA, *ESA moves ahead on low-cost reusable rocket engine*, Juin 2020, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Future_space_transportation/ESA_moves_ahead_on_low-cost_reusable_rocket_engine, consulté le 23 Février 2021.

⁴⁰ CNES, *Ariane Next regarde vers la prochaine décennie*, <https://ariane6.cnes.fr/fr/lanceurs-ariane-next-regarde-vers-la-prochaine-decennie>, consulté le 15 Mai 2021.

⁴¹ S. ROUAT, Science et Avenir, Premier vol du lanceur Longue Marche 8 : la Chine se lance dans le réutilisable, 2020, https://www.sciencesetavenir.fr/espace/premier-vol-du-lanceur-longue-marche-8-la-chine-se-lance-dans-le-reutilisable_150364, consulté le 21 Mai 2021.

nouveau standard technologique, tant en raison des gains économiques que des exigences environnementales qui devraient s'appliquer à la filière à l'avenir. C'est pourquoi personne ne veut rater le tournant du réutilisable⁴².

Titre 2 : Le réutilisable en réponse aux problématiques actuelles :

Si réutiliser ses lanceurs devient une vraie tendance comme nous avons pu le constater précédemment, c'est aussi parce que cela répond entre autres à certaines problématiques actuelles et qui jusqu'alors n'avaient pas pu être contournées ou tout simplement n'avaient pas été soulevées. En effet, la réutilisation repose sur une technologie avantageuse qui permet aux acteurs du spatial de se maintenir sur le marché (***Chapitre 1***) mais également en phase avec les exigences environnementales qui sont plus pressantes que jamais (***Chapitre 2***).

Chapitre 1 : Une technologie plus avantageuse :

Avec la réutilisation, la place au doute n'est pas permise. Il est nécessaire de se baser sur une technologie fiable (***Section 1***) et sans danger pour obtenir la confiance des clients mais aussi parce que sans cela, le nombre de lancements qui permet d'obtenir, *a priori*, le rendement attendu, n'est pas réalisable et l'ensemble ne tient plus la route. Car oui, le réutilisable s'il inspire confiance, permet avant tout de décrocher des contrats et d'envoyer un nombre de charges utiles considérable en orbite (***Section 2***).

Section 1 - Des lancements dotés d'une technologie de plus en plus fiable :

Le premier argument qui a pu être amené allant à l'encontre de la réutilisation concerne l'usure. En effet, par principe, un lanceur qui a servi plusieurs fois est susceptible de s'user plus facilement et de ne pas répondre à la fiabilité à laquelle on doit s'attendre. Il est vrai que lors des phases de décollage, de séparation des étages et surtout du retour sur Terre, les lanceurs spatiaux subissent d'énormes pressions en raison de leur haute vitesse mais également de la

⁴² C. PROCACCIA, B. SIDO, *La politique spatiale européenne, rapport fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, 2015.

chaleur à laquelle ils sont confrontés. A cela s'ajoute les différentes manœuvres en vol visant à ralentir la chute et qui poussent inévitablement les moteurs du booster dans leurs retranchements. Bien que l'on sache réparer le lanceur, son usure est certaine et ne pourra jamais être complètement évitée. Cela revient à questionner sérieusement la fiabilité des lanceurs usagés. Quelle entreprise voudrait prendre le risque de placer son satellite en orbite via un lanceur qui a déjà été utilisé quatre ou cinq fois? Et surtout, depuis plus récemment, quel astronaute ne serait pas réticent à l'idée de rejoindre l'espace en se plaçant dans une capsule au sommet d'un booster rempli de tonnes d'ergols, et dont les neuf moteurs ont déjà auparavant servi ?

Ces interrogations sont légitimes car on le sait, et nous l'aborderons dans la suite de ce mémoire, le spatial n'est pas un secteur sans risque, loin de là. L'histoire nous l'a démontré malheureusement à plusieurs reprises et des échecs subsistent encore aujourd'hui. Mais comment progresser sans échec? En réalité, ce sont eux qui permettent d'assurer à la réutilisation une fiabilité de plus en plus poussée. Lorsque l'on utilise un lanceur consommable, faire évoluer sa technologie et prendre en considération certains changements ou améliorations nécessaires ne sont pas forcément une priorité absolue. Tant que celui-ci parvient à l'orbite et que la méthode fonctionne, il retombe sur Terre et il ne reste plus qu'à répéter l'opération. Or, avec le réutilisable, on ne peut pas se permettre ce genre de chose puisque chaque vol étant différent, le lanceur reviendra au sol dans une configuration et dans un état différent systématiquement. Cela permet alors aux ingénieurs d'effectuer des ajustements, des corrections progressives des défauts qui sont révélés au fur et à mesure des multiples utilisations et donc de connaître le lanceur dans son ensemble⁴³. Appréhender le processus de récupération sous chaque angle apporte une fiabilité accrue qui fait que la réutilisation est désormais de plus en plus sûre. Et ceci n'est pas négligeable pour des entreprises comme *SpaceX* ou *Blue Origin* qui place en orbite des charges utiles pour leurs clients. Le

⁴³ Académie Nationale de l'Air et de l'Espace, Commission Espace, Rapport du groupe sectoriel sur le transport spatial, <http://www.academie-air-espace.com/upload/doc/docComm/TransportSpatial.pdf>

prix reste un critère de choix pour effectuer un lancement, certes, mais la fiabilité est probablement déterminante.

Nous l'avons compris, pour devenir la norme de demain, la réutilisation d'un lanceur, quel qu'il soit, doit rassurer. Si elle rendait l'Europe hésitante lors des premiers essais du *Falcon 9* de *SpaceX* au début des années 2010, il semble que cette fiabilité ne soit plus à démontrer désormais, du moins pour ce prototype. Le lanceur de *SpaceX* a maintenant été réutilisé maintes fois, avec un délai exceptionnel de 27 jours seulement entre deux vols pour le même premier étage. Cette performance inégalée par d'autres à l'heure actuelle, illustre bien à quel point le *Falcon 9* est maîtrisé par ses concepteurs qui comptent réutiliser le même booster jusqu'à l'échec pour en tester les limites⁴⁴. Ce travail d'amélioration constante que nous évoquions précédemment se reflète parfaitement à travers la conception du nouveau *Starship* qui, après plusieurs crashes, est parvenu à revenir sur Terre intact en mai 2021. En domptant sa machine, *SpaceX* a convaincu la *NASA* de contracter avec elle pour la modique somme de 2,9 milliards de dollars en 2021⁴⁵. Mais si la réutilisation répond à l'exigence de fiabilité, elle permet aussi de remplir la fonction principale d'un lanceur : placer en orbite des charges utiles.

Section 2 - La mise en orbite de nombreuses charges utiles :

Outre le fait d'abaisser considérablement les coûts, la réutilisation des lanceurs spatiaux est censée permettre d'obtenir une cadence de tir élevée. Si nous ne traitons pas de suite de la corrélation entre ces deux facteurs, attardons nous à vérifier dans un premier temps si cette affirmation s'avère véridique. Logiquement, lorsque qu'une fusée est de type consommable, les différents étages qui la composent sont largués lors de leur séparation et sont détruits. Cela implique donc de devoir repasser impérativement par une nouvelle phase de

⁴⁴ B. LOUET, SciencePost, *SpaceX repousse les limites de la réutilisabilité de ses boosters*, 2021, <https://sciencepost.fr/spacex-repousse-les-limites-de-la-reutilisabilite-de-ses-boosters/>, consulté le 13 juillet 2021.

⁴⁵ N. RAULINE, Les Echos, *La Nasa attribue à SpaceX le contrat pour aller sur la Lune*, 2021, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/la-nasa-attribue-a-spacex-le-contrat-pour-aller-sur-la-lune-1307703>, consulté le 12 Mai 2021.

fabrication pour avoir un lanceur neuf. A l'inverse, le fait de pouvoir réutiliser un lanceur, en principe, doit diminuer le temps qu'il faut pour le remettre en état de fonctionnement après un usage. On ne repart pas de zéro et selon la configuration du vol qui vient d'avoir lieu, le premier étage peut revenir sur Terre plus ou moins abîmé. En tout état de cause, il paraît impossible de faire voler de nouveau un lanceur sans qu'il soit réparé, vérifié et certifié pour des questions évidentes de sécurité. Dans l'aéronautique, rien n'est laissé au hasard en ce qui concerne ce genre de vérifications et il en va de même dans le spatial, dans la mesure où les engins sont confrontés à des chocs généralement bien plus puissants que de simples avions de ligne.

Ce laps de temps qu'offre la réutilisation, les acteurs du spatial qui la pratiquent le mettent à profit. A ce titre, il est intéressant de comparer les fréquences de lancements entre une entreprise qui effectue des lancements consommables et l'autre dont les lanceurs sont récupérables. Sur l'année 2020, on constate que le lanceur *Ariane 5* de l'Agence spatiale européenne, non réutilisable, n'a effectué que trois lancements. De l'autre côté, le lanceur *Falcon 9* de *SpaceX* en a réalisé 25. Cet énorme écart n'est pas forcément dû au fait que le lanceur soit réutilisable ou non. Il est vrai qu'on ne lance pas une fusée pour rien et chaque lancement est préparé, soit pour répondre à la demande d'un client, privé ou public, soit pour servir ses propres intérêts comme il arrive à *SpaceX* de le faire pour mettre en orbite sa constellation de satellites *Starlink*. Mais quoiqu'il en soit, en théorie, la réutilisation permet la mise en orbite de nombreuses charges utiles en un temps restreint grâce à une cadence de production tout aussi élevée. Les russes ont également une cadence de lancement plutôt grande en 2020 avec 15 lancements au cours de l'année mais c'est en grande partie grâce à leurs lanceurs *Soyouz* qui sont d'une technologie qui n'a pas évolué depuis des décennies et peu onéreuse même si cela représente tout de même dix lancements de moins que le *Falcon 9*. Enfin, la Chine a une énorme cadence de lancements sur l'ensemble de sa gamme de *Longue Marche*, dont 11 pour la *Longue Marche 2*, qui encore une fois n'est pas réutilisable.

Pour une entreprise qui souhaite s'imposer sur le marché, avoir une forte cadence de lancement figure parmi les objectifs afin d'obtenir de la visibilité et multiplier les contrats par la suite. En effet, si réutiliser est synonyme de forte cadence de tirs, alors forcément cela est supposé entraîner une réduction du coût du lancement. Par exemple, en 2018, le prix par kilogramme de la masse mise en orbite publié est de 17 800 euros pour *Ariane 5* (ESA) , de 25 842 euros pour *Atlas V* (USAF), de 28 129 euros pour *Delta IV* (Boeing / USAF) et de seulement 7 625 euros pour le *Falcon 9* de *SpaceX*⁴⁶. On comprend par là que pour diminuer le prix de l'accès à l'espace, une forte cadence de lancement serait impérativement nécessaire. Pourtant, nous ne manquerons pas de revenir dessus plus tard, il semblerait que ce ne soit pas si évident que cela. Car en effet, si le CNES reconnaît que les gains potentiels peuvent être moins élevés si la cadence de tir est faible, l'intérêt de la réutilisation de dépendrait peut-être pas de la cadence au premier ordre. La réutilisation viendrait optimiser le rythme des lancements mais ne serait pas la seule responsable en réalité. Quoiqu'il en soit, il est clair qu'une gamme de lanceurs classiques consommables, de par sa nature, effectuera forcément moins de lancement au cours de sa durée de production et d'utilisation qu'un lanceur récupérable. Mais si cette technologie a permis de faire progresser à grands pas dans le domaine, elle participe également à répondre aux enjeux environnementaux dont le spatial, au même titre que l'aviation, est aux premières loges.

Chapitre 2 : Une technologie en phase avec les exigences environnementales et la transition écologique :

Alors que le secteur de l'aéronautique fait face à de nombreuses critiques visant à mettre en lumière l'impact environnemental de celui-ci, le secteur spatial n'attend pas d'être ciblé et prépare d'ores et déjà sa transition vers une industrie plus respectueuse et sensible aux enjeux climatiques qui doivent être plus que jamais une priorité. A ce titre, la réutilisation occupe une place de premier choix puisqu'elle permet une réduction des débris orbitaux et terrestres (**Section 1**) mais

⁴⁶ G. PRADELS, E. JOLIVET, *Des solutions low cost disruptives pour le secteur spatial*, dans Le Journal de l'école de Paris du Management, vol. 132, 2018, p. 8-14.

contribue aussi à réduire l'impact environnemental de chaque lancement de fusée (*Section 2*).

Section 1 : Vers une réduction significative des débris orbitaux et terrestres :

Si la pollution est particulièrement préoccupante sur notre planète, on pourrait penser que l'espace, en raison de son infinité et de son vide permanent, en est totalement dépourvu. Or, c'est loin d'être le cas. En effet, la pollution spatiale est un véritable problème qui préoccupe les acteurs du milieu seulement depuis quelques années. En France, le CNES en a d'ailleurs fait une priorité. Un débris spatial, ou débris orbital, peut se définir comme « *un objet artificiel en orbite qui n'est pas fonctionnel* »⁴⁷. Ils correspondent tant bien aux objets entiers qui gravitent autour de la Terre tels que des satellites hors service ou des étages supérieurs de lanceurs, mais aussi de fragments de ces derniers résultant d'explosion ou de détérioration avec le temps. Cela représenterait des millions de débris se déplaçant à une vitesse extrêmement élevée. On compte environ 34 000 objets de plus de dix centimètres en orbite basse pour l'année 2019 et ce chiffre ne fait qu'augmenter. Le risque de collision en orbite est immense et peut causer d'énormes dégâts puisque la taille du débris n'est pas proportionnelle à la taille des dommages qu'il peut engendrer. Il est malheureusement impossible de les éliminer. On peut seulement tenter de les éviter, à l'instar de l'ISS qui a manœuvré 5 fois en 2015 pour dévier sa trajectoire de plusieurs débris spatiaux. S'ajoute à cela le fait que la pollution spatiale, à terme, risque de créer une couche de débris qui empêcherait les scientifiques d'observer correctement l'espace depuis la Terre. Récemment, la Chine a fait parler d'elle en faisant exploser un de ses satellites, créant par la même occasion des centaines de milliers de débris.

Pourtant, le Traité sur l'espace de 1967, est un des rares textes supranational qui établit les principes de droit spatial international, notamment celui de la responsabilité de l'Etat, tant pour ses propres activités spatiales que pour celles

⁴⁷ CNES, *Débris spatiaux : Où en est-on ?*, 2017, <https://cnes.fr/fr/dossier-debris-spatiaux-ou-en-est>, consulté le 21 Mars 2021.

de ses nationaux⁴⁸. Il est signé notamment par les Etats-Unis, le Royaume-Unis, la France, la Chine et l'Union soviétique. Son article 6 prévoit que « *Les États 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* »⁴⁹ et l'article 7 étend cette responsabilité du fait des activités des Etats aux dommages causés par leurs objets. Paradoxalement, la Convention sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux de 1972 dispose dans son article 3 que : « *En cas de dommage causé, ailleurs qu'à la surface de la Terre, à un objet spatial d'un État de lancement ou à des personnes ou à des biens se trouvant à bord d'un tel objet spatial, par un objet spatial d'un autre État de lancement, ce dernier État n'est responsable que si le dommage est imputable à sa faute ou à la faute des personnes dont il doit répondre* »⁵⁰. Il paraît peu probable que les débris non fonctionnels dérivant depuis des années, difficilement identifiables et causant un dommage puissent être rattachés à la faute d'un Etat. En réalité, le droit spatial souffre de l'ancienneté des traités qui n'ont pas pris en compte à l'époque de leur signature la question de l'encombrement de l'espace. Il ne semble donc pas exister de devoir de dépollution qui lient les Etats sur le plan international⁵¹. En revanche, la France est à ce jour le seul pays à avoir une loi qui traite des débris spatiaux dans une optique de contrôle des débris générés, de protection des populations au sol et dans l'espace et de limitation des risques de collision⁵². La loi sur les opérations spatiales promulguée le 10 décembre 2010

⁴⁸ R. S. JAKHU, P. S. DEMPSEY, *Routledge Handbook of Space Law*, Routledge Handbooks, 2017, p. 37.

