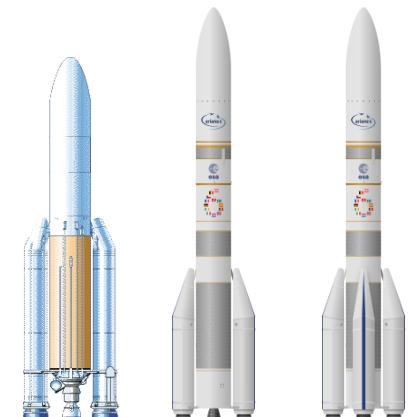


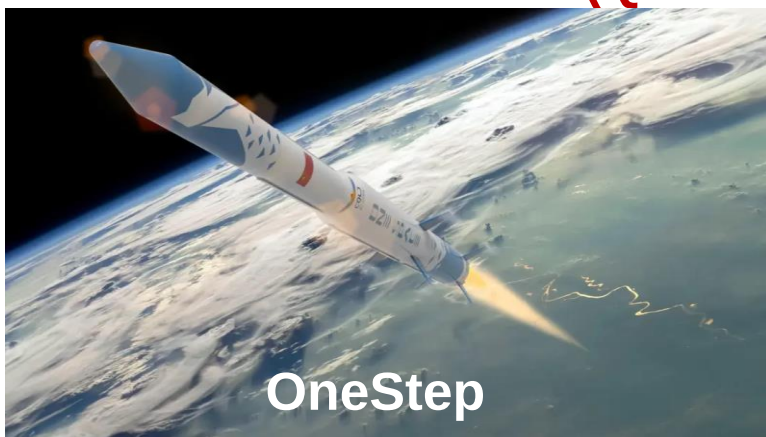
« COMMENT FAIRE LORSQU'ON NE CONNAÎT RIEN AUX FUSÉES ET QUE L'ON VEUT EN MÊME TEMPS INVESTIR L'ESPACE ? »



(Question de Gérard Balantzian le 31 mai 2020)

Patrick FARFAL

Emergence Santa Café
16 novembre 2020



Sommaire

- ❑ Véhicules et Lanceurs Spatiaux
- ❑ Qu'est-ce qu'un Lanceur ?
 - Enjeux et Contraintes
 - Complexités technique et industrielle
 - Types d'orbites
 - Missions Ariane 5 – Performances vs orbites
 - Qu'est-ce qu'Ariane 5 ? - Innovation
- ❑ Elon Musk et Jeff Bezos
- ❑ EM & JB cachent la forêt
- ❑ Et le « *green* » dans tout ça ?
- ❑ Vega et Ariane 6
- ❑ Coût de l'Ingénierie spatiale et Leçons tirées
- ❑ Quelle(s) suite(s) ?

Réemploi de matériel
issu de cours ou de
stages

*IONIS STM – School of
Technology &
Management,
ArianeGroup*

ou de conférences

*CNAM, Université d'été
de Canton,
Chine, Université de
QingDao*

⇒ 3 planches en anglais

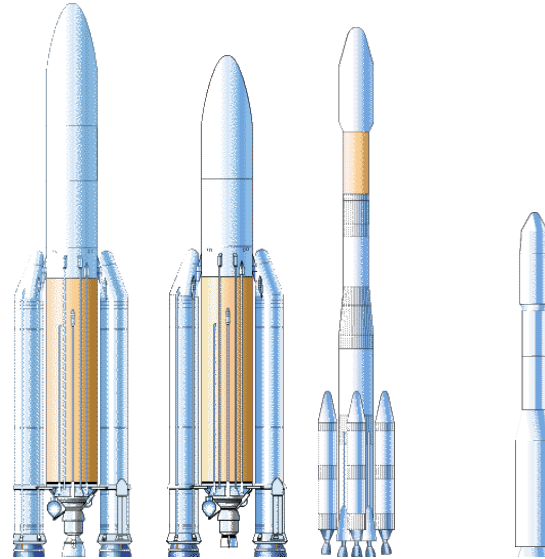
VÉHICULES ET LANCEURS SPATIAUX

**CU : Charge Utile
(Payload)**

Launch/Space Vehicles (European)



Ariane 5



Ariane Family + Vega



Spot 5



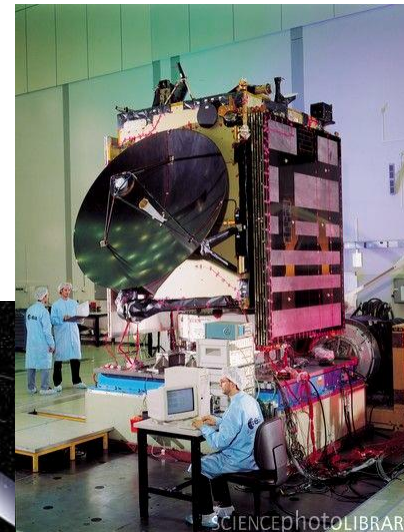
Hot Bird 7

**Satellite = Véhicule ?
oui : CU Télécoms,
Instruments Scientifiques,
Moyens d'Observation...**

**Mais...
Problématiques différentes !**



Rosetta Space Probe

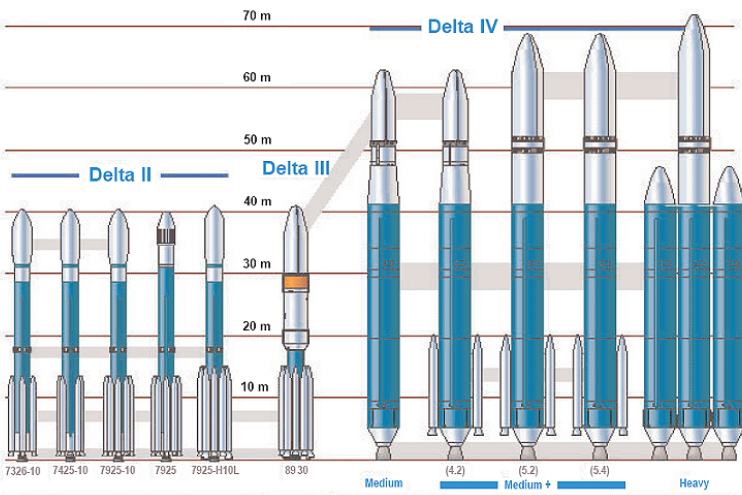


**Automated Transfer
Vehicle (ATV)**

Launch Vehicles

Soyuz F-G

长征系列运载火箭



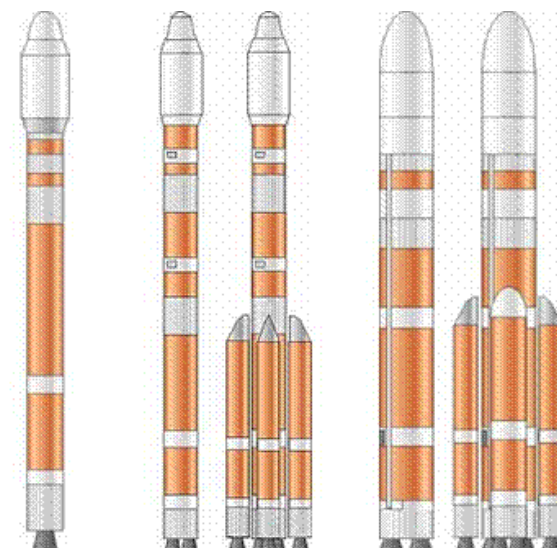
Delta EELV Family (II to IV)



Space X
Falcon Heavy



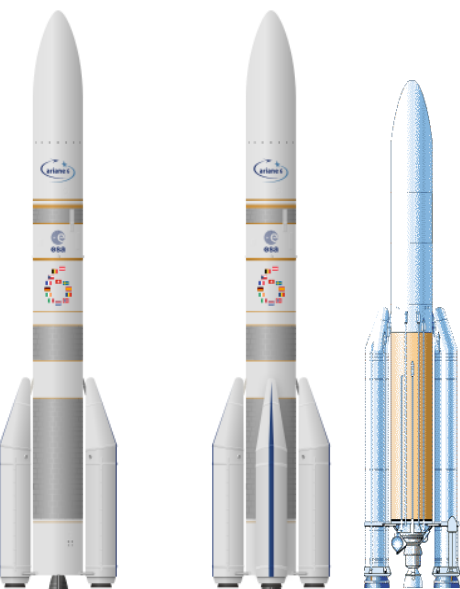
Proton Zvezda



Long March 5



Long March 9
(2030)

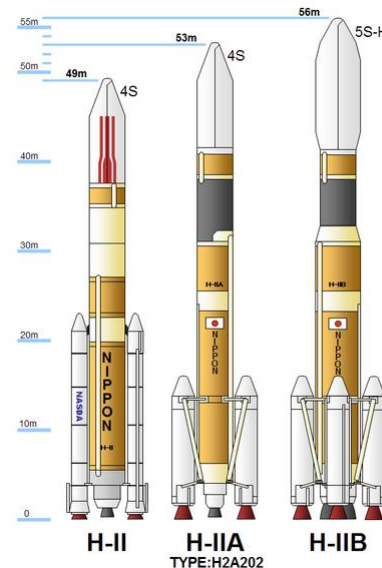
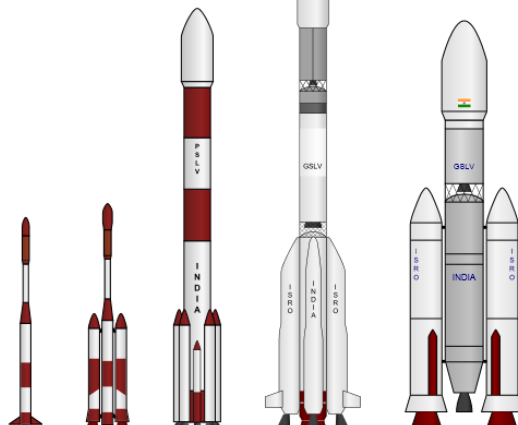


Ariane 6
(2022)

Ariane 5

Vega

Indian Launch Vehicles



H II Family



Long March 3A
(Tianlian 1 launch)



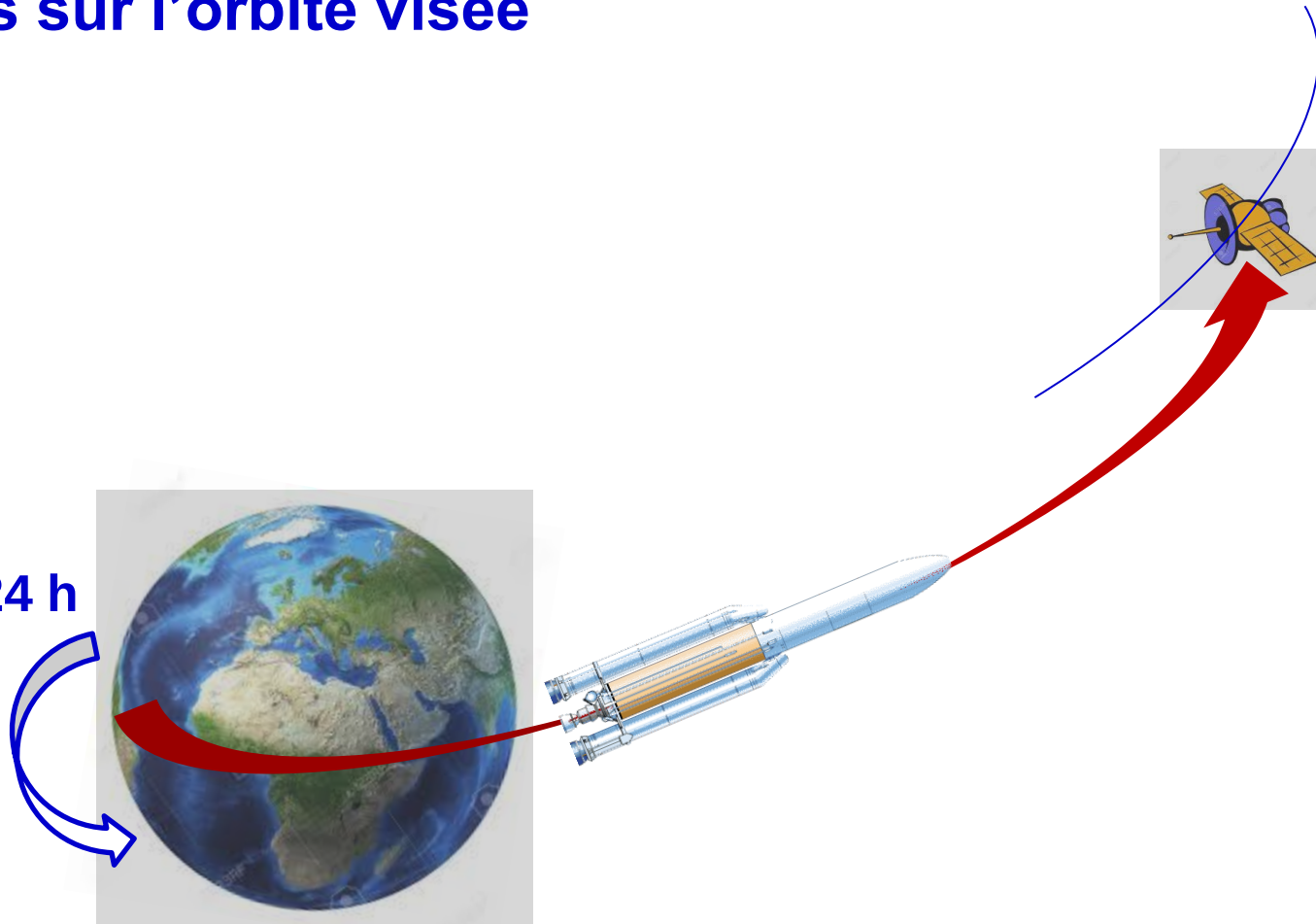
Long March 3B

QU'EST-CE QU'UN LANCEUR ?

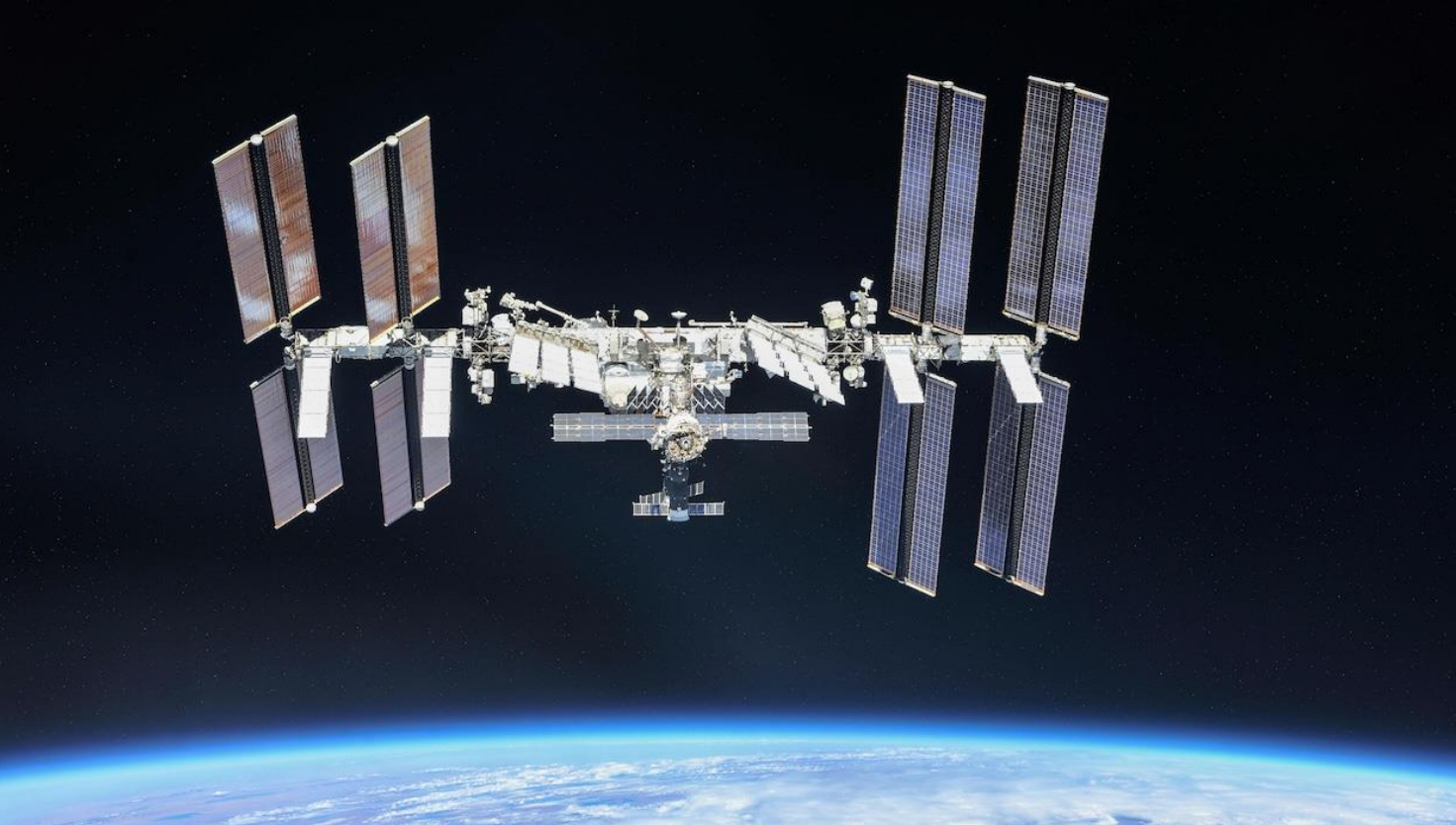
Lanceur spatial (genre Ariane 5) : Mission

- Accélérer une Charge Utile [*] d'une vitesse faible [******] jusqu'à ~10 km/s sur l'orbite visée

[**] 40 000 km/24 h
= 1670 km/h
= ~463 m/s



[*] Satellites civils ou militaires, de Télécom ou d'Observation, Sondes, autres Véhicules spatiaux (ravitailleurs de la Station Spatiale Internationale...)



ISS

International Space Station

Altitude ~400 km

Masse 420 t

Dimensions 110 m * 74 m * 30 m

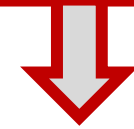
Terrain de football

90 à 120 m * 45 à 90 m



Spécificités des Lanceurs Spatiaux

Contraintes
sur les Choix
« *Design drivers* »



Tout Valider

➤ Contraint la
méthode de
Qualification

➤ Contraint les
Technologies

➤ Contraint les
Algorithmes

➤ Contraint les
Technologies

➤ ~~Ctrl – Alt – Suppr~~

❑ Enjeux et Contraintes

❑ Coût d'un lancement classique: ~150 à 200 M€
Consommable ! (sauf exceptions)

❑ Sanction binaire !

❑ Démonstration d'ensemble dès le premier vol

❑ Humain concerné par certaines missions

❑ Sévérité des Environnements (mécaniques,
thermiques, rayonnements...)

