



L'histoire à succès de SpaceX: Quelques éléments de compréhension...

Christophe Bonnal – Direction de la Stratégie, CNES
Christophe.bonnal@cnes.fr

*Café des Sciences
Louvenciennes – 30 novembre 2023*



AVERTISSEMENT : IL EST INTERDIT DE COPIER TOUT OU PARTIE DE
CETTE PRESENTATION SANS L'AUTORISATION DE **Louv'Science**

L'histoire à succès de SpaceX: Quelques éléments de compréhension...

Christophe Bonnal – Direction de la Stratégie, **CNES**

Christophe.bonnal@cnes.fr

Pas vraiment CNES aujourd'hui...
Ce n'est qu'une analyse personnelle.
Ne représente pas forcément la vision
du CNES

Café des Sciences
Louvenciennes – 30 novembre 2023

•
•
•
•
•
Le personnage

•
•
•
Le manager

•
•
•
•
L'ingénieur

•
•
•
•
Le visionnaire

Quelques références

- [1] Alain Dupas – Contrat de veille « SpaceX » pour le CNES (in memoriam)
- [2] Nathalie Girard – Expert sénior « Veille » du CNES
- [3] Elon Musk, Ashlee Vance, Virgin editor 2015
- [4] « Inside SpaceX » Rapport d'étonnement – Sibylle Delaporte, mars 2018
- [5] Liftoff, Elon Musk and the desperate days that launched SpaceX, Eric Berger, mars 2021
- [6] Elon Musk, l'enquête inédite, B. Mathieu, E. Botta, Robert Laffont 2023



❖ Quelques messages importants...

- Né le 28 juin 1971 à Pretoria
 - . Jeunesse mouvementée avec de nombreux déménagements
 - . Avide de connaissances, gros lecteur notamment « HitchHickers Guide to the Galaxy (H2G2 – Douglas Adams) »
 - . Mémoire prodigieuse : dévore les encyclopédies
 - . Dira en 2021 qu’il est atteint d’un autisme, syndrome d’Asperger

- De fortes prédispositions pour les jeux vidéos et l’informatique
 - . Premier jeu vidéo à 12 ans sur Vic 20 :
 - Blastar, 167 lignes de code, vendu 500 dollars
 - . Assemble et vend des ordinateurs personnalisés dans son entourage
 - . Répare et upgrade toute l’informatique de ses connaissances
 - . Se forge une très bonne réputation de computer-geek



❖ Quelques messages importants...

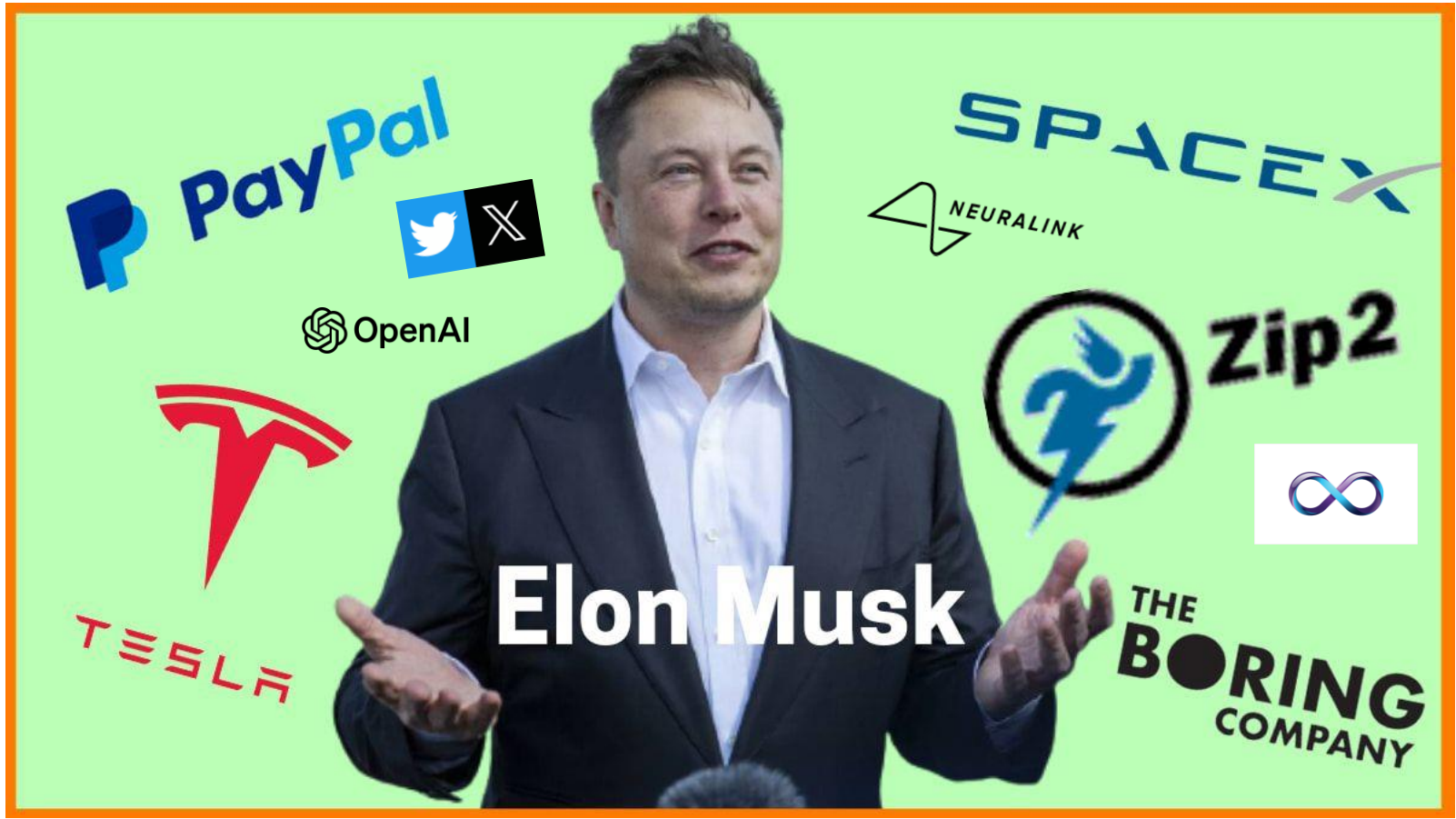
- Nombreux changements dans sa jeunesse
 - . Canada en 1988, Université Queens, diplôme en Administration
 - . Entre 1988 et 1992 « survit » grâce à des emplois partiels en informatique
 - . USA en 1992, Université de Pennsylvanie, Physique et Economie
 - . Bourse de PhD en 1995 à Stanford – Abandonne au bout de 2 jours
 - . Pour lancer sa propre société...
- Ne se voyait pas faire de l'informatique comme métier de base
 - . « *I really like computer games, but then if I make really good computer games, how much effect would that have on the world?* »
 - . Première mentalité de « changer le Monde »
 - . Il identifie 4 domaines Techno Utopian « Power, Transport, Connect, Explore »
 - . Dira par la suite de Zuckerberg « *We wanted flying cars, but instead we got 140 characters* »
- Editeur de contenus en ligne Zip-2 en 1995 avec son frère Kimbal
 - . Améliorations permanentes du système (comme il le fera plus tard avec Falcon 9)
 - . Rachat par Compaq en 1995 pour 341 M\$



❖ Quelques messages importants...

- Banque en ligne X.com en 1999
 - . Pas mal de problèmes... Apprend la « guerre » des sociétés
 - . Devient PayPal en 2001 – Vendu à eBay en 2002 pour 1,5 B\$
- Rencontre avec Robert Zubrin (Mars Society) en 2001 et discussions de missions martiennes
 - . Board de direction, mais déçu par le manque d'ambition . Création de la « Life to Mars Foundation »
 - . Négociations infructueuses avec les Russes avec pour acheter de vieux missiles pour lancer des souris
 - . Décide alors de faire ses propres lanceurs après sa rencontre avec Tom Mueller
 - . Fonde SpaceX en 2002 avec l'obsession de Mars
- Accessoirement... « *willing to take an insane amount of personal risk* »
 - . Entre dans le capital de Tesla en 2004 et en prend la direction en 2008
 - . Hyperloop, train à 1.200 km/h dans un tube, en 2012
 - . Tesla Powerwall, stockage d'énergie électrique, en 2015
 - . Open AI en 2015 – Quitte en 2018
 - . Neuralink en 2016
 - . The Boring Company en 2016
 - . Rachète Twitter en 2022 pour 44 B\$ et le transforme en X (50-80% de licenciement)





❖ Evolution récente...

- De plus en plus libertarien
 - . Apôtre de la liberté individuelle à tout prix
 - . Intervention minimale de l'Etat dans la vie des citoyens
 - . Liberté d'expression maximale
 - ↳ Explique ses activités sur Twitter ≡ X: renvoi de l'équipe de modération
 - Mais de fait, entraîne une forte réduction de la liberté d'expression des abonnés !

- Absence de régulation des discours de haine
 - . Relations complexes à suivre avec le Politique : critique des restrictions à l'immigration de Trump
 - . Très conservateur
 - . « Promotion abjecte de la haine antisémite et raciste » (Maison Blanche - 171123)
 - Mais rencontre en direct avec le Pdt. Israélien pour dissiper l'accusation
 - . Politique : actions peu claires dans le conflit en Ukraine

- In-fine, Musk pourrait être son pire ennemi...
 - . Fuite de très nombreuses entreprises-soutiens
 - . Retrait des publicités (IBM, Apple, Disney, Warner Bros, ...)



© Le Monde – 2 décembre 2022



❖ **Dirigeant atypique et exceptionnel**

➤ **Fondateur – CEO (ex) – CTO – Chief Designer**

- . Patron hors-pair, investi et présent
- . Prend toutes les décisions, notamment tous les choix techniques
- . A mis en place une organisation qui casse les codes, insuffle la culture d'entreprise, inspire la vision, et entraîne vers l'objectif Mars

➤ **Choix toujours pertinent de son top management**

- . Un duo iconique avec Gwynne Shotwell, actuelle CEO
 - . Ex Aerospace pendant 10 ans
 - . Ex Microcosm pendant 4 ans
 - . Rejoint SpaceX en 2002, puis Présidente & COO en 2008
- . Elon présente la vision et les projets, Gwynne la situation financière et commerciale
- . Le top du top avec Tom Mueller, gourou de la Propulsion
 - . Membre fondateur de SpaceX
 - . Ex VP Propulsion TRW
 - . Chief engineer du moteur LCPE 300 tonnes, Pintle, en 2000



❖ Efficacité de SpaceX

➤ Des liens très forts entre employés

- . Esprit d'équipe remarquable impactant fortement sur l'efficacité.
- . À SpaceX, tous se sentent dans le même bateau.
- . Toutes les équipes doivent avancer au même rythme
- . Si l'une d'entre elles peine et rencontre des difficultés susceptibles de mettre en péril le lancement, de la main d'oeuvre lui est envoyée en renfort : ingénieurs, techniciens, inspecteurs qualité, tous les métiers sont sollicités pour apporter un coup de main aux camarades qui en ont besoin.