⁴⁹ 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 célestes (1966, entrée en vigueur : 1967), Article 6.

⁵⁰ Convention sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux (1972, entrée en vigueur : 1972), Article 3.

⁵¹ Q. GUEHO, *La pollution spatiale, reflet des limites du droit international public, Etude de l'encombrement spatial et de son environnement juridique : une démonstration des lacunes du droit de l'espace extra-atmosphérique*, Université Paris II Panthéon-Assas, 2020, p. 11.

⁵² Loi n°2008-518 du 3 juin 2008 relative aux opérations spatiales.

prévoyait une période transitoire de dix ans pour que les différents opérateurs puissent adapter leurs véhicules, lanceurs et matériels à ces exigences. Elle définit un dommage provoqué par une activité spatiale comme « *toute atteinte aux personnes, aux biens, et notamment à la santé publique ou à l'environnement directement causée par un objet spatial dans le cadre d'une opération spatiale* ». Par conséquent, le dommage causé à l'environnement par les activités spatiales est pris en compte par le droit français.

S'il est important de réduire l'impact des débris dans l'espace, c'est aussi parce l'envoi d'engins spatiaux entraîne inévitablement des conséquences dramatiques à la surface de notre planète. Les satellites ont une durée de vie limitée par leurs réserves d'énergie, de carburant et, pour ceux qui circulent sur une orbite basse, par l'atmosphère qui tend à les freiner et finalement les pousser à retomber sur Terre. Certains objets sont voués à rester des millions d'années en orbite lorsque d'autres se désintègreront à leur entrée dans l'atmosphère ou s'échoueront à la surface. Car en effet, lors de la rentrée atmosphérique, si une partie des objets est détruite en raison de la chaleur, il arrive que d'autres subsistent du fait de leur forme ou de la nature des matériaux qui les composent⁵³. La rentrée peut être « *contrôlée* », ce qui signifie que l'on fait en sorte que l'objet tombe dans une zone non habitée, le plus souvent un océan. Si elle est dite « *naturelle* » alors l'objet peut tomber absolument n'importe où. Même si le risque liée à la retombée est très faible⁵⁴, l'explosion du marché spatial et du nombre d'objets en orbite le multiplie grandement. La réutilisation des lanceurs spatiaux est indéniablement un moyen de limiter la pollution terrestre et extra-atmosphérique. Même si sur les lanceurs semi-récupérables les plus classiques, seul le premier étage est récupéré, cela contribue déjà à faire baisser fortement le nombre de débris orbitaux dérivant autour de la Terre à chaque lancement. De plus, la rentrée atmosphérique se fait toujours de manière contrôlée afin de

⁵³ Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, *Stratégie et recherche spatiale*, 2019, https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid58651/www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid58651/espace-et-developpement-durable.html#sommaire_faq, consulté le 24 Mai 2021.

⁵⁴ A ce jour, plus de 20 000 objets d'une taille supérieure à 10 cm sont rentrés sur Terre sans jamais faire de victime.

pouvoir réceptionner l'étage dans un bon état, ce qui participe à la protection des océans, des terres et des populations. On peut imaginer qu'à terme, si les lanceurs mono-étage parviennent à être entièrement développés dans une configuration réutilisable, il ne sera alors plus question de larguer quoique ce soit en dehors de la charge utile. La réutilisation semble donc en toute logique être un pas en avant vers une meilleure gestion de l'impact environnemental du spatial.

Section 2 : Un moyen d'abaisser considérablement l'impact environnemental des lancements :

Nous l'avons compris, l'espace extra-atmosphérique mais aussi certaines zones du globe peuvent se voir encombrées par les différents engins envoyés dans l'espace ou retombant sur Terre lorsqu'ils ne sont plus actifs. S'il peut paraître sidérant d'utiliser un lanceur comme *Ariane 5*, d'un coût équivalent à celui d'un petit avion de ligne et de le jeter environ 30 minutes après s'en être servi, les lancements spatiaux génèrent une autre forme de pollution dont il faut s'inquiéter. Le voyage vers l'ISS de Thomas Pesquet en 2021 a émis par exemple un total de 1150 tonnes de *CO2* selon *SpaceX*, l'équivalent de 150 fois le tour de la Terre en voiture. Si ce chiffre peut faire froid dans le dos, il doit être néanmoins relativisé. En effet, la phase de vol en elle-même, bien qu'elle soit impressionnante, n'est pas celle qui a le plus gros impact environnemental. Par exemple, un lancement de fusée *Ariane 5* ou encore *Soyouz* a un effet limité : les produits émis lors de la combustion des ergols sont concentrés autour de la trajectoire et se diffusent ensuite dans l'atmosphère en quantités trop faibles pour avoir un réel impact. Pour illustrer ceci, ayons en tête que la pollution en équivalent *CO2* pour cinq lancements *Ariane 5* équivaut à un aller-retour Paris-Cayenne avec un *Boeing-747*⁵⁵. Pour autant, ce n'est pas un raison pour ne pas s'attacher à réduire cette pollution. Aussi, à Kourou en Guyane française et grâce au CNES, les lancements font l'objet d'une surveillance permanente. Pour chaque lancement, un « *Plan de mesure environnement* » est mis en place et prévoit des mesures de la qualité de l'eau, de l'air, de la végétation ainsi que de la faune

⁵⁵ Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, *Op. cit.*

aquatique. De plus la loi spatiale française que nous avons évoquée précédemment exige des acteurs du spatial une surveillance de l'ensemble des impacts environnementaux de leurs activités qui doivent s'inscrire dans le cadre d'un système de management certifié ISO 140001⁵⁶.

L'impact environnemental des lanceurs est bien plus grand durant leur phase de fabrication que durant la phase de lancement. En effet, les activités industrielles en amont qui visent à construire, tester et faire marcher un lanceur spatial arrivent nettement en tête. Il est vrai que des réflexions sont actuellement menées en ce qui concerne la conception des futurs engins spatiaux pour inciter le marché à développer et se servir de technologies les plus respectueuses de l'environnement. A ce titre, la recherche se tourne comme pour le secteur aéronautique, vers des carburants très peu polluants pour les futurs lanceurs ou encore des matériaux de fabrication pour la satellites qui seront totalement désintégrés lors de leur rentrée atmosphérique au terme de leur utilisation. Mais à ce jour, la technologie qui tient le plus ses promesses reste la réutilisation. Par essence, lorsque le lanceur est réutilisable, chaque élément récupéré n'a pas besoin d'être refabriqué entièrement⁵⁷. Il est vrai qu'à l'exception des lanceurs mono-étage, qui commencent doucement à faire leur apparition à l'image du *Starship* de *SpaceX* ou encore du lanceur aéroporté *Space2Ship* de *Virgin Galactic*, dans le cadre d'un lanceur multi-étage, seul le premier revient sur Terre. Mais c'est sans aucun doute la partie du lanceur qui nécessite le plus d'attention et génère le plus de pollution durant la phase de fabrication. D'abord parce que c'est celle qui supporte l'ensemble des moteurs-fusées, mais aussi parce qu'elle contient toute la technologie embarquée qui lui permet d'être pilotée en vol et de revenir intact au sol.

La production des matériaux et l'assemblage de la fusée représenterait environ 30% de l'ensemble de l'impact écologique que peut avoir un lancement et

⁵⁶ CNES, *Op. cit.*, *Débris spatiaux : Où en est-on ?*.

⁵⁷ Note n°9 de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, *Les lanceurs spatiaux réutilisables*, Janvier 2019, http://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/opepst/quatre_pages/OPECST_2019_0004_note_lanceurs_spatiaux_reutilisables.pdf

jusqu'à 70% des indicateurs environnementaux comme l'eutrophisation et la toxicité en ce qui concerne *Ariane 5*⁵⁸. Cela est notamment dû à la production de l'acier qui constitue la structure du lanceur mais également à la production d'énergie qui en résulte. Pourtant, tout ceci sont des éléments auxquels on ne pense pas forcément lorsque l'on observe le décollage d'une fusée. Or, prendre en compte le cycle de vie total du lanceur est indispensable pour bien saisir l'impact environnemental qu'il peut avoir. La réutilisation permettrait de rallonger ce cycle de vie plus de dix fois pour le moment comme nous l'a démontré *SpaceX* avec son *Falcon 9*. En utilisant plusieurs fois les mêmes moteurs et les mêmes structures de lanceurs, on parvient à limiter la production et l'assemblage. Ainsi, en tentant de devenir le modèle standard de demain, le réutilisable apporte avec lui le recyclage sur le marché spatial et met en lumière les points qui doivent être améliorés au sein de l'industrie.

⁵⁸ L. PATOUIILLARD, Radio-Canada, *Quelle est l'empreinte environnementale des missions spatiales?*, Moteur de recherche, émission du 12 Novembre 2020, <https://ici.radio-canada.ca/ohdio/premiere/emissions/moteur-de-recherche/segments/chronique/209190/pollution-espace-navettes-carbone-environnement>.

PARTIE II - UNE SOLUTION A LA PÉRENNITÉ INCERTAINE

Nous l'avons vu, la technologie des lanceurs spatiaux réutilisables est indéniablement une solution qui tend grandement à s'affirmer sur le marché du spatial. Néanmoins, de nombreux aspects de celle-ci demeurent encore fragiles et sont à même de remettre en cause sa pérennité. Au premier plan, on retrouve le point noir du réutilisable, à savoir sa rentabilité économique souvent controversée (**Titre 1**). Enfin, il ne faut pas oublier qu'avec cette nouvelle méthode, de nouveaux risques apparaissent également. Tout l'enjeu repose alors sur la capacité des acteurs du milieu à les maîtriser (**Titre 2**).

Titre 1 - Une rentabilité économique encore controversée :

La rentabilité économique des lanceurs spatiaux réutilisables est certainement l'aspect qui fait le plus douter. Tellement que certains, notamment en Europe, ont directement pensé que se lancer dans l'aventure du réutilisable était une option à reconsidérer sérieusement et que des entreprises privées telle que *SpaceX* n'arriveraient jamais à en faire le moteur de leur activité. Quelques années plus tard, il semblerait que la donne ait changée. Mais est-ce réellement le cas ? Pour bien comprendre tous les enjeux économiques qui gravitent autour du réutilisable, il est nécessaire de prendre en compte l'impact de l'accroissement de la concurrence sur le marché spatial (**Chapitre 1**). Enfin, nous nous intéresserons à la problématique des coûts de lancement qui demeurent encore plutôt instables (**Chapitre 2**).

Chapitre 1 - L'accroissement de la concurrence sur le marché spatial : l'avènement du New Space :

Depuis le début des années 2000, la concurrence n'a fait qu'augmenter sur le marché spatial. Alors qu'auparavant la majorité des acteurs étaient institutionnels et étroitement liés aux politiques gouvernementales des pays, aujourd'hui, on constate l'essor de nombreux acteurs privés qui souhaitent s'imposer dans le domaine, souvent pour des raisons différentes (**Section 1**). Tout

cela se développe notamment dans une logique de vouloir protéger ou acquérir un accès autonome à l'espace, l'enjeu de demain pour beaucoup (*Section 2*).

Section 1 - La multiplication notoire des acteurs privés et institutionnels :

Depuis plusieurs années maintenant, on peut observer une véritable « *ruée vers les étoiles* » à travers le monde. De nombreuses entreprises ont fait le choix de se tourner vers le spatial. Certaines se sont fixées le but de lancer des missions d'exploration de notre univers, d'autres effectuent un travail scientifique qui se veut utile aux habitants de la Terre et d'autres encore souhaitent développer le tourisme dans l'espace à l'image de *Blue Origin* qui a réalisé son premier vol habité le 20 Juillet 2021, emportant ainsi pour un séjour de quelques minutes dans le vide intersidéral son fondateur Jeff Bezos, son frère et deux autres personnes dont un étudiant ayant payé son billet au prix de 28 millions de dollars⁵⁹. Cette concurrence vive n'a pas toujours été présente, comme le démontre la conjoncture plutôt favorable dont *Ariane 5* a pu bénéficier au cours de son activité. En effet, les lanceurs américains comme *Atlas V* de *United Launch Alliance* (ULA), capables d'atteindre l'orbite GTO, n'étaient pas réellement implantés sur le marché commercial au début des années 2000 car il privilégiaient un marché institutionnel plus rémunérateur. Aussi, les lanceurs chinois étaient d'office évincés au titre de la législation américaine de contrôle à l'exportation (ITAR) qui interdit de lancer tout satellite qui embarque des brevets américains. Enfin les lanceurs indiens avaient une capacité d'emport trop faible et le lanceur japonais trop cher. En réalité, pendant près d'une décennie, le marché a été un duopole tenu par *Ariane V* et ses concurrents russes. Mais aujourd'hui c'est devenu loin d'être encore le cas⁶⁰.

On distingue généralement le marché commercial des lancements de satellites dans l'espace du marché institutionnel. Il est normalement estimé que le marché commercial représente entre le quart et le tiers du nombre total de

⁵⁹ Le Monde, *Jeff Bezos réussit son premier vol dans l'Espace à bord de sa fusée Blue Origin, 2021*, https://www.lemonde.fr/sciences/article/2021/07/20/jeff-bezos-reussit-son-premier-vol-dans-l-espace-a-bord-de-sa-fusee-blue-origin_6088954_1650684.html, consulté le 3 Août 2021.

⁶⁰ S. PRIMAS, J.-M. BOCKEL, *Op. cit.*

lancements de satellites dans le monde. Cependant, aucune définition standardisée n'existe au niveau international. L'idée de cette distinction est, en somme, de séparer les lancements réservés aux opérateurs nationaux de ceux qui ne le sont pas, selon différents critères que sont le recours à une mise en concurrence ou au contrat de gré à gré, l'existence ou non d'une règle de préférence nationale, et le type de financement de la charge utile (public ou privé). Le *New Space*, ces jeunes acteurs du spatial qui se sont consolidés en partie grâce à des financements privés, a acquis une certaine crédibilité grâce à l'ascension de *SpaceX* comme nous l'avons souligné précédemment. L'irruption de ces différents acteurs privés a entraîné une chute des prix et une concurrence exacerbée, en particulier grâce à la maîtrise de la récupération et de la réutilisation des lanceurs. Mais avant d'en dire plus sur le phénomène de réutilisation et son importance, il est nécessaire de comprendre pourquoi il faut s'attendre à une multiplication des acteurs et une explosion de la concurrence sur le marché commercial. Pour commencer, toutes les grandes puissances spatiales entendent renouveler leurs flottes de lanceurs afin d'assurer leur besoin propres et en même temps d'entrer sur le marché commercial. A titre d'exemple, le Japon tente de diminuer les coûts de lancement de son lanceur *H2* par le développement d'une nouvelle fusée *H3*⁶¹. C'est le cas également de la Russie avec la réorganisation de *Glavkosmos* et une reprise de l'activité commerciale après la transition entre *Proton* et *Angara*, ainsi que le développement d'un lanceur *Soyouz 5*. Enfin, bien que la réglementation américaine ITAR constitue toujours un obstacle à la pénétration de la famille de lanceur chinois *Longue Marche* sur une partie du marché commerciale, comme évoqué précédemment, la Chine a prouvé dernièrement qu'elle maîtrisait un panel de compétences incroyables, du micro-lanceur au vol habité en passant par les capacités spatiales militaires et l'exploration avec un autofinancement intégral.