❑ Haut niveau de réactivité

absence de pilotage pendant 100 ms
⇒ perte du Véhicule (Ariane 5)

❑ Haut niveau de fiabilité

❑ Véhicules autonomes



PLUS VRAI POUR
LE « NEW SPACE »

Specificities of Launch Vehicles Program

□ Schedule

- 10 years between Ariane 5 full scale development kick-off (1987) and 1st successful flight (1997)
- 1st commercial flight 2 years later

PLUS VRAI POUR LE « *NEW SPACE* »

→ **SPACEX : *FALCON 1* 2002-2006, *FALCON 9* 2006-2010**

(NI POUR ARIANE 6 2014 – (2020) 2022)

□ Limited Mass-production

- A few tens for Ballistic Missiles
- 252 Ariane launches (1 to 5) from Dec. 24th, 1979 to Aug. 15th, 2020 – 109 Ariane 5
- 5 ATV (Automated Transfer Vehicles)

Specificities of Launch Vehicles Programs

□ Technical/Industrial Complexity

Example : Components of the Main Cryotechnic Stage

STRUCTURES, TANKS, SPHERES

12 Manufacturers



PYROTECHNICSYSTEM

10/12 Pieces of Equipment
5 Manufacturers

FLUIDICSYSTEM

12/15 Pieces of Equipment
8/10 Manufacturers

ELECTRICAL SYSTEM

15 Pieces of Equipment
12 Manufacturers



VULCAIN
MOTOR

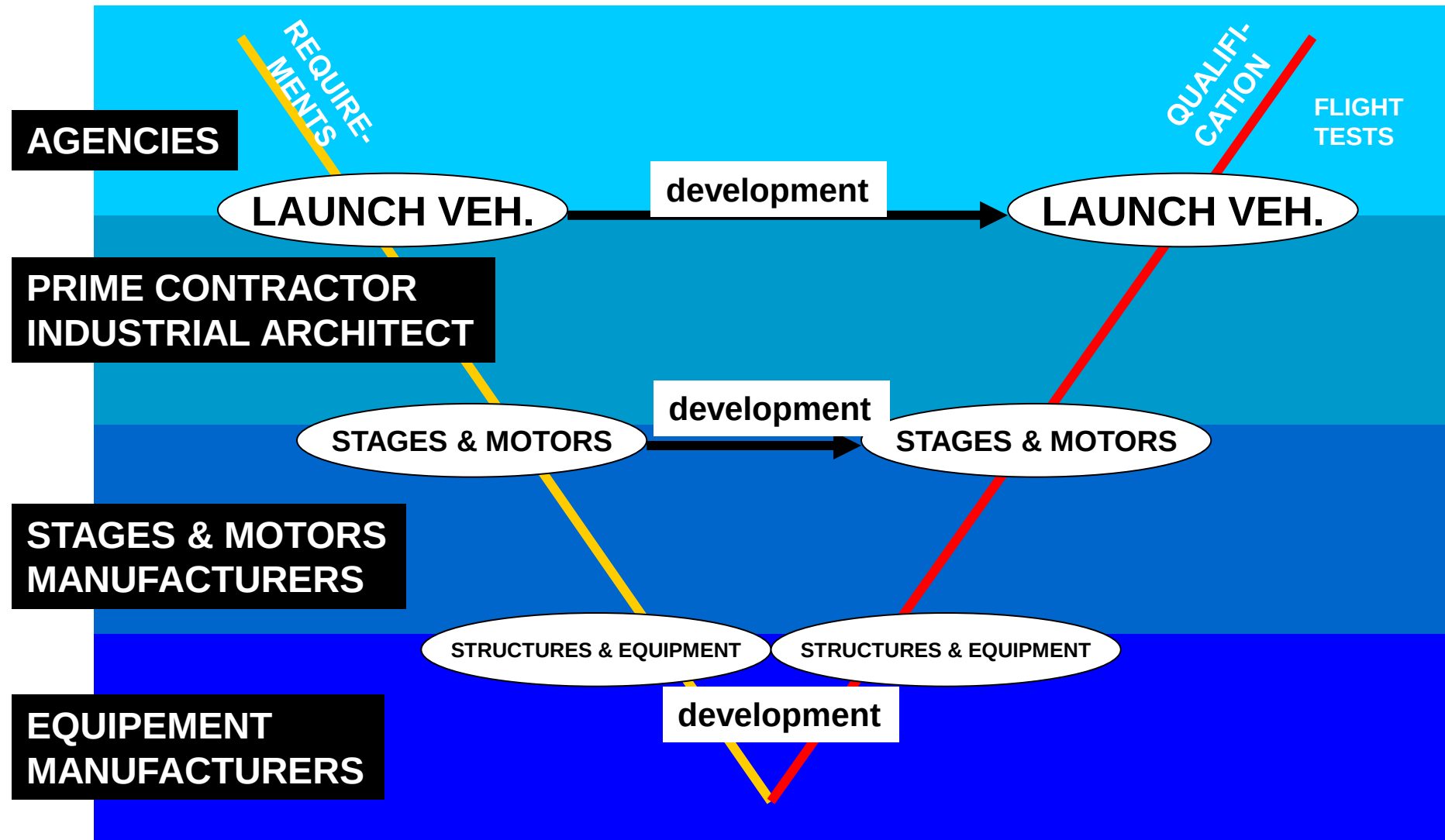
20 Manufacturers

- Hydrogen Turbopump
- Oxygen Turbopump
- Divergent (Nozzle)
- Combustion Chamber
- Gas Generator
- 20 Valves
- 20 Electrovalves
- Pipes, Harnesses
- Flexibles, Sensors



Specificities of Launch Vehicles Programs

□ Organizational Complexity



Specificities of Launch Vehicles Programs

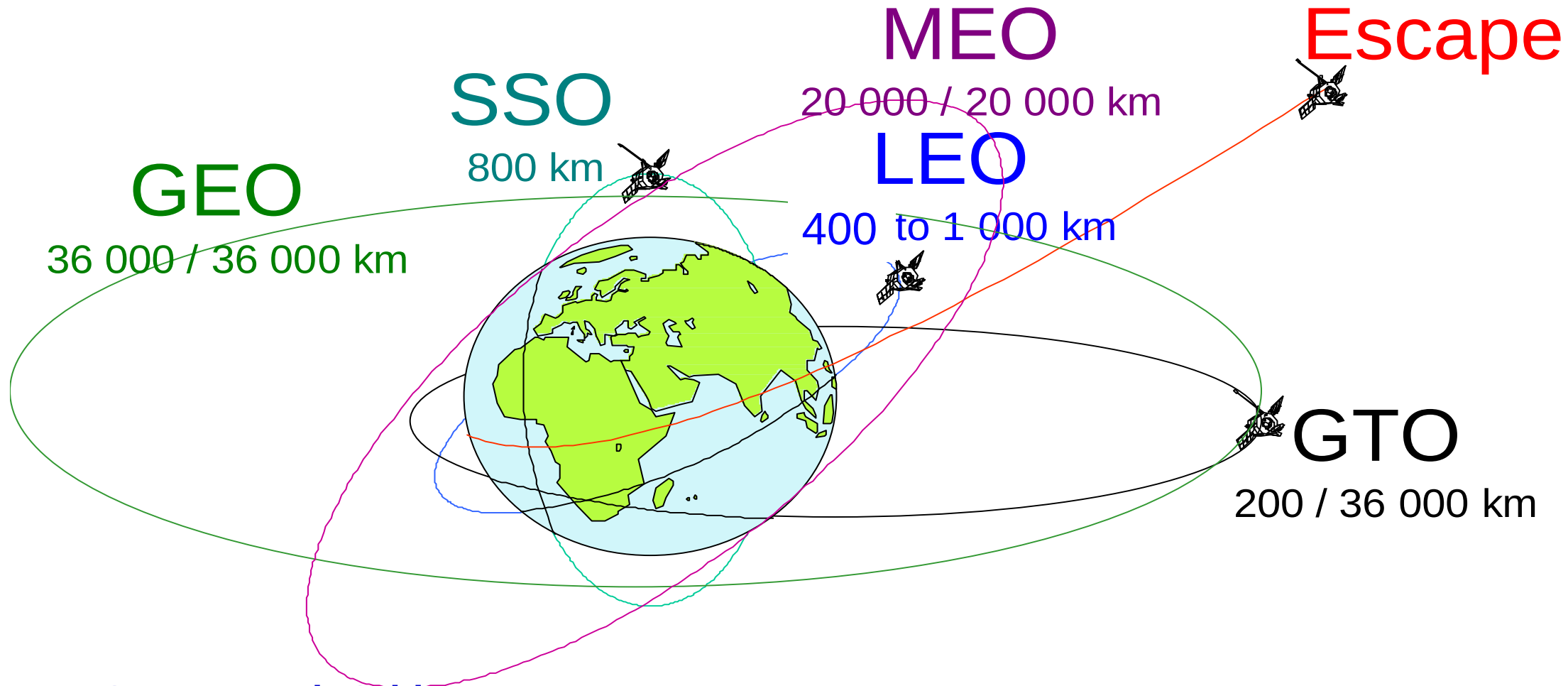
□ Industrial Complexity

- ~150 Manufacturers on Ariane 5 Program
- More than 100 European experts participated in the Preliminary Design Review of Ariane 5 MidLife Evolution (A5ME) [*] Launch Vehicle from September to November 2011

[*] Updated definition of Ariane 5 (2016)

Les Spécifications de Management, applicables par le Maître d'Ouvrage, le Maître d'Œuvre et tous les coopérants et sous-traitants, si elles sont indispensables (leçons du programme Europa), n'effacent pas pour autant la complexité de l'organisation

Launch Vehicles: Mission – Various Orbits



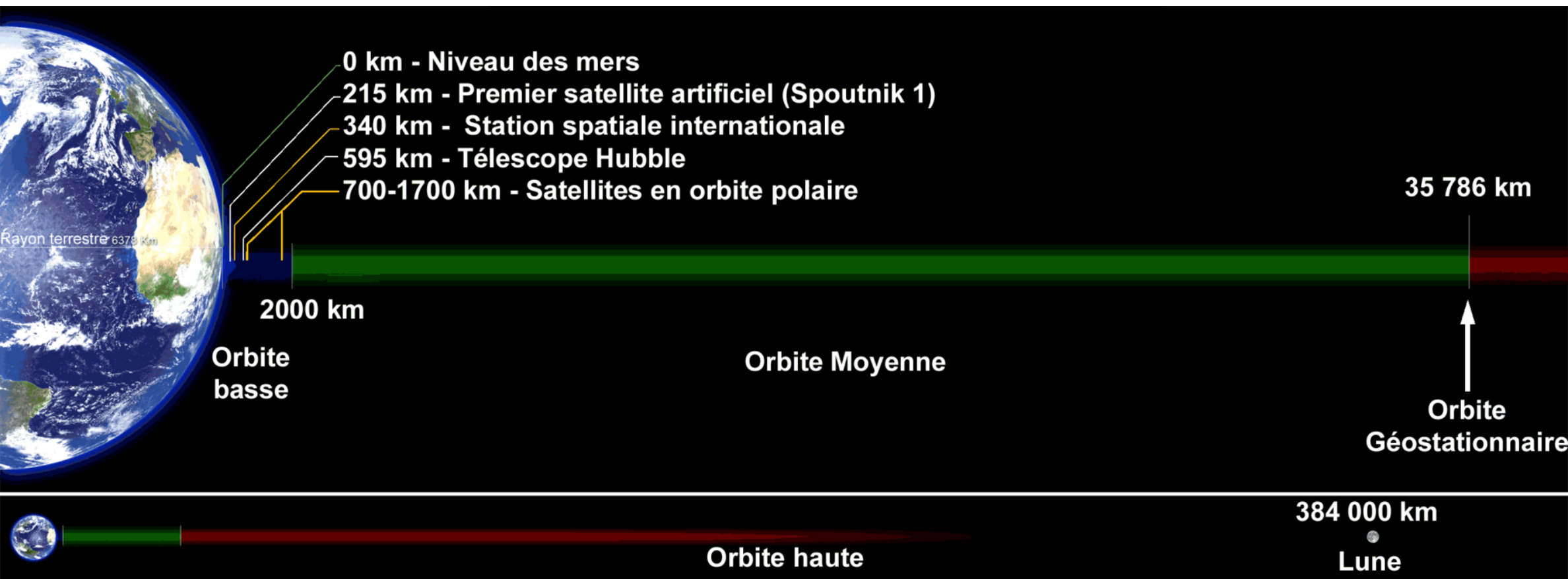
LEO: Low Earth Orbit

MEO: Mid Earth Orbit

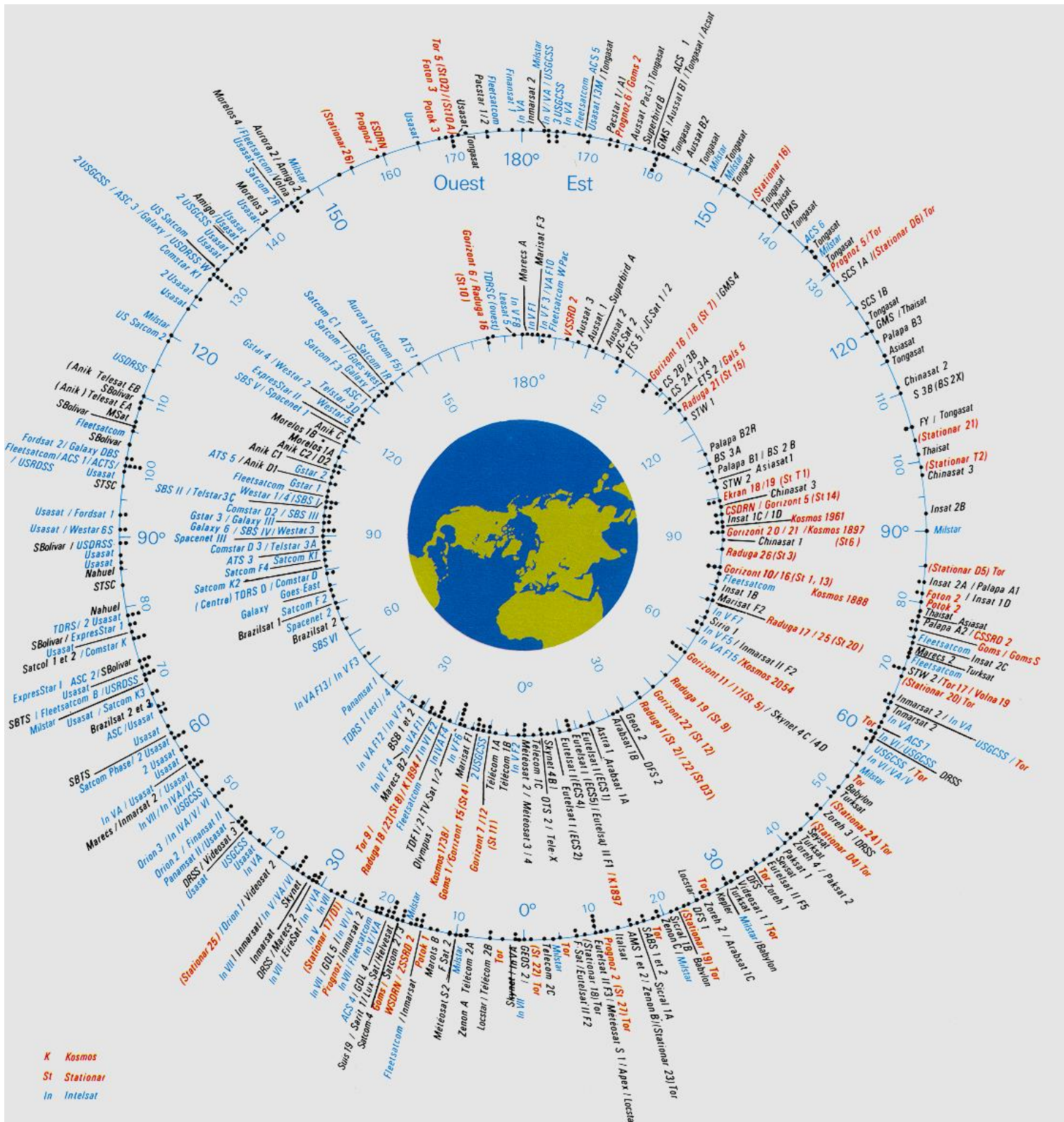
GEO: Geostationary Earth Orbit

GTO: Geostationary Transfer Orbit

SSO: Sun-Synchronous Orbit



GEO Satellites (2004)



2017 : le bilan des lancements

**91 lancements
orbitaux**

*7 échecs ou
échecs partiels*

**6 pays
lanceurs**

*USA (29), Russie (19)
Chine (18), Europe (11),
Japon (7), Inde (5)*

**369 satellites
mis en orbite
avec succès**

par une fusée

**374,7 tonnes
satellisées**

*Masse moyenne
par satellite : 1016 kg
Masse record : 12,9 tonnes*

**4 vols
habités**

*Tous réussis, vers la
Station Spatiale
Internationale (ISS)*

**173 satellites
d'observation**

*Télécommunications: 76
Technologie : 33
Multi-mission : 26*

www.regard-sur-la-terre.over-blog.com

Lancements orbitaux 2018

Orbites visées

Note :
distances et échelles
approximatives

MEO

- 13 lancements
- 27 satellites
- 28,7 tonnes en orbite

LEO

- 54 lancements
- 360 satellites
- 91,6 tonnes en orbite

ISS

- 13 lancements
- 12 vaisseaux vers l'ISS
- 93 tonnes en orbite

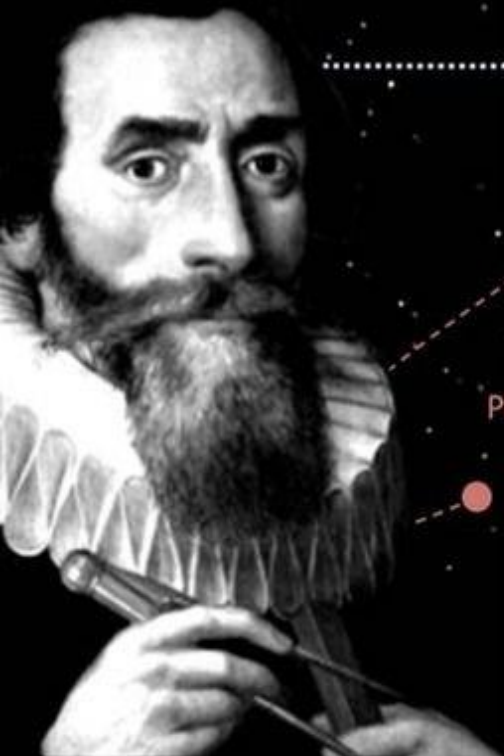
GEO/GTO

- 27 lancements
- 33 satellites
- 136,2 tonnes en orbite

Autres orbites

- 7 lancements
- 11 sondes ou satellites
et 1 voiture rouge
- 11,4 tonnes en orbite

Plus loin...



www.regard-sur-la-terre.over-blog.com

Bilan des lancements - 2018 - Arianespace - United Launch Alliance - SpaceX



Nombre de satellites par type d'orbite



www.regard-sur-la-terre.over-blog.com

**ULA United Launch Alliance = Boeing + Lockheed Martin
(3^e opérateur avec Arianespace et SpaceX)**

2019 : le bilan des lancements orbitaux

97 lancements orbitaux réussis

5 échecs au lancement et 1 pendant les préparatifs

441 satellites mis en orbite

139 autres satellites depuis l'ISS, un cargo ou un satellite

3 vols habités tous réussis

7 hommes et 2 femmes à bord d'une fusée Soyouz

7 pays lanceurs

Chine (32), Russie (22), USA (21), Europe (8), Inde (6), Japon (2) et Nouvelle-Zélande (6)

395 tonnes satellisées

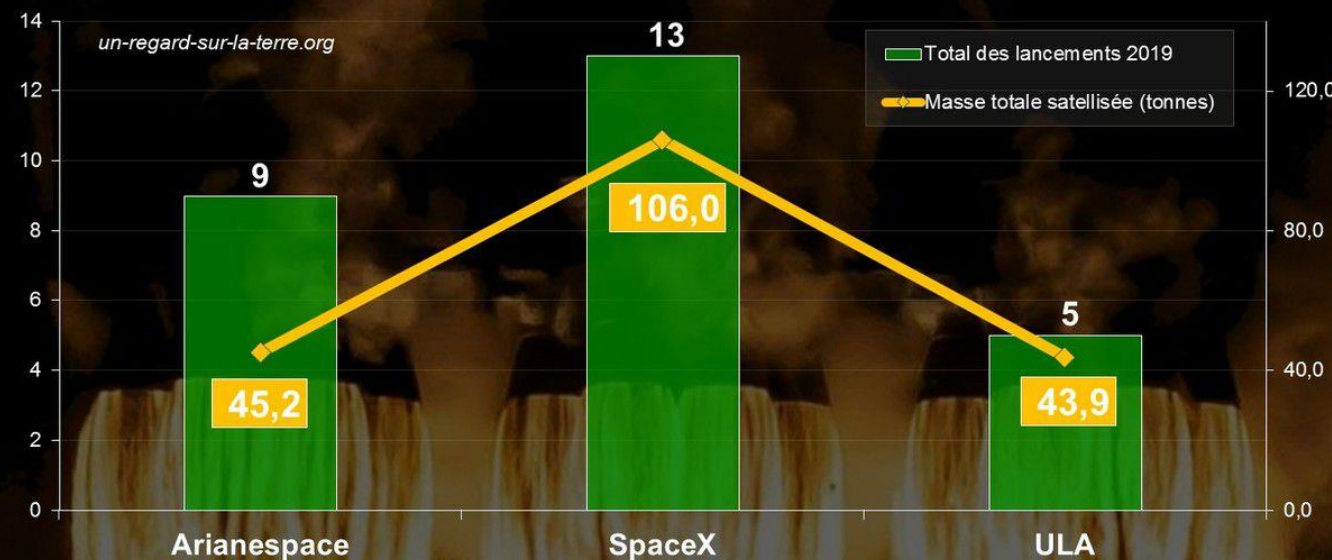
Masse moyenne par satellite : 681 kg
Masse record : 16,5 tonnes

189 satellites de communication

Observation : 75
Navigation : 16
Technologie : 216 (petits)