➤ Agilité à redéployer des ressources rapidement

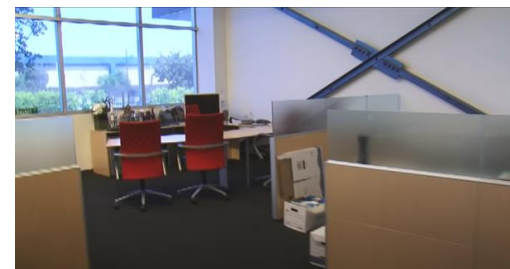
- . Force qui réduit le risque du maillon faible.
- . En plus, la compréhension du travail et des contraintes des autres soude fortement les équipes.
- . Cet esprit d'équipe est une caractéristique des start-ups : comme il y a tout à faire, et tant de challenges externes, pas de temps à perdre pour se disputer en interne.



Livraison du 200^{ème} 2nd étage

➤ **Une entreprise organisée horizontalement**

- . Le signalement de tout problème est encouragé, notamment via une boîte mail anonyme ver Gwynne
- . ‘Compagnies talks’, ou ‘Allhands meetings’ fréquents à l’initiative d’Elon, Gwynne et des VP pour présenter à tous les employés les projets et challenges en cours, tout ça enrobé dans un discours motivant. Cela permet de remettre la vision en tête et de garder chacun motivé et concentré sur les objectifs de la compagnie.
- . Tout le monde (même les managers et Elon lui-même) a son bureau en open space au cœur de l’usine d’Hawthorne, véritable ruche industrielle.
- . Tout est conçu pour faciliter communication, échanges d’idées et d’informations.
- . Fort esprit d’autonomie, de responsabilisation et d’esprit d’initiative chez tous



➤ **Une structure intégrée verticalement**

- . Le low cost de SpaceX réside notamment dans son modèle industriel spécifique, mélange d’intégration verticale, d’utilisation de COTS2, de 3D printing et non au recours systématique à la sous-traitance
- ↳ Près de 80% des pièces du F9 et Dragon sont conçues et produites sous le même toit à Hawthorne
- . Deux exemples :
 - . Fonderie la plus perfectionnée au monde pour fabriquer n’importe quelle pièce de fonderie très rapidement
 - . Internalisation de la fabrication des vannes cryotechniques
- . A l’image de Henry Ford, Elon Musk a le contrôle de sa supply chain et dispose ainsi des leviers pour réduire les coûts et les délais

❖ Une culture du risque

- . Le développement est intimement lié à la notion de risque.
- . Les Américains l'acceptent de manière positive, car elle est ancrée dans leur ADN et conduit à des innovations fabuleuses.

“When something is important enough, you should do it even if the odds are not in your favor” — Elon

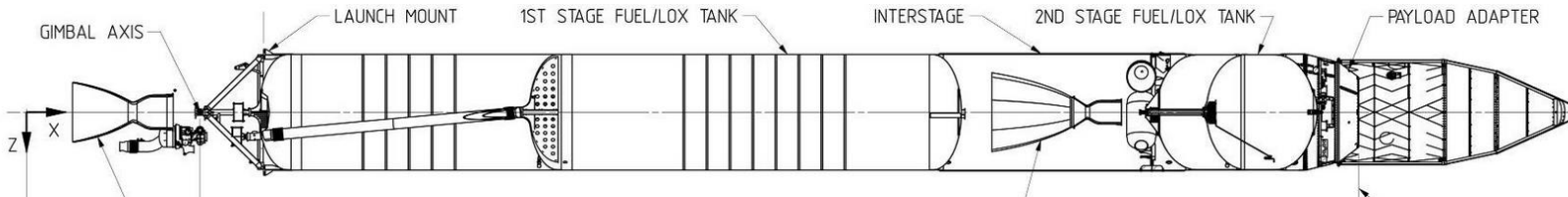
“Failure is an option here. If things are not failing, you are not innovating enough” — Elon

❖ First Principle Thinking

- . Elon prêche Elon le « *First Principle Thinking* », autrement dit, revenir aux principes fondamentaux de la physique pour résoudre les problèmes.
- . Décomposition d'un problème complexe en vérités fondamentales puis raisonnement à partir de là, par opposition au raisonnement par analogie ou des 'best practices'.
- . Questionner le statu quo, rechercher du feedback négatif, et laisser la physique définir les limites, ce sont les clefs de l'innovation made in SpaceX... tout à l'inverse du crédo Européen qui prône l'héritage des technologies, du « *ça a volé, donc on ne change pas* » ou du « *on a toujours fait comme ça donc il faut faire pareil* »...

❖ Falcon 1 : premier développement de lanceur SpaceX

- . Conception très simple : Bi-étage Oxygène Liquide - Kérosène, fonds communs
- . Moteur Merlin 1A 1^{er} étage de Tom Mueller – Cycle Générateur de Gaz – Injecteur Pintle – 340 kN – Isp_s 304 s
- . Moteur 2^{ème} étage Kestrel très simple : pressurisé - injecteur Pintle – 30 kN – Isp_v 325 s
- . Etages en Alu 2219 soudés par Friction Stir Welding
- . Performance élevée : 650 kg en orbite basse, 400 kg en SSO pour une masse au décollage de 27 tonnes – 21 mètres
- . Lancement depuis l'îlot d'Omelek (Kwajalein)
- . Récupération du 1^{er} étage prévue sous parachute, mais non réalisée
- . Deux premiers vols = échecs (mars 2006, mars 2007) ¹
- . Modification du Merlin : chambre refroidie par circuit régénératif : Merlin 1B



¹ [5] « Liftoff » de Eric Berger, Livre passionnant, page turner...

❖ Falcon 1 : premier développement de lanceur SpaceX

. Nouvel échec en vol en août 2008

↳ Très gros problèmes financiers (problèmes analogues chez Tesla en même temps)

. Succès des deux vols suivants en version Merlin 1B septembre 2008, juillet 2009

. Arrêt du Falcon 1 malgré sa qualification ! Inadéquation au marché

. Cout du programme ≈ 90 M\$ - Lancement = 5,9-7 M\$ - 1^{ère} fois qu'un privé atteint l'orbite !

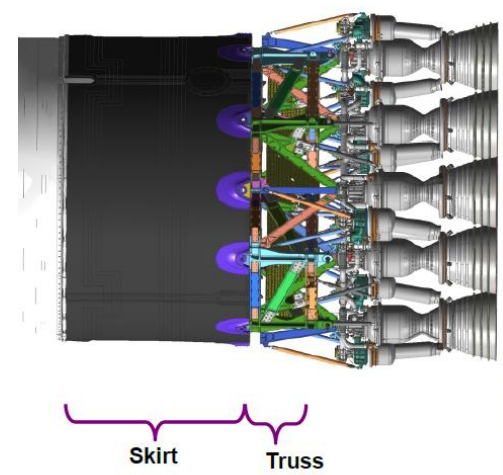
➤ Important : Avant même le 1^{er} vol réussi Falcon 1, le premier étage de Falcon 9 était testé au sol avec 9 Merlin 1C (1^{er} août 2008) et les premiers avant-projets de Dragon étaient bouclés

⇒ Contrats COTS 09.06 puis CRS 12.08 pour 1,6 à 3,1 B\$

➤ Capacité de projection dans le futur : toujours un coup d'avance



- ❖ **Falcon 9 : lanceur prévu pour être compétitif vis-à-vis de Delta IV et Atlas V**
 - . Bi-étage, y compris vers l'orbite GTO – 55 mètres – 330 tonnes
 - . 1^{er} étage équipé de 9 Merlin 1C de 500 kN sol – 2^{ème} étage avec 1 Merlin 1CVac
 - Conception devenue classique : 1^{er} étage N – 2^{ème} étage 1 identique
 - . Même électronique et GNC que Falcon 1
 - . Orientation moteur par Kérosène haute pression
 - . Contrôle en roulis vié l'échappement turbine
 - . Réservoirs Aluminium-Lithium Friction Stir Welded – Fonds communs
 - . Lancement depuis LC40 à Cap Canaveral et SLC3 à Vandenberg
 - . Baie moteur « tic-tac-toe » très complexe



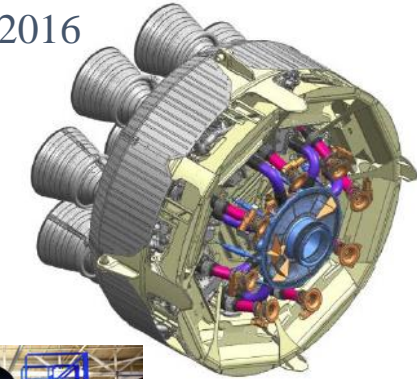
❖ **Falcon 9 : modification majeure en septembre 2013**

- . Version 1.1 plus haute (69 m) et plus lourde (505 t)
- . Nouvelle baie-moteur 1^{er} étage dite Octaweb avec Merlin 1D
 - On modifie ce qui marche après seulement 4 vols !
- . Sur les 10 premiers vols, 6 lancements Dragon ravitaillement ISS
 - . 2 contrats de démonstration COTS, puis contrat CRS
- . Premières tentatives de récupération du 1^{er} étage sous parachute : échecs
 - . Jambes d'atterrissage avril 2014 + grid-fins en 2015
 - . 1^{er} succès « océan » au 9^{ème} vol en 2014 puis au sol en décembre 2015 et sur barge en 2016



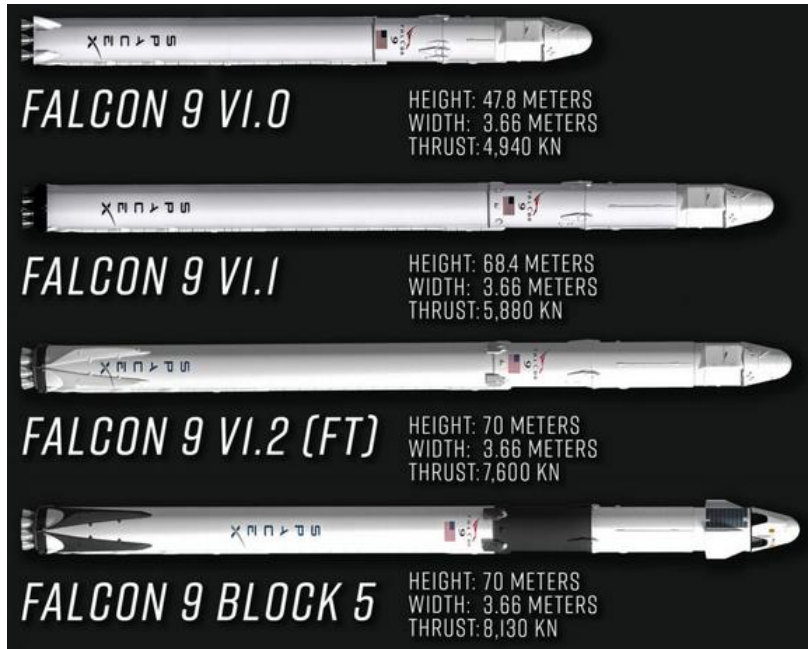
❖ **Falcon 9 : modification majeure en juin 2015 !**