Il faut bien également prendre en compte l'augmentation concurrentielle sur chacun des marchés institutionnels captifs. S'ils bénéficient d'un conséquent volant de commandes publiques, les acteurs actuellement présents sur le marché institutionnel sont aujourd'hui concurrencés par d'autres acteurs nationaux et sont

⁶¹ S. CLARK, Spaceflight Now, *Japan moves forward with replacement for H-2A rocket*, 2014, https://spaceflightnow.com/news/n1403/04h3rocket/#.Uz8PiFc_iHl4, consulté le 12 Mars 2021.

alors contraints de se placer sur le marché commercial, ce qui n'était pas le cas avant. Aux Etats-Unis par exemple, plus de quatre concurrents étaient en lice dans le cadre de l'appel d'offres émis au titre du programme *National Security Space Launch* (NSSL) en vue de sélectionner deux fournisseurs de services de lancement lourd. Le niveau élevé des financements publics a en effet favorisé le développement de quatre lanceurs lourds (*Falcon* de *SpaceX*, *Vulcan* de *ULA*, *New Glenn* de *Blue Origin (New Glenn)* et *Omega*, de *Northrop Grumman Innovation Systems*), un nombre supérieur aux besoins du marché intérieur américain. C'est finalement *SpaceX* et *ULA* qui ont remporté l'appel d'offre en 2020 mais on constate par la même occasion que la *NASA* et le *DoD* préfèrent maintenir plusieurs fournisseurs de lancements. La pression que *SpaceX* exerce sur le marché commercial a donc toutes les raisons de rester élevée. S'ajoutent à cette concurrence sur les lanceurs lourds deux autres éléments : la diminution de la taille de certains satellites qui soumet inévitablement les grands lanceurs à la concurrence de lanceurs plus petits et les partenariats qui pourraient naître entre petits lanceurs et nouveaux remorqueurs spatiaux, permettant à de nouveaux acteurs d'accéder plus facilement au marché des lancements en orbite géostationnaire. En conséquence, la tendance à la baisse des prix déjà observée pourrait se renforcer, l'offre augmentant tandis que la demande diminue. Alors que le prix de l'accès à l'espace décroît doucement, la concurrence se dévoile aussi sur la volonté de conserver et protéger cet accès de manière autonome qui s'avère possiblement être un des enjeux stratégiques les plus importants de ces prochaines années, tant sur un plan financier que géopolitique.

Section 2 - La volonté de protéger son autonomie d'accès à l'espace :

Accéder à l'espace permet d'accomplir énormément de choses, que ce soit à l'échelle d'une agence spatiale ou bien d'un pays. Lorsque l'on se rend compte des avantages qu'il offre à ceux qui peuvent s'y rendre, on comprend alors qu'un accès direct vers l'espace s'avère être l'un des enjeux majeurs de notre ère. A l'heure où les télécommunications et la surveillance, civile comme militaire, donnent le ton, il faut s'attendre à ce que notre planète soit de plus en plus observée, décryptée depuis l'espace. Nous l'avons vu, la concurrence sur le

marché du spatial devient de plus en plus rude et foisonnante. Aussi, dans ce contexte là, le coût de l'accès à l'espace tend à baisser pour lentement devenir ce qui ressemble à un service standardisé. Cela permettrait bien évidemment l'essor de l'économie spatiale. En dehors des puissances spatiales que nous avons déjà citées au début de ce mémoire, aucun pays ne peut prétendre pouvoir lancer une fusée dans l'espace. Pour ce faire, l'Etat qui voudrait placer un satellite en orbite par exemple, doit donc obligatoirement se tourner vers un Etat qui possède une base de lancement. C'est donc cela la force des puissances spatiales : un accès autonome à l'espace.

Mais avec l'augmentation des acteurs du spatiales et notamment des entreprises étrangères qui effectuent des lancements, il devient primordial de pouvoir compter sur un lanceur efficace et les infrastructures correspondantes afin de répondre à la demande. C'est ce que tente de faire l'Europe, dont les Etats membres ont attribué à l'Agence spatiale européenne et à l'ensemble du secteur un budget record de 14,4 milliards d'euros pour la période 2020-2024, dont une contribution de 2,66 milliards d'euros pour la France⁶². Ces financements complémentaires sont indispensables pour la préservation de notre autonomie d'accès à l'espace et de notre filière d'excellence en la matière à court et moyen terme. Cette enveloppe doit notamment permettre d'effectuer la transition entre la fin de l'exploitation d'*Ariane 5* et le début d'*Ariane 6*, mais surtout de développer un nouveau lanceur, potentiellement réutilisable comme nous l'avons vu avec les projets *Thémis* et *Callisto*. Il ne faut pas non plus négliger l'impact indirect sur l'économie que cet argent public va avoir. D'ailleurs, en 2019, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) estime que « *ces dépenses ont un effet de levier important sur l'activité économique. L'Agence spatiale européenne a ainsi calculé que, pour 100 euros dépensés pour le développement d'Ariane 5, 320 sont générés en valeur ajoutée supplémentaire dans l'économie ; quelque 50 milliards d'euros de chiffre d'affaires auraient ainsi été générés entre 2000 et 2012 dans l'industrie européenne spatiale*

⁶² R. DECOURT, Futura Sciences, L'ESA annonce un budget record et des ambitions renforcées, 2019, <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronautique-esa-annonce-budget-record-ambitions-renforcees-44765/>, consulté le 22 Mars 2021.

et non spatiale »⁶³. Grâce à un accès à l'espace autonome, il est donc possible de faire appel à des entreprises européennes privées et d'injecter de l'argent dans l'économie du spatial. C'est aussi grandement utile pour effectuer des lancements de type militaire pour la défense et la sécurité nationale.

Mais au-delà de la « *liberté d'agir dans l'espace* », avoir un accès autonome permet de réduire les coûts des lancements. En effet, si on peut effectuer soi-même un tir de fusée, cela revient forcément moins cher que si l'on doit passer par un autre pays. De la même manière, cela permet aussi de conserver des parts de marché, notamment du marché commercial, en démontrant à ses clients que l'on est fiable. C'est pour cela qu'il faut être opérationnel et anticiper les besoins futurs. L'Europe l'a désormais compris, cela passe par une nouvelle génération de lanceurs réutilisables qui permettront d'abaisser encore davantage les coûts de l'accès à l'espace. En effet, la réutilisation est censée permettre une cadence de tir plus élevée due au recyclage du lanceur mais aussi de réaliser des gains économiques conséquents, tout en respectant les exigences environnementales nouvelles qui risquent de s'appliquer dans la filière à l'avenir. Mais si la réutilisation des lanceurs semblent pour le moment devenir la norme et s'imposer prochainement comme l'étape à ne pas rater, cela est-il économiquement viable ? Car si pouvoir compter sur un lanceur utilisable à plusieurs reprises dans un laps de temps plus restreint qu'auparavant permet de protéger son accès autonome à l'espace, pourquoi tout le monde ne suit pas ce schéma et continue d'exploiter des lanceurs traditionnels ? Il semblerait en effet que l'équation économique des lanceurs réutilisables demeure encore instable et que tout le monde ne puisse pas en profiter de la même manière.

Chapitre 2 - La problématique des coûts : une équation économique encore instable :

L'argument principal qui donne toute sa force à la réutilisation des lanceurs spatiaux est sans aucun doute la réduction des coûts d'un lancement. Néanmoins, il semblerait que cela ne soit pas forcément vrai pour tous les acteurs du milieu,

⁶³ S. PRIMAS, J.-M. BOCKEL, *Op. cit.*

d'où la persistance d'une hésitation, plutôt compréhensible, chez certains d'entre eux (*Section 1*). Par ailleurs, on entend souvent que la réutilisation doit être couplée à une forte cadence de tirs pour amortir les coûts et être rentable. Pour autant, est-ce que la réutilisation permet forcément une cadence de tir élevée et donc un rendement plus grand ? (*Section 2*).

Section 1 : La réutilisation du lanceur : une baisse systématique des coûts ?

Avec l'irruption du réutilisable sur le marché des lanceurs, la baisse du prix du lancement a commencé à nettement faire son apparition. *SpaceX* et son *Falcon 9* en sont en grande partie les responsables. L'entreprise américaine applique depuis plusieurs années une politique de prix très agressive en divisant le prix d'un lancement par trois, variant entre 50 et 60 millions de dollars par lancement. Pour rappel, le lancement d'une fusée Ariane 5 avoisine les 150 millions de dollars⁶⁴. Même en effectuant un lancement double, le prix payé resterait près de deux fois plus élevé⁶⁵. *SpaceX*, dans une déclaration publique affirme que la baisse des coûts lors de la réutilisation du premier étage de leur lanceur serait de l'ordre de 30%⁶⁶. En récupérant les éléments du premier étage, qui à lui seul coûterait un peu moins de la moitié du prix de fabrication du lanceur, les économies réalisées serait donc plutôt importantes. D'ailleurs, le Centre national d'études spatiales en France estime lui aussi « *qu'il est aujourd'hui démontré que la réutilisation du premier étage permet un gain économique d'environ 30 à 50 % sur le coût d'un lancement, et sans doute plus pour les réutilisations multiples, à condition que le lanceur soit conçu d'emblée pour la réutilisation* ». En effet, le premier étage neuf d'un Falcon 9 coûte environ 18 millions de dollars, ce qui représente environ 40 % du coût total d'un lancement. Avec un coût de remise en état de l'ordre d'un million de dollars et une dizaine de réutilisations, le coût moyen d'un premier étage qui serait utilisé dix fois serait de 2,8 millions de

⁶⁴ Pour une comparaison des prix de lancement en orbite GTO pratiqués par *SpaceX* avec son *Falcon 9* et Arianespace avec *Ariane 5* (en millions de dollars), se référer à l'Annexe 5.

⁶⁵ N'oublions tout de même pas que la capacité d'emport d'*Ariane 5* reste de deux tonnes plus élevée que le *Falcon 9*.

⁶⁶ P. B. DE SELDING, SpaceNews, *SpaceX says reusable stage could cut prices 30 percent, plans November Falcon Heavy debut, 10 mars 2016*, <https://spacenews.com/spacex-says-reusable-stage-could-cut-prices-by-30-plans-first-falcon-heavy-in-november/>, consulté le 30 Juin 2021.

dollars, soit un coût de lancement de 29 millions de dollars et donc une économie de 34 %. Ce calcul permet de donner un ordre de grandeur. Mais alors pourquoi certains acteurs, tels que récemment en Europe, hésitent encore à se lancer dans la réutilisation de leurs fusées ?

Il faut se mettre en tête que de nombreux obstacles peuvent potentiellement empêcher d'atteindre la rentabilité économique escomptée. En effet, il ne suffit pas de pouvoir récupérer le premier étage. Le niveau des économies réalisées dépend avant tout de la valeur de l'élément récupéré, qu'il faut maximiser, et des coûts de réutilisation, à savoir la récupération, la remise en état, la variation de cadence ou encore la défiabilisation, qu'il faut quant à eux minimiser, lesquels dépendent avant tout des choix de conception. Le premier étage doit pouvoir être réutilisé en toute sécurité et il faut parvenir à convaincre le client que le lancement peut s'effectuer sans problème alors même que le lanceur en est à son dixième vol. La commercialisation de lanceurs usagers peut clairement s'avérer être un frein. S'ajoute à cela le fait que la réutilisation entraîne systématiquement une perte de rendement due à la nécessité de garder des réserves de carburant pour l'atterrissage. Enfin, on notera également la réduction des économies d'échelles liée à la baisse du volume de production des lanceurs neufs. Tout ceci constitue de véritables barrières qu'il faut pouvoir surmonter s'il on veut être économiquement viable et il semblerait que tout le monde ne soit pas capable de le faire. Mais alors comment *SpaceX* parvient-elle à faire face à ces problématiques ?

Pour commencer, il faut comprendre que être rentable grâce à la réutilisation ne reflète pas exclusivement une tendance « *naturelle* » du marché. En effet, l'exemple de *SpaceX* est trompeur. Déjà, c'est une entreprise qui bénéficie de fonds privés importants et qui n'est donc pas soumise à l'attribution d'un budget par plusieurs pays, à l'instar de l'Agence spatiale européenne. Elon Musk étant une des personnalités les plus riches de la planète, il peut apporter un soutien sans égal à sa société qui ne peut que lui être profitable. Ensuite, comme nous le rappelle Christophe Bonnal, « *le Falcon 9 de SpaceX se décline en trois versions qu'il adapte selon la mission et la charge utile* ». Nous avons vu que la réutilisation est synonyme de baisse de performance. En fait, *SpaceX* va décider

de consommer ou non son étage selon la charge utile : un *Falcon 9* réalise 6 tonnes de performance en version consommable, 4,5 tonnes lorsqu'il revient sur une barge et 2,8 tonnes lorsqu'il atterrit sur son pas de tir⁶⁷. Et comme *SpaceX* est en situation de quasi monopole aux Etats-Unis, il peut se permettre d'effectuer des lancements qui lui demande seulement la moitié de ce que le lanceur pourrait réaliser, ce qui explique pourquoi le retour se fait facilement. Mais c'est derrière cette situation de monopole que se cache la raison pour laquelle le bilan économique de *SpaceX* n'est pas tant lié à la réutilisation de ses lanceurs.

En réalité, l'entreprise californienne, comme la plupart des acteurs du « *New Space* », bénéficient d'un soutien financier public extrêmement important, notamment avec la *NASA* et le *Department of Defense* (DoD). Il résulte d'une forme de pari de l'administration américaine au cours des années 2000 - 2010 visant à confier une partie des missions institutionnelles à de nouvelles entreprises spatiales en vue de réduire les coûts et de revoir la répartition des rôles entre le public et le privé⁶⁸. Ce soutien se manifeste sous différentes formes. Il passe d'abord par la mise à disposition de capacités développées par la recherche publique : le lanceur *Falcon 9* a été développé par *SpaceX* en incluant le moteur *Merlin* issu des travaux de la *NASA*. Il ne faut pas oublier les commandes publiques de lancements qui ont été passées alors même que le *Falcon 9* n'existait pas et sur plusieurs années, ce qui a permis à l'entreprise d'investir dans de nouvelles capacités technologiques⁶⁹. Enfin, il faut également pointer du doigt la tarification des services de lancement à destination des clients institutionnels à des prix deux fois supérieurs à ceux pratiqués sur le marché commercial, c'est-à-dire

⁶⁷ Interview de Christophe Bonnal, responsable des lancements au CNES. Se référer à l'Annexe 11.

⁶⁸ En 2006, la *Nasa* a lancé le programme visant à soutenir de nouveaux entrants en vue de construire des fusées et des capsules spatiales qui pourraient être utilisées pour ravitailler la station spatiale internationale, sachant que la navette spatiale serait bientôt arrêtée : c'est le programme COTS (*commercial orbital transportation services program*), qui a marqué le début du tournant américain vers le « *New Space* ». C'est dans le cadre de ce programme que *SpaceX* a reçu son premier soutien financier substantiel, de 278 millions de dollars.

⁶⁹ C'est par exemple le cas du contrat *CRS* (pour *commercial resupply services*) passé en 2008 et concernant 12 lancements pour un montant de 1,6 milliard de dollars. Certains contrats associent d'ailleurs commande de lancement et développement de capacités comme, par exemple, le contrat *CctCap* (pour *Commercial Crew Transportation Capability*) de 2014 pour un montant de 2,6 milliards de dollars, qui incluait également les fonds nécessaires au développement de la capsule *Crew Dragon*.

de 50 à 60 millions de dollars à 90 à 100 millions de dollars. Cet écart s'explique cependant en partie par des exigences supplémentaires de la part des institutionnels et, le cas échéant, par le coût de la charge utile également développée par *SpaceX*, en l'occurrence la capsule *Crew Dragon*. Mais il constitue également une subvention. Aujourd'hui, *SpaceX* détient les contrats de ravitaillement de la station spatiale internationale et aurait reçu sur la période 2006-2019 l'équivalent de 9,5 milliards de dollars pour le développement de ses capsules et lanceurs ainsi que des services de lancement associés, soit l'équivalent des contributions françaises à l'Agence spatiale européenne sur les 10 dernières années ou le financement de près de deux *Ariane 6*. Même si tout le mérite ne peut être enlevé à *SpaceX* en estimant que son succès ne résulterait que de ce financement public, il est clair que l'entreprise bénéficie d'une aisance économique qui lui permet de faire à peu près ce qu'elle veut, le réutilisable participant forcément à sa rentabilité mais ayant aussi la fonction d'un *bonus*, à la fois technologiquement parlant mais aussi en terme d'image de marque. Toute entreprise voulant participer à l'aventure de la réutilisation et n'ayant pas les mêmes moyens financiers que *SpaceX* doit donc prendre en compte d'autres paramètres. Au premier plan, la question de la cadence de tir reste celle qui semble revenir le plus souvent.