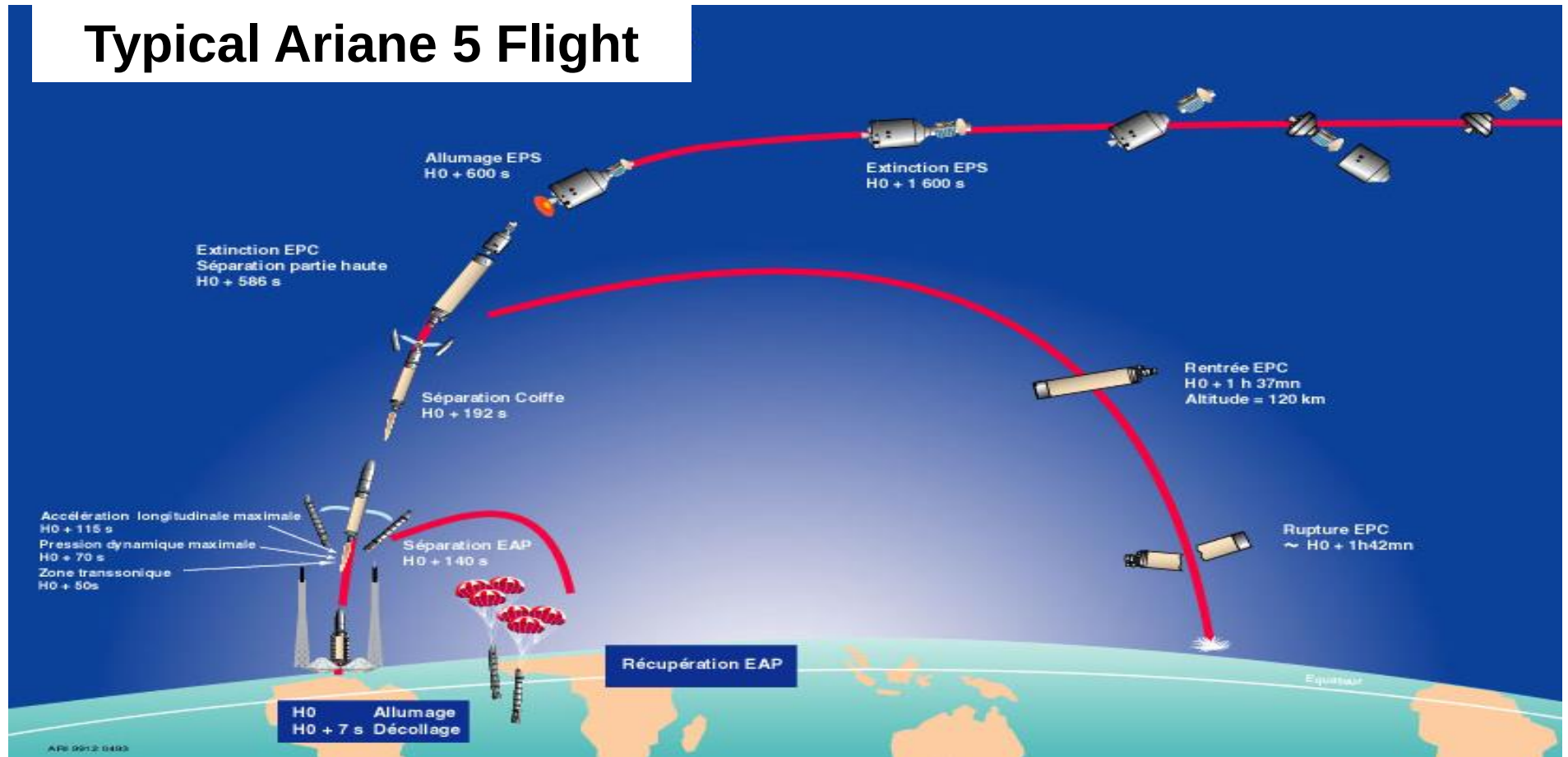
un-regard-sur-la-terre.org

Bilan des lancements - 2019 - Arianespace - Space X - United Launch Alliance



Launch Vehicles: Mission

- Deliver to the Payload (*) the needed altitude (200 to 1000 km) and velocity (8 to 10 000 m/s) so as to reach the targeted orbit



(*) Civilian or Military Telecom Satellites, Scientific or Military Observation Satellites, Scientific Space Probes, other Space Vehicles (e.g. Automated Transfer Vehicle...)

Performances Ariane 5

- ❑ **20 t en orbite basse**

- **Hermès (†)**

- **ATV**

- ❑ **10,5 t en orbite de transfert géostationnaire (GTO)**

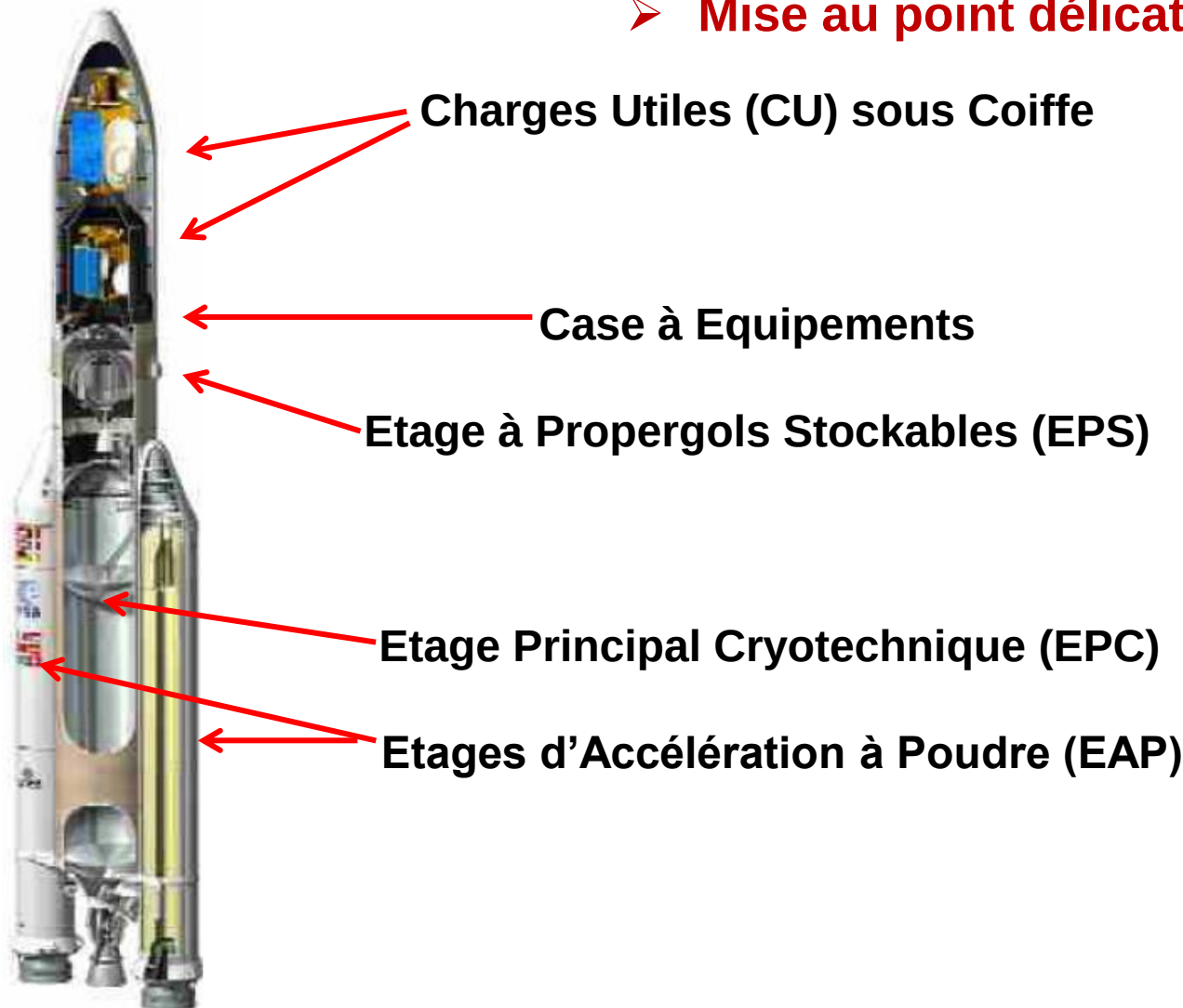
Innovation technologique

Sur EPC : la Cryotechnie = H₂ et O₂ liquides

Ariane 5

Ariane 5 1^{ère} génération (vue écorchée)

- Impulsion spécifique élevée (liée à vitesse d'éjection gaz)
- Réallumable
- Poussée variable, en pratique 2 pts de fct
- Non toxique
 - Turbopompe H₂ : 14 MW (21 000 CV) > rame TGV 9 à 12 MW
 - Mise au point délicate



Sur A5 2^e gén. A5ECA (2003) : EPS remplacé par ECA = Etage Cryotechnique type A

ELON MUSK & JEFF BEZOS

« New » Space ?

❑ Pas si « new »

❑ Robert Goddard (1882-1945)

- Inventeur du moteur-fusée à ergols liquides
- Financé par la Smithsonian Institution (institution de recherche scientifique, créée sous l'égide de l'administration américaine en 1846) et la *Fondation Guggenheim* (1925)



❑ Wernher Von Braun (1912-1977)

- A 18 ans rejoint la *Verein für Raumschiffahrt* qui met au point de petites fusées expérimentales



❑ Aujourd'hui New Space = Lanceurs, pas Satellites

- Télécoms, Observation de la Terre = majorité de **privés**
- Qqs institutionnels : *Copernicus* (UE) ⇒ données gratuites d'observation de la Terre (Ex-*Global Monitoring for Environment and Security*)

Eutelsat, Inmarsat,
Hispasat, Globalstar,
Asiasat...

In 2004, G. W. Bush established the *U.S. Space Exploration Policy*

- return to the Moon by 2020
 - Space Shuttle to be retired by the end of 2010 after completion of the ISS assembly
- 2006 : Mike Griffin (new NASA Administrator in 2005) challenged **U.S. private industry** to develop **cargo and eventually crew space transportation capabilities** (meeting the needs of ISS (*International Space Station*))
- Allocated \$500 million over five years to stimulate the development and demonstration of commercial capabilities and fenced the funds



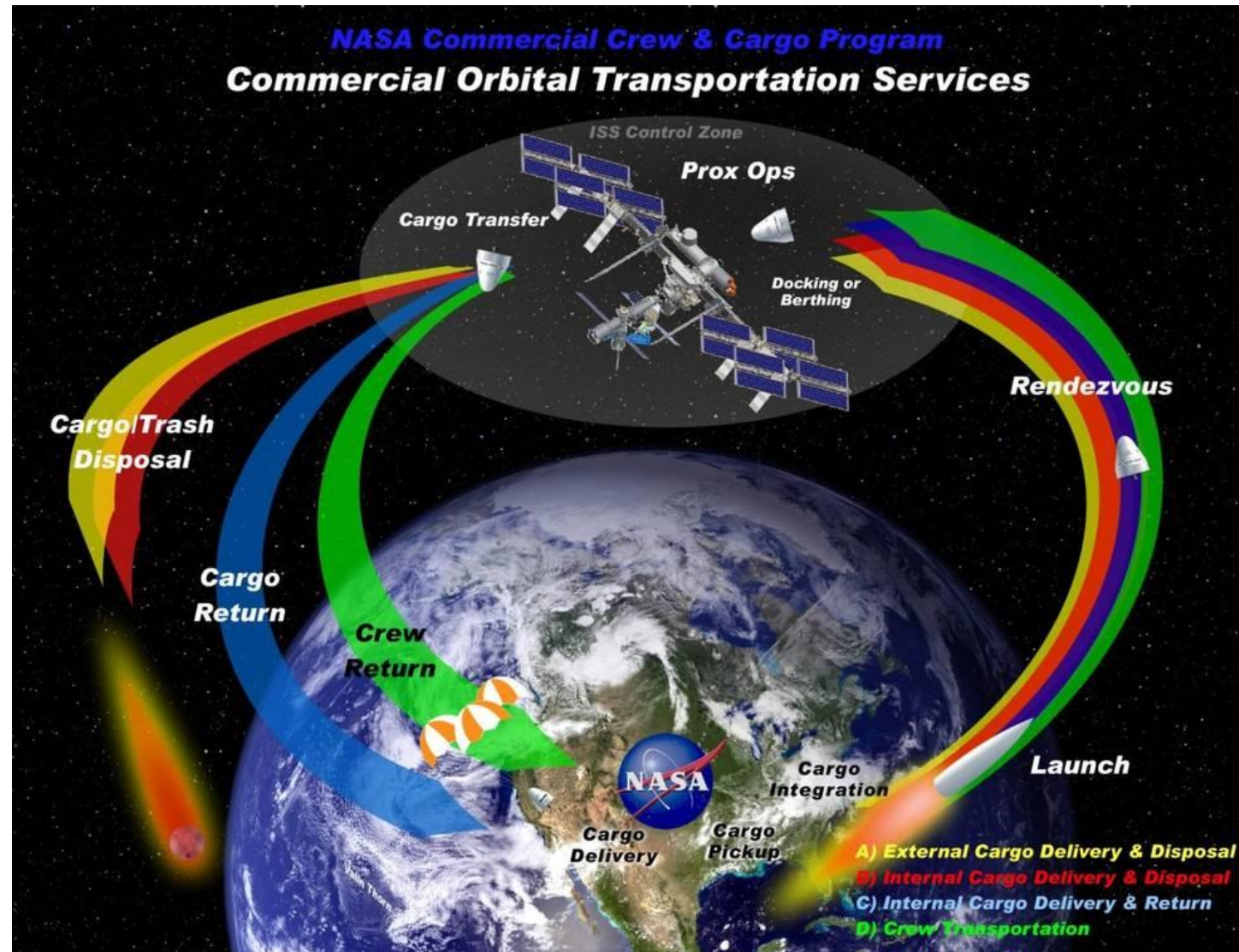
**NASA LANCE LA « PRIVATISATION »
DE LA DESSERT DE L'ISS**

Two-Step Acquisition Strategy

**Commercial Orbital
Transportation Services (COTS)**
= demonstration of Commercial
Partners' capability

**Commercial Resupply Services
(CRS)** = independent purchase
of services

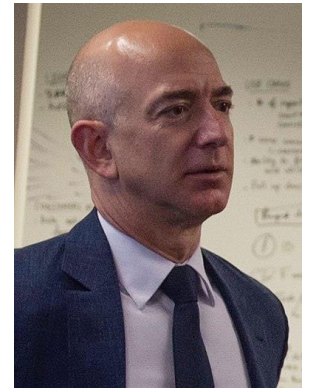
**Ont répondu
SpaceX et Orbital ATK**



Elon MUSK & Jeff BEZOS



Elon MUSK



Jeff BEZOS

❑ 2 fondus de l'espace

❑ Scientifiques

- Jeff Bezos ingénieur (Princeton)
QI à 8 ans jugé hors du commun
- Elon Musk : 1^{er} cycle puis après un *joint honours degree** entreprend un doctorat de physique à Stanford

❑ Ont cherché à « faire du fric »...

- EM 46 Md \$
 - JB 166 Md \$
- } *Forbes* 1.07.2020
- 2 Md \$ en 2012, 20 en 2018
10 Md \$ en 1999, 150 en 2018, 202 en août 2020

... pour se payer leur rêve d'enfant

- EM a décidé à 15 ans qu'il s'adonnerait à l'espace – Serait candidat au voyage vers Mars - Aurait émis le désir de mourir sur la Planète rouge
- JB a vu Apollo 11 (1969) à 5 ans – membre du *SEDS (Students for Exploration & Devt of Space)*

❑ Objectif commun : réduire le coût des lancements (opportunité NASA)

* deux ou plusieurs matières étudiées simultanément dans le cadre d'une seule licence avec mention : *honours bachelor*

Elon MUSK & Jeff BEZOS

d'après Wikipedia et al.

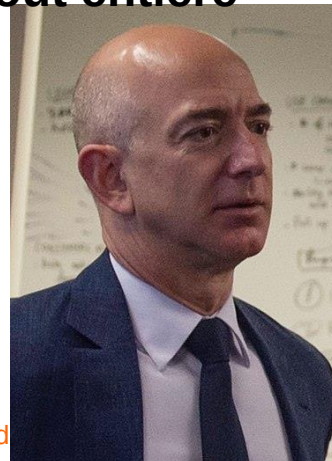


□ Elon MUSK (1971 -)

- Chef d'entreprise et ingénieur sud-africain, naturalisé canadien (1988) puis américain (2002)
- A commencé un doctorat de physique à Stanford
- DG et directeur architecture produit de **Tesla**, après avoir été président du CA de Solar City et de Tesla
- Fondateur de The Boring Company, société de construction de tunnels, et de Neuralink, une société de neurotechnologie
- Fondateur, directeur de **SpaceX** - *President (depuis 2002) & Chief Operations Officer : Gwynne Shotwell* (1^{er} tir en 2006)
- Cofondateur de Zip2, et fondateur et un des principaux dirigeants de X.com : fusionne avec Confinity ⇒ **PayPal**
- En 2015, cofonde et coprécide Open AI, association de recherche en IA ; objectif = promouvoir et développer une IA open-source bénéficiant à l'humanité tout entière

□ Jeff(rey) BEZOS (1964 -)

- Ingénieur (Princeton) américain, entrepreneur et investisseur américain, technologies et commerce
- Fondateur, principal actionnaire et PDG d'**Amazon**
- Fondateur de **Blue Origin** (1ers tirs en 2015)
- Propriétaire du **Washington Post** depuis 2013



Elon MUSK

□ SpaceX

- Fondée en 2002
- ~5 400 personnes – moyenne d'âge 30/35 ans – fort turn-over
- Intégration verticale (Californie) : lanceurs, capsule
Centres de lancement SpaceX (éventuellement loués)
- Amélioration à chaque vol (*Falcon 9* a plus que doublé de puissance depuis son 1^{er} vol en 2010)
- Moteurs désoptimisés pour limiter les coûts
- Mêmes moteurs sur tous les étages
- Indices constructifs (M struct./M tot.) faibles (~1/2 Europe)
- Récupère les 1ers étages (se posent en autonome)
- Réutilise les 1ers étages
 - De la récupération à la réutilisation : 3 mois
- Réutilise *Crew Dragon*
 - pour le fret
 - pour un équipage ?
- Veut réutiliser les coiffes (2 x 2,5 M\$)
- Vise Mars (colonisation ?)



Capsule Dragon



Capsule Crew Dragon



Récupération simultanée de 2 étages (propuls. secondaires) de *Falcon Heavy* (*Falcon Heavy* = 3 *Falcon 9*)

Elon MUSK

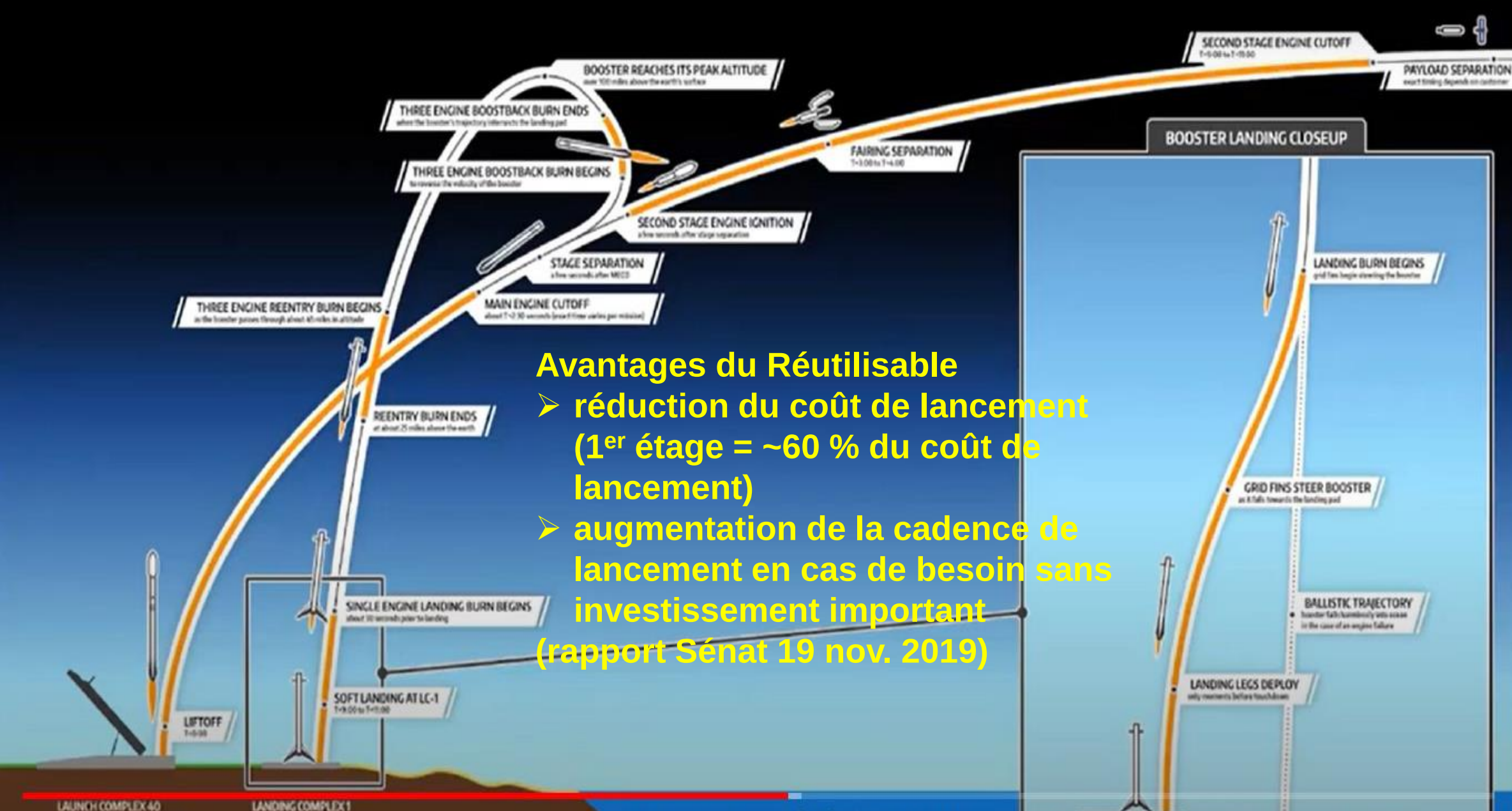
❑ SpaceX

❑ Communication insolite

- Sur les échecs (5 tirs *Falcon1*, 3 échecs, *Falcon 9*, 3 (+ 11) échecs, 85 tirs*)
 - « *Well, technically, it did land... just not in one piece* »
 - « *It's just a rapid unscheduled disassembly* »
- Sur *Falcon Heavy*
 - A proposé une place gratuite à des satellitiers - refus
 - A satellisé sa propre Tesla