- . Version 1.2 puis Full Thrust
- . Ergols sous-refroidis refroidir le LOX de -183 à -206°C et le kérosène RP1 de 21 à -7°C
 - . + 10% de Kérosène et + 3% de LOX à iso longueur hors tout
 - Modification osée, notamment au moment du remplissage
 - « Victoire » de Musk face aux astronautes
- . Merlin 1D+ : 771 tonnes au décollage – Pression 110 bars – Masse 470 kg
 - Evolutions permanentes, type développement informatique
 - Chaque lanceur est différent du précédent, ou presque

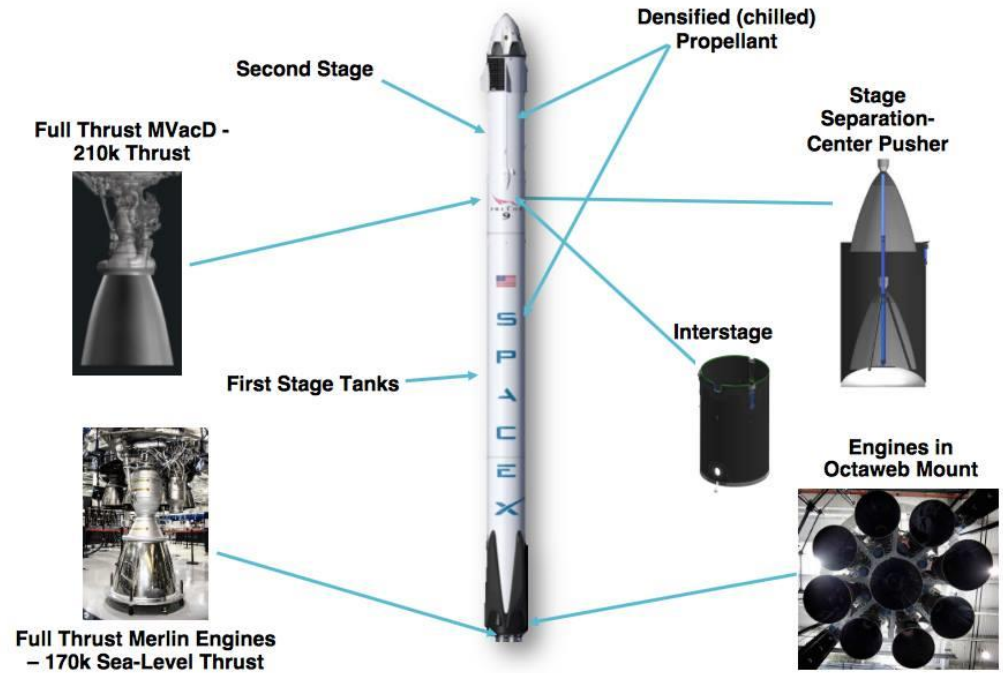


❖ Falcon 9 : Evolution Version 1.1, V1.2 Full Thrust puis Block 5

- Quand on parle de Falcon 9 il faut être clair quant à la version dont on parle !
- . Version Full Thrust depuis mars 2016
- . Version Block 5 depuis 2018 (réutilisabilité 10 fois)

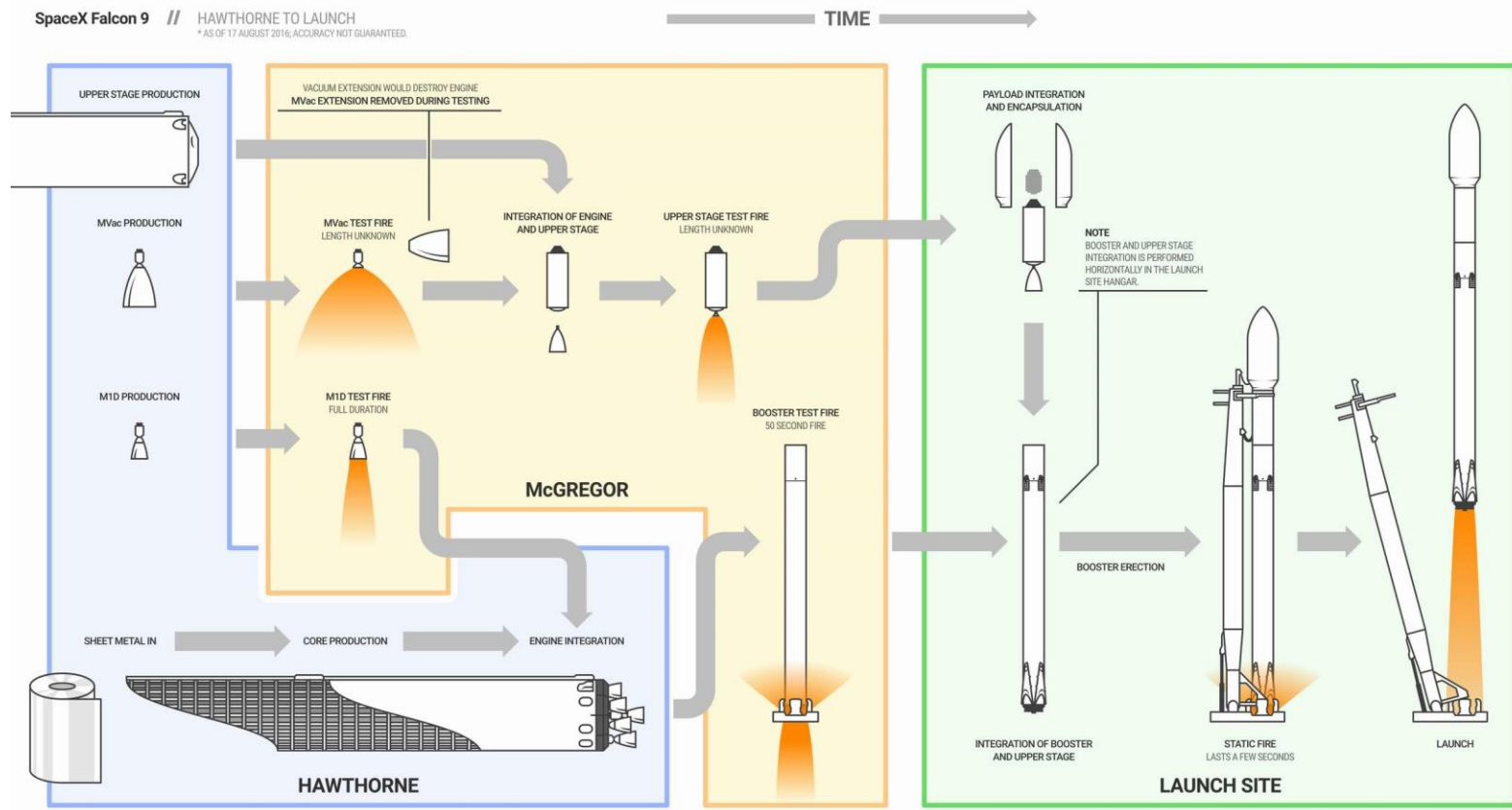


© EveryDay Astronaut



❖ Falcon 9 : un schéma d'intégration très simplifié – Très forte verticalisation des activités

En caricaturant : « *on rentre une tôle à un bout, on ressort un lanceur à l'autre* »



COPYRIGHT 2017 ZLSA DESIGN

❖ Falcon 9 Heavy = FH : Lanceur lourd tri-corps

. Capable de très hautes performances :

Sans récupération : 68 t en LEO, 26,7 t GTO, 16,8 t vers Mars

. 1^{er} vol Février 2018 avec Starman au volant d'un roadster Tesla sur « Space Oddity » de Bowie, avec le message « Don't Panic » de H2G2

↳ Modèle marketing propre de Musk : rendre l'espace « super-cool »¹ pour susciter l'enthousiasme du grand public...

. Image « cool » très perpétrée par Musk :

toujours habillé décontracté, jeans sans cravate, excellent communicant, capte l'attention du public, souvent avec humour, très fort impact sur les jeunes embauchés « sortie d'école »

. Très fort contraste avec l'image classique « techno boring »

. Version peu utilisée – 8 vols à ce jour dont 3 pour la défense US

. Problème de la disponibilité de gros satellites

. Coût de lancement affiché 97 M\$ en réutilisable

. Mais les 3 corps ont des différences significatives :

coûts de production potentiellement plus élevés



¹ Sibylle Delaporte [R4]





❖ Falcon 9 : des performances exceptionnelles liées à un devis de masse exceptionnel

. Poussée sur Poids Merlin 1D : 190 (tf/tm...)

- Thrust to weight Falcon 9 Merlin 1D : 190
- Delta IV RS-68 : 50
- Ariane 5 Vulcain-2 : 67
- Atlas V RD-180 : 77
- Zenit RD-170 : 83
- LM-5 YF-77 : 26
- LE-7A : 60
- Raptor-2 : 150

. Indice constructif des étages (masse sèche / masse d'ergols)

1^{er} étage (avec kit récupération) ≈ 4,7%

2^{ème} étage ≈ 3,8%

- Delta IV 1^{er} : 13,4% - 2^{ème} : 12,8%
- Atlas V 1^{er} : 7,4% - 2^{ème} : 9,7%
- Zenit 2 1^{er} : 8,7 % - 2^{ème} 11%
- H-IIA 1^{er} : 13,6% - 2^{ème} 18%

➤ Valeurs à peine crédibles, mais validées en rétro-engineering !

➤ Un mono-étage vers orbite (SSTO) serait possible avec le 1^{er} étage de Falcon 9 😊

		v1.0	v1.1	v1.2 FT	Bloc 5
Lanceur	Longueur m	54,3	68,1	70	70
	Masse décollage tonnes	331	503	549	595
1er étage	Longueur m	31	40,8	42	42
	Diamètre m	3,66	3,66	3,66	3,66
	Masse ergols chargée tonnes	261	410	440	475
	Masse larguée à sep 1/2 kg	16186	21874	22200	22200
	Débit Merlin kg/s	168	238	270	299
	Poussée Merlin sol kN	422,6	650	840	900
	Isp sol s	262,2	281,1	243,9	288,5
	Poussée Merlin vide kN	490	720	836	913
	Isp Merlin vide s	304	308	310	310
	Pc Merlin bar	69	97		108
Epsilon Merlin	14,5	16		21,4	
	Masse Merlin kg	630	425		470
2ème étage	Longueur m	4,36	8,6	15,5	15,5
	Diamètre m	3,66	3,66	3,66	3,66
	Masse ergols chargée tonnes	47	90	92	107
	Masse larguée à sep CU kg	3149	4603		4000
	Débit MerlinVac kg/s	129	241		274
	Poussée MerlinVac vide kN	427	726		935
	Isp MerlinVac vide s	337	345		348
	Pc MerlinVac bar	53,2	67,1		108
	Epsilon MerlinVac	117	117		117
		Masse MerlinVac		567	
Interétage	Longueur m	6,1	5,6		
	Masse (intégrée dans Ms1)		2000		
Coiffe	Longueur m	13,2	13,2		
	Diamètre m	5,18	5,18		
	Masse larguée kg	3210	3477		

❖ Falcon 9 : architecture générale

. Simplification à l'extrême de la conception

➤ Exemple du 2nd étage Falcon 9 V1.0

. Fond commun : pas de Jupe Inter Réservoirs

. Bâti moteur minimaliste

. Divergent Merlin 1D VAC radiatif (Niobium)