Section 2 : La nécessité d'une forte cadence de tir pour être rentable :

Si la réutilisation permet de réduire les coûts financiers grâce à la valeur de ce qui est récupéré après le lancement, elle est censée également permettre de pouvoir effectuer plus de tirs, dans un délai plus restreint que pour des lanceurs classiques. En effet, en récupérant l'élément déjà utilisé, la phase de fabrication complète du lanceur est remplacée par une remise en état et des vérifications, ce qui prend largement moins de temps que de repartir de zéro. Gardons tout de même à l'esprit qu'une entreprise comme *SpaceX*, disposant de plusieurs types de lanceurs de la même gamme, ne réutilise pas systématiquement le lanceur qui vient de revenir pour un nouveau vol. Mais force est de constater qu'il s'agit d'une véritable prouesse de la part des équipes d'Elon Musk qui, seulement trois ans après le premier essai réussi de récupération fin 2015, parviennent à réutiliser

le premier étage de leurs lanceurs pour plus d'un tir sur deux. Fin 2018, 9 des 17 missions opérées par *SpaceX* reposaient sur des lanceurs de type *Falcon 9* ayant déjà volé, ce qui représente 53 % des lancements⁷⁰. Mais c'est réellement les délais de remise en état qui mettent en lumière l'expertise de *SpaceX*. Selon l'entreprise américaine, la version *Block 5* du *Falcon 9*, lancée pour la première fois en mai 2018, serait de nouveau opérationnel après un lancement en 24 heures seulement. S'il ne s'agit là que d'un objectif et que peu de révélations sont communiquées à ce sujet, on sait tout de même que le reconditionnement d'un *Falcon 9* peut largement se réaliser en deux mois à peine⁷¹.

Logiquement, la réutilisation du lanceur permettrait donc d'augmenter la cadence de lancement et par conséquent, le nombre de contrats conclus. Lorsqu'on se souvient que la navette spatiale à son époque prévoyait au minimum un lancement par semaine, on comprend aisément qu'avoir un rythme de tir soutenu est un point important auquel les acteurs du milieu sont particulièrement attachés. Car en effet, si la cadence de lancement diminue, il y a de fortes chances que les économies réalisées diminuent elles aussi. C'est pourquoi la réutilisation du premier étage, ou encore une réutilisation totale, permet à la fois de réaliser une baisse des coûts de lancement mais aussi augmentation de leur nombre. Cette conjugaison de ces éléments entraîne en théorie une rentabilité financière. L'exemple de *SpaceX*, malgré ce qui a été dit au paragraphe précédent, illustre bien cette situation. Avant que la réutilisation ne soit parfaitement maîtrisée, les vols commerciaux opérés par *SpaceX* augmentaient plutôt lentement avec 3 vols en 2013, 6 en 2014 et 7 en 2015. A partir de 2016 et l'arrivée de la version réutilisable du *Falcon 9*, la rythme s'est grandement accéléré avec 9 vols en 2016, 18 en 2017 et 21 en 2018. En six ans, la cadence de lancement a été multipliée par sept.

Mais alors la réutilisation permet-elle forcément d'augmenter son nombre de lancements ? Comme nous l'avons déjà mentionné, *SpaceX* bénéficie en

⁷⁰ Note n°9 de l'OPECST, *Op. cit.*, p. 6.

⁷¹ *Ibid.*

grande partie des contrats avec la *NASA* qui font en sorte que leurs tirs interviennent de manière régulière. S'ajoute à cela les lancements effectués pour le compte de la société *Starlink*, détenue elle aussi par Elon Musk et dont le but est de constituer une constellation de satellites permettant d'être connecté à internet partout à travers le monde. Avec plus de 1 300 satellites mis en orbite, c'est plus de 28 lancements qui ont été réalisés pour le compte de *Starlink*. De son côté, l'Europe reste sceptique et a longtemps pensé que la réutilisation n'était envisageable seulement si la cadence de tir la rendait économiquement viable. Il faut tout de même rappeler que l'Europe est loin de disposer du même programme de lancement que les Etats-Unis : *Ariane 6*, dont le vol inaugural a été décalé en 2022, devrait normalement connaître une cadence minimale de 11 lancements par an, avec au moins cinq tirs institutionnels⁷². Selon le CNES, on doit s'attendre à ce que ce nombre soit revu à la baisse avec des lancements s'échelonnant entre cinq et huit par ans, car les lanceurs concurrents - *Falcon*, *New Glenn*, *H3*, *Longue Marche* - semblent évoluer plus rapidement. La réutilisation, bien qu'elle ait un prix, permet donc en principe d'augmenter sa cadence de lancement annuel. En réalité, c'est surtout la qualité et la fiabilité du lanceur en lui-même qui demeure importante. Il doit apporter la confiance nécessaire pour que les clients acceptent de l'utiliser. C'est la raison pour laquelle, bien qu'aidé, *SpaceX* parvient à réaliser un nombre conséquent de lancements : le *Falcon 9* a déjà fait ses preuves. L'Europe pour sa part a un train de retard sur le plan technique et peine à revenir à la hauteur de ses concurrents. Le risque est qu'en faisant le choix de se maintenir sur une gamme de lanceurs classiques, les prix deviennent trop chers, ce qui entraînerait indéniablement une baisse du nombre de lancement et un désintérêt des clients potentiels qui préféreront se tourner vers des prix plus abordables. Il sera d'ailleurs intéressant de suivre dans les prochaines années la cadence de tir de *Blue Origin* ou encore *Virgin Galactic* qui ont toutes les deux montré au grand public, avec l'envoi dans l'espace de leurs dirigeants, que leurs lanceurs respectifs étaient dignes de confiance.

⁷² A. BAUER, Les Échos, *Arianespace se montre prudent dans une conjoncture difficile*, 10 janvier 2019, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/prudence-chez-arianespace-dans-une-conjoncture-difficile-347622>, consulté le 23 Mars 2021.

Titre 2 - Des risques nouveaux qui demeurent élevés et difficiles à maîtriser :

L'industrie du spatial est un secteur à haut risque. Si les vols habités sont évidemment ceux qui sont les plus exposés, les accidents de la navette spatiales américaines peuvent en témoigner, un lancement est toujours une opération dont la réussite ne peut être certaine. En effet, outre le nombre faramineux de paramètres à prendre en compte, c'est un milieu qui repose sur des technologies dangereuses et explosives. En matière de lanceurs réutilisables, là aussi des risques sont bien présents et on constate souvent une absence de réglementation clairement définies pour encadrer son utilisation (***Chapitre 1***). De plus, ce secteur étant soumis à une évolution permanente, il faut continuellement s'adapter et anticiper de nouveaux risques (***Chapitre 2***).

Chapitre 1 : L'absence d'un cadre juridique clairement défini :

Une activité comme celle d'un lancement spatiale doit évidemment être pris très au sérieux par les autorité en raison du danger qu'elles peuvent représenter. Pour cela, il est primordial que les puissances spatiales et les pays qui participent à ces lancements s'entourent d'une réglementation stricte visant à sécuriser toutes les opérations. En France, la loi reste discrète autour des lanceurs réutilisables, nouveaux arrivants dans le secteur (***Section 1***). Sur le plan international, il semblerait que l'émergence de nouveaux acteurs privés remettent en question les textes qu'il est de plus en plus nécessaire d'harmoniser et d'actualiser (***Section 2***).

Section 1 : L'insuffisance de la réglementation française en matière de retour des lanceurs spatiaux sur Terre :

Par définition, une fusée ou un lanceur fonctionne de la même manière qu'un missile. Sa destruction peut potentiellement produire de grosses explosions en raison des ergols qu'il contient dans ses réservoirs, même s'il en possède moins à son retour qu'au décollage. C'est une technologie sensible à laquelle la plus

grande attention est apportée lors de sa conception et surtout avant et durant la phase de décollage. Mais dans le cas d'un lanceur réutilisable, les risques sont d'autant plus présents. En effet, comme nous le rappelle Christophe Bonnal du Centre national d'études spatiales, « *un lanceur réutilisable est un véritable missile qui revient directement sur Terre* ». On comprend alors pourquoi il s'avère nécessaire de contrôler, encadrer le retour des lanceurs récupérables sur notre sol dans l'optique de minimiser le plus possible les risques qui peuvent en découler. Il faut comprendre les contraintes qui sont liées à cette technologie afin de mieux les cerner mais aussi de ne pas impacter le marché. Parmi elles, on retrouve des distances à respecter, des seuils de dangerosité à ne pas dépasser ou encore diverses méthodes à mettre en place après l'atterrissage afin de dégazer le reste de méthane présent encore dans l'atmosphère. Tout ceci sont des contraintes à prendre en compte pour une récupération et une réutilisation en toute sécurité des lanceurs spatiaux. Pourtant, il semble que la réglementation française sur le sujet soit insuffisante.

Si les lois spatiales françaises de 2008 encadrent tout ce qui se passe sur le sol français et dictent les contraintes de sauvegarde vis-à-vis de la montée comme la retombée des étages d'un lanceur, elles n'évoquent en aucun cas la question du retour d'un étage sur le site de lancement⁷³. Certes, la notion de « *retour sur Terre d'un objet spatial* » revient dans certains articles, mais au vu de l'ancienneté de la loi, on comprend que cela fait surtout référence à la rentrée atmosphérique des étages qui sont voués à se désintégrer ou bien atterrir en mer. Pour ces objets, le retour sur Terre est soumis à une autorisation préalable délivrée par l'autorité administrative sous peine d'une amende de 200 000 euros⁷⁴. La notion de réutilisation ne ressort aucunement des textes en réalité, bien qu'elle tend à se démocratiser dans le monde aujourd'hui, ce qui montre à quel point la réglementation française n'est pas à jour en la matière. Parce que faire retomber un objet en mer et le faire revenir à son point initial sur une base de lancement sont deux choses bien différentes. Avec le Centre spatial guyanais de Kourou, la

⁷³ Loi n° 2008-518 du 3 juin 2008 relative aux opérations spatiales.

⁷⁴ Article 2 et 11 de la Loi n° 2008-518 du 3 Juin 2008 relative aux opérations spatiales.

France figure au rang des puissances spatiales et se doit d'avoir des textes solides qui envisagent la survenance de n'importe quel évènement sur une base bien plus petite que le Centre spatial de Cap Canaveral en Floride, c'est-à-dire, sujette à des plus grands risques, mais aussi entourée d'un environnement contenant une faune et une flore qui doivent être protégée.

L'article 13 des lois spatiales françaises démontrent parfaitement à quel point le retour d'un premier étage de lanceur sur site après son lancement n'est pas couvert par les textes. En effet, ce dernier pose le principe d'une canalisation de la responsabilité sur l'opérateur, à l'exclusion de tout autre partie prenante à une opération spatiale, comme par exemple un cocontractant dudit opérateur. Il érige ainsi « *la responsabilité sans faute, de l'opérateur, pour tous les dommages causés aux tiers, au sol ou dans l'espace aérien, c'est-à-dire pendant la phase de lancement* ». Il ajoute que l'opérateur ne peut s'en exonérer que par la preuve de la faute de la victime. Le rapport parlementaire n° 161 (2007-2008) d'Henri Revol, fait au nom de la commission des affaires économiques et déposé le 15 janvier 2008, estime même qu'il est justifié de « *limiter cette canalisation de responsabilité à la seule phase de lancement, car c'est elle qui concentre l'essentiel des risques de dommages à des tiers* »⁷⁵. Or, on sait désormais que la phase de retour sur Terre des lanceurs spatiaux constituent tout autant voire plus de risques que la phase de lancement. L'écart entre la réalité et les textes législatifs est donc bel et bien réel. Cela, le CNES l'a bien compris et compte palier à ces lacunes avec sa participation à un nouveau projet de loi visant à actualiser celle de 2008 et enfin prendre en compte la réutilisation et les risques qui y sont liés. Cela a également pour but de mieux encadrer les prochains démonstrateurs européens, que sont *Themis* et *Callisto*, dont la France et le CNES occupe une place importante dans la bonne exécution des programmes et plus tard du lancement depuis Kourou. Mais à l'heure où le marché des lanceurs est en train d'exploser, avec l'émergence de nouveaux acteurs privés, il devient de plus en plus urgent de faire en sorte d'harmoniser les règles au niveau international en plus des lois étatiques.

⁷⁵ H. REVOL, *Rapport n° 161 (2007-2008), fait au nom de la commission des affaires économiques, Titre V - La responsabilité*, déposé le 15 janvier 2008.

Section 2 : La nécessité d'actualiser la réglementation internationale :

Tout au long de ce mémoire, nous avons pu constater à quel point le marché du spatial est en expansion et par conséquent l'accroissement fulgurant du nombre de lancements dans le monde. En effet, l'augmentation des différents acteurs, dont la plupart sont désormais privés, mais aussi la coopération entre les agences spatiales de différents pays amènent clairement à se pencher sur les règles internationales qui régissent le droit de l'espace et l'encadrement des pratiques nouvelles telle que la réutilisation des lanceurs. Avant toute chose, il faut bien avoir en tête que les lois internationales spatiales sont peu nombreuses et datent pour la plupart de plusieurs décennies. Elles ont été pensées à partir des années 70, lorsque l'aventure de l'homme dans l'espace a commencé à quitter le mythe pour devenir réalité. Afin de régir les actions pouvant être menées dans l'espace, des grands principes ont été posés par différentes conventions et traités internationaux de l'ONU⁷⁶. On retrouve 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 célestes* de 1966, que nous avons déjà évoqué précédemment, ou encore la *Convention sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux* de 1972. S'il en existe d'autres, ces deux-là restent probablement les textes les plus importants car ils balayent les points essentiels, à savoir la responsabilité des acteurs et l'organisation des interactions dans l'espace.

Pourtant, il est clair que le droit spatial international est lacunaire, voire même obsolète. L'une des raisons principales est que ce droit n'a été que très peu testé depuis qu'il existe. En effet, les situations de conflits ou d'appropriation d'objets ou de corps célestes n'arrivent que très rarement. La question de la responsabilité revient quant à elle plus souvent, notamment lors des collisions ou des accidents en vols de certains lanceurs mais elle n'a pas évolué depuis plusieurs années. En réalité, en droit français comme en droit international, la question de la réutilisation des lanceurs n'est absolument pas abordée. D'une part

⁷⁶ Nations Unies, Bureau des affaires spatiales, *Droit international de l'espace : instruments des Nations Unies*, New York, 2017.

parce qu'elle est bien trop récente, et d'autre part, parce qu'elle ne concerne que très peu de monde pour l'instant. Néanmoins, c'est un point sur lequel il sera nécessaire de revenir très prochainement afin d'encadrer au maximum le retour sur Terre des lanceurs. Certes, il existe l'*Accord sur le sauvetage des astronautes, le retour des astronautes et la restitution des objets lancés dans l'espace extra-atmosphérique* de 1968. Celui-ci évoque la rentrée atmosphérique des objets spatiaux et la manière dont ils doivent être appréhendés mais en aucun cas il ne prévoit un retour sur une zone entourées d'infrastructures et potentiellement de personnel. Ces nouveaux risques qu'apporte la réutilisation et que nous analyserons ci-dessous sont à prendre en compte pour une réglementation internationale harmonisée et claire. Si la réutilisation s'avère bel et bien être la norme de demain, utilisée par toutes les puissances spatiales à travers le monde, alors il faut nécessairement l'intégrer aux textes internationaux. Que faire en cas d'accident, de déviation de trajectoire, quelles sont les conditions de sécurité à respecter ? Tout ceci doit permettre à ce que cette nouvelle technologie soit encadrée et conforme aux autres textes internationaux préexistants.