***au 4 juin 2020 (+ 11 = échecs de récup.)**



- Difficultés avancées à l'encontre de la Réutilisation (cf. expérience Navette, exp. A5 EAP)**
- perte de rendement (nécessité de garder des réserves de carburant pour l'atterrissage)
 - réduction des économies d'échelles (baisse du volume de production de lanceurs neufs)
 - coûts de remise en état
 - commercialisation plus difficile de lanceurs usagés (fiabilité à déterminer)



1^{er} étage
50 m



Falcon 9 & Falcon Heavy

- ❑ **Falcon 9 - 9 moteurs sur le 1^{er} étage**

- ❑ **Falcon Heavy**
 - **~3 Falcon 9**



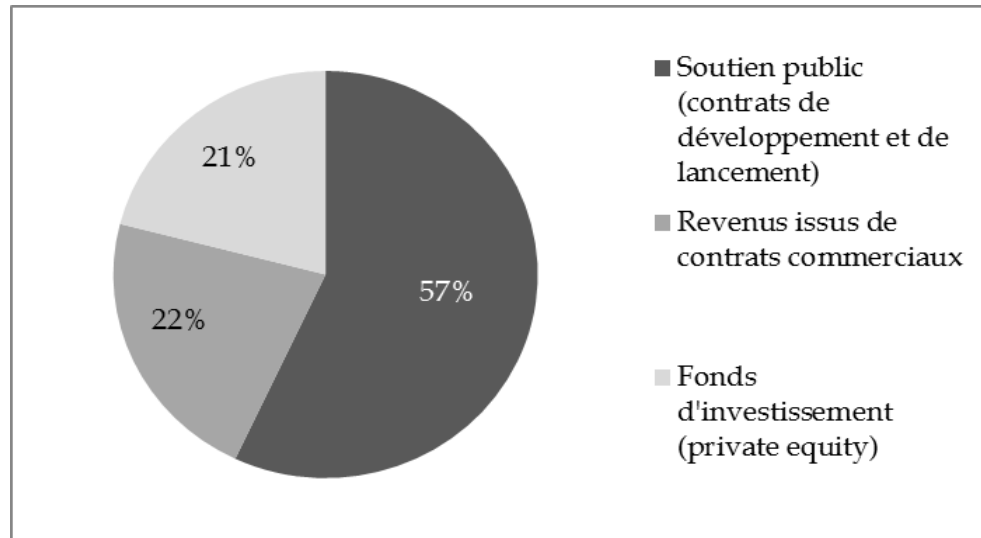
Pattes de récupération





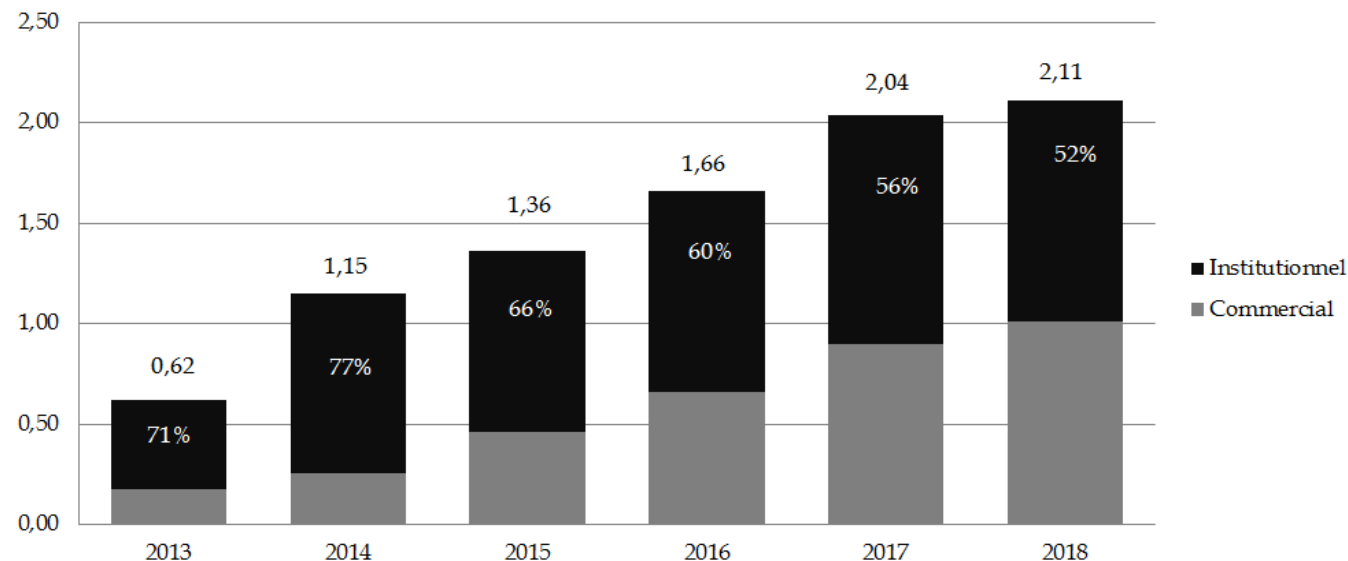
Décollage de Falcon 9
30 mai 2020
Mission habitée vers l'ISS

Comment se finance SpaceX ?



Source : estimations du groupe de travail
à partir de sources publiques

Part du marché institutionnel dans le CA Estimation du CA de SpaceX (Md \$, généré par *Falcon* et *Dragon*)



Source : Cnes

Comment se finance SpaceX ?

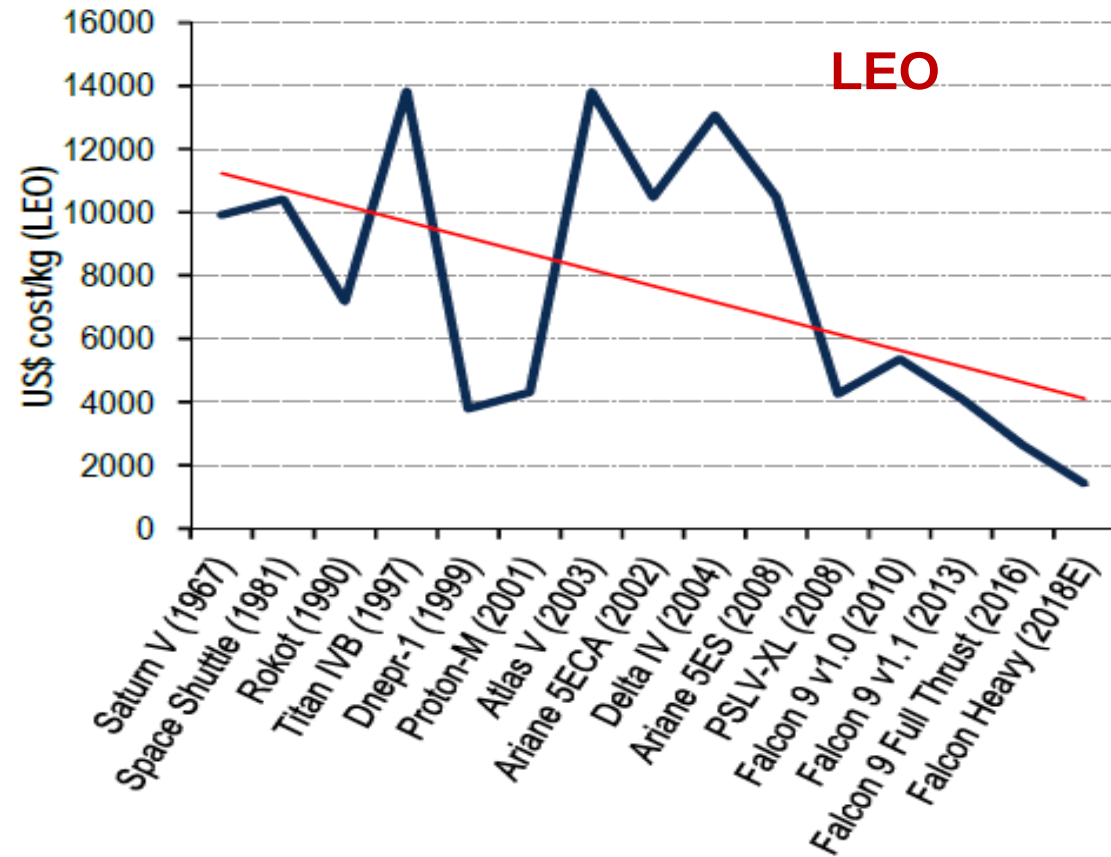
□ Soutien public

- Mise à disposition de capacités développées par la recherche publique : *Falcon 9* utilise le moteur *Merlin* issu des travaux de la *Nasa*
- Contrats de développement, p. ex. *CCiCap (Commercial Crew Integrated Capability)*, 2012, 440 M \$ (NASA)
- Commandes publiques de lancement quand le *Falcon 9* n'existait pas encore, p. ex. contrat *CRS (Commercial Resupply Services)*, 2008, pour 12 lancements, 1,6 Md \$ - et sur plusieurs années, permettant d'investir dans de nouvelles capacités technologiques

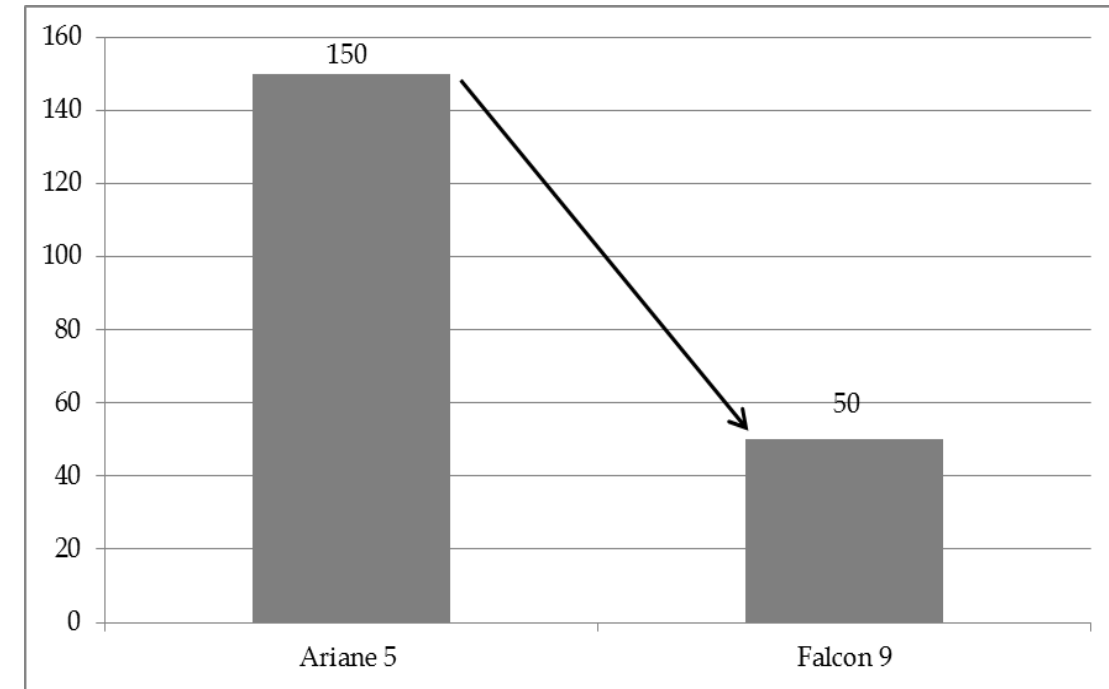
Association dans certains contrats de commande de lancements et développement de capacités, p. ex. contrat *CctCap (Commercial Crew Transportation Capability)*, 2014, 2,6 Md \$: 14 lancements de 2017 à 2024, incluait également les fonds nécessaires au dévt de *Crew Dragon*

- Tarification des services de lancement à destination des Clients institutionnels à des prix 2 x supérieurs à la pratique du marché commercial
 - le prix facturé passe 50 à 60 M \$ à 90 à 100 M \$
 - s'explique en partie par des exigences supplémentaires de la part des institutionnels et, le cas échéant, par le coût de la CU développée par *SpaceX*, capsule *Dragon* ; mais l'écart constitue également une subvention

Objectif atteint ?



Source : Bank of America - Merrill Lynch, *To infinity and beyond, Global space primer*, octobre 2017



Comparaison des prix de lancement en orbite **GTO** pratiqués par SpaceX (*Falcon 9*) et Arianespace avec Ariane 5 (M\$)

Coût de lancement *Falcon 9* ~44 Md \$
Estimation Cnes



Saturn V



Jeff BEZOS

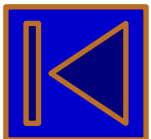
Récupération d'un
morceau de Saturne V
d'Apollo 11 au fond de
l'eau



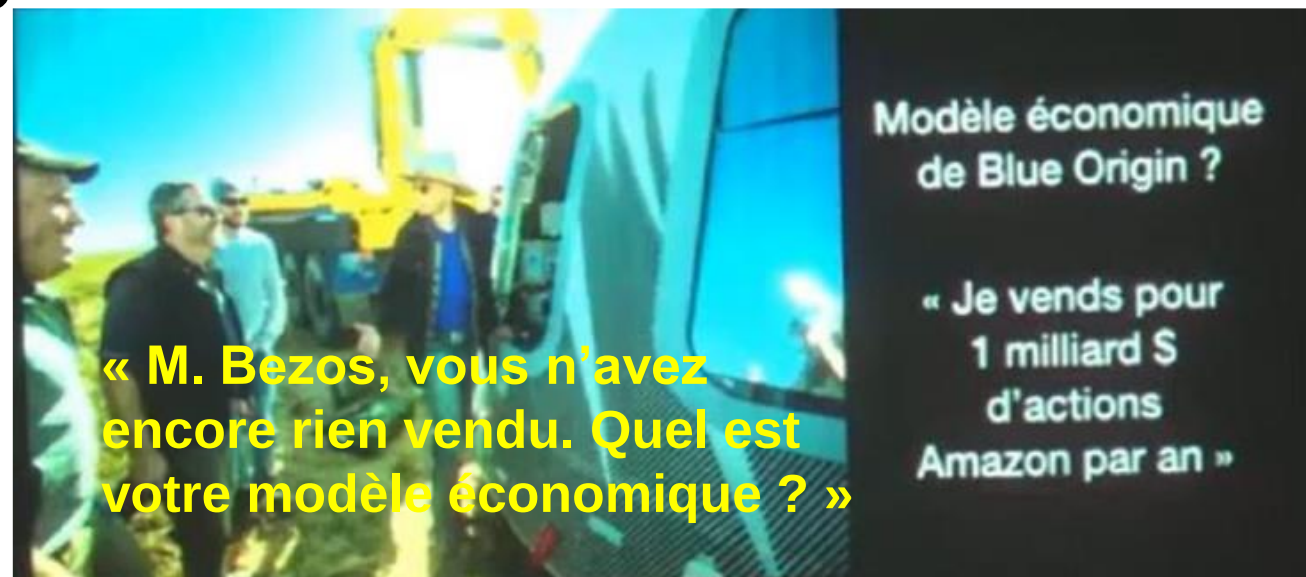
- ❑ **Blue Origin créée en 2010 – 2000 p.**
 - Seattle : siège, centre de dévt. et de production
 - Moteurs à ergols liquides BE-3, BE-4, BE-7
 - Couvre ses besoins et celui du futur lanceur lourd *Vulcan* (vol en 2021) de ULA (BE-4)
 - Lanceurs : tourisme spatial et lanceurs lourds
- ❑ ***New Shepard***
- ❑ ***New Glenn* : Blue Origin s'installe en Floride (usine et centre de lancement)**



New Shepard : tourisme spatial

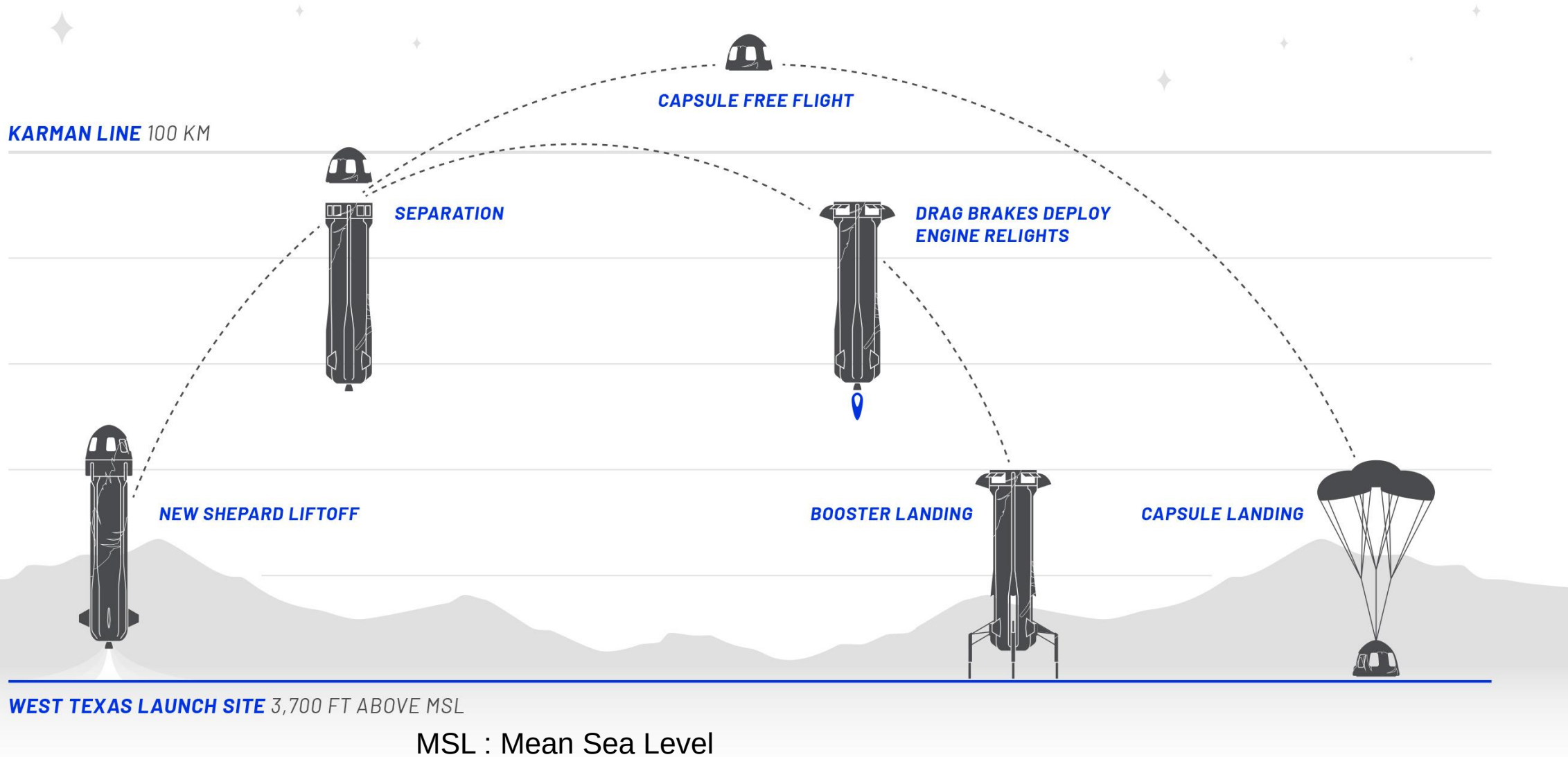


- 45 t orbite basse, 13 t GTO
- 1er vol en 2021
- ❑ ***New Armstrong* (lanceur lunaire : projet)**
- ❑ **Modèle économique ?**