. Pas de structure de Case à Equipements

Attache directe sur le fond avant Réservoir LOX ROX

. Pressurisation Hélium 350 bars noyée dans le réservoir LOX

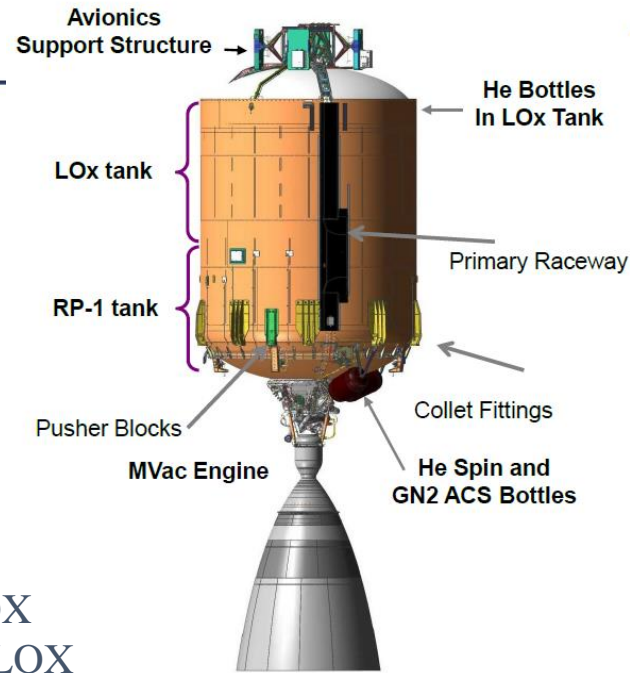
Pressurisation à 90K : meilleure densité, réservoirs plus petits

. Système de séparation 1-2 :

Initialement 3 vérins pneumatiques périphériques

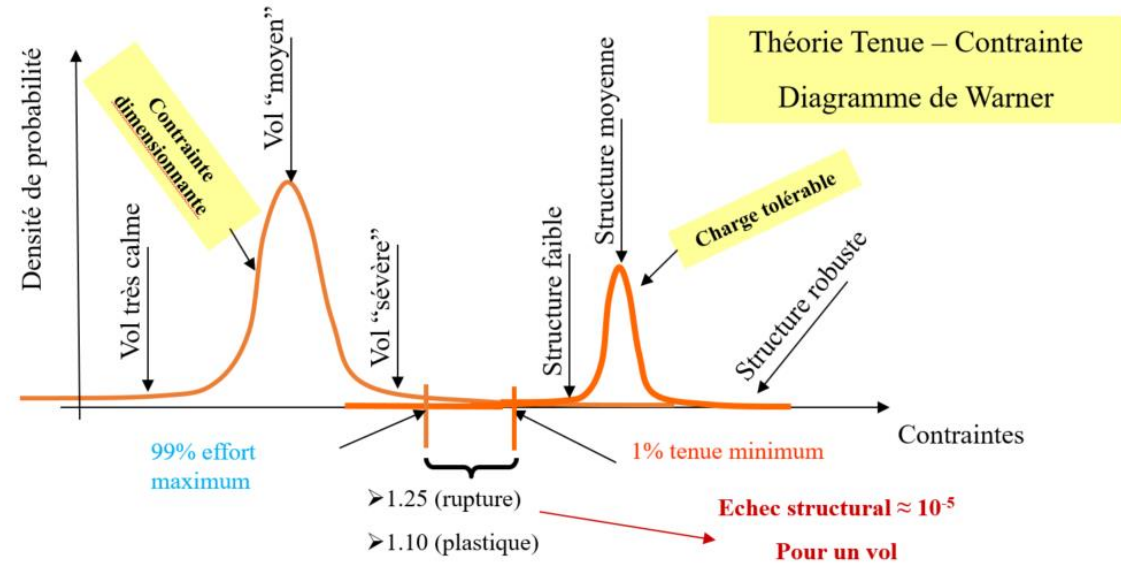
Actuellement 1 seul vérin sur le 1^{er} étage : pas de masse sur le 2nd étage !

. Adaptateur charge utile et coiffe directement clampés sur le haut du ROX



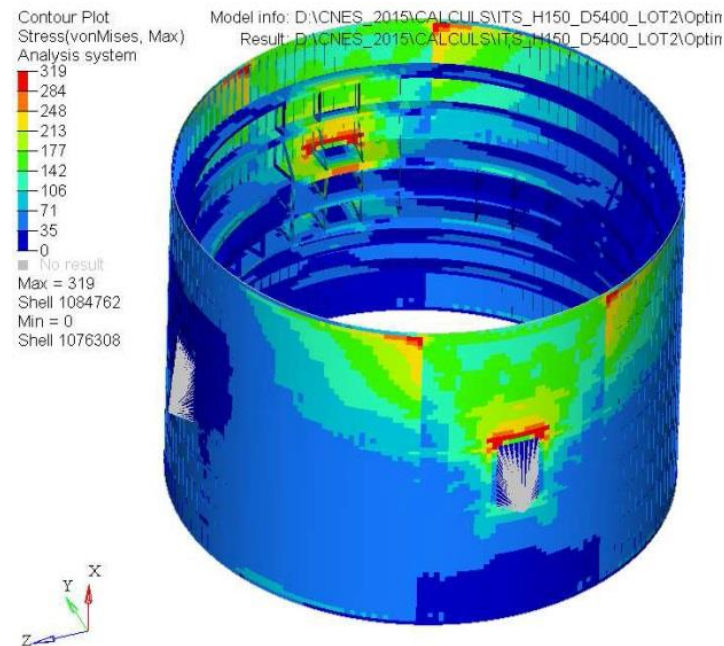
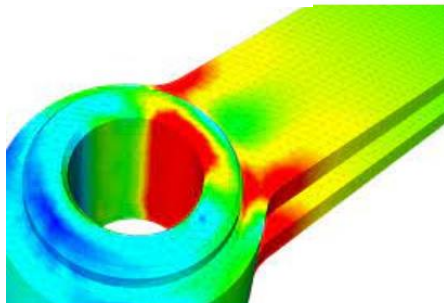
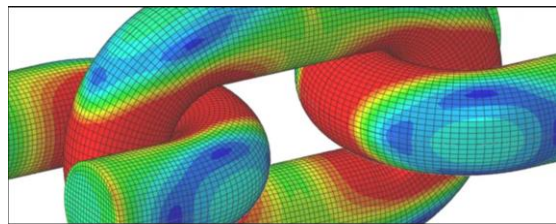
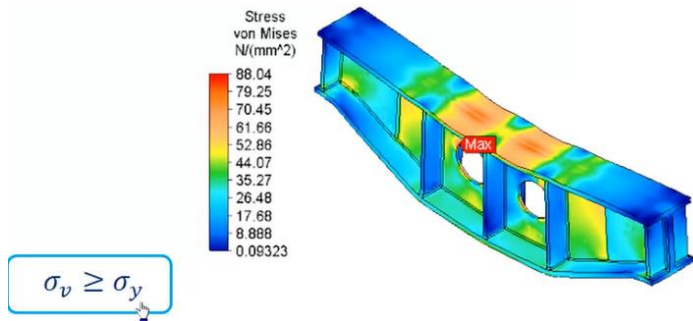
❖ Falcon 9 : devis de masse – Charges mécaniques, statistiques et fiabilité

- . Charges : efforts généraux, surflux, pression, effets thermiques
- . Coefficient de sécurité : « classique » $J_r = 1,25$ depuis le programme Saturne V
- . Probable remise en cause par Space X : $J_r = 1$? voire moins ?
- . Approche top-down de probabilité acceptable de rupture mécanique
- . Sélection probable des « meilleurs » matériaux grâce à la commonalité avec Tesla
- Gain majeur sur la masse des structures dimensionnées aux efforts



❖ Falcon 9 : devis de masse – Chasse aux marges

- . Diminution systématique des marges de dimensionnement
- . Exemples « classiques » ci-dessous de marges mécaniques en critère Von Mises ou équivalent
- . Rouge = Marge négative – Vert = Marge largement positive - Jaune = Marge marginalement positive
- Approche classique : tout doit devenir Vert
- Approche probable SpaceX : tout doit devenir Jaune

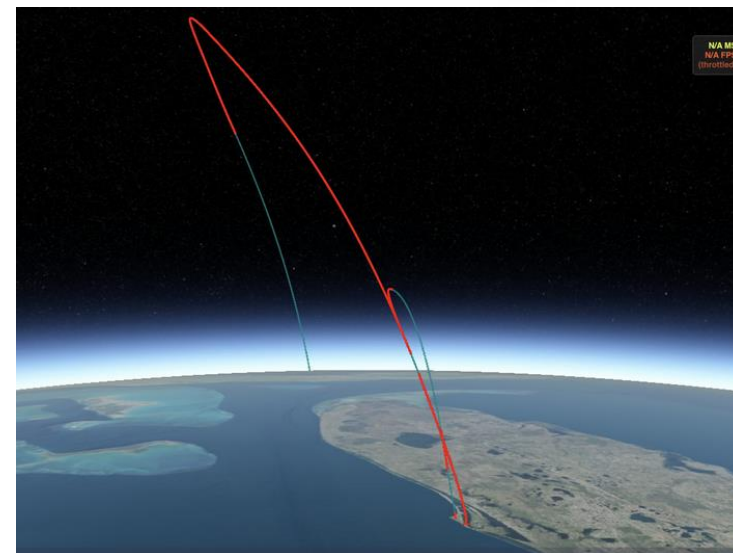


❖ Gestion active des ergols

- . Mesure en temps réel du niveau des ergols
 - . Détermination du rapport de mélange des moteurs
 - . Modification en temps réel du rapport de mélange
 - . Minimisation des ergols de la réserve statistique
- ⇒ Gain de performance significatif à iso concept

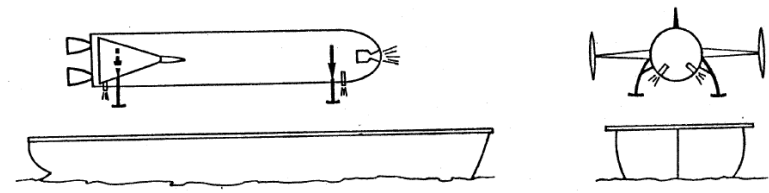
❖ Flight Termination System FTS

- . Sauvegarde embarquée
 - . Mesure à bord de la trajectoire réelle
 - . Envoi autonome de la commande de destruction si besoin
 - . Forte réactivité par rapport à une sauvegarde « sol »
- ⇒ Permet des azimuts de lancement autrement interdits
- ⇒ Gain de performance significatif à iso concept
- . Exemple : mission SAOCOM-1B
 - Quasi survol de Miami et Cocoa Beach
 - Première mission héliosynchrone depuis la Floride