Mais le point qui mérite le plus d'être soulevée est sans aucun doute celui de l'irruption d'acteurs privés. En effet, dans la majeure partie de la réglementation spatiale internationale, on parle des actions entre « *Etats* ». Or, aujourd'hui des entreprises privées sont capables d'envoyer un satellites pour leur compte et donc n'ont rien à voir avec une quelconque mission ou lancement chapeauté par un gouvernement. Actuellement, aucun texte n'est assez précis sur le sujet et ne permet de garantir la conformité des pratiques des opérateurs non gouvernementaux avec les engagements internationaux souscrits au niveau étatique. De plus, les principes du droit spatial n'engagent que les États qui ont signé et ratifié les conventions des Nations Unies les consacrant. Il existe aujourd'hui une coexistence des États, acteurs traditionnels des activités spatiales et sujets privilégiés des traités de l'espace, et des entreprises privées apparues ces dernières années qui nous pousse à s'interroger sur l'avenir des relations entre les représentants de l' « *Old Space* » et du « *New Space* ». Celles-ci oscillent pour l'instant entre concurrence et complémentarité : les acteurs privés conservent un

statut ambigu dépendant encore largement de l'État dans lequel ils sont basés tout en participant au développement des activités spatiales et des technologies nécessaires à leurs réalisations. C'est pourquoi l'encadrement d'activités inédites et techniquement complexes telle que la réutilisation, toujours en évolution du fait des progrès constants de la technologie et présentant de forts enjeux de sécurité et de responsabilité est un chantier majeur pour les secteurs du spatial et de l'aérien. La maîtrise de ces défis implique pour tous les acteurs de s'inscrire dans des réflexions stratégiques appelant à des évolutions nécessaires des cadres juridiques nationaux et internationaux actuels, notamment en matière de responsabilités contractuelle et extra-contractuelle, mais également en matière d'assurances, de partage des risques et concernant la répartition des responsabilités entre secteurs public et privé.

Chapitre 2 : Un secteur soumis à une constante évolution :

En 50 ans, le secteur des activités spatiales a bien changé. D'abord le premier satellite envoyé dans l'espace, puis le premier homme. Aujourd'hui, le progrès file à vive allure et fait de l'industrie spatiale un milieu en perpétuelle évolution. Si l'innovation est souvent accompagnée d'échecs (*Section 1*), elle permet aussi de s'améliorer, de comprendre et d'anticiper les risques de demain afin de les maîtriser (*Section 2*).

Section 1 : Des échecs toujours présents :

Comme dans tous les milieux à risques, le spatial connaît son lot d'échecs et de tragédies. Si les vols habités sont toujours les plus sensibles puisqu'ils mettent en jeu la vie de femmes et hommes au cours des missions, la simple destruction d'un lanceur ou de la charge utile durant la phase de lancement peut s'avérer catastrophique pour les différents opérateurs spatiaux. On pourrait penser qu'avec le progrès technique et la perfection des connaissances sur les technologies spatiales, les risques s'amenuisent. Certes, la sécurité des vols et lancements s'est considérablement renforcée depuis l'époque du programme *Apollo* des années 60 mais l'arrivée de nouveaux modules, de nouveaux lanceurs et de nouvelles

méthodes de propulsions participent à l'apparition de risques qui, jusque là, ne s'étaient encore jamais présentés. En effet, à l'heure actuelle, des échecs de lancements sont répertoriés et cela chez tous les acteurs du spatial. A titre d'exemple, la lanceur léger *Vega* de l'Agence spatiale européenne a subi deux échecs lors de lancements à Kourou en Guyane française le 11 Juillet 2019, puis le 16 Novembre 2020. La fusée s'est échouée en mer, peu après son envol, avec à son bord un satellite espagnol d'imagerie optique, *SEOSAT-Ingenio*, et le satellite français *Taranis*, premier instrument scientifique d'observation de la face cachée des orages. Ainsi, le risque zéro n'existe pas dans le spatial.

En matière de réutilisation, nous l'avons vu précédemment, les risques sont bien présents. Pour s'imposer comme la norme de demain, la technologie permettant la récupération des lanceurs doit être parfaitement maîtrisée et sûre. Si *SpaceX* donne l'impression désormais de réussir les atterrissages de ses boosters *Falcon 9* ou *Falcon Heavy* à chaque essai, on recense tout de même quelques échecs lors de la phase de récupération. Sur 122 lancements effectués dont 98 programmés pour récupérer le lanceurs, on comptabilise 12 échecs soldés par une explosion⁷⁷. Certes, cela reste faible mais cela tend à prouver que la réutilisation peut encore être perfectionnée. En ce qui concerne le *Starship*, lanceur lourd voué à être entièrement réutilisable à l'inverse du *Falcon 9* qui l'est partiellement, les échecs successifs ont directement freinés son développement. La réutilisation n'est donc pas à la portée du premier venu, surtout lorsqu'il s'agit d'engin spatiaux énormes comme celui-ci. De plus, cela met en lumière un point qui fera sûrement parler de lui dans les prochaines années : la question des assurances en matières de réutilisation.

L'assurance spatiale consiste à couvrir certains évènements pouvant se produire lors du lancement de satellites ou de fusée, à partir du moment où à lieu le décollage. Elle ne prend donc pas en compte la phase de fabrication, de transport et de mise en place du lanceur et de sa charge utile. Anciennement, le lanceur étant consommable, jeté et les assurances ne couvraient pas les dommages

⁷⁷ Pour une vision des succès et échecs du Falcon 9, se référer au graphique de l'Annexe 6.

qui pouvaient survenir. La course à l'espace étant désormais rouverte, les États-Unis, l'Europe, la Russie et dernièrement, la Chine, se livrent à une guerre sans merci à laquelle les assureurs doivent se tenir prêts pour encadrer au mieux et rapidement les nouveaux projets. Avec l'arrivée des lanceurs réutilisables et donc la nécessité pour l'opérateur de récupérer un élément en bon état, on pourrait penser que les compagnies d'assurances se soient penchées sur ce nouveaux cas. Or, il n'en est rien. A ce jour, les polices d'assurances ne prévoient pas de régime adapté à la situation des lanceurs réutilisables⁷⁸. Cela s'explique par deux raisons très simples : seulement deux entreprises principales utilisent régulièrement la technique du « *toss back* » pour faire revenir ses lanceurs sur Terre, *SpaceX* et *Blue Origin*, et elles ont toutes deux fait le choix de ne pas s'assurer pour leur lanceurs recyclables. En effet, les deux sociétés sont détenues par deux milliardaires qui estiment ne pas avoir besoin de dépenser en assurance sur ce point précis. Aujourd'hui, seuls les lanceurs classiques sont susceptibles d'être assurés pour les dommages dont ils pourraient faire les frais ou causer au tiers. Or, sur des étages de fusée réutilisables, nul doute qu'une assurance est préconisée puisque ces matériels ont pour but d'être réutilisés encore et encore. Ainsi, il devient primordial de pouvoir quantifier le risque pour les lancements postérieurs à une première utilisation. Le lanceur ayant déjà servi, il convient de voir comment une garantie peut être mise en œuvre puisque, plus l'étage ou les boosters auront été utilisés, plus risque sera grand⁷⁹. La réutilisation du lanceur est donc vouée à faire parler d'elle à l'avenir, toujours dans l'optique d'en comprendre au mieux les risques et de parvenir à les maîtriser. Cela est d'autant plus vrai à l'heure où le transport commercial de passager vers l'espace voit le jour et avec lui, de nouveaux enjeux.

⁷⁸ J. MIGNONAT-LASSUS, *Gestion des risques et aspect assurantiel dans les projets spatiaux contemporains*, Mémoire pour l'obtention du Master 2 Droit et Management du transport aérien, Aix-en-Provence, 2020, p. 12.

⁷⁹ *Id.*, p. 75.

Section 2 : Vers le transport commercial de passagers : la maîtrise du risque absolu :

L'exploration de notre univers n'a jamais été aussi présente dans les esprits que maintenant. De nouveaux projets, tous plus ambitieux les uns que les autres, voient le jour et passionnent tant ils font rêver. Mais il arrive un moment où le rêve flirte avec la réalité. Il y a à peine plus de 70 ans, emmener un homme sur la Lune relevait du miracle. Aujourd'hui, certains souhaitent porter l'espèce humaine jusqu'à la surface de Mars. Si cela peut paraître prétentieux, *SpaceX* prend le pari et compte bien embarquer à bord de sa fusée *Starship* les premiers astronautes qui fouleront le sol de la « planète rouge ». S'il a connu plusieurs échecs, le prototype de lanceur lourd *Starship SN15* a réussi l'exploit de se positionner à l'horizontal après son décollage, puis d'atterrir de nouveau à son point de départ verticalement grâce à ses trois puissants moteurs *Raptor*. Dans sa version finale, la fusée sera composée, en plus du vaisseau habité, d'un premier étage *Super Heavy* pour un total de 120 mètres de hauteur et une capacité d'emport de 100 tonnes à bord⁸⁰. Faire de l'homme une espèce interplanétaire n'est pas si lointain d'après Elon Musk, dont les équipes travaillent d'arrache-pied pour perfectionner ce nouveau lanceur réutilisable. On ne peut que souligner la performance quand on pense qu'il y a encore quelques années, l'idée de faire fonctionner un lanceur entièrement réutilisable ne relevait encore que de l'hypothèse.

Le transport de passagers dans l'espace, ou même de marchandise intéresse de plus en plus. D'ailleurs, l'US Air Force regarde les avancées réalisées par le *Starship* de très près. En effet, on peut voir en celui-ci un moyen de déplacer la capacité d'emport d'un avion de guerre américain partout sur la Terre en moins de deux heures. Si cela reste encore très flou pour le moment, on comprend tout de même pourquoi certaines entreprises ont décidé de faire du transport de passagers dans l'espace leur principale activité. Au premier plan, on retrouve bien sûr *Blue Origin* et *Virgin Galactic* qui ont récemment démontré leur capacité à faire ce

⁸⁰ Le Point, *SpaceX : la fusée Starship réussit son atterrissage pour la première fois*, 2021, https://www.lepoint.fr/sciences-nature/spacex-la-fusee-starship-reussit-son-atterrissage-pour-la-premiere-fois-06-05-2021-2425241_1924.php, consulté le 13 Juin 2021.

qu'on appelle du « *tourisme spatial* ». Le prix du billet pour un tour dans l'espace avec le *Space2Ship*, le vaisseau de *Virgin Galactic*, est fixé à 450 000 dollars. Entre 2006 et 2014, plus de 600 billets ont déjà été vendus et avec l'envoi dans l'espace de son directeur, Richard Branson, on ne peut que s'attendre à une envolée des ventes. De son côté, *Blue Origin* affirme qu'elle approche les 100 millions de dollars de ventes privées⁸¹. Enfin, si *SpaceX* est grandement occupée avec ses projets de voyage interplanétaires, les ravitaillements de la station spatiale internationale et la mise en orbite de ses satellites Starlink, elle se positionne également sur le marché du tourisme spatial. Le voyage ne consistera pas en quelques minutes d'apesanteur mais bien à réaliser le tour de la Lune. C'est le milliardaire japonais Yusaku Maezawa qui sera le premier à embarquer, en compagnie de celle qui gagnera un concours de télé-réalité organisé par ces soins⁸².

La réutilisation, en abaissant les coûts d'accès à l'espace permettrait à terme de réaliser des choses qui dépassent encore notre imagination. L'espace devient alors le terrain de jeu de ces nouveaux acteurs privés, à l'origine du « *New Space* » et que rien ne semble pouvoir arrêter. Nous sommes réellement à point charnière de l'histoire de la conquête spatiale. En outre, tout ceci cache bien évidemment des aspects politiques et on commence à comprendre que l'espace sera inévitablement le sujet d'enjeux géostratégiques. On le constate aisément avec la volonté de la Chine, aidée désormais de la Russie, d'envoyer des hommes sur la Lune au cours de la décennie. Mais ce ne sont pas les seuls à avoir un regain d'intérêt pour ce genre de mission. En effet, les Etats-Unis et leurs partenaires ont lancé le programme *Artemis* qui a également pour but de ramener des humains sur notre satellite naturel d'ici quelques années. Cela participerait notamment à la

⁸¹ K. DUFFY, Business Insider, *Blue Origin a déjà vendu près de 100 M\$ de billets pour des voyages dans l'espace, selon Jeff Bezos*, 2021, <https://www.businessinsider.fr/blue-origin-a-deja-vendu-pres-de-100-m-de-billets-pour-des-voyages-dans-lespace-selon-jeff-bezos-188199>, consulté le 14 Août 2021.

⁸² I. A. HAMILTON, Business Insider, *Voici les critères du milliardaire japonais qui voyagera autour de la Lune avec Space X pour trouver la femme qui l'accompagnera*, 2020, <https://www.businessinsider.fr/voici-les-criteres-du-milliardaire-japonais-qui-voyagera-autour-de-la-lune-avec-space-x-pour-trouver-la-femme-qui-laccompagnera-176293#yusaku-maezawa-a-tweete-le-lien-vers-le-formulaire-de-candidature-a-ses-7-2-millions-dabonnes-dimanche-12-janvier-2020>, consulté le 4 Août 2021.

logistique de ravitaillement imaginée pour un voyage vers Mars. Le transport de passagers, qu'ils soient civils ou astronautes expérimentés, semble être le nouvel *El Dorado* du secteur spatial. Les lancements de satellites auront toujours leur place sur le marché mais il faut croire que la rupture technologique apportée par la réutilisation des lanceurs ouvre d'autres portes pouvant mener un jour, qui sait, aux confins de notre système solaire.

CONCLUSION

Nous l'avons bien compris, l'arrivée sur le marché spatial des lanceurs réutilisables a réellement changé la donne. Abandonner et détruire une partie des éléments qui constituent une fusée a un coût et devant un tel constat, il paraît logique de vouloir récupérer et réutiliser tout ou partie de l'importante valeur intégrée d'un lanceur, à la manière d'un transport terrestre. Si cette idée se reflète à travers le programme de la navette spatiale américaine dans les années 80, son échec tragique a laissé place à de nouveaux acteurs privés qui sont à l'origine de ce qu'on appelle désormais le « *New Space* ». Le choix qu'a fait *SpaceX* de se tourner vers la réutilisation de ses lanceurs constitue une véritable rupture technologique sans précédente dans l'histoire de l'industrie spatiale. En récupérant le premier étage, et bientôt l'entièreté de ses lanceurs, les coûts d'accès à l'espace ont diminué et ont permis à l'entreprise californienne de démocratiser le vol spatial *low cost*, là où d'autres restaient pourtant sceptiques.

Si la réutilisation des éléments déjà utilisés peut paraître une idée séduisante, la route pour y parvenir est semée d'embûches. En effet, il semble qu'elle soit conditionnée par plusieurs facteurs, notamment une maîtrise parfaite de la technologie mais aussi par les coûts du reconditionnement et de la remise en état des lanceurs qui peuvent s'avérer élevés, ainsi que par le délais de reconditionnement de ceux-ci. Enfin, il faut parvenir à conserver la confiance de ses clients qui doivent désormais accepter de lancer leurs satellites, voire leurs astronautes dans le cas d'un vol habité, avec une fusée qui a déjà servi plusieurs fois. Si *SpaceX* tente de démontrer qu'elle s'en sort largement, il ne faut pas omettre que cette tendance n'est pas applicable à tous les acteurs du spatial. Elon Musk, tout comme Jeff Bezos, sont deux milliardaires à la tête de sociétés privés aux capitaux extrêmement élevés et qui bénéficient de subventions gouvernementales sur un marché national essentiellement institutionnel et protégé. Pour les autres acteurs du spatial encore étranger à la réutilisation, la

concurrence est de plus en plus rude, et on envisage grandement d'emboîter le pas aux deux entreprises américaines.