New Shepard
moteur-fusée BE-3 de 50 t de poussée O₂ et H₂ liquides



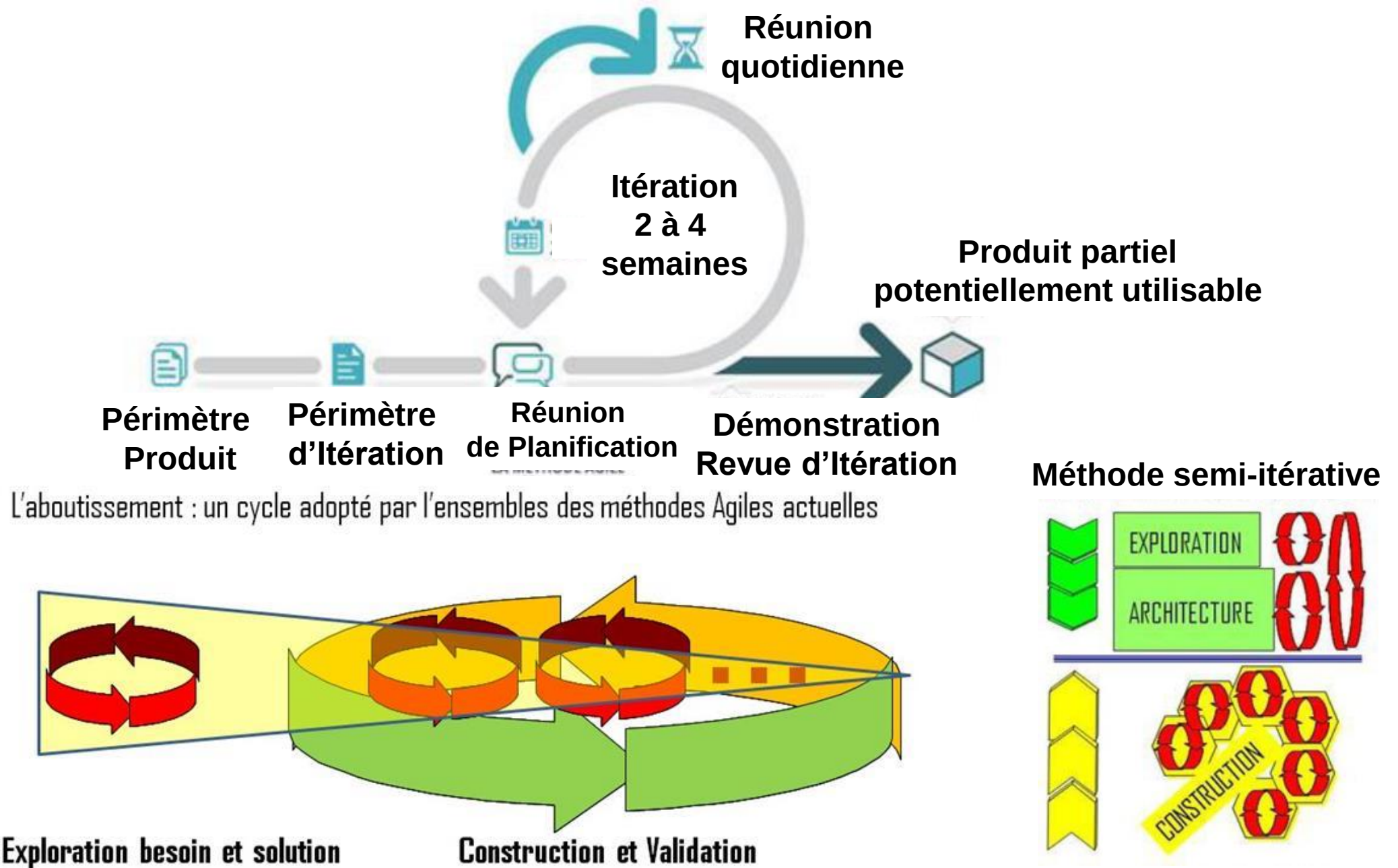
Blue Origin : Mission *New Shepard*



Présentation par Jeff Bezos de la capsule du *New Shepard*
© Blue Origin



Méthodes Agiles



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Semilteratif.jpg?uselang=fr>

This document is the property of PAT SYS. It shall not be communicated to third parties without prior written agreement. Its content shall not be disclosed.

Méthodes Agiles

❑ Méthodes Agiles : 4 valeurs fondamentales

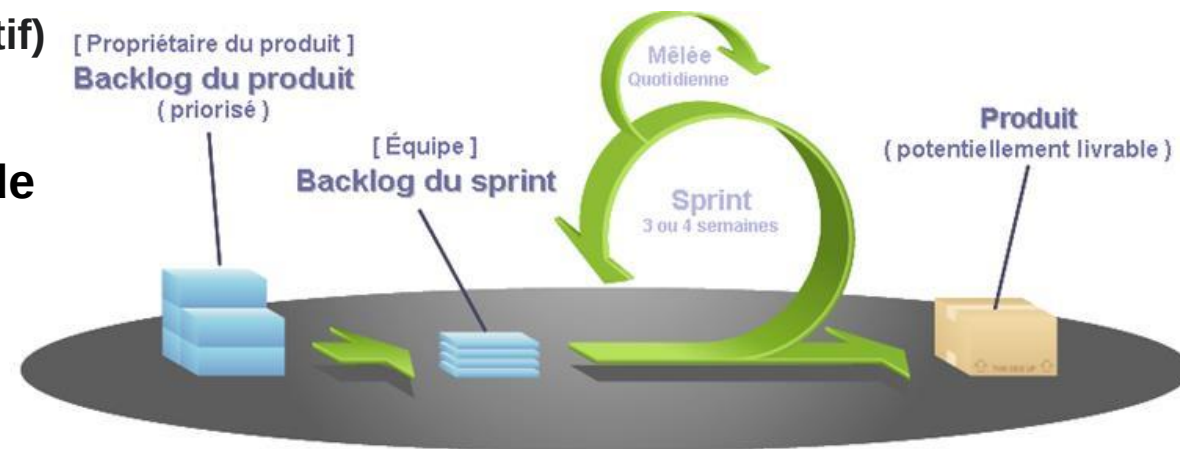
- *Individuals & Interactions* rather than *tools & processes*
- *Operational functionality* rather than *complete documentation*
- *Collaboration with Customer* rather than *contractual relations*
- *Ability to change* rather than *compliance with plans*

❑ Caractéristiques

- + pragmatiques que méthodes traditionnelles
- Demandeur (Client) impliqué au maximum
- Grande réactivité à ses demandes
- Modèle de développement itératif (ou semi-itératif), incrémental et adaptatif (cf. spirale de Boehm)

❑ Scrum (cadre de travail holistique itératif)

- = Cadre de travail (*framework*)
- Découpage du projet en « boîtes de temps » ou *sprints*



COPYRIGHT © 2005. MOUNTAIN GOAT SOFTWARE

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Scrum_\(d%C3%A9veloppement\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Scrum_(d%C3%A9veloppement))

Méthodes Agiles

❑ Application des Méthodes Agiles aux Grands Projets

➤ Exemple de *SpaceX*

➤ Elon Musk

➤ Exemple de *Blue Origin*

➤ Jeff Bezos

Produits : lanceurs, vaisseaux spatiaux, moteurs-fusées

➤ Le développeur d'un élément en est responsable de la Conception à l'Essai

➤ Apprentissage par l'erreur

➤ 15 lanceurs détruits depuis début des années 2000

➤ Idée d'apprentissage rapide quitte à faire des erreurs : *Fail Fast*

➤ Jamais 2 fois la même erreur

➤ Développement par essais peu coûteux sur des briques technologiques

➤ Développement en « bac à sable » ou *sandbox* : tout le monde « joue »



Blue Origin et SpaceX

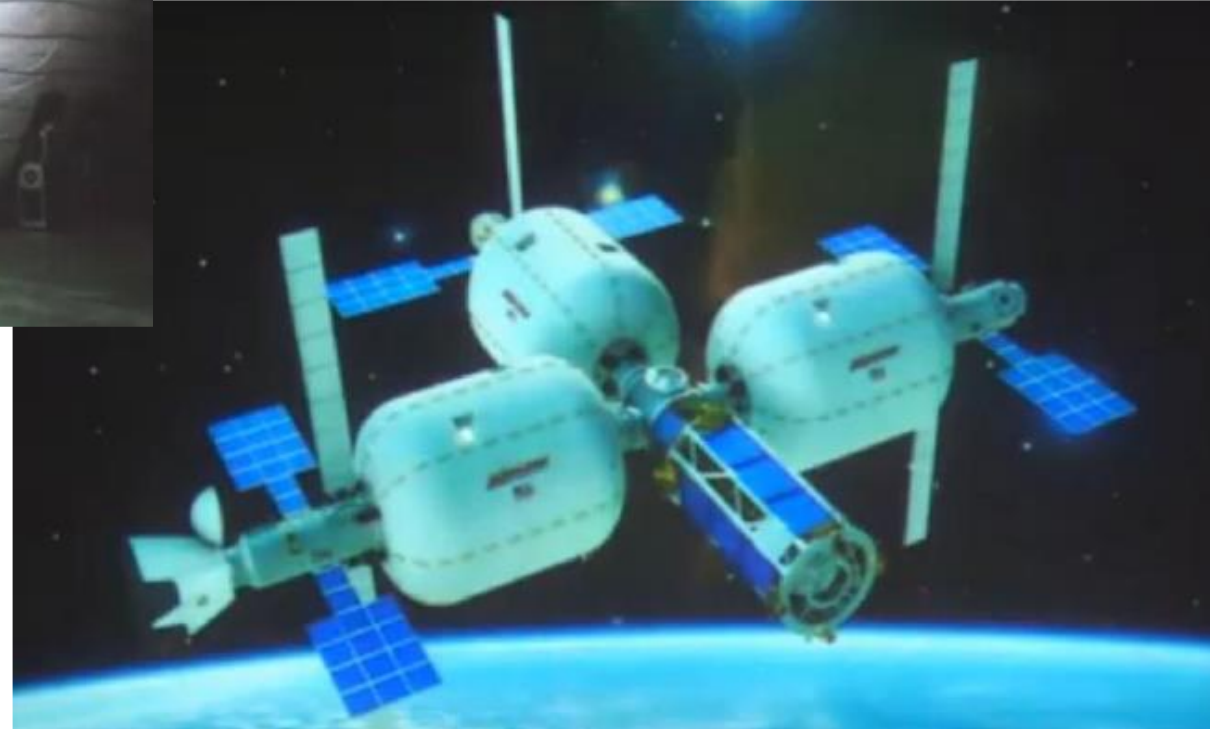
Les 2 arbres qui cachent la forêt !

New Space hors Elon Musk et Jeff Bezos

- ❑ **Robert Bigelow** Hôtels gonflables dans l'espace
- ❑ **Richard Bronson (*Virgin Orbit*)** Lanceur sous avion
 - **Constellations**
 - **Tourisme spatial**
- ❑ **Paul Gardner Allen (*Stratolaunch* : 2 x B 747)** Lanceur sous avion
Cofondateur de MicroSoft
- ❑ **Peter Beck (Néozélandais, racheté par US)** Petits lanceurs pour petits satellites

LES « VIEUX » DU « NEW » SPACE

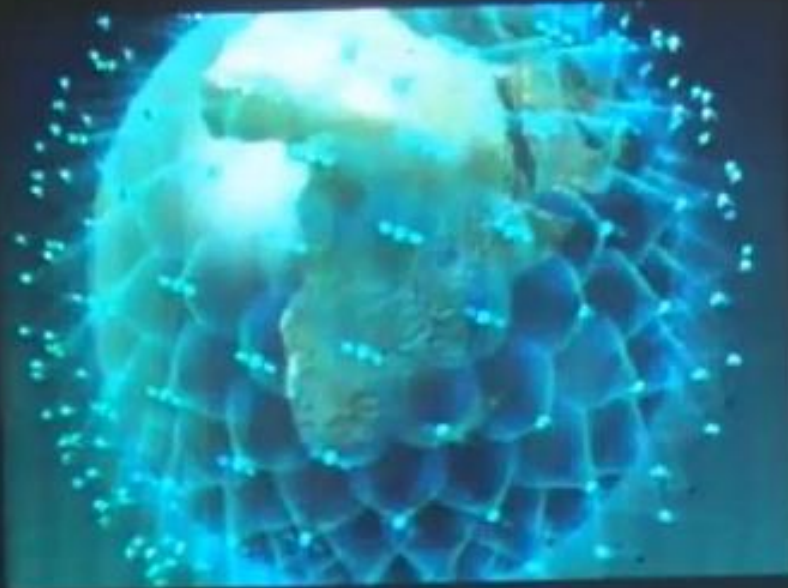
- ❑ **ULA *United Launch Alliance* = Boeing + Lockheed Martin**
Récupération moteur 1er étage par hélicoptère
- ❑ **Xí Jìn Píng (2014) ouvre le secteur des petits satellites à la concurrence**
 - **OneSpace créée en 2015 (le SpaceX chinois)**
- ❑ **CALLISTO (*Cooperative Action Leading to Launcher Innovation in Stage Toss-back Operations*) : Lanceur monoétage expérimental, CNES, DLR et JAXA, 2022**
 - **Transition Ariane 6 vers Ariane Next – moteur PROMETHEUS**



**Robert Bigelow (1945 -)
A construit des hôtels à LV**

**Envisage de construire des hôtels gonflables dans l'espace
A testé un module gonflable sur l'ISS – sert de lieu de stockage
(technologie NASA abandonnée dont il a racheté le brevet)**

Les constellations :
des centaines à milliers de satellites pour Internet,
l'observation de la Terre, etc.



Quelques acteurs du « New » Space



<i>Falcon 9</i>	<i>Falcon Heavy</i>	<i>New Glenn</i>	<i>Vulcan</i>	<i>Omega A</i>	<i>Angara 5</i>	<i>Longue Marche 5</i>	<i>H3</i>	<i>GSLV</i>
8,3	26,7	13	13,3	10,1	4	13	6,5	6
En service	En service	2021	2021	2021	2020	2020	2022	En service

GSLV Geosynchronous Satellite Launch Vehicle
ISRO Indian Space Research Organization



Virgin Orbit
Richard Bronson
Petit lanceur sous avion
Lancement de constellations





Richard Bronson
Tourisme spatial
Avion-fusée (en composites à base de plastiques)
transporté par un avion plus grand
250 k\$ la place



Richard Bronson Tourisme spatial

Avion-fusée après largage et début d'allumage fusées

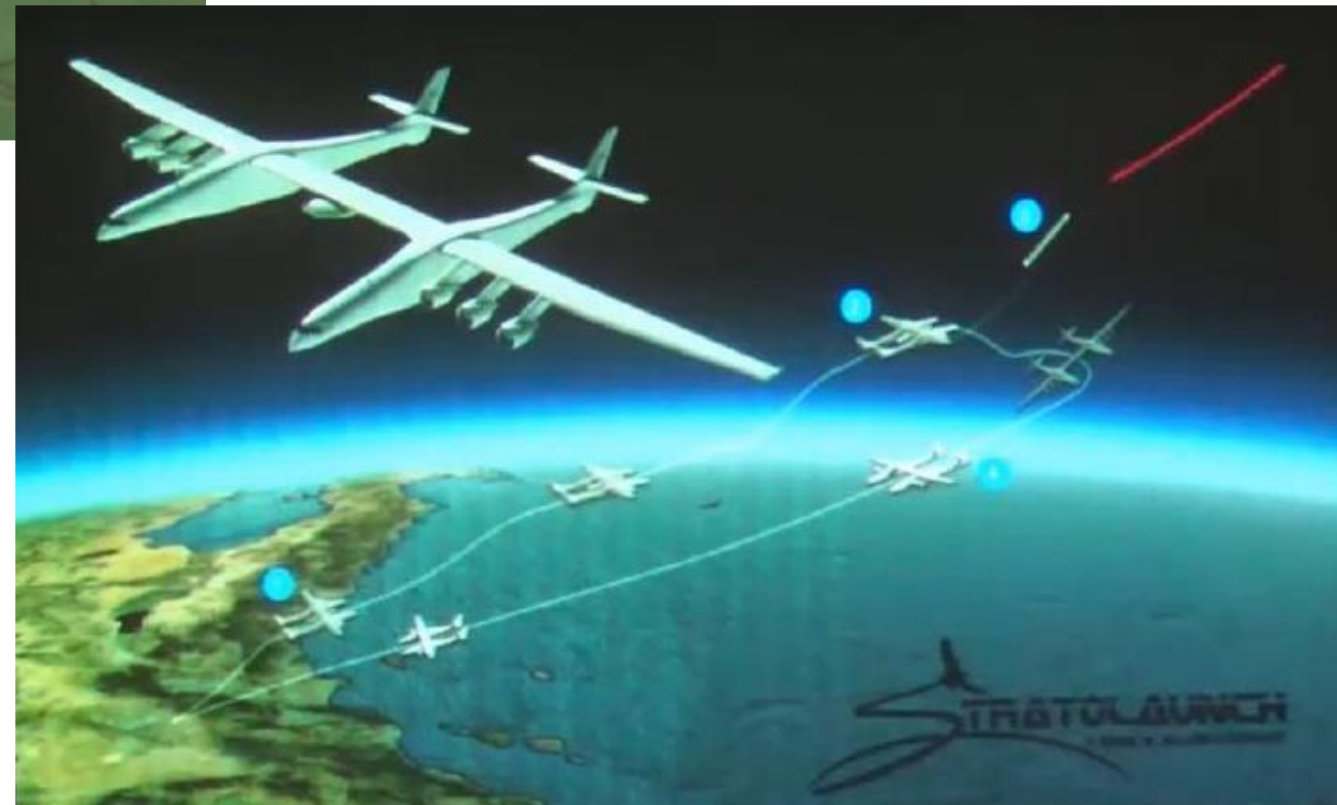


SpaceShipOne
créé par ***Scaled***
Composites



Développement des ailes à angle droit

SpaceShipTwo
créé par ***Virgin Galactic***
co-entreprise entre
Scaled Composites
et ***Virgin Group***



Stratolaunch
2 x 747

Paul Gardner Allen



Stratolaunch
2 x 747

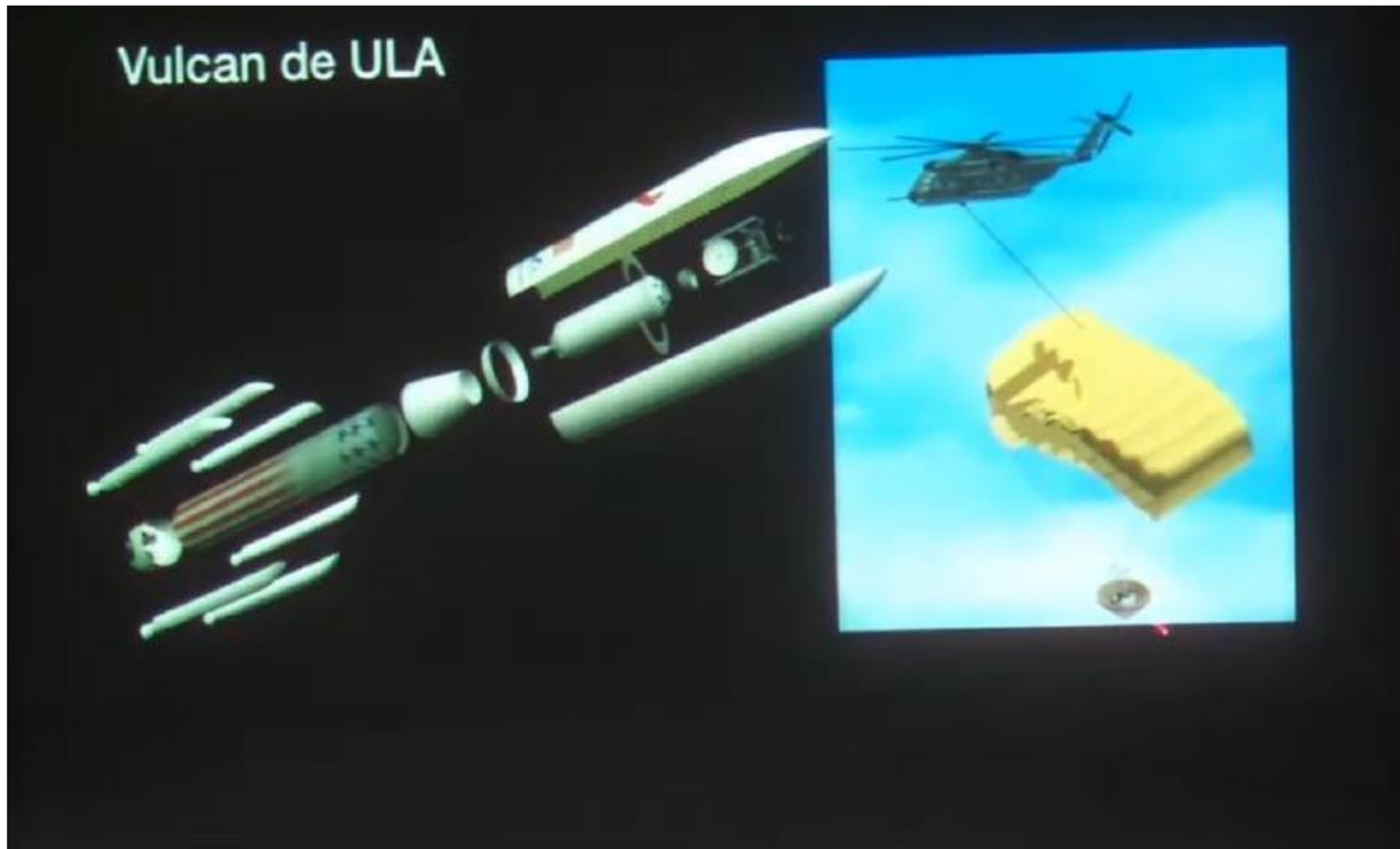
Paul Gardner Allen, cofondateur de Microsoft