❖ Falcon 9 : réutilisation du 1^{er} étage

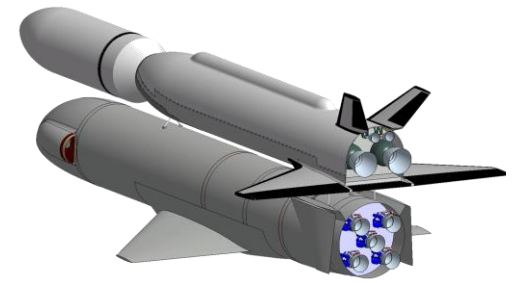
- . Sujet très complexe globalement...
- . Pourquoi réutiliser :
 - . Pour faire un geste environnemental
 - . Pour réduire les coûts de mission
- . A l'étude dans le monde entier depuis toujours
 - . Enormément de travaux, notamment en Europe
 - . For fun, atterrissage sur barge en 1986...
 - . Toutes options possibles étudiées :



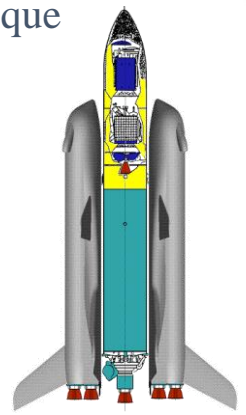
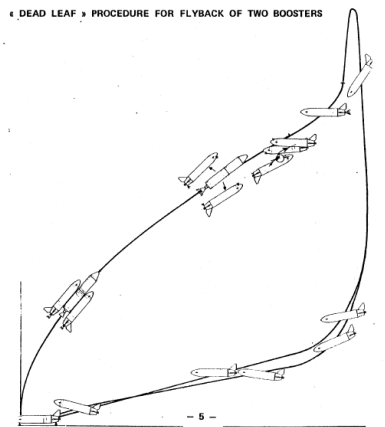
FLS Aerospatiale 1986

Semi-Fully reusable SSTO-TSTO VTOL-HTOL

. Conclusion systématique de non-viabilité économique

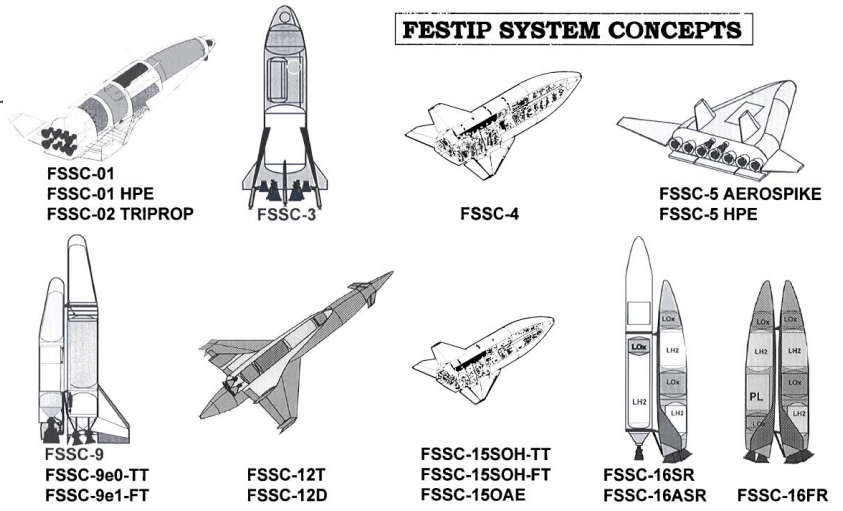


EVEREST CNES-EADS-Snecma-Dassault 2004



Bargouzin 2003
CNES-Roscosmos

FESTIP SYSTEM CONCEPTS



ESA FESTIP 1999

❖ Falcon 9 : réutilisation du 1^{er} étage

. Diverses méthodes de réutilisation possible

. Nombreuses sous-variantes : capture en vol, séparation baie-moteur, etc...

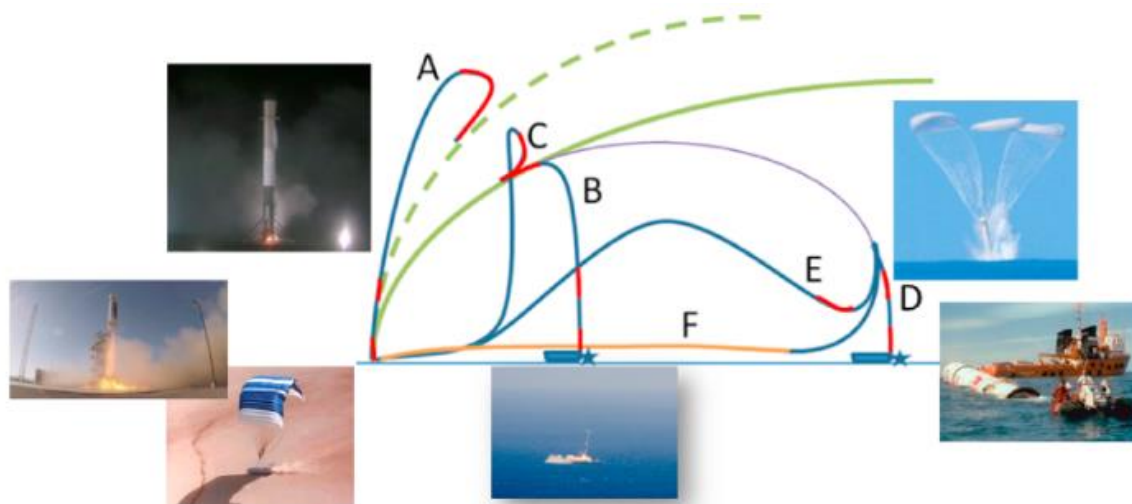
. Critères : performance, complexité, notamment nombre de rallumages et variation de poussée

. La variante la plus complexe et la moins performante est la variante A dite Toss-Back

⇒ Forte perte de performance, 3 rallumages moteur en vol, forte variabilité de poussée, faible déport latéral

➤ Mais, c'est celle choisie par SpaceX, car c'est la seule applicable sur Mars (et sur la Lune...)

➤ Depuis, tout le monde a suivi sur cette solution 😊



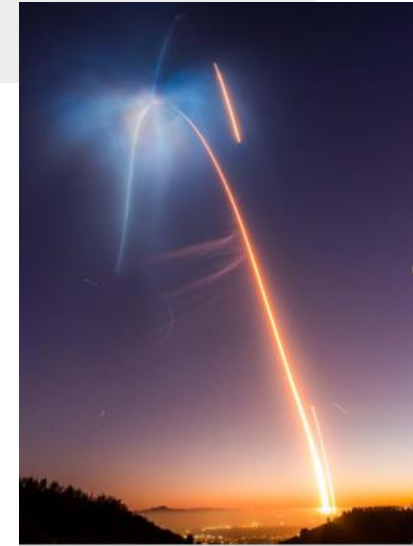
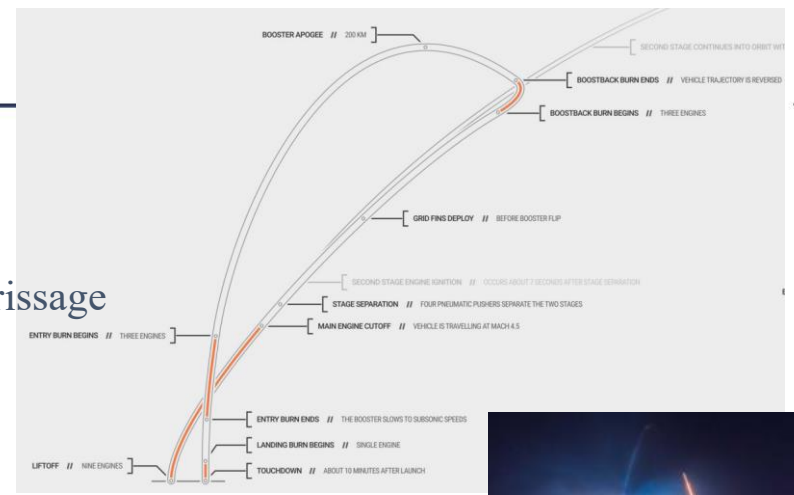
❖ Falcon 9 : réutilisation du 1^{er} étage – Mise au point complexe via N démonstrateurs

. Nombreux échecs = « *food for improvement* » : « *fail, fail, fail... to learn* »



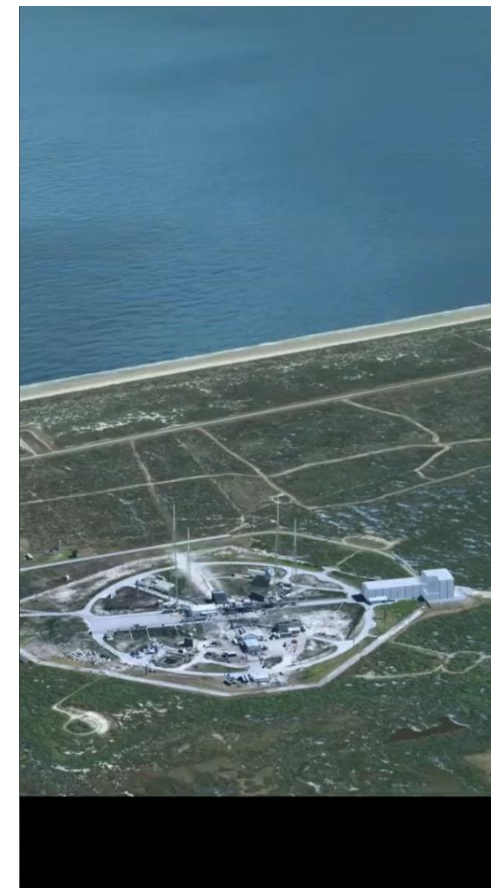
❖ Falcon 9 : réutilisation du 1^{er} étage en Toss-Back

- . 4 allumages de certains moteurs
 - . Consommation d'ergols pour le retournement, le freinage et l'atterrissage
 - . Forte variabilité (40-110% typiquement) pour l'atterrissage
 - . Trajectoire de montée « verticalisée » : perte de performance
 - . Performances typiques (ordres de grandeur pour la démonstration)
 - . Falcon 9 consommable : 6 tonnes
 - . Récupération sur barge : 4,5 tonnes
 - . Récupération sur la base de départ : 2,5 tonnes
 - . Si la charge utile fait 6 tonnes
 - . Besoin d'un lanceur 2 fois plus lourd au décollage
 - . 2 fois plus de moteurs
 - . 2 fois plus d'ergols
 - ↳ Impact environnemental
 - Il faut une grande variété de charges utiles
 - . C'est ce que SpaceX a la chance d'avoir dans son carnet de commande !
 - . Très forte variabilité des performances requises permettant de choisir parmi 3 solutions (consommable, barge, sol)
- Exemples LEO-SSO Cassiope : 450kg, Formosat : 475 kg, 500 kg, DSCOVER : 570 kg, Jason 3 : 500 kg, Dragon : 7500 kg, Starlink : 16500 kg
 Exemples GTO Thaicom 8 : 3100 kg, Amos 17 : 6500 kg, ITS-35e : 6761 kg, Es'Hail : 3100 kg



❖ Falcon 9 : réutilisation du 1^{er} étage

- . Approche économique simplifiée (simpliste, excusez moi 😊...)
- . Exemple d'un moteur consommable à 10 M€ en cadence 6/an : 60 M€/an
 - . Frais fixes 60% = 36 M€/an, frais variables = 24 = 6 x 4 M€
- . Si je décide de réutiliser le moteur 1 fois (donc 2 utilisations)
 - . Le design du moteur est plus complexe, (marges, redondances, contrôleur, mesures) donc son coût devient 12 M€ (=+2 M€ en frais variables)
 - . Les frais fixes restent les mêmes = 36 M€ / an
 - . Les frais variables deviennent 3 x 6 M€
 - . Total annuel = 54 M€ / an
 - ⇒ Gain global ≈ 10% du coût du moteur, et non 50% comme espéré
- . Mais, j'ai perdu la moitié de la performance de mon lanceur
 - . A iso charge utile annuelle, je dois produire 2 fois plus de moteurs
 - . Total annuel = 36 + 6 x 6 M€ = 72 M€
 - ⇒ Perte globale ≈ 20% du coût du moteur
- Cas particulier de Space X : réutilisation démontrée supérieure à 10 fois (18 à ce jour)
 - . Production pléthorique de Merlin si non réutilisable
 - . Adaptation facile au performances requises
 - . Cadence de lancement extrême (100 en 2023) ⇒ Frais fixes négligeables
 - ↳ Remise à plat complète de l'approche...