La question de l'autonomie de l'accès à l'espace et de la souveraineté des Etats pousse en réalité à s'intéresser de plus en plus à la réutilisation des lanceurs spatiaux. L'Europe, pour qui la maîtrise des technologie de récupération ne faisait pas consensus jusqu'alors, commence à réfléchir sérieusement à développer ses propres lanceurs réutilisables. Pourtant, il faut garder à l'esprit que l'équation économique lié à la réutilisation reste instable. Plus les coûts de lancement diminueront, plus la valeur de ce qu'on va récupérer sera faible. S'ajoute à cela la nécessité d'obtenir une cadence de tir élevée, pas toujours évidente à décrocher lorsque l'on ne s'appelle autrement que *SpaceX*. Le choix de se tourner vers le réutilisable doit être alors mûrement réfléchi mais il est clair qu'il conditionne cependant notre capacité collective à maîtriser des connaissances clés qui irrigueront un grand nombre de domaines de recherches et de développements. C'est probablement la raison pour laquelle la Chine, le Japon et l'Europe semblent bien parties pour se lancer dans l'aventure au même titre que les Etats-Unis afin de rester dans la course vers l'espace, qui prend de plus en plus la forme d'un vaste échiquier sur lequel chacune des puissances spatiales entend jouer ses pions dans une logique économique et géopolitique.

Au-delà, il est important de se souvenir que le marché des lanceurs est un marché très évolutif. Aujourd'hui, il repose essentiellement sur les télécommunications, sous la forme de constellations de satellites en orbite basse destinées à l'échange d'information à fort débit. Mais gardons à l'esprit que grâce à la réutilisation, nous rentrons désormais plus que jamais dans l'ère du tourisme spatial et de l'exploration de notre système solaire. Bientôt, faire un tour dans l'espace sera devenu pour certains privilégiés une simple banalité. La réutilisation des lanceurs spatiaux a donc eu un impact phénoménal sur l'évolution des activités spatiales dans le monde et a littéralement transformé la vision du futur de l'homme dans l'espace mais aussi sur Terre avec des technologies plus respectueuses de notre environnement. Elle apporte avec elle de nouveaux risques à maîtriser et de nouveaux défis à relever mais tend définitivement à devenir la

norme de demain en matière de lanceur. La Direction générale de l'armement va même plus loin en soulignant que « *le lanceur réutilisable n'est pas une solution de 2030 mais de 2018. Il faut viser l'étape d'après car, en 2030, SpaceX ou ses successeurs seront vraisemblablement passés à autre chose* ».

BIBLIOGRAPHIE

I - Dictionnaires et encyclopédies

DE LA COTADIÈRE Philippe, PENOT Jean-Pierre, *Dictionnaire de l'astronomie et de l'espace*, Paris, Larousse-Bordas, 1997.

II - Romans

CYRANO DE BERGERAC Savinien, *Histoire comique des états et empires de la Lune*, Paris, 1657.

VERNES Jules, *De la Terre à la Lune*, Paris, Pierre-Jules Hertznel, 1865.

III - Ouvrages scientifiques :

BILSTEIN Roger E., *Stages to Saturn : A Technological History of the Apollo/Saturn Launch Vehicles*, University Press of Florida, 2003.

BRUHNS Sarah, *Yuri Gagarin : The Spaceman*, Hyperink, 2012.

CLERVOY Jean-François, LEHOT Frank, *Histoire de la conquête spatiale*, De Boeck Supérieur, 2017.

DUGGINS Pat, *Final Countdown : NASA and the End of the Space Shuttle Program*, American Scientist, 2007.

JENKINS Dennis R., *Space Shuttle : The history of the National Space Transportation System the first 100 missions*, Midland Publishing, 2006.

NEWTON Isaac, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Londres, 1687.

TSIOLKOVSKI Constantin, *L'exploration de l'espace cosmique par des engins à réaction*, URSS, 1903.

VIGLIETTI Lukas, *Apollo confidentiel : Mémoires d'hommes sur la Lune*, De Boeck Supérieur, Paris, 2019.

WADE Mark, *Shuttle*, Astronautix, 2003.

IV - Articles internet :

BAUER Anne, Les Echos, *2010-2019 : les dix ans qui ont transformé l'espace en Far West*, 2019, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/2010-2019-les-dix-ans-qui-ont-transforme-lespace-en-far-west-1159269>, consulté le 29 Juin 2021.

BAUER Anne, Les Echos, *Arianespace se montre prudent dans une conjoncture difficile*, 10 janvier 2019, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/prudence-chez-arianespace-dans-une-conjoncture-difficile-347622>, consulté le 23 Mars 2021.

CLARK Stephen, Spaceflight Now, *Japan moves forward with replacement for H-2A rocket*, 2014, https://spaceflightnow.com/news/n1403/04h3rocket/#.Uz8PiFc_iHl4, consulté le 12 Mars 2021.

DECOURT Rémy, Futura Sciences, *L'ESA annonce un budget record et des ambitions renforcées*, 2019, <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astronautique-esa-annonce-budget-record-ambitions-renforcees-44765/>, consulté le 22 Mars 2021.

DOUMERC Vincent, *Les bases spatiales dans le monde : les interfaces Terre-espace*, Géoconfluences, 2021, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/articles/bases-spatiales>, consulté le 2 Juillet 2021.

DUFFY Kate, Business Insider, *Blue Origin a déjà vendu près de 100 M\$ de billets pour des voyages dans l'espace, selon Jeff Bezos*, 2021, <https://www.businessinsider.fr/blue-origin-a-deja-vendu-pres-de-100-m-de-billets-pour-des-voyages-dans-lespace-selon-jeff-bezos-188199>, consulté le 14 Août 2021.

GÉDÉON, *L'année spatiale 2020 : le bilan des lancements orbitaux*, in Satellites et lancement, New Space, économie du spatial, 2021, <http://un-regard-sur-la-terre.org/2021/01/l-annee-spatiale-2020-le-bilan-des-lancements-orbitaux.html>, consulté le 28 Juin 2021.

HAMILTON Isobel Asher, Business Insider, *Voici les critères du milliardaire japonais qui voyagera autour de la Lune avec Space X pour trouver la femme qui l'accompagnera*, 2020, <https://www.businessinsider.fr/voici-les-criteres-du-milliardaire-japonais-qui-voyagera-autour-de-la-lune-avec-space-x-pour-trouver-la-femme-qui-laccompagnera-176293#yusaku-maezawa-a-tweete-le-lien-vers-le-formulaire-de-candidature-a-ses-7-2-millions-dabonnes-dimanche-12-janvier-2020>, consulté le 4 Août 2021.

LAUSSON Julien, Numerama, *SpaceX : jamais une fusée Falcon 9 n'avait été autant utilisée*, 2021, <https://www.numerama.com/sciences/710226-spacex-etablit-un-nouveau-record-dutilisation-avec-la-falcon-9.html>, consulté le 14 Avril 2021.

LOUET Brice, SciencePost, *SpaceX repousse les limites de la réutilisabilité de ses boosters*, 2021, <https://sciencepost.fr/spacex-repousse-les-limites-de-la-reutilisabilite-de-ses-boosters/>, consulté le 13 juillet 2021.

MONNIER Pierre, usinenouvelle.com, *Pourquoi l'exploit d'Elon Musk avec SpaceX dépasse celui de Jeff Bezos avec Blue Origin*, 2015, <https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-l-exploit-d-elon-musk-avec-spacex-depasse-celui-de-jeff-bezos-avec-blue-origin.N370613>, consulté le 12 Juillet 2021.

PATOUILLARD Laure, Radio-Canada, *Quelle est l'empreinte environnementale des missions spatiales?*, Moteur de recherche, émission du 12 Novembre 2020, <https://ici.radio-canada.ca/ohdio/premiere/emissions/moteur-de-recherche/segments/chronique/209190/pollution-espace-navettes-carbone-environnement>.

RAULINE Nicolas, Les Echos, *La Nasa attribue à SpaceX le contrat pour aller sur la Lune*, 2021, <https://www.lesechos.fr/industrie-services/air-defense/la-nasa-attribue-a-spacex-le-contrat-pour-aller-sur-la-lune-1307703>, consulté le 12 Mai 2021.

ROUAT Sylvie, Sciences et Avenir, *Premier vol du lanceur Longue Marche 8 : la Chine se lance dans le réutilisable*, 2020, https://www.sciencesetavenir.fr/espace/premier-vol-du-lanceur-longue-marche-8-la-chine-se-lance-dans-le-reutilisable_150364, consulté le 21 Mai 2021.

SELDING Peter B., SpaceNews, *SpaceX says reusable stage could cut prices 30 percent, plans November Falcon Heavy debut, 10 mars 2016*, <https://spacenews.com/spacex-says-reusable-stage-could-cut-prices-by-30-plans-first-falcon-heavy-in-november/>, consulté le 30 Juin 2021.

V - Discours :

MUSK Elon, *Background on Tonight's Launch*, SpaceX, 21 décembre 2015.

VI - Ouvrages juridiques :

COUSTON Mireille , *Liberté spatiale, la norme juridique de l'extrême*, Revue française de droit aérien et spatial, 2000.

JAKHU R. S., DEMPSEY P. S., *Routledge Handbook of Space Law*, Routledge Handbooks, 2017.

Nations Unies, Bureau des affaires spatiales, *Droit international de l'espace : instruments des Nations Unies*, New York, 2017.

PRADELS Grégory, JOLIVET Eric, *Des solutions low cost disruptives pour le secteur spatial*, dans Le Journal de l'école de Paris du Management, 2018.

VII - Rapports :

Académie Nationale de l'Air et de l'Espace, Commission Espace, Rapport du groupe sectoriel sur le transport spatial, <http://www.academie-air-espace.com/upload/doc/docComm/TransportSpatial.pdf>

Note n°9 de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, *Les lanceurs spatiaux réutilisables*, Janvier 2019, http://www.senat.fr/fileadmin/Fichiers/Images/opekst/quatre_pages/OPEKST_2019_0004_note_lanceurs_spatiaux_reutilisables.pdf

PRIMAS Sophie, BOCKEL Jean-Marie, *Rapport d'information n° 131 sur la politique des lanceurs spatiaux (2019-2020), fait au nom de la commission des affaires économiques et de la commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées*, déposé le 19 novembre 2019, <http://www.senat.fr/rap/r19-131/r19-131.html>.

PROCACCIA Catherine, SIDO Bruno, *La politique spatiale européenne, rapport fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, 2015.

REVOL Henri, *Rapport n° 161 (2007-2008), fait au nom de la commission des affaires économiques, Titre V - La responsabilité*, déposé le 15 janvier 2008.

VIII - Mémoires de recherche :

MIGNONAT-LASSUS Justine, *Gestion des risques et aspect assurantiel dans les projets spatiaux contemporains*, Mémoire pour l'obtention du Master 2 Droit et Management du transport aérien, Aix-en-Provence, 2020.

GUEHO Quentin, *La pollution spatiale, reflet des limites du droit international public, Etude de l'encombrement spatial et de son environnement juridique : une démonstration des lacunes du droit de l'espace extra-atmosphérique*, Université Paris II Panthéon-Assas, 2020.

IX - Sites internet :

ArianeSpace, https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2020/06/Arianespace_Brochure_Ariane6_Sept2019.pdf, consulté le 25 Juin 2021.

CNES, *Ariane Next regarde vers la prochaine décennie*, <https://ariane6.cnes.fr/fr/lanceurs-ariane-next-regarde-vers-la-prochaine-decennie>, consulté le 15 Mai 2021.

CNES, *Débris spatiaux : Où en est-on ?*, 2017, <https://cnes.fr/fr/dossier-debris-spatiaux-ou-en-est>, consulté le 21 Mars 2021.

ESA, *ESA moves ahead on low-cost reusable rocket engine*, Juin 2020, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Future_space_transportation/ESA_moves_ahead_on_low-cost_reusable_rocket_engine, consulté le 23 Février 2021.

France-Science, *Budget de 23,27 Md\$ (+2,84 %) pour la NASA pour l'exercice 2021*, <https://france-science.com/budget-de-2327-md-284-pour-la-nasa-pour-l'exercice-2021/>, consulté le 25 Juin 2021.

France-Science, *Les lanceurs réutilisables américains au 1er mars 2021*, <https://france-science.com/les-lanceurs-reutilisables-americains-au-1er-mars-2021/>, consulté le 12 Juin 2021.

Le Figaro, *La Nasa choisit SpaceX pour sa prochaine mission vers la Lune*, 16 avril 2021, <https://www.lefigaro.fr/sciences/la-nasa-choisit-spacex-pour-sa-prochaine-mission-vers-la-lune-20210416>, consulté le 21 Juin 2021.

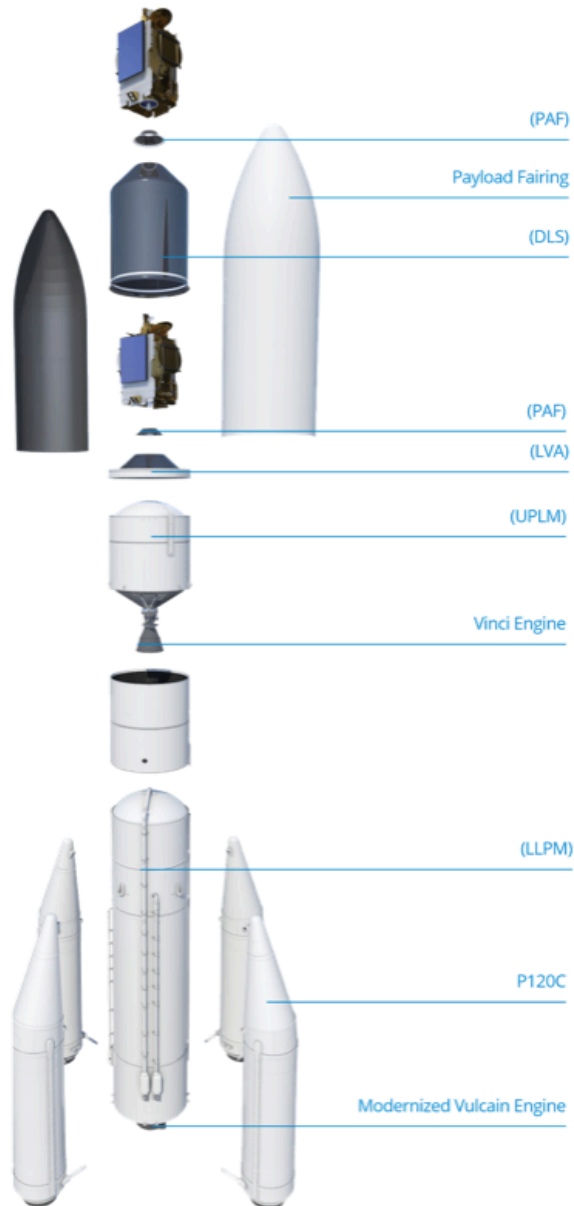
Le Monde, *Jeff Bezos réussit son premier vol dans l'Espace à bord de sa fusée Blue Origin*, 2021, https://www.lemonde.fr/sciences/article/2021/07/20/jeff-bezos-reussit-son-premier-vol-dans-l-espace-a-bord-de-sa-fusee-blue-origin_6088954_1650684.html, consulté le 3 Août 2021.

Le Point, *SpaceX : la fusée Starship réussit son atterrissage pour la première fois*, 2021, https://www.lepoint.fr/sciences-nature/spacex-la-fusee-starship-reussit-son-atterrissage-pour-la-premiere-fois-06-05-2021-2425241_1924.php, consulté le 13 Juin 2021.

Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, *Stratégie et recherche spatiale*, 2019, https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid58651/www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid58651/espace-et-developpement-durable.html#sommaire_faq, consulté le 24 Mai 2021.

ANNEXES

Annexe 1 - Coupe d'une fusée Ariane 6



Source : arianespace.com

Annexe 2 - Les lanceurs Falcon 9 et Falcon Heavy de SpaceX :

CAPABILITIES & SERVICES

SpaceX offers competitive pricing for its Falcon 9 and Falcon Heavy launch services. Modest discounts are available, for contractually committed, multi-launch purchases. SpaceX can also offer crew transportation services to commercial customers seeking to transport astronauts to alternate LEO destinations.