**Peter Beck
Néozélandais
Petits lanceurs pour petits satellites**

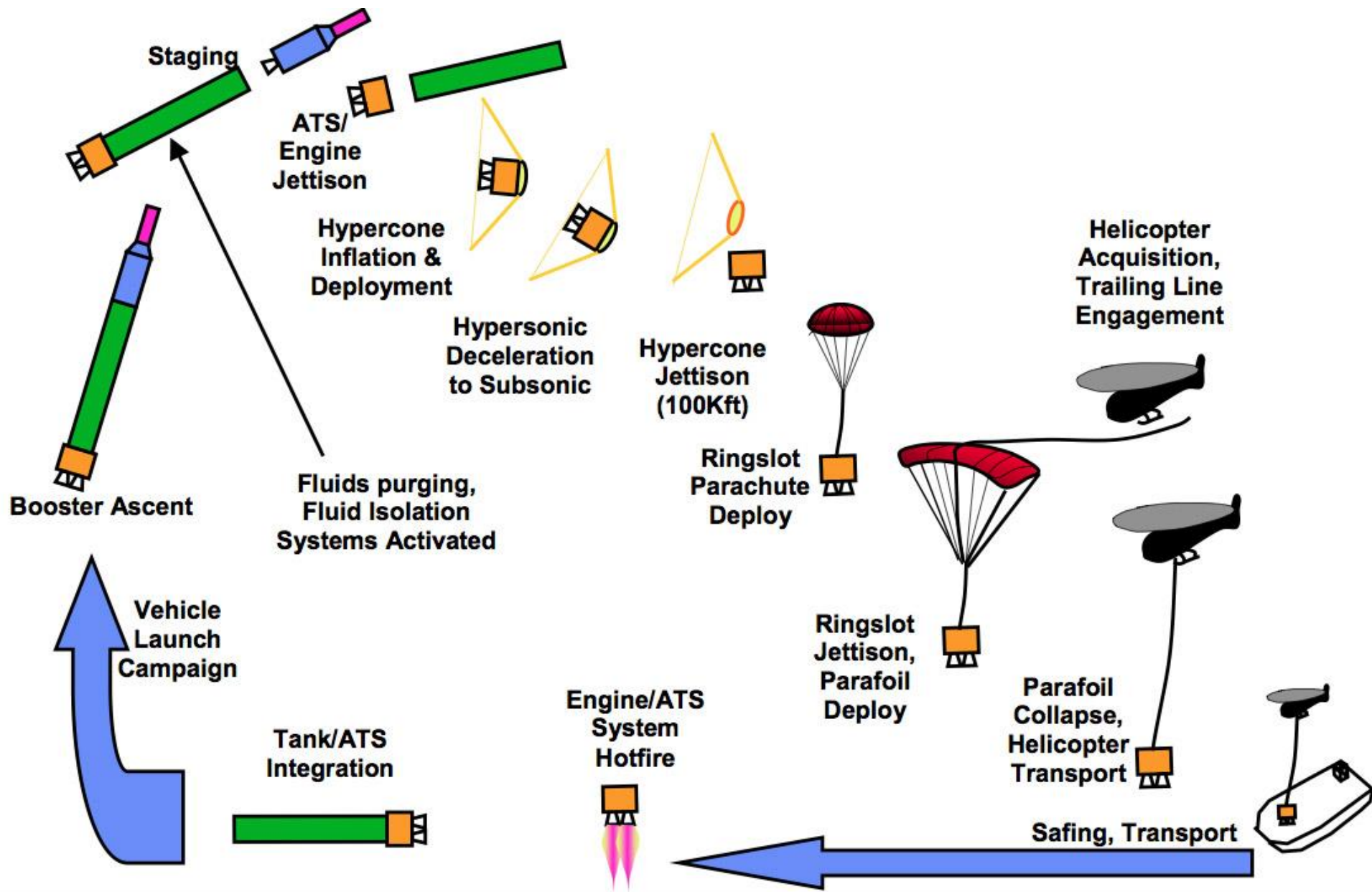
A été racheté par les Américains

Les « vieux » du « New » Space : ULA



United Launch Alliance = Boeing + Lockheed Martin

Récupération moteur 1^{er} étage par hélicoptère



Concept de baie propulsive réutilisable ULA

Source : Rapport Sénat précité

Les « vieux » du « New » Space : Chine



Décision (2014) du gouvernement chinois (Xí Jìn Píng) d'ouvrir le secteur d'activité des petits satellites à la concurrence

- **OneSpace** fait partie de la dizaine de start-up chinoises (*iSpace, LandSpace...*) créées dans la décennie 2010
- Créée en 2015
- Objectif : marché du lancement des petits satellites – dévt d'une famille de micro-lanceurs pour placer en orbite basse des satellites de qqs centaines de kg
 - Mono-étage testé en 2018 – 2 vols suborbitaux réussis
 - Lanceur complet OS-M le 27 mars 2019 – échec
 - 3 étages à propergol solide
 - Capacité de placement en orbite basse de ~200 kg
 - Etages du lanceur sont fournis par les constructeurs institutionnels chinois

Les « vieux » du « New » Space : l'Europe et le Récupérable



***DLR** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
JAXA Japanese Aerospace eXploration Agency
PROMETHEUS Precursor Reusable Oxygen METHan
cost Effective propUlsion System*

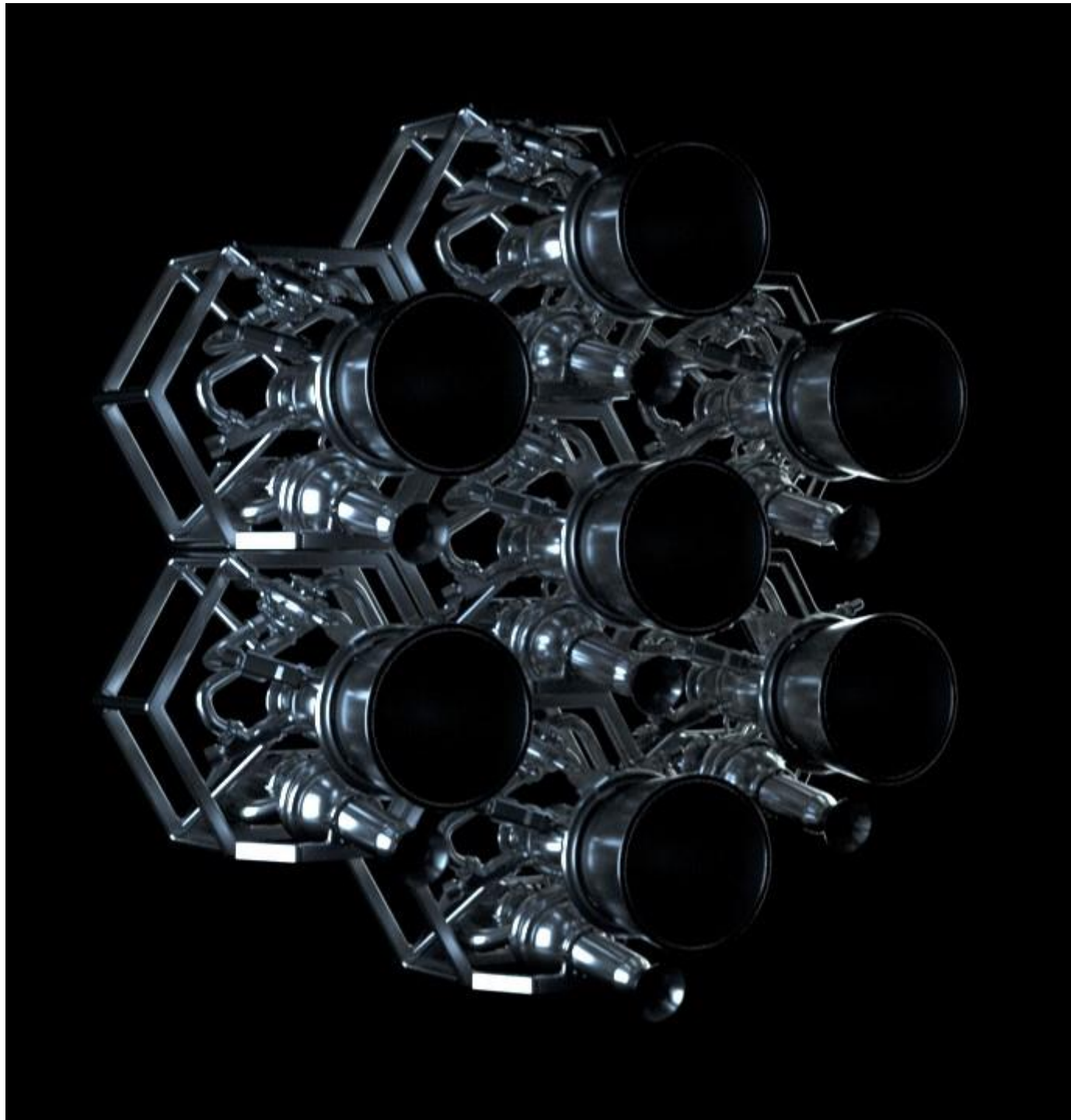
CALLISTO, *Cooperative Action Leading to Launcher Innovation in Stage Toss-back Operations*

- Lanceur monoétage expérimental développé par le CNES, DLR et JAXA
- Objectif
 - M. au p. techniques pr lanceur réutilisable (retour au sol, remise en condition)
 - En estimer le coût opérationnel (obj. ÷ 10 coût moteur - 100 t de poussée*)
- 1^{er} vol prévu courant 2022

Permettra la transition entre Ariane 6 (1^{er} vol 2021) et son remplaçant *Ariane Next* (2035)
Ariane Next reprendrait le concept *Falcon 9*

- 1^{er} étage réutilisable (revient se poser sur Terre à la verticale), utilise plusieurs moteurs-fusées à ergols liquides **PROMETHEUS** (1ers essais 2021, objectif 2030) : méthane et oxygène liquides – Remplacera *Vulcain 2.1* d'A 6
- 9 moteurs sur le 1^{er} étage, un moteur unique pour le 2nd

* ***Vulcain, Vulcain 2 (A 5), Vulcain 2.1 (A6) : 110 à 135 t***



PROMETHEUS : Moteur d'Ariane Next

ET LE « *GREEN* » DANS TOUT ÇA ?

Et le « *green* » dans tout ça ?

❑ Télécoms

- Pollution électromagnétique... (sur Terre)

❑ Ozone, pluies acides, toxicité/opérateurs, effet de serre

- Non significatif pour le nb de lancements actuels

❑ Pollution des orbites (débris spatiaux)

- Grande variété

- Morceaux d'étages lanceurs (retombent sur terre, parfois)
- Petites pièces mécaniques

- Saturation en orbites basses pas encore atteinte

- Peu de pollution en GEO

- GEO (36 000 km d'altitude) : vitesse = 3 km/s ou 11 000 km/h

- LEO (400 km, ISS), vitesse = 9 km/s ou 32 000 km/h

❑ Pollution visuelle

- *Starlink* 42 000 satellites



↓
Débris du 3e étage
PAM-D de Delta 2
Arabie Saoudite
21 janvier 2001

VEGA & ARIANE 6

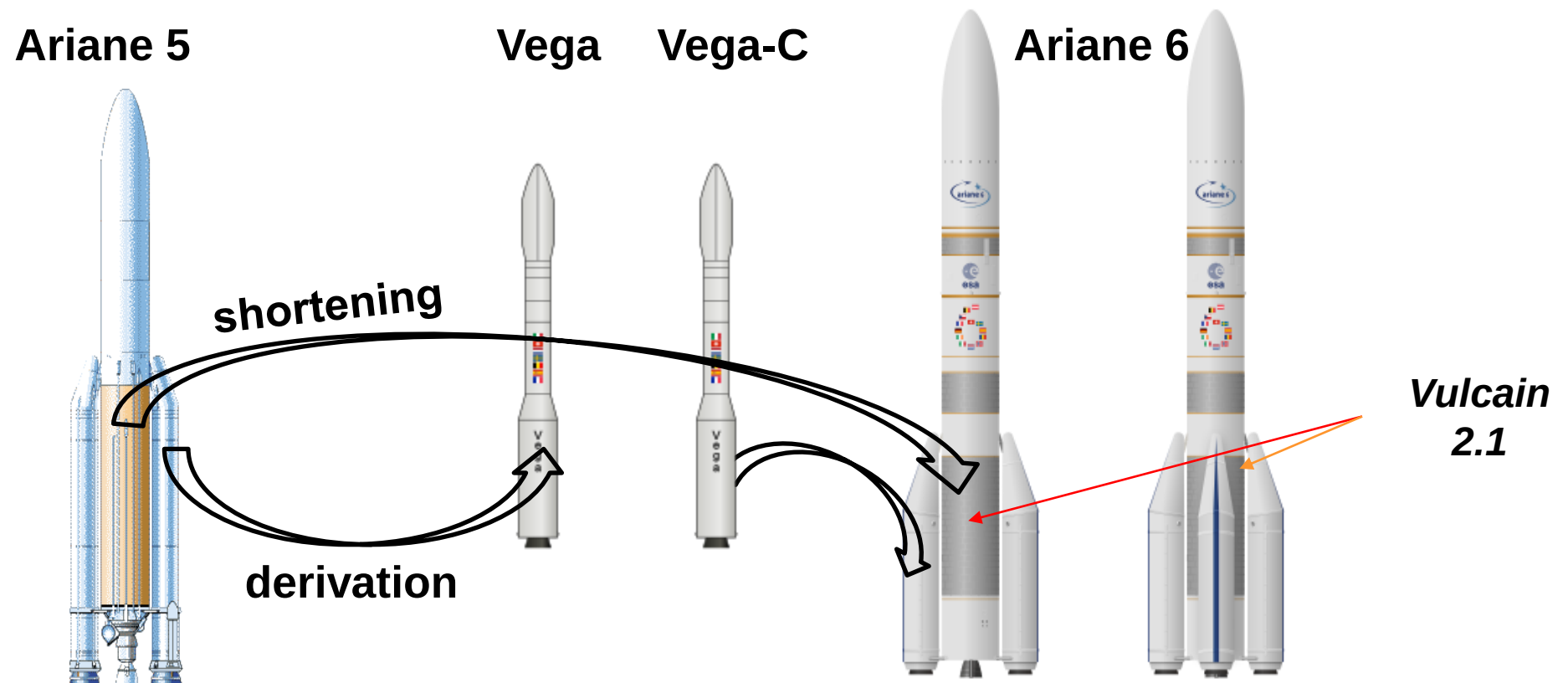
Vega, Ariane 6

❑ What about Innovation?

➤ Innovation in Methods

- Agile Methods
- Reuse
 - Faster, cheaper and more secure development

*And overall Experience
& Synthesis Capacity*



COÛT DE L'INGÉNIERIE SPATIALE ET LEÇONS TIRÉES

Systems Engineering for Launch Vehicles: How much does it cost?

❑ Extreme rigor...

- Proven Technologies (energetic, mechanical, fluidic, electronic...)
- Selected Electric & Electronic Parts and Assembly Techniques
- Proven Processes
- Selected Manufacturers
- Many justifications: studies, simulations and tests
 - Main Ariane 5 engine: 285 tests (in total 24 hours) before 1st flight

« The old elephant knows how to find water, but even the old monkey may fall down from the tree. »

African proverb adapted by a Japanese

« Question and challenge everything - even those things that have already worked. »

« Test, test and test some more »

Recommandations du Mars Climate Orbiter Mishap Investigation Board
pour Mars Probe Lander (~2000)

« Test as you fly ...

... fly as you test »

NASA

QUELLE(S) SUITE(S) ?

Quelle(s) suite(s) ?

ISS = International Space Station
JAXA = Japan Aerospace eXploration Agency
LEM = Lunar Excursion Module

❑ **Dernier vol Shuttle : 2011 (ravitaillement ISS, accès et retour humains)**

❑ **Ravitaillement ISS**

- *ATV* : 5 de 2008 à 2014 (lanceur Ariane 5)
- *Progress* : 4/an (lanceur *Soyuz*)
- *HTV* (H II Transfer Vehicle, JAXA, lanceur H II-B) : 1/an
- *Cygnus* (Orbital ATK (racheté par Northrop Grumman), lanceur Antares) : 10 de 2013 à 2019
- *Dragon* : 3 à 4/an (lanceur *Falcon 9*)

Accès & retour

➤ *Vaisseau Soyuz*
(lanceur *Soyuz*)

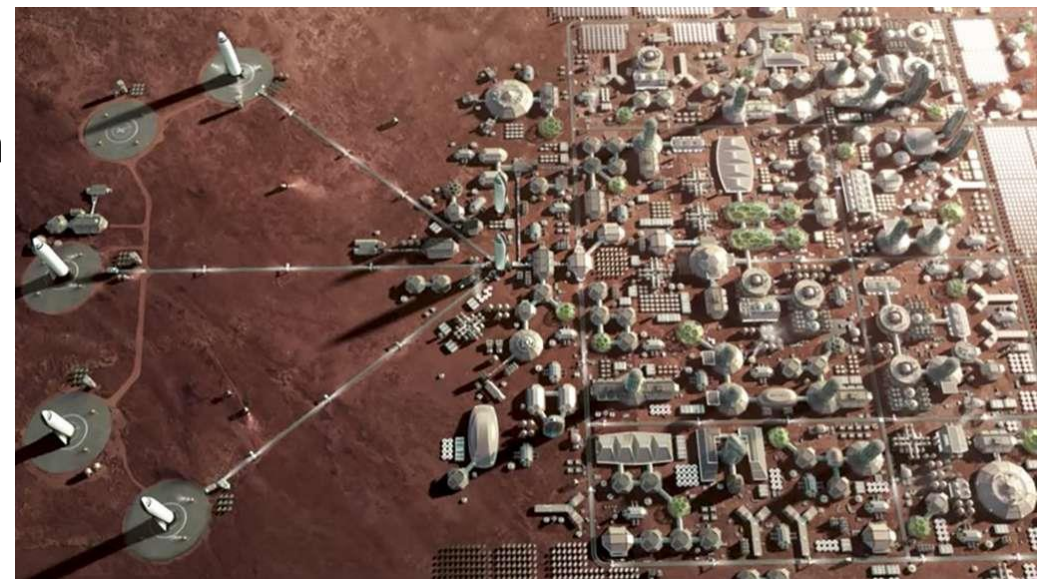
➤ *Crew Dragon*
(lanceur *Falcon 9*)