*Crédit inconnu, désolé
Piqué sur Internet...*

❖ Falcon 9 : coûts de lancement

- Prix affichés pour une mission commerciale : 55-67 M\$ suivant les options
 - . Dépend du degré de réutilisation du 1^{er} étage considéré : 40 M\$ pour un booster déjà bien éprouvé
 - . Nombreuses options hardware (adaptateurs), soft mission (mise à poste), et analyse mission

- Prix effectifs pour les missions institutionnelles, avec boosters neufs ou peu utilisés : 85-105 M\$
 - . GPS-III SV05 et 06 avec des boosters réutilisés 3 fois 97 M\$ chacun
 - . Prix institutionnels bien connus car en général publics

- Remise en état d'un booster
 - . 30 jours de travail = 250 k\$
 - . Inspection Rayons X de la structure, nettoyage et vérification des pieds
 - . Musk : coût total inférieur à 10% du coût de lancement d'un lanceur neuf, donc < 5M\$

- Coût interne probablement très faible
 - . Cf analyse simplifiée ¹
 - . Potentiellement ≈ 20 M\$ par lancement Starlink
 - . Bénéfices extraordinaires...

Estimation sommaire du coût interne à SpaceX pour les lancements de Falcon 9 Block 5

	Fabrication (M\$), essais et transports	Coût opérationnel en mode réutilisable (M\$)	Coût mission en mode réutilisable (10 missions sans révision majeure) en M\$	Coût mission en mode réutilisable (5 missions sans révision majeure) en M\$	Coût mission en mode non réutilisable fin de vie du booster En M\$
F9 Booster (S1 réutilisable)	20	3	5	7	0
F9 Second Stage (non réutilisable)	6		6	6	6
Coiffe réutilisable	5	1	1,5	2	0
Coût opérations lancement		5	5	5	5
Total	31	9	17,5	20	11

¹ Alain Dupas [R1]

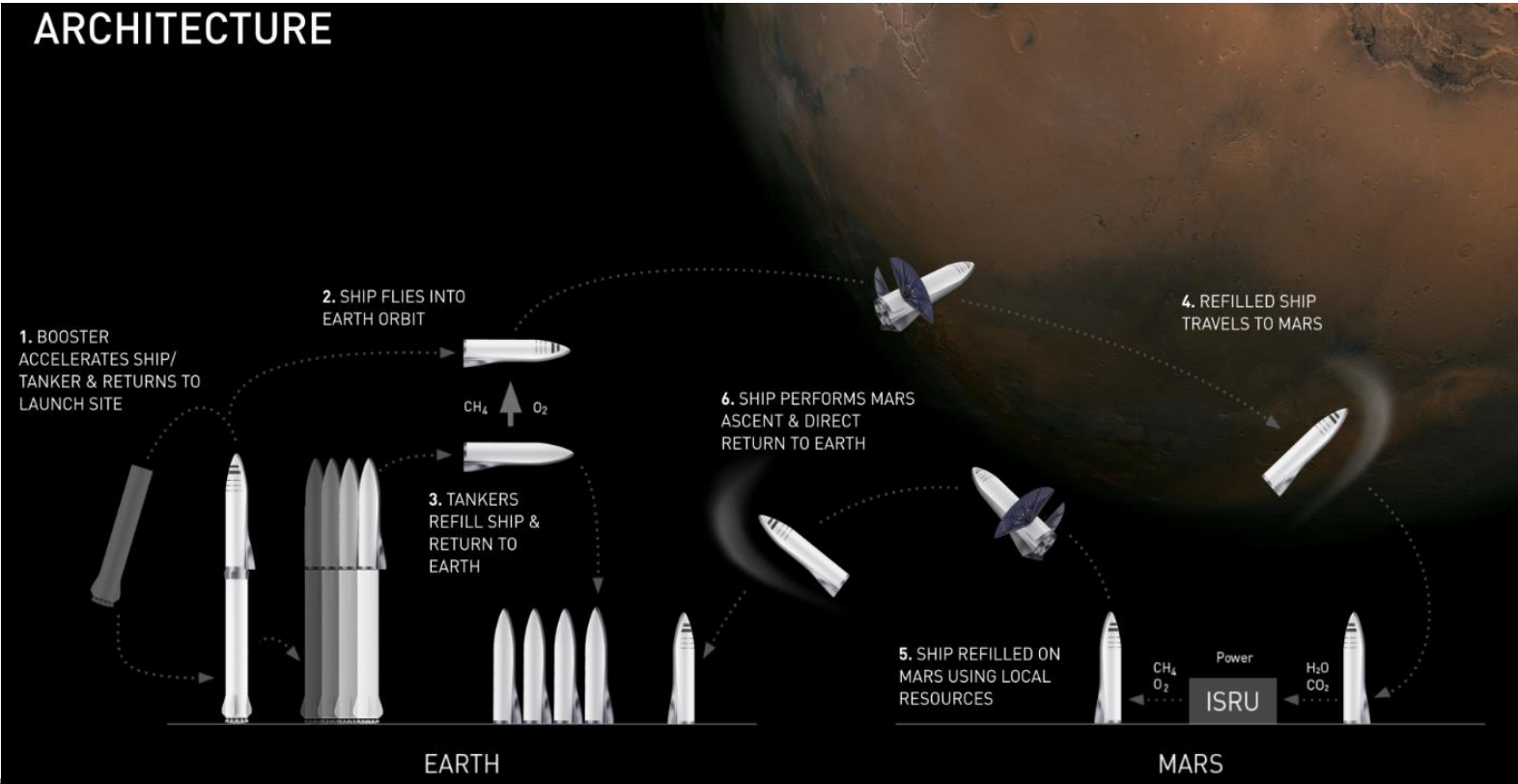
❖ Faire de l'homme une espèce multi-planétaire

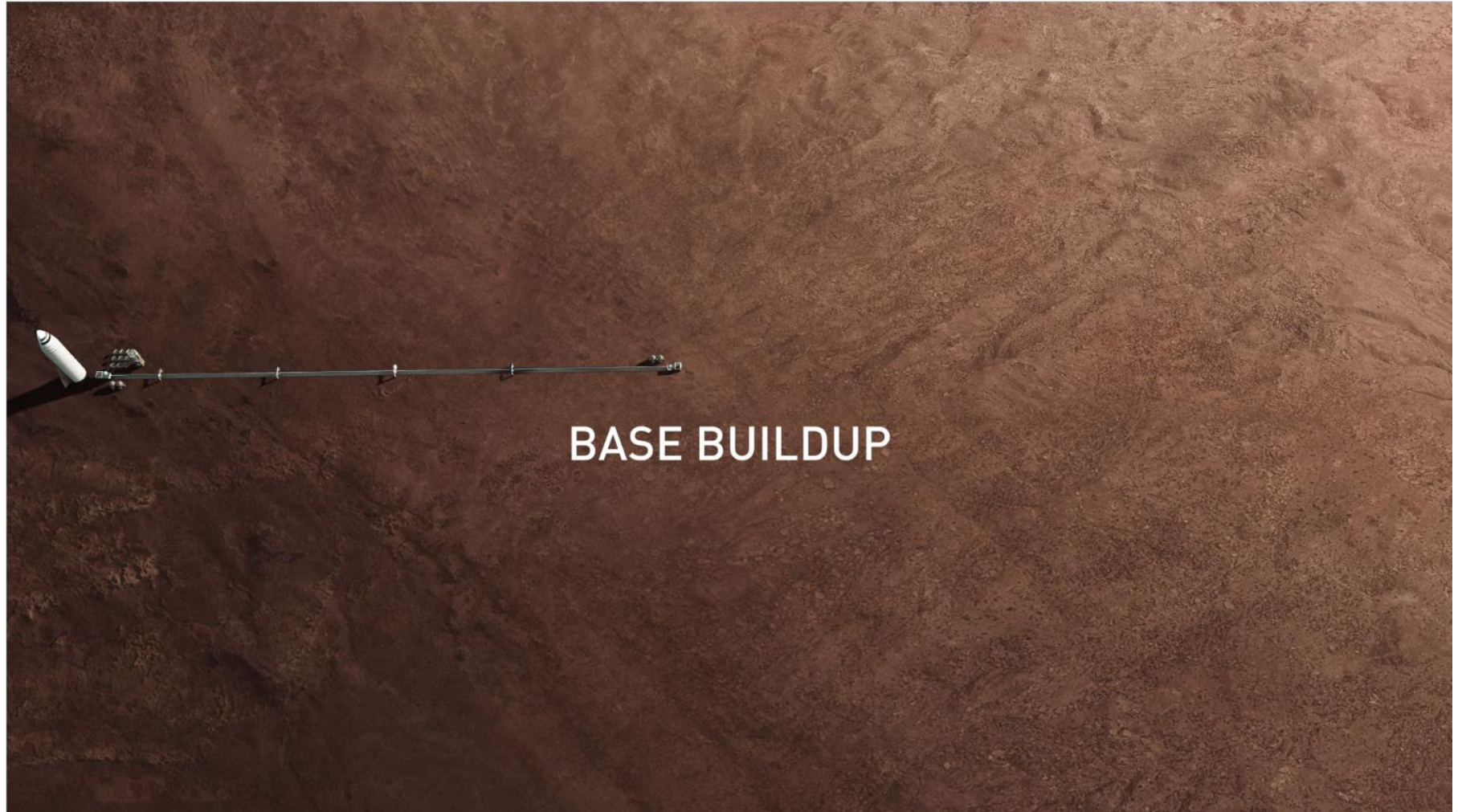
- Obsession de Musk depuis plusieurs décennies : il veut mourir sur Mars (et pas d'un crash...)
 - . Volonté prométhéenne de conquête, transhumanisme : double désir de présence et de connaissance
 - . Notion de « destinée manifeste » chère aux Américains ; repousser la « frontière »
- « *Il est temps de partir à la conquête des étoiles, d'étendre le spectre de la conscience humaine. Je trouve ça incroyablement excitant et ça me rend heureux d'être en vie, j'espère que vous aussi* » (Mars 2008)
- Présentations du 28 septembre 2016 à l'IAC – Guadalajara puis 29 septembre 2017 à l'IAC – Adélaïde