PRICE	FALCON 9	FALCON HEAVY
STANDARD PAYMENT PLAN (THROUGH 2022)	\$62 M UP TO 5.5 mT TO GTD	\$90 M UP TO 8 mT TO GTD
DESTINATION	PERFORMANCE*	PERFORMANCE*
LOW EARTH ORBIT (LEO)	22,800 kg 50,265 lbs	63,800 kg 140,660 lbs
GEOSYNCHRONOUS TRANSFER ORBIT (GTO)	8,300 kg 18,300 lbs	26,700 kg 58,860 lbs
PAYLOAD TO MARS	4,020 kg 8,860 lbs	16,800 kg 37,040 lbs

*Performance represents max capability on fully expendable vehicle
Inclination: LEO = 28.5°, GTO = 27°

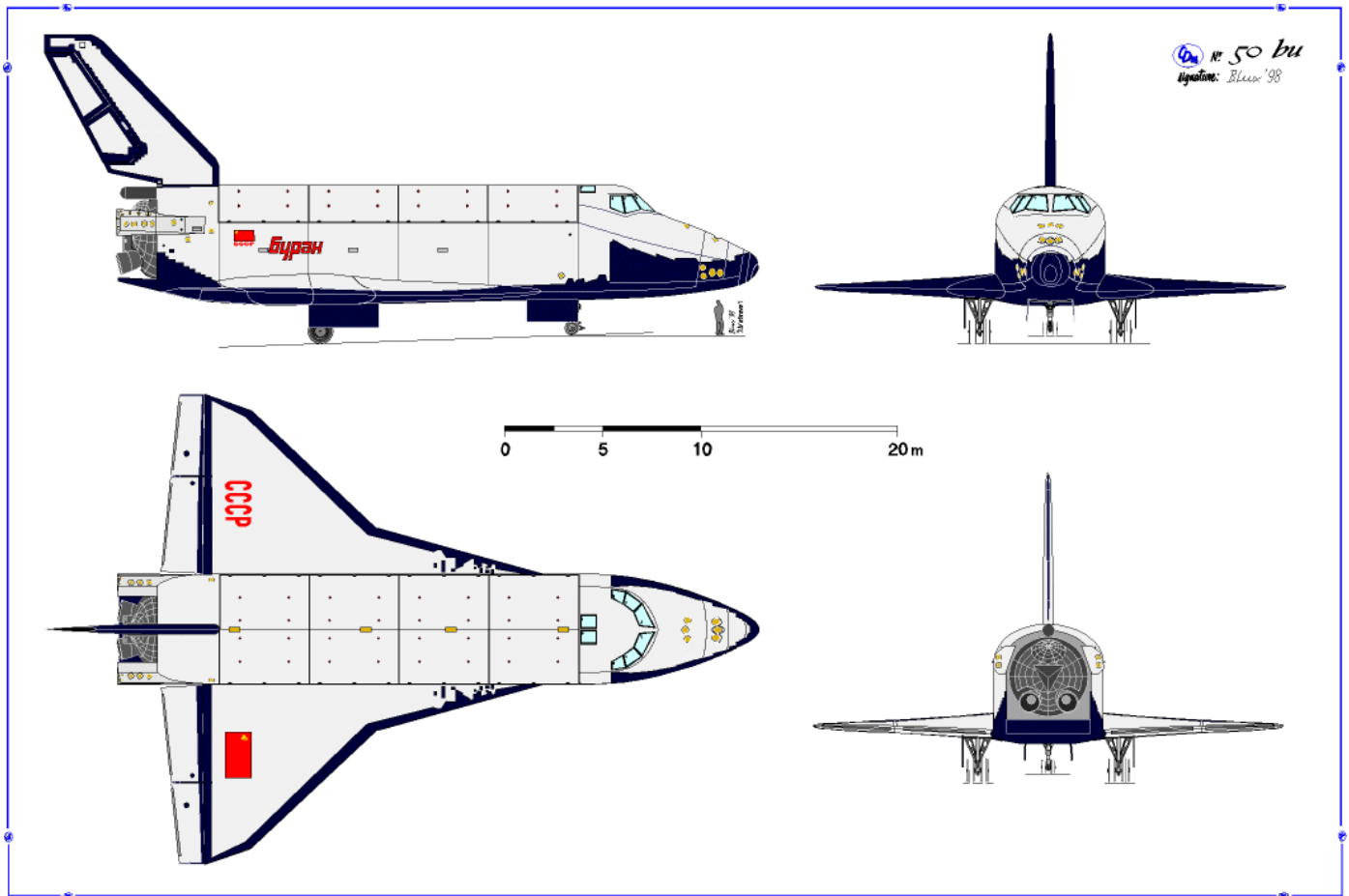
Source : spacex.com

Annexe 3 - Chine et USA : la nouvelle course à l'espace



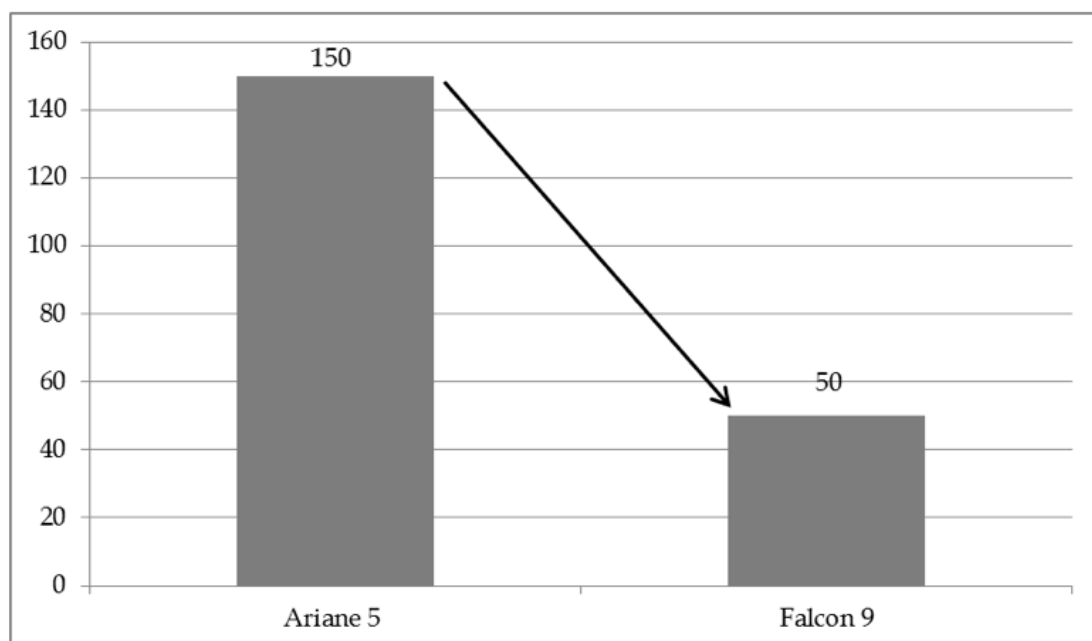
Les lancements orbitaux de l'année 2020 : la nouvelle course à l'orbite entre la Chine et les USA.
Cumul des lancements effectués au cours de l'année. Infographie : Gédéon.
Image de fond : premier vol de la fusée Long March 5B le 5 mai 2020. A bord, la charge utile la plus lourde de l'année : un prototype inhabité du vaisseau spatial chinois de nouvelle génération.
Crédit image : CASC

Annexe 4 - La navette spatiale américaine

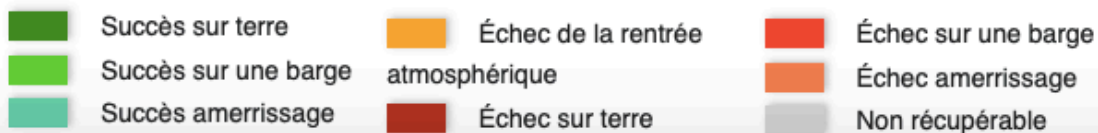
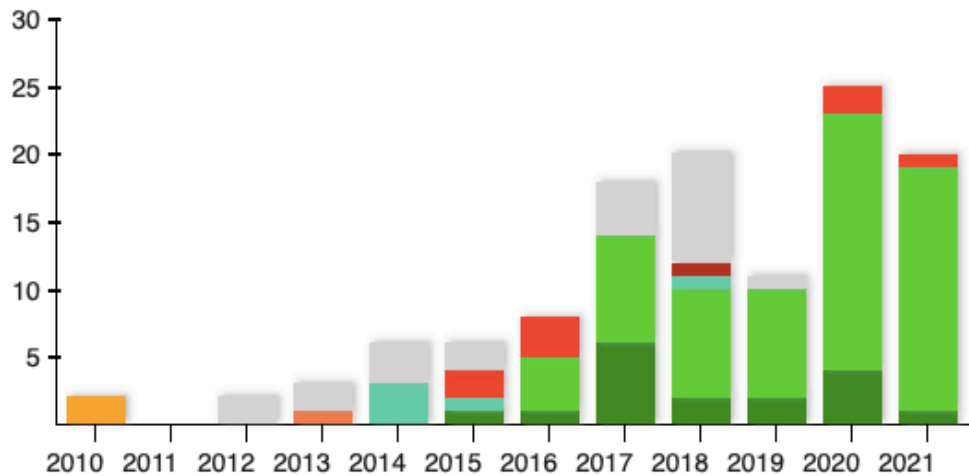


Source : capcomespace.net

Annexe 5 - Comparaison des prix de lancement en orbite GTO pratiqués par SpaceX avec son Falcon 9 et Arianespace avec Ariane 5 (en millions de dollars)