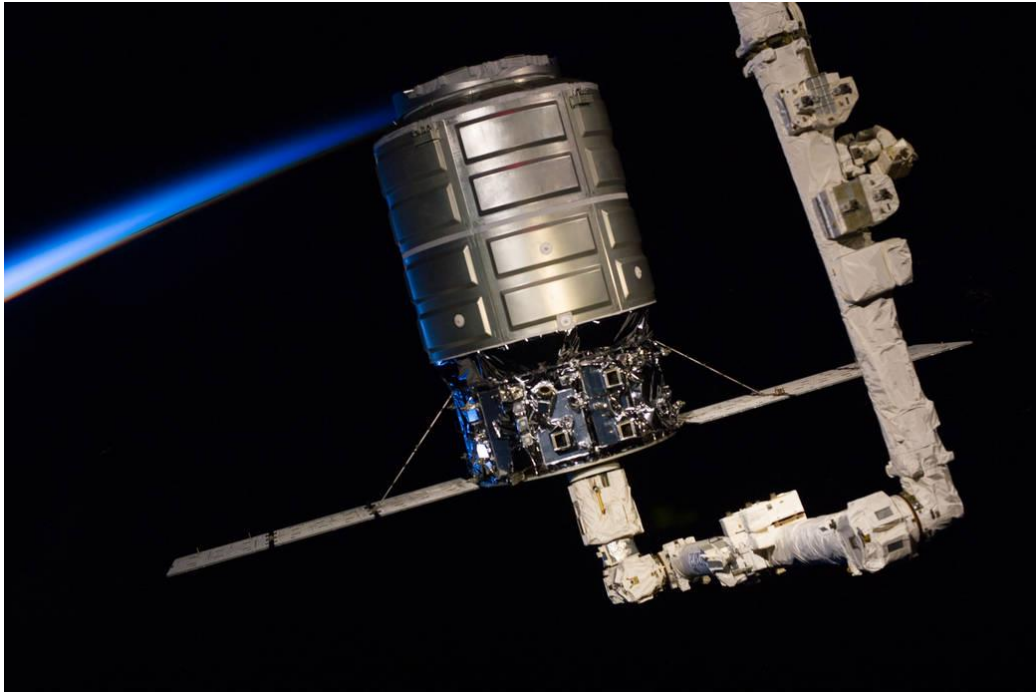
❑ **Retour sur la Lune : 2024**

❑ **Mars, et ça repart...**

- *Super Heavy/Starship* lanceur martien de SpaceX 100% réutilisable

Concept de ville martienne envisagée par SpaceX © SpaceX

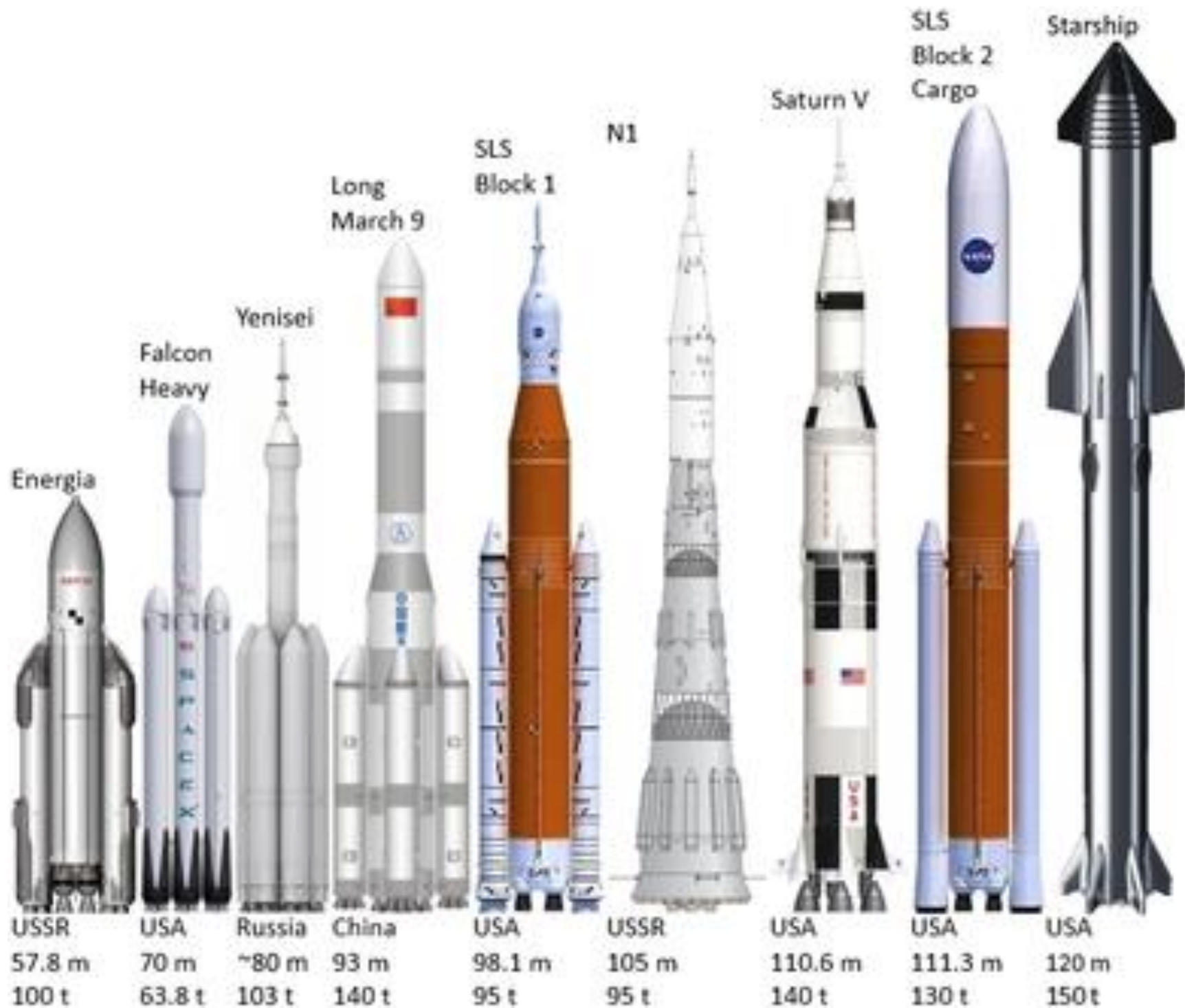




The first *Cygnus* attached to the Canadarm2



SpaceX *Dragon* is grappled by Canadarm2



Lanceurs ultralourds (+ de 50 t)

Quelle(s) suite(s) ?

❑ **Retour sur la Lune : 2024**

❑ **Mars, et ça repart...**

➤ **Radiations ?**

■ **Traversée des Ceintures de Van Allen**

- **Apollo 14 : 2,28 millisieverts (limite annuelle en France dans le nucléaire 20 millisieverts – ou 2 rem)**

■ **Eruptions solaires**

- **rayonnements potentiellement mortels, pour des astronautes en scaphandre à la surface de la Lune, ou dans le LEM, en août 1972, entre les missions Apollo 16 et Apollo 17 (aucun risque en orbite terrestre)**

■ **Mars ?**

- **« La dose sera 50 à 100 fois plus élevée pour une mission sur Mars. » (Francis Cucinotta, spécialiste des radiations à l'université du Nevada)**
- <https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/nasa-nasa-sante-astronautes-ne-semble-pas-affectee-radiations-74492/>



Ça sert à quoi ?

❑ Télécoms, Localisation

❑ Recherche, Observation scientifique

➤ Rosetta

- Lancée en mars 2004, posée sur la comète Churiumov-Gerasimenko (« Tchouri ») ou 67P en novembre 2014 – fin de mission 2016

➤ ISS, 1983 – assemblage 1998-2011

❑ Défense & Suprématie

➤ Sputnik, 1957, Vostok (Gagarine), 1961

➤ Lune, 1969 (Mercury 58-63, Gemini 65-67, Apollo 67-72)

➤ Initiative de Défense Stratégique (SDI) : « bouclier spatial », 1983-93

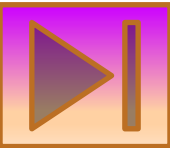
➤ Longue Marche, 1965 -

- Chang'e 4 (*cháng'e sì hào*) – lancée 7 déc 2018, posée sur la face cachée de la Lune le 3 janvier 2019 🖐️ 1ère mondiale

➤ *Tiangong* (le palais céleste) : l'ISS chinoise

➤ Lune en 2024 (EU)

❑ Mars ?



Documents consultés

- ❑ **SpaceX, Blue Origin et les autres : les privés à l'assaut de l'espace**

Festival d'astronomie de Fleurance, 4-10 août 2018 – Ferme des étoiles 20/24

<https://www.youtube.com/watch?v=CHQUiznP0Js&list=PLEKvp6XrS80Mh3dvTwZh2dO9vtYzmIk5P&index=20>

- ❑ **SÉNAT - RAPPORT D'INFORMATION fait au nom de la commission des affaires économiques et de la commission des affaires étrangères, de la défense et des forces armées sur la politique des lanceurs spatiaux,
par Mme Sophie PRIMAS et M. Jean-Marie BOCKEL, Sénateurs
19 novembre 2019**

- ❑ **Avis n°9 de l'Académie de l'Air et de l'Espace sur L'Avenir des lanceurs européens, mars 2019**

Comment faire quand on ne connaît rien aux fusées et que l'on veut en même temps investir l'Espace ?

- ❑ Il faut être attiré par l'Espace**
- ❑ Il vaut mieux avoir une formation scientifique minimum**
- ❑ Il faut savoir s'entourer de gens qui savent déjà**
- ❑ Il faut avoir des sous et ne pas craindre les échecs**

**ÇA SERT À QUOI ?
A VOUS...**

MERCI DE VOTRE ATTENTION



Back-up

Ariane 62 – Vega C

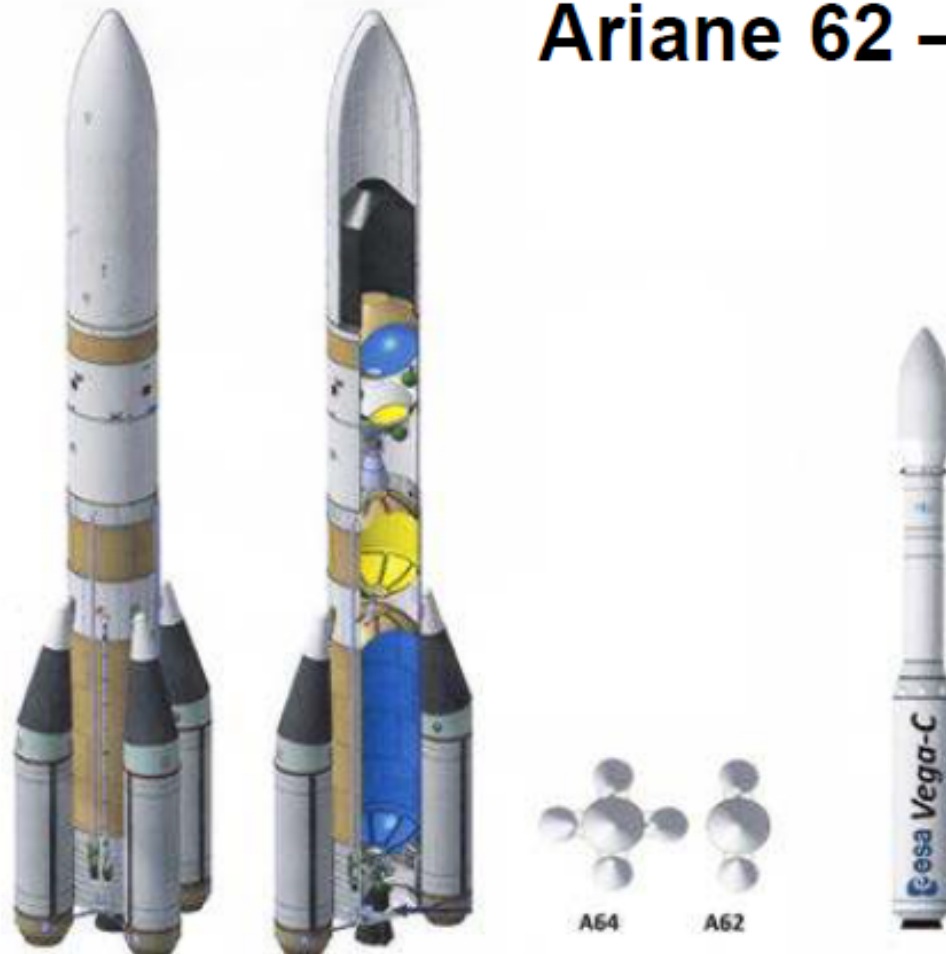


Figure 1 : Les accélérateurs à poudre d'Ariane 6 et le premier étage du Vega C utilisent le même moteur à poudre (P120).

Les satellites institutionnels européens (Copernicus, Metop, Météosat, observation militaire, ...) de la classe 1,5t/2t sont orientés vers Vega C ou Soyuz, voire le bas des performances d'Ariane 62. Leurs cadences de lancement sont faibles.

	Hauteur du lanceur	Masse au décollage	Performances charge utile orbite héliosynchrone 700 km	Capacité en orbite de transfert géostationnaire GTO	Estimation du prix
Vega C	35 m	210 tonnes	2200 kg	NA	35 M€ (pour cadence 3/an)
Ariane 62	63 m	530 tonnes	7000 kg	5000 kg	70 M€ (pour cadence 11/an)

Source : Avis n° 9 de l'Académie de l'Air et de l'Espace sur L'Avenir des lanceurs européens Mars 2019

Systems Engineering for Launch Vehicles: How much does it cost?

□ What about Innovation?

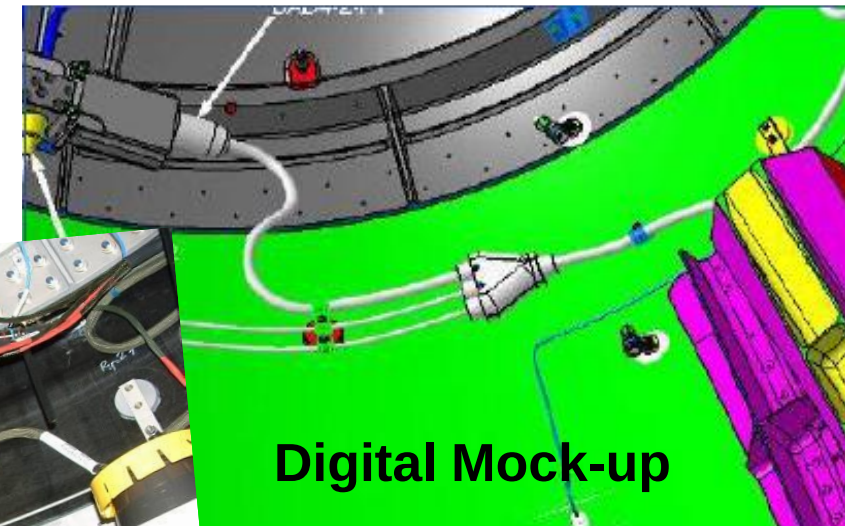
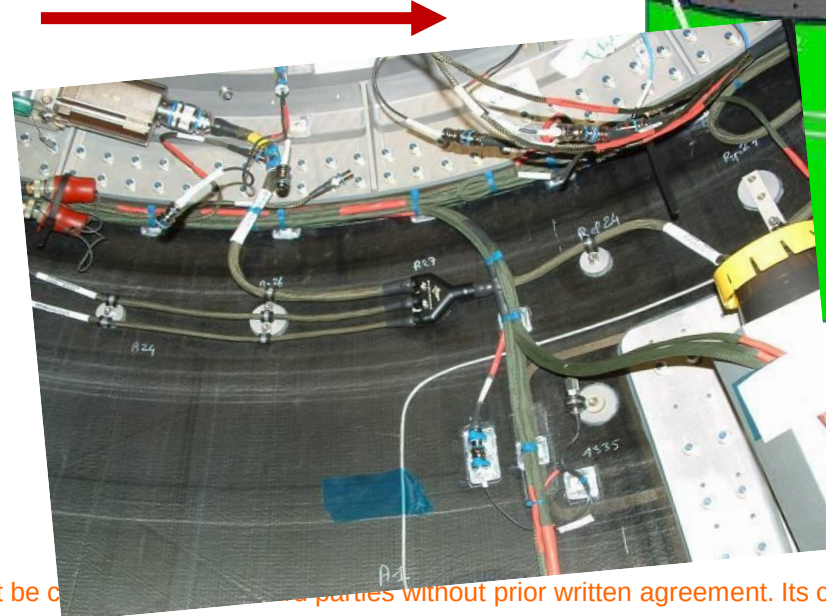
➤ Innovation in Technologies

- Demand for Credibility (**secure project achievement**)
- Demand for Sustainability (**availability of parts throughout the lifecycle**)
- Trade-offs between promising but proven and mature enough technologies but not obsolescent!
- Beware of **Commercial Off The Shelf (COTS)**, e.g. open source softwares...

➤ Innovation in Tools

- More and more Simulation
- Digital Mock-ups

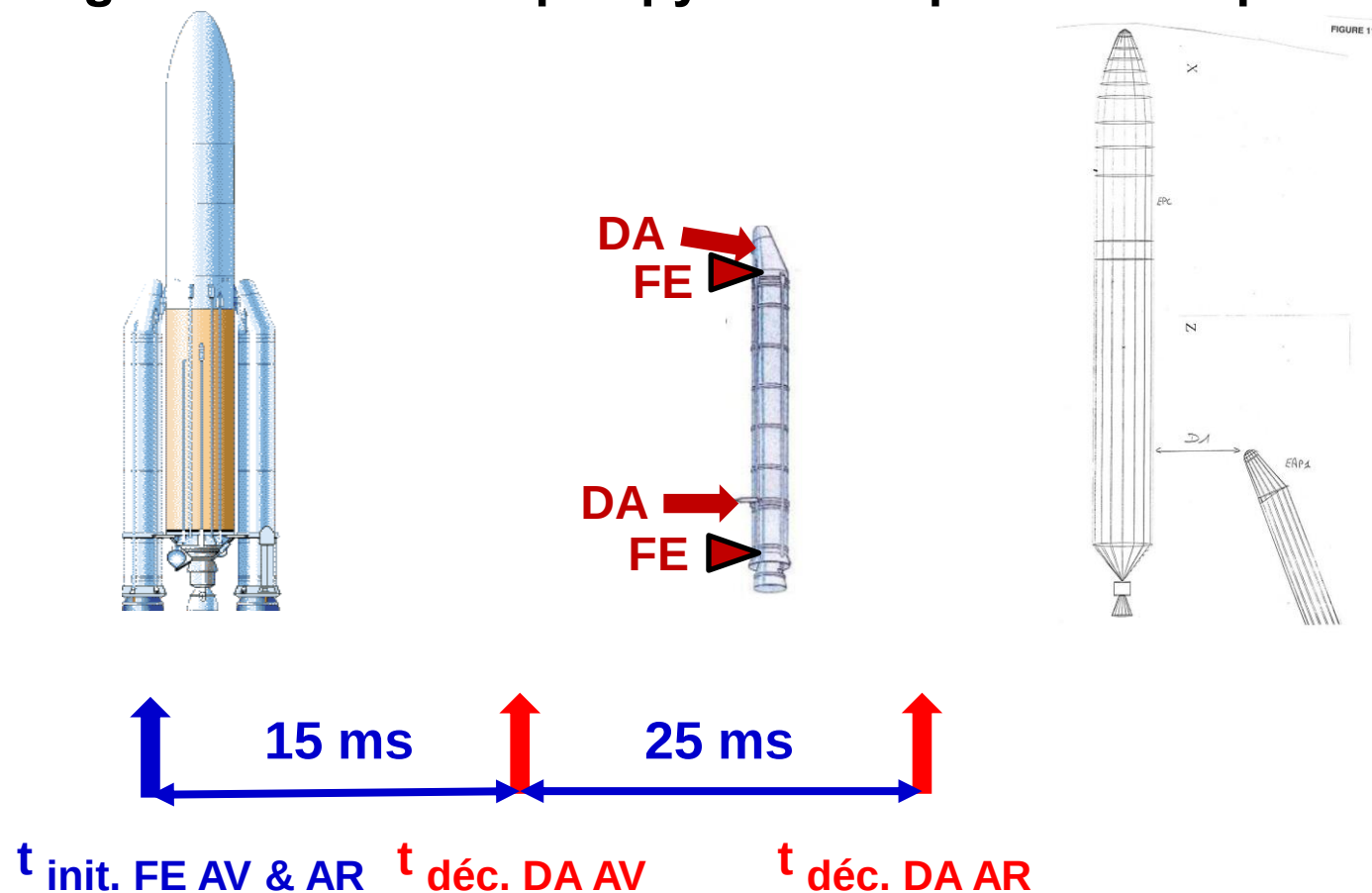
*And overall
Experience
& Capacity of Synthesis*



Photograph

Spécificités des Lanceurs Spatiaux

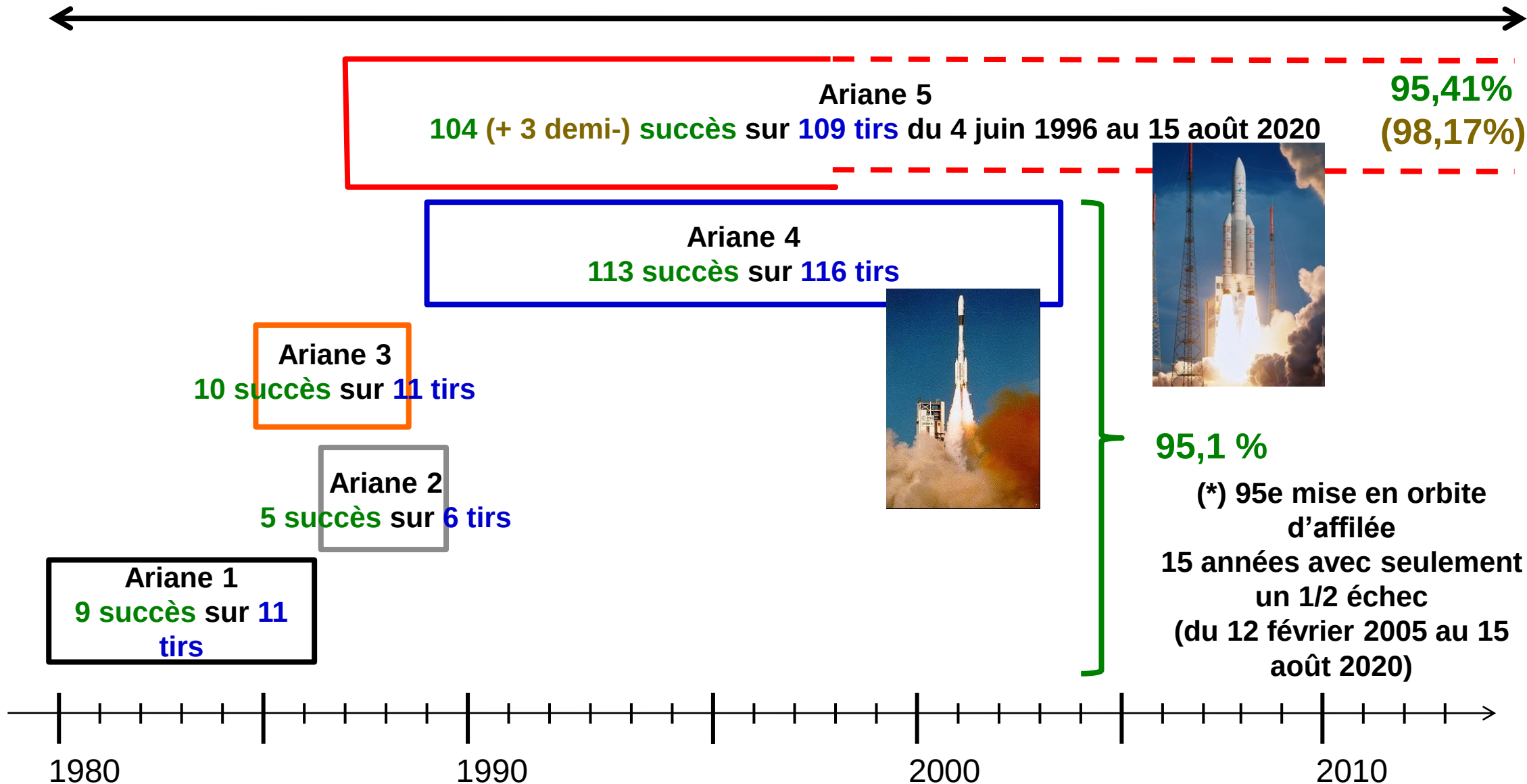
- **Un exemple de contrainte de réactivité sur le Logiciel Temps Réel**
 - **Management des Séparations d'Etages (initiation des Fusées d'Eloignement et découpes pyrotechniques des Dispositifs d'Accrochage)**