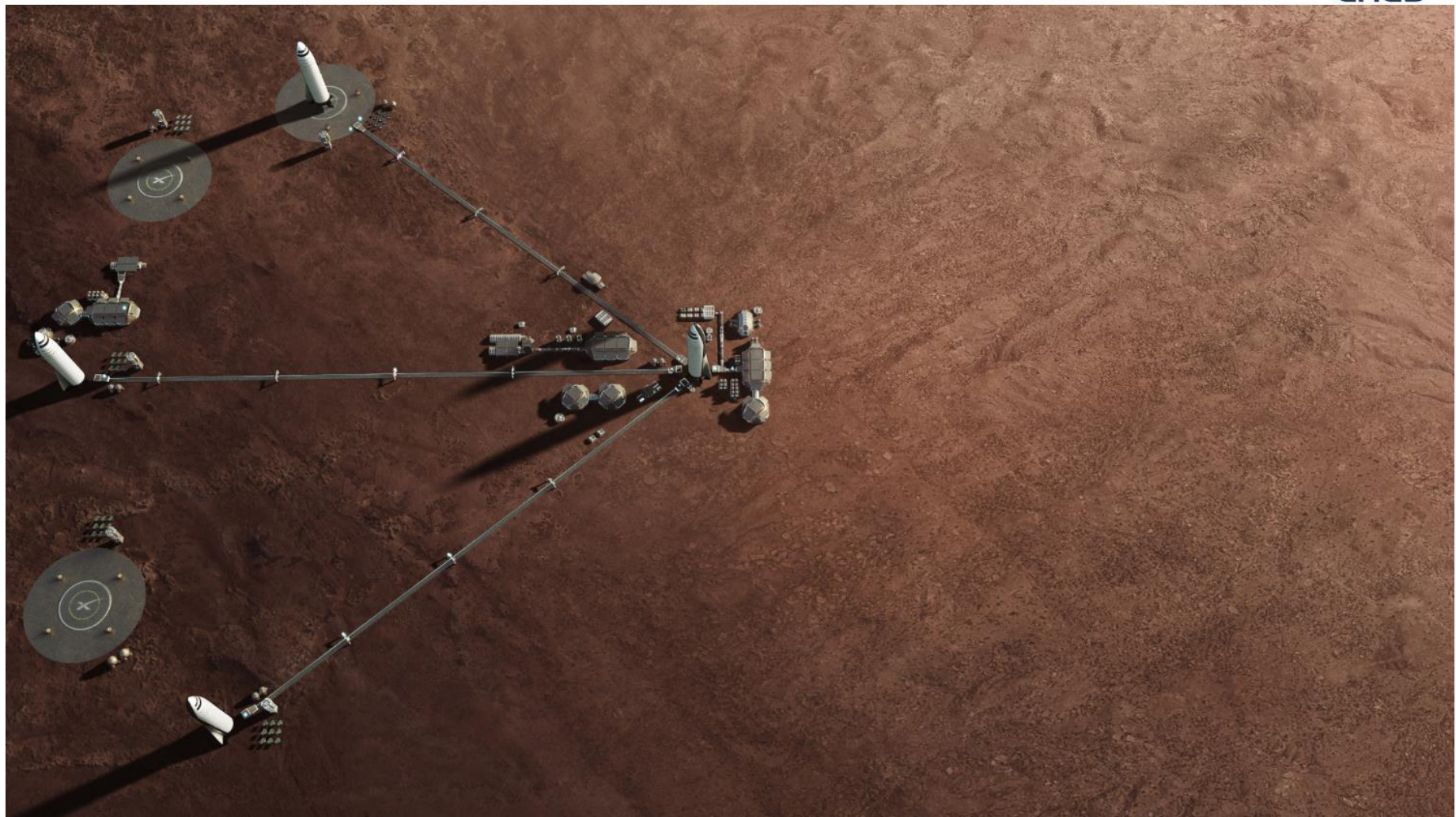


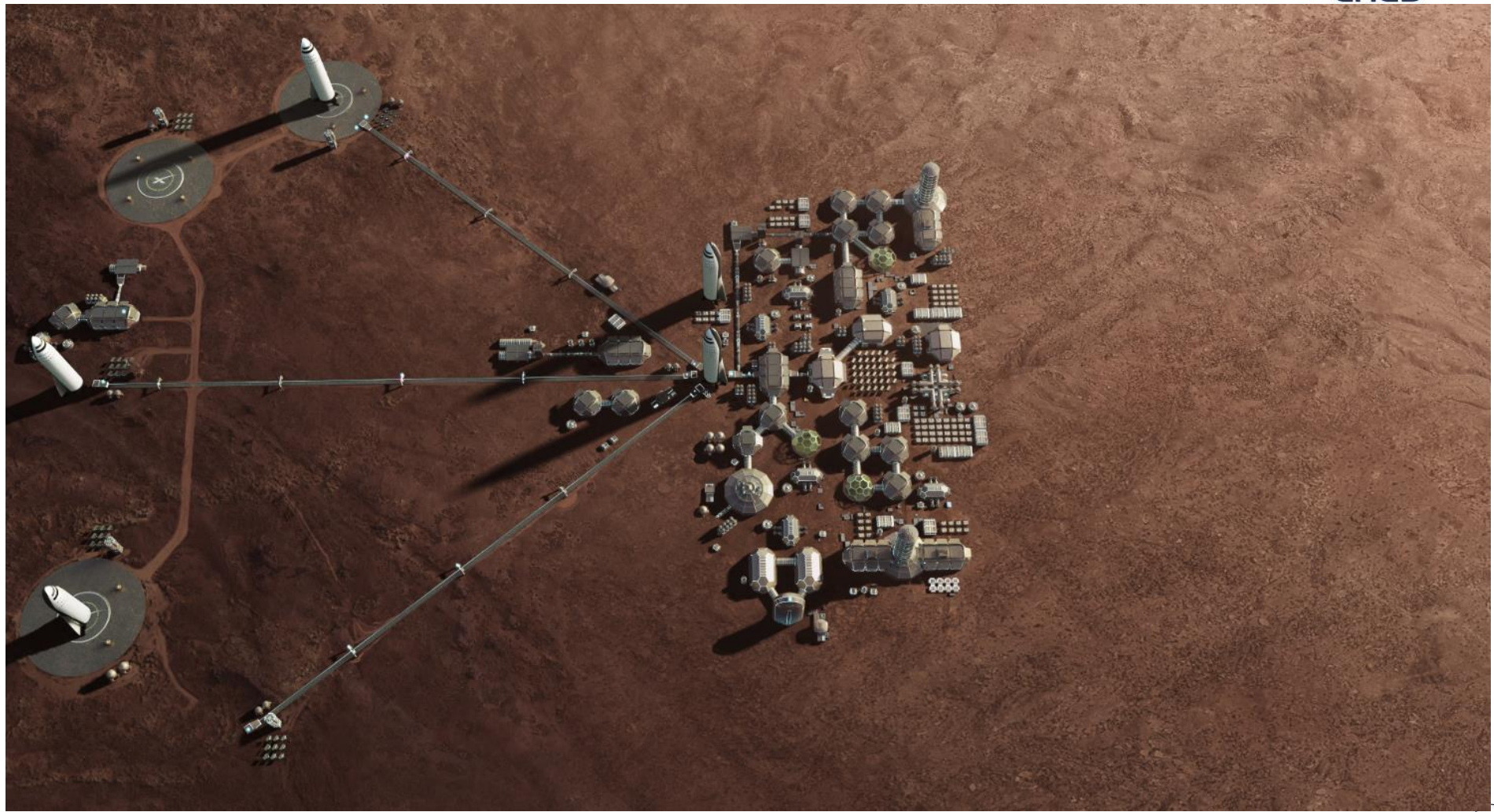
❖ **BFR Big Falcon Rocket, depuis devenu Starship**

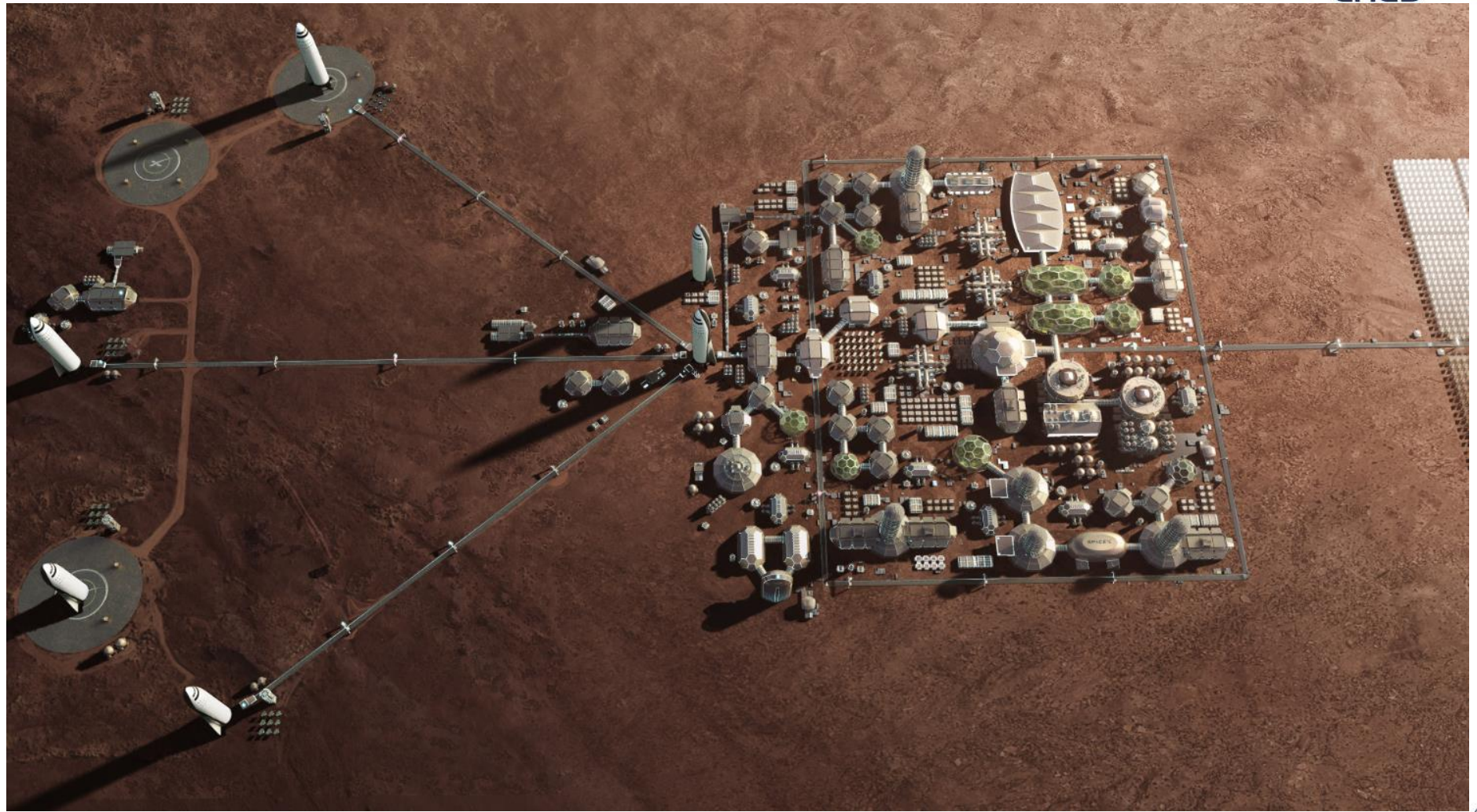
- Prévu avant même Falcon 9 : Tom Mueller avait fait un avant projet d'un moteur fusée géant
 - . Améliorer le coût de la tonne vers Mars de « *5 million de pourcents* »... [NDLR : aujourd'hui 30 M€/t ⇨ 6€/t ?]
 - . 4 clés pour réussir : réutilisabilité totale, remplissage en orbite, production d'ergols sur Mars, choix d'ergols