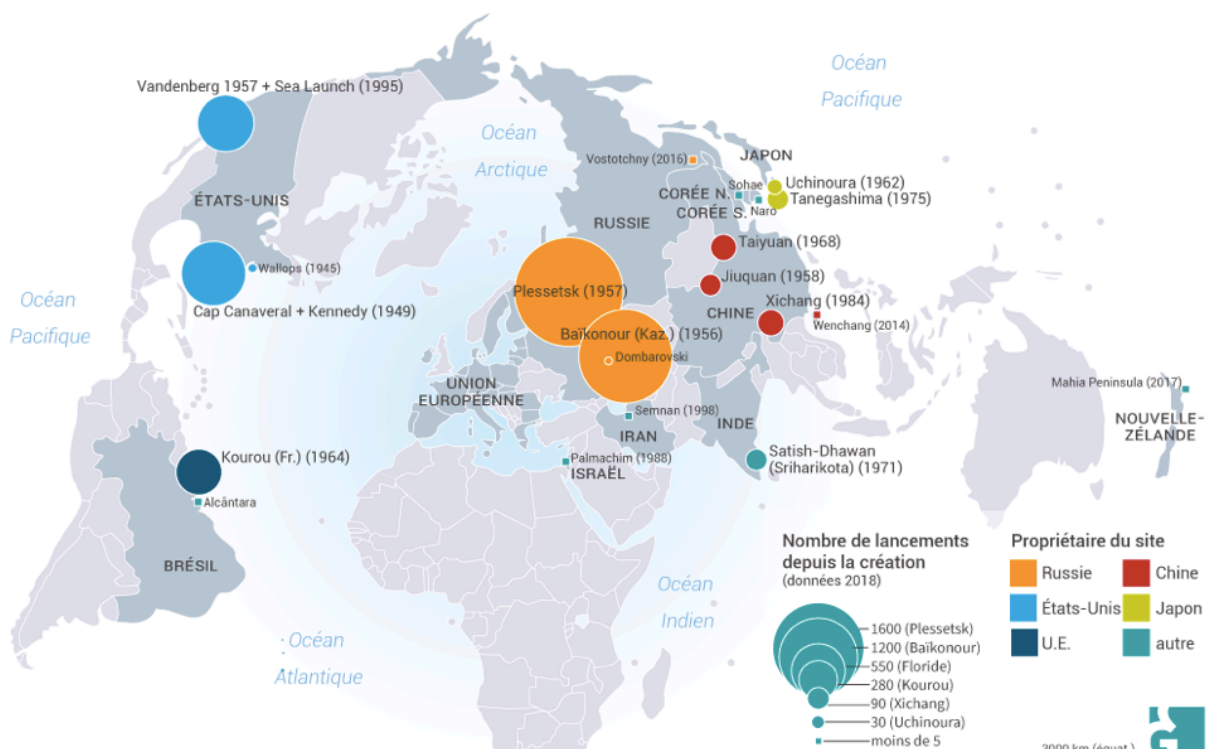


Annexe 6 - Succès et échecs de la récupération du Falcon 9 de SpaceX



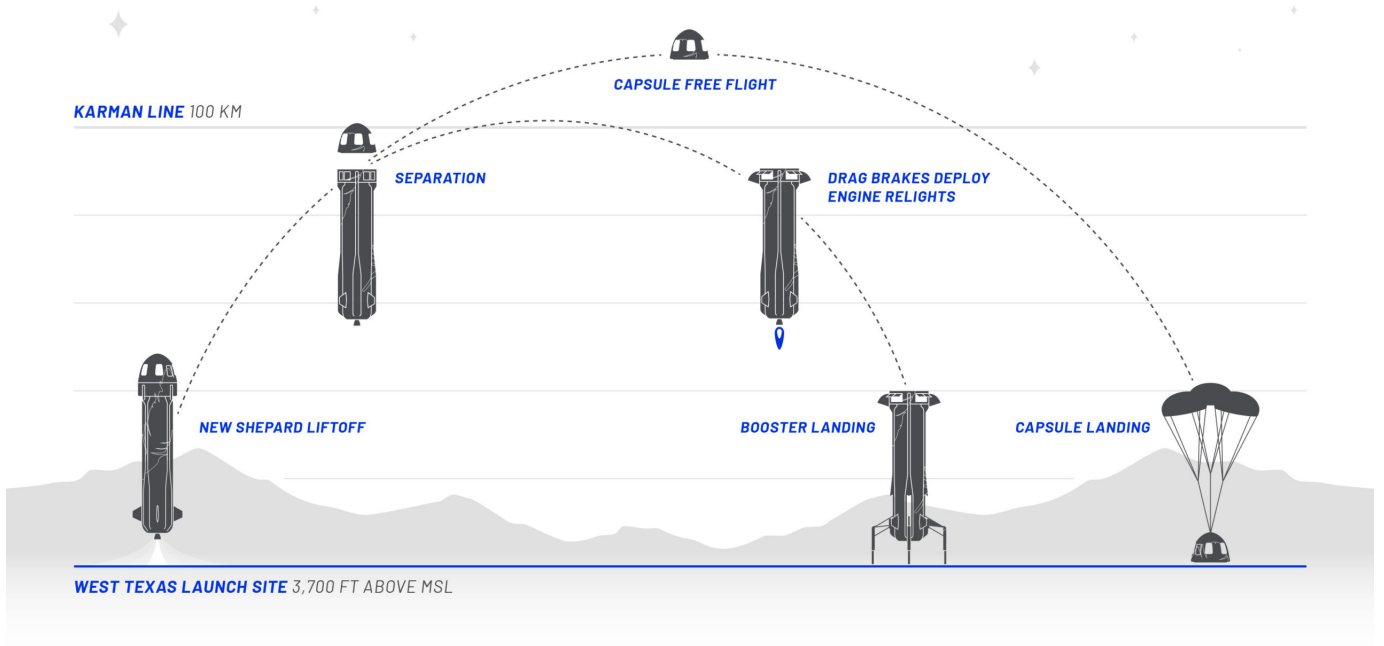
Source : Wikipédia

Annexe 7 - Planisphère des sites de lancement spatial



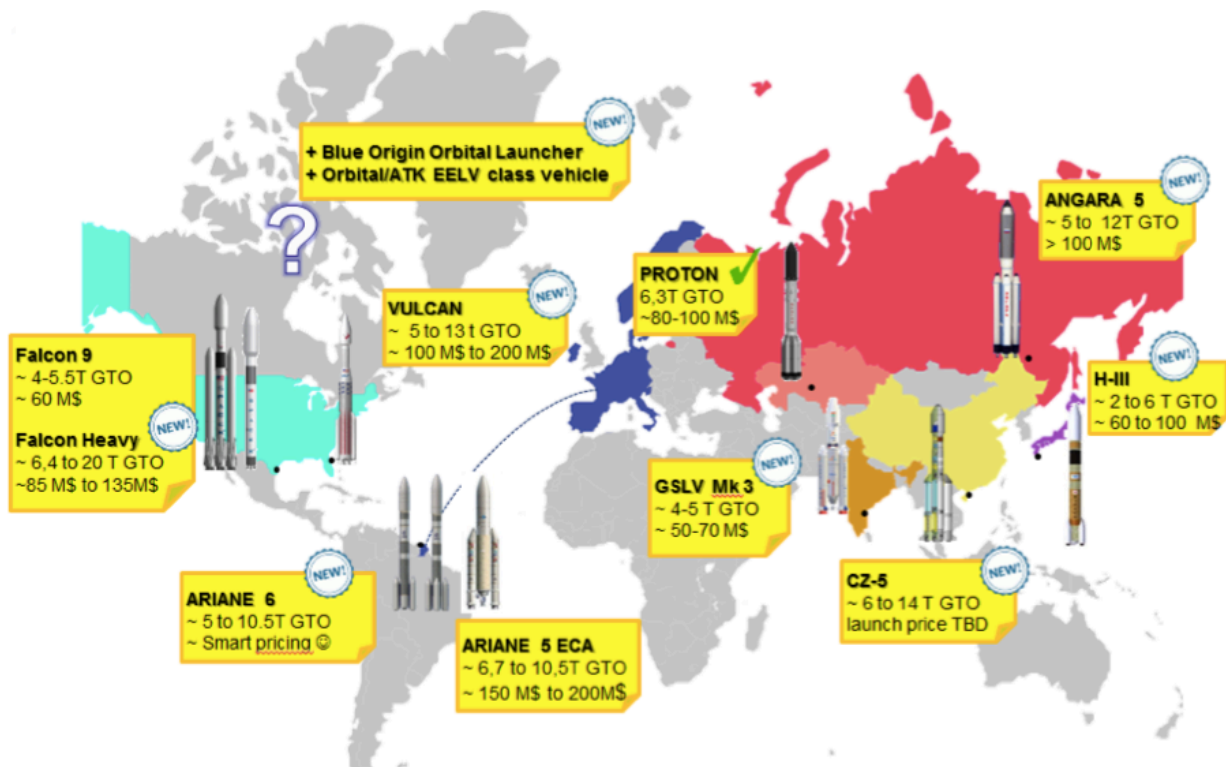
D'après la liste établie par les contributeurs de Wikipédia France et les données collectées par V. Doumerc. Fond de carte : d-maps.com. Projection : Bertin1953
Cartographie : J.-B. Bouron, Géoconfluences, 2021. Licence cc BY-SA-NC

Annexe 8 - La récupération du premier étage pour le New Shepard de Blue Origin

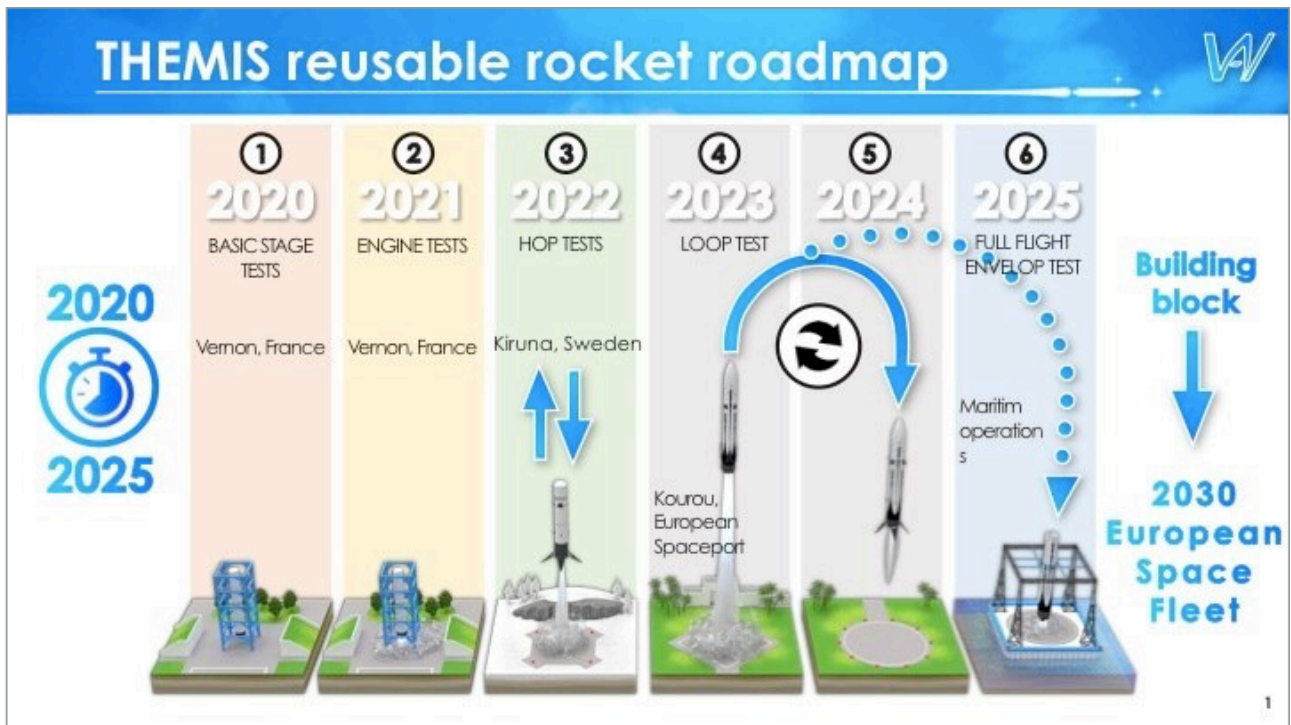


Source : Blue Origin

Annexe 9 - Des nouveaux lanceurs plus compétitifs :



Annexe 10 - Les étapes vers le lanceur réutilisable Themis de l'ESA :



Annexe 11 - Interview téléphonique de Christophe Bonnal, responsable des lancements au CNES, par Gabriel Voisin - 2021 :

Gabriel Voisin - *Est-ce que le réutilisable est quelque chose de totalement nouveau pour le secteur spatial ?*

Christophe Bonnal - *Il faut bien comprendre que les lanceurs réutilisables existent depuis toujours ou presque (1986). La récupération et la réutilisation demandent des éléments techniques complexes : il faut un bon état constant et que les éléments soient qualifiés pour faire plusieurs vols. Autre point, les moteurs s'usent, donc si on veut qu'ils tiennent ils doivent être sur-dimensionnés donc on doit s'adapter pour complexifier le moteur et l'alourdir. Le coefficient de sécurité (paramètres permettant de dimensionner des dispositifs) classique est 1,25 (depuis Saturne V) sauf quand c'est du réutilisable, car on passe alors à un coefficient de 1,4 : la structure est plus lourde, l'épaisseur des parois sera alors plus épaisse. On sait le faire mais au lieu de faire 10 tonnes de charge utile on en fait moins. La réutilisation classique de type Falcon 9, nous savons la faire depuis toujours. Avant il y a eu le DCX qui a très bien volé jusqu'au crash (1985). En effet, ce n'est pas la même chose de monter que de descendre. Pour apprendre aux futurs lanceurs réutilisables de l'Europe à voler et contrôler leur altitude, le Cnes a initié le programme FROG qui propose une plateforme d'apprentissage et de développement pour tester en vol des algorithmes GNC (guidage, navigation et*

contrôle). Donc du point de vue du volet technique il n'y a pas de difficulté, on sait le faire.

G. V. - Dans ce cas, pourquoi l'Europe est-elle restée sceptique dès le départ à propos du réutilisable ?

Christophe Bonnal - En réalité, c'est le volet technico-économique qui s'avère bien plus compliqué. Par exemple, un Falcon 9 se décline en 3 volets :

- Consommable : on jette le 1er étage, il fait alors 6 tonnes de performance.
- On le récupère sur une barge : il faut des pieds, des ergols, donc 4,5 tonnes de performance.
- Il revient au point de départ : sur la pas de tir, il doit faire demi tour; qu'il freine, qu'il annule le vecteur vitesse horizontale, il fait 2,8 tonnes de charge utile.

En résumé, c'est bien de réutilisé mais on ne fait plus la même performance. Si on devait récupérer le 1er étage avec Ariane 5 on ne pourrait pas envoyer 2 satellites donc pour récupérer un étage, ça ne marche pas du tout. Mais ça marche avec Elon Musk car il est en situation de monopole au Etats-Unis. Jusqu'à maintenant c'était des lanceurs institutionnels avec les prix qu'ils voulaient. Puis le gouvernement a dit de se mettre en compétition, mais Space X est arrivé en disant qu'ils étaient prêt à proposer un service moins cher et finalement a tout remporté avec des cas quasiment caricaturaux. Aujourd'hui, Space X a un super lanceur avec un bon niveau de performance et quand il embarque une charge utile plus petite, en fonction, il consomme l'étage ou s'il a de la marge, il le récupère sur une barge ou encore sur Terre. En ce qui concerne le contrat signé pour l'ISS : les Dragons sont remplis en fonction du contrat avec la NASA. Le Dragon est bien plein mais la performance demandé au Falcon 9 n'est que de moitié donc il peut revenir.

G.V. - Que pensez-vous de la stratégie d'Elon Musk et de SpaceX ?

Christophe Bonnal - Elon Musk a récupéré tous les contrats de NASA (desserte de la station, etc). En fait, il a tellement de missions, qu'il n'a pas assez d'usines pour tout produire, notamment pour ses moteurs Merlin. Il en utilise 10 par lancements. S'ils font 20 lancements par an il faudrait qu'ils produisent 200 moteurs par an et c'est impossible. Encore une raison pour laquelle il est obligé de récupérer des moteurs (9 à chaque mission). Lui, a adopté une stratégie différente de la notre : il a fallu vraiment qu'il commence à bien réutiliser pour que la NASA et l'US Air force accepte de passer par lui. Donc une mauvaise passe est en vue pour eux car on va rapidement avoir une non sur-qualification des moteurs alors qu'ils sont destinés à une réutilisation intensive.

G.V - En ce qui concerne le CNES, vers quelle technologie se tourne-t-on actuellement ?

Christophe Bonnal - Pour le CNES, la prochaine génération sera potentiellement réutilisable en visant 3, voire 4 réutilisations. Le moteur Prometheus a été dessiné pour être réutilisable, plus lourd mais en réalité léger

car conçu par impression 3D : donc peu cher (1,2 millions d'euros). Il devrait être utilisé sur le lanceur Ariane Next. Le moteur d'une navette était dessiné pour être réutilisable 50 fois mais on n'a pas dépassé les 8 fois. Il était démonté entre chaque vol (c'est le moteur le plus cher du monde). Quand on est réutilisable on est plus cher. Prometheus est à la fois pas cher et réutilisable. Il est vrai que le CNES reçoit beaucoup de reproches sur le fait que l'on ne soit pas réutilisable mais les choses risquent de bientôt évoluer. On a 3 lanceurs en Europe : Ariane, Soyuz, Vega. Quand on aura Prometheus, on pense qu'il va se décliner sur toute la gamme : il remplacera les tris. On aura une rationalisation très forte, avec une production du coup plus élevée car toutes les missions seront faites avec tous les éléments : donc moins cher, donc plus de clients.

G.V. - *Que pensez-vous du projet fou de SpaceX avec son lanceur Starship ?*

Christophe Bonnal - *Il faut comprendre que plus un lanceur est gros, plus il devient léger. Pour un Starship il faut donc des super moteurs (Raptor) mais limités en efficacité car c'est du méthane liquide et de l'oxygène liquide (LOX). Il faut que la structure soit la plus légère possible donc il faut un truc gigantesque. Si il était plus petit, il serait trop lourd par rapport à la masse d'ergol embarqué. Le CNES regarde avec beaucoup d'attention les agissements de SpaceX. Si ça marche complètement comme il le souhaite, c'est un accès à l'espace gratuit. Beaucoup de difficultés techniques persistent cependant : on sait faire sur un premier étage mais sur un premier étage orbital c'est autre chose. L'opérationnel n'est pas avant 2030, 2028 à la limite.*

G.V. - *Est-ce que, juridiquement, le réutilisable est encadré en France ?*

Christophe Bonnal - *Les lois spatiales françaises encadrent tout ce qui passe sur le sol français : elles dictent les contraintes de sauvegarde vis-à-vis de la montée, de la retombée des étages mais il n'y a rien sur les étages qui reviennent sur le site (qui sont des missiles en fait). Donc on a des contraintes très strictes. Le Centre spatial Kennedy c'est grand, mais en Guyane c'est chaud. On doit comprendre à quel type de contraintes nous devons faire face pour ne pas tuer le marché en même temps. C'est pourquoi un groupe de travail a été formé au CNES pour un éventuel projet de loi. On en a besoin pour lancer les prochains démonstrateurs depuis Kourou (Themis et Calisto). Quels sont les critères ? Les distances, les seuils de dangerosité. Une fois qu'on a atterri, qu'est ce qu'on fait ? La route est encore longue.*

TABLE DES MATIERES

Remerciements	5
Sommaire	7
Liste des abréviations	8
Introduction	10
PARTIE I - UNE SOLUTION QUI S’AFFIRME SUR LE MARCHE SPATIAL	20
<i>Titre 1 - Une rupture technologique qui s’inscrit dans le temps</i>	20
<i>Chapitre 1 - Des débuts plutôt compliqués</i>	20
Section 1 -	
Section 2 - <i>L’échec du programme de la navette spatiale américaine</i>	23
<i>Chapitre 2 - La renaissance de l’intérêt pour les lanceurs réutilisables</i>	26
Section 1 - <i>Le pari fou de SpaceX : l’émergence d’un nouveau standard</i>	26
Section 2 - <i>L’avènement d’une nouvelle génération de lanceurs réutilisables</i>	29
<i>Titre 2 - Le réutilisable en réponse aux problématiques actuelles</i>	32
<i>Chapitre 1 - Une technologie plus avantageuse</i>	32
Section 1 - <i>Des lancements dotés d’une technologie de plus en plus fiable</i>	32
Section 2 - <i>La mise en orbite de nombreuses charges utiles</i>	34
<i>Chapitre 2 - Une technologie en phase avec les exigences environnementales et la transition écologique</i>	36
Section 1 - <i>Vers une réduction significative des débris orbitaux et terrestre</i>	37
Section 2 - <i>Un moyen d’abaisser considérablement l’impact des lancements</i>	40
PARTIE II - UNE SOLUTION A LA PERENNITE INCERTAINE	43
<i>Titre 1 - Une rentabilité économique qui reste controversée</i>	43
<i>Chapitre 1 - Un accroissement de la concurrence sur le marché spatial : l’avènement du New Space</i>	43
Section 1 - <i>La multiplication notoire des acteurs privés et institutionnels</i>	44
Section 2 - <i>La volonté de protéger son autonomie d’accès à l’espace</i>	46
<i>Chapitre 2 - La problématique des coûts : une équation économique encore instable</i>	48
Section 1 - <i>La réutilisation du lanceur : une baisse systématique des coûts ?</i>	49
Section 2 - <i>La nécessité d’une forte cadence de tir pour être rentable</i>	52
<i>Titre 2 - Des risques nouveaux qui demeurent élevés et difficiles à maîtriser</i>	55
<i>Chapitre 1 - L’absence d’un cadre juridique clairement défini</i>	55
Section 1 - <i>L’insuffisance de la réglementation française en matière de retour des lanceurs spatiaux sur Terre</i>	55
Section 2 - <i>La nécessité d’actualiser la réglementation internationale</i>	58
<i>Chapitre 2 - Un secteur soumis à une constante évolution</i>	60
Section 1 - <i>Des échecs toujours présents</i>	60
Section 2 - <i>Vers le transport commercial de passagers : la maîtrise risque absolu</i>	63
Conclusion	66
Bibliographies	69
Annexes	74
Table des matières	82