(+ Performances des organes pyrotechniques à l'avenant)

Nécessité d'un Architecte à chaque niveau de l'Arborescence

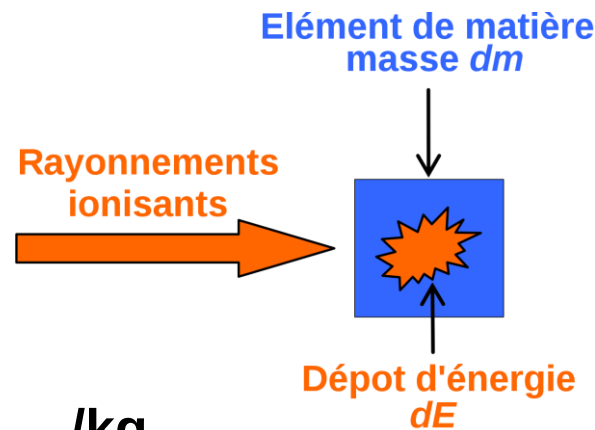
Ariane 1 à 5 : **241 (+ 3 demi-) succès** sur **253 lancements** du 24 décembre 1979 au 15 août 2020 (*)



Images : Wikipedia



Dose - Débit de dose



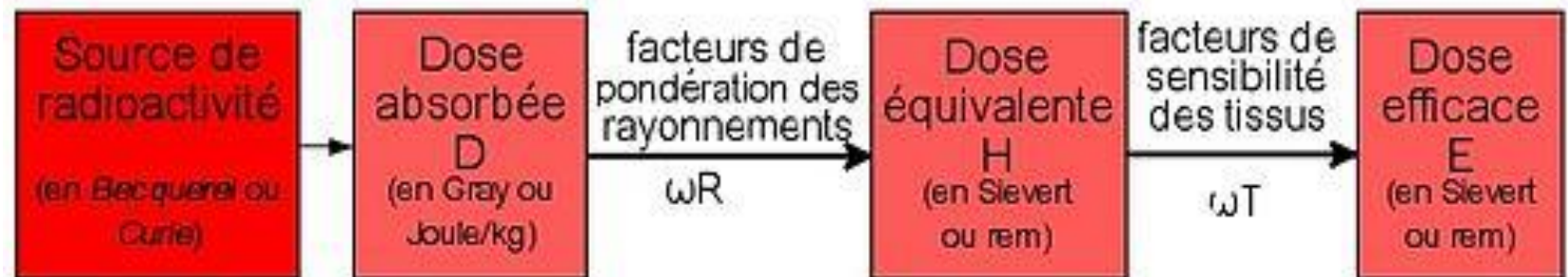
□ Dose $D = dE/dm$

- Unité : **gray (Gy)** $1\text{Gy} = 1 \text{ J}_{(\text{abs})} / \text{kg}$
- **rad (rd)** $1 \text{ rd} = 100 \text{ ergs}_{(\text{abs})} / \text{g}$
 $= 100 * 10^{-7} * 10^3 \text{ Gy}$
 $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$

Débit de dose
 $\text{Gy/s}, \text{Gy/h}, \text{rad/h}$
 $\text{rad}_{\text{Si}}/\text{s}$ en nuc. mil.
Débit de dose éq., eff.
 $\text{Sv/s}, \text{Sv/h}$
 rem/an

□ Dose équivalente, Dose efficace

- Equivalente : énergie reçue par unité de masse, corrigée d'un *facteur de pondération du rayonnement* sans dimension, qui prend en compte la *dangerosité relative du rayonnement*
- Efficace : prend en compte la *dangerosité relative du rayonnement* et la *sensibilité du tissu irradié*



- Unité : **sievert (Sv)**
- **rem (röntgen equivalent man)** $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

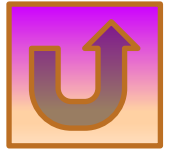


Dose - Débit de dose

- ❑ Niveau moyen d'exposition à la radioactivité naturelle (2.5 mSv/an*) $\Leftrightarrow$ 0.3 μ Sv/h
- ❑ Débit de dose tolérable
 - 2 μ Sv/h (débit de dose reçu par les populations qui habitent dans des régions à forte radioactivité naturelle)
- ❑ Dose annuelle tolérable
 - $\Leftrightarrow$ 17.5 mSv par individu (1,75 rem)
- ❑ Apollo 14
 - Les astronautes ont pris au niveau de la peau (traversée des Ceintures de Van Allen)
 - 1,14 rad soit 11,4 mGy
 - facteurs de pondération de 20 et 0,01 (peau)
 - $\Rightarrow$ 2,28 mSv (0,228 rem)

* 0,25 rem/an

Rosetta



❑ Coût de la mission

- 1,3 Md € lancement & opérations au sol inclus

❑ Distance de la comète 67P

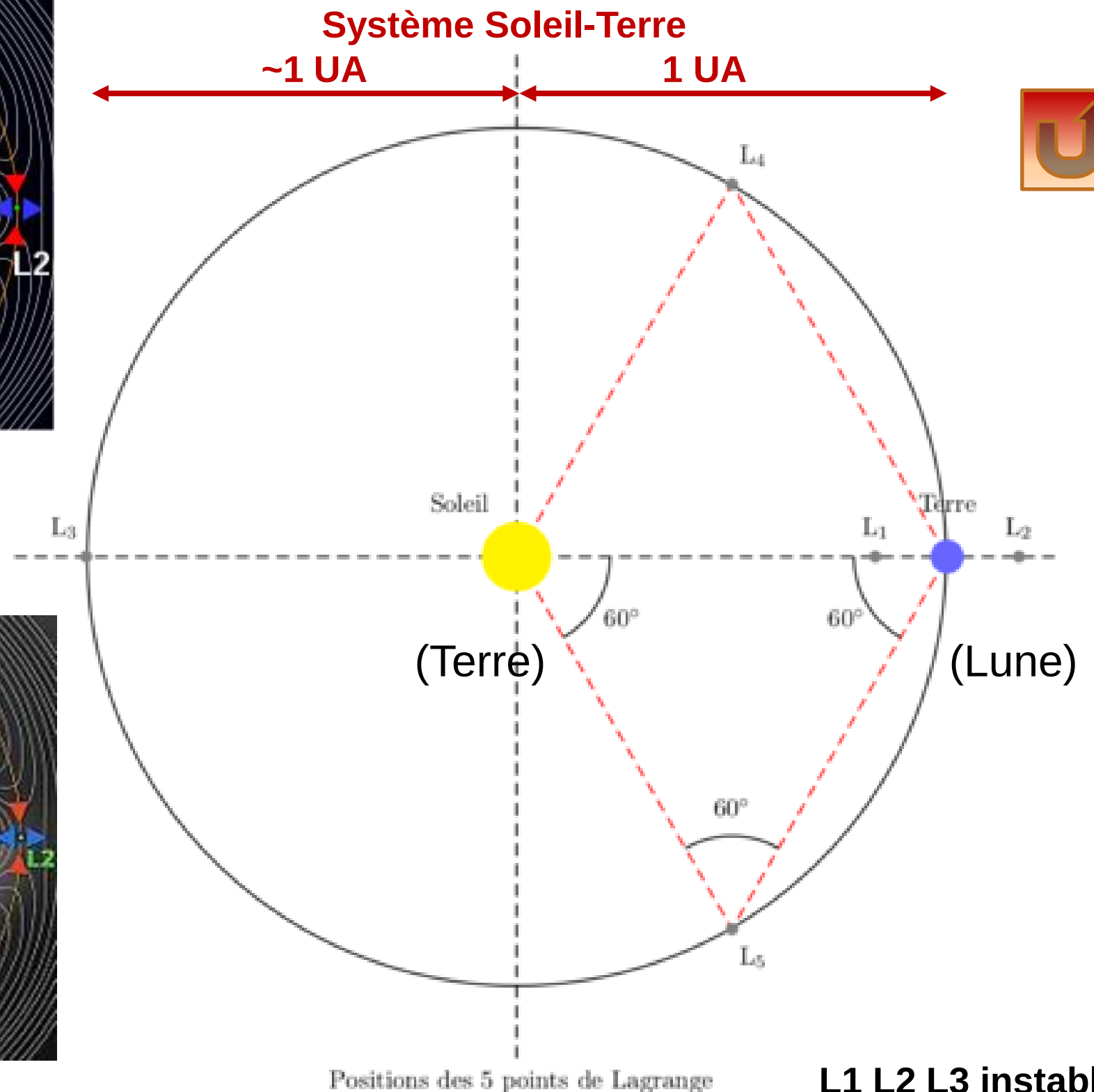
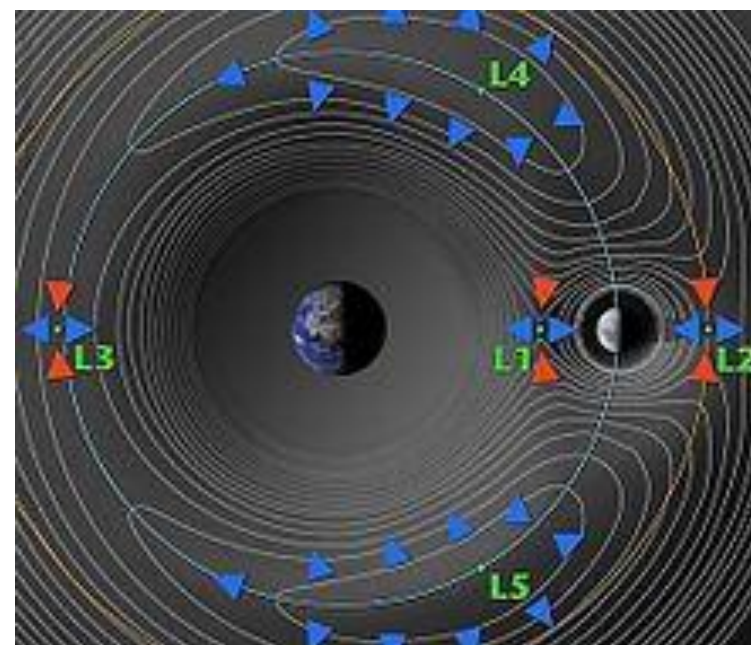
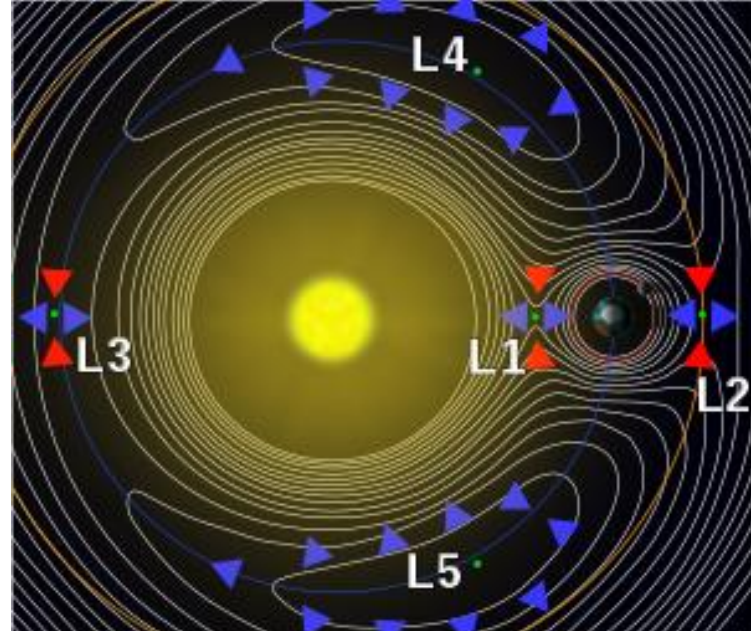
- Périhélie $1,29 \text{ UA} = \sim 190 \text{ M km}$
- Au moment du RV $3 \text{ UA} = 450 \text{ M km}$

Chang'e4

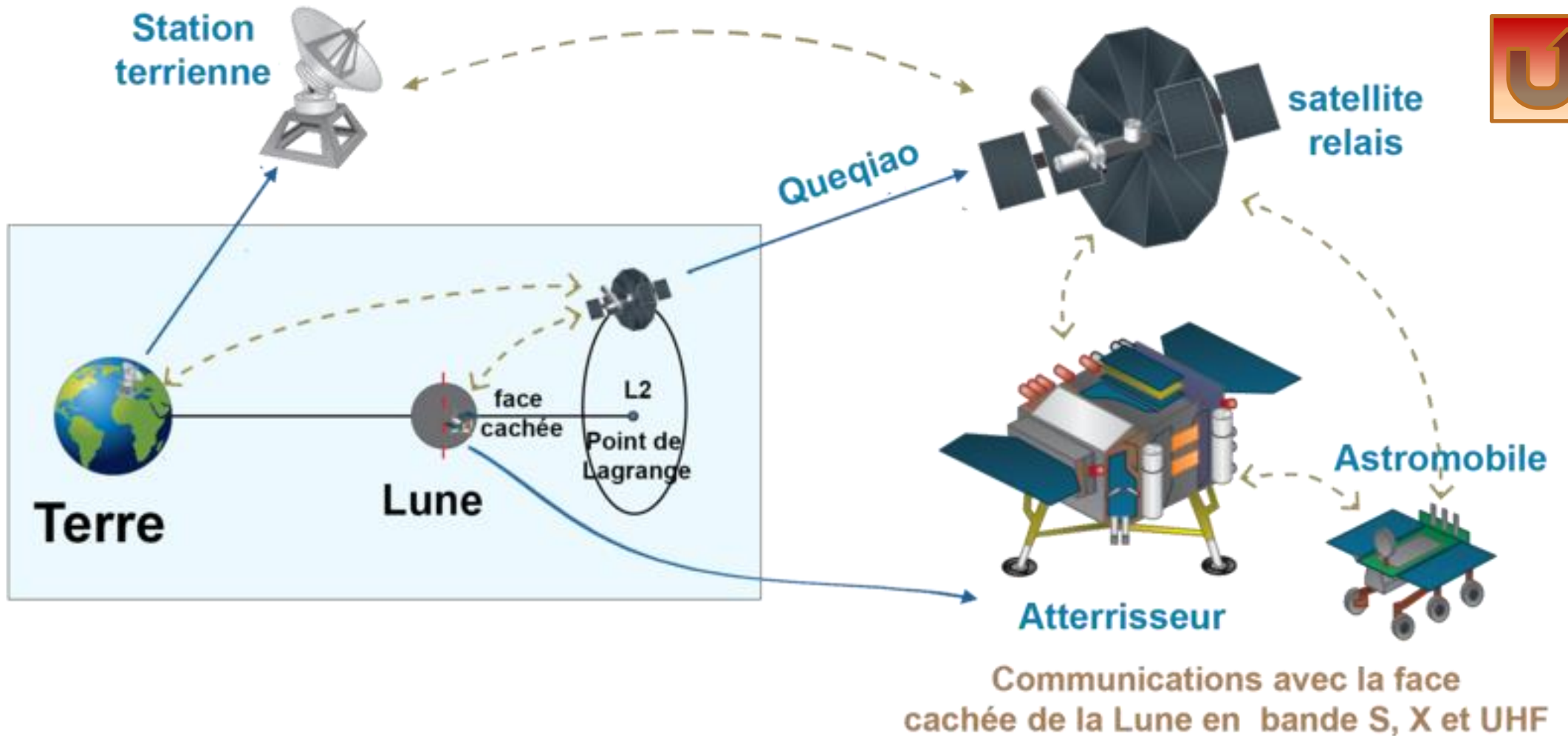


- ❑ **Satellite-relais *Quèqíáo* placé au point de Lagrange [*] L2 du système Terre-Lune**

[*] Un objet de faible masse situé aux points de Lagrange d'un système de 2 corps n'en bouge plus relativement aux deux autres corps, et tourne de concert avec eux



L1 L2 L3 instables

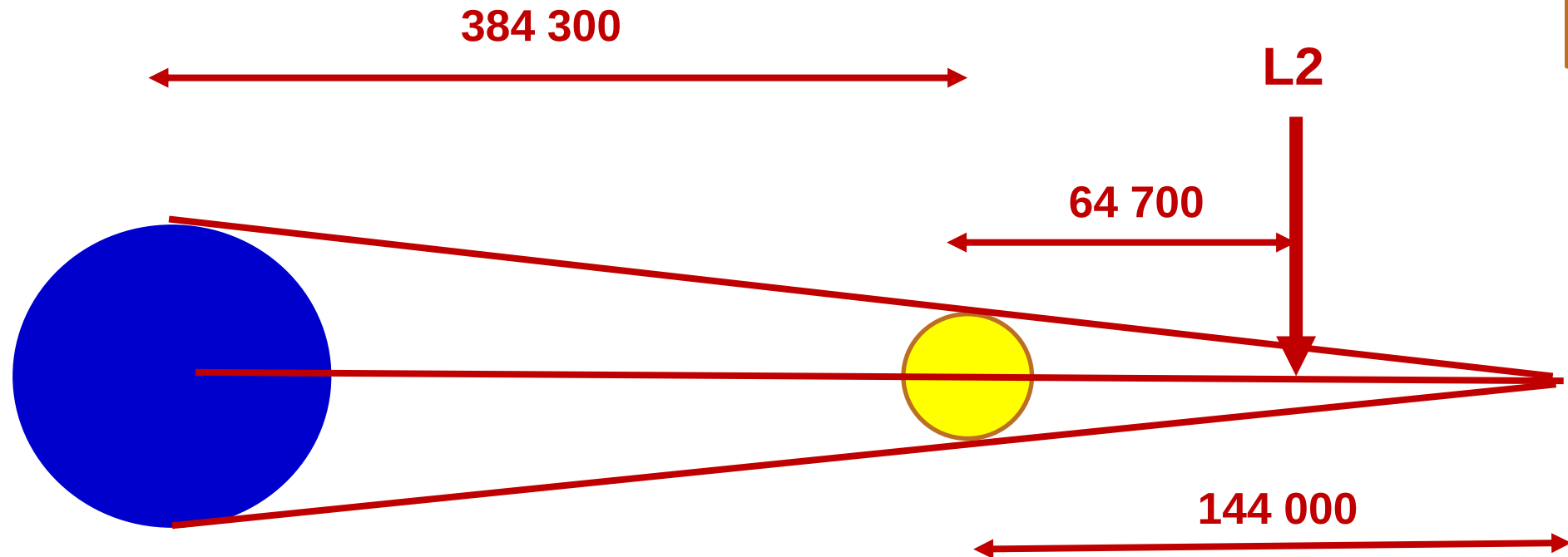


Système TERRE-LUNE

Données chiffrées

km	Bary centre	L ₁	Lune	L ₂	L ₃	L ₄ / L ₅
Lune	379 600	58 200	/	64 700	769 000	384 300
Terre	4 700	326 200	384 300	449 000	384 700	384 300

Diamètre Lune
3474 km



Système TERRE-LUNE						
Données chiffrées						
km	Bary centre	L ₁	Lune	L ₂	L ₃	L ₄ / L ₅
Lune	379 600	58 200	/	64 700	769 000	384 300
Terre	4 700	326 200	384 300	449 000	384 700	384 300

Diamètre Lune
 3474 km
 Diamètre moy. Terre (géoïde)
 12 742