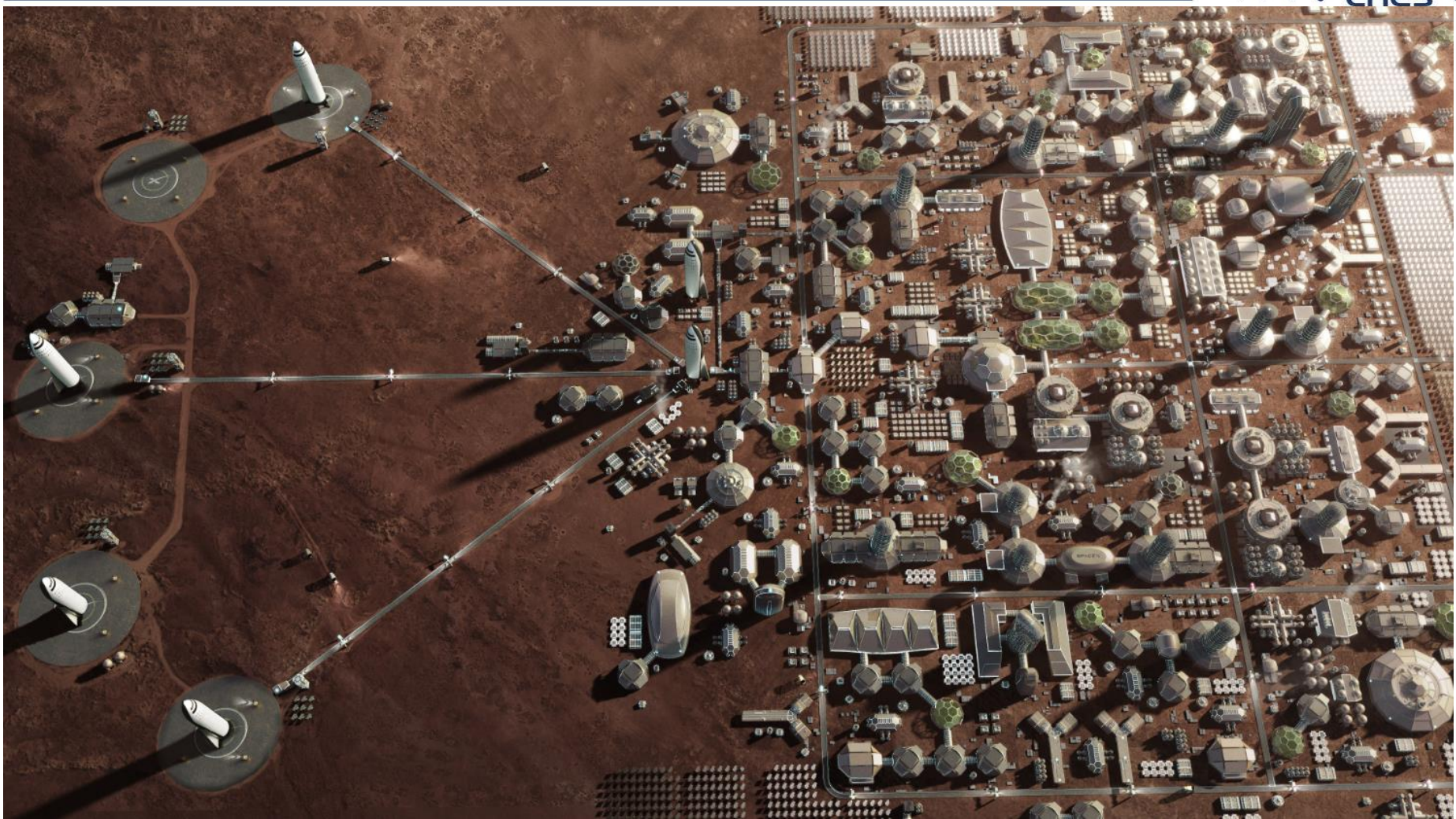


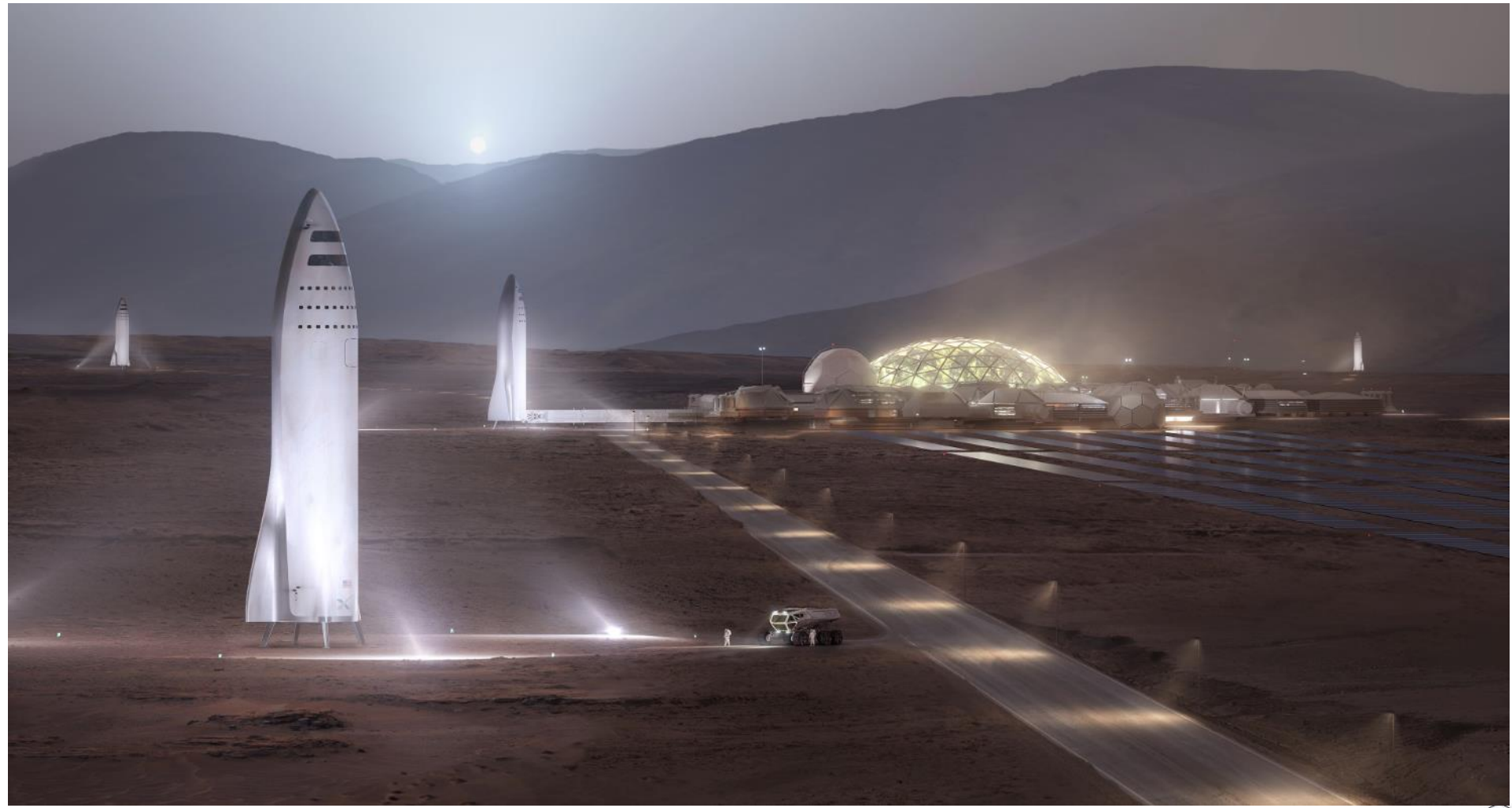






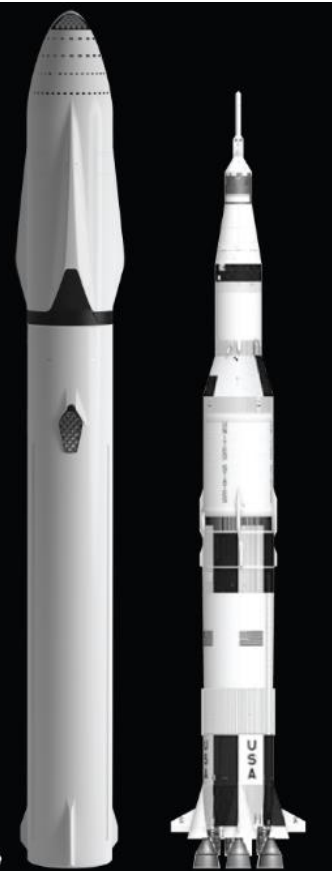






❖ Concept initial du « Mars Vehicle »

	MARS VEHICLE	SATURN V	RATIO
GROSS LIFT-OFF MASS (t)	10,500	3,039	3.5
LIFT-OFF THRUST (MN)	128	35	3.6
LIFT-OFF THRUST (t)	13,033	3,579	3.6
VEHICLE HEIGHT (m)	122	111	1.1
TANK DIAMETER (m)	12	10	1.2
EXPENDABLE LEO PAYLOAD (t)	550	135	4.1
FULLY REUSABLE LEO PAYLOAD (t)	300	-	-



❖ Développement des technologies nécessaires

➤ Maîtres mots :

- . développement rapide, tests rapides, échecs rapides, remise en cause, reprise rapide
- . S'il n'y a pas d'échecs pendant les essais, c'est qu'on est trop conservatifs

➤ Structures

- . Réservoirs cryotechniques composite sans liner
 - . Démonstrateur ϕ 12 m
 - . Volume 1.000 m³ \cong 1.200 tonnes de LOX
 - . Testé à rupture sur une barge en mer
- . Résultats non conclusifs: changement de matériau
 - . Aluminium-Lithium
 - . Problèmes avec les charges thermiques à la rentrée
- . Changement de matériau :
 - . Acier Inox 301
- . Changement de matériau
 - . Acier Inox 304L fabriqué maison
 - . = Référence actuelle





❖ Développement des technologies nécessaires

➤ Propulsion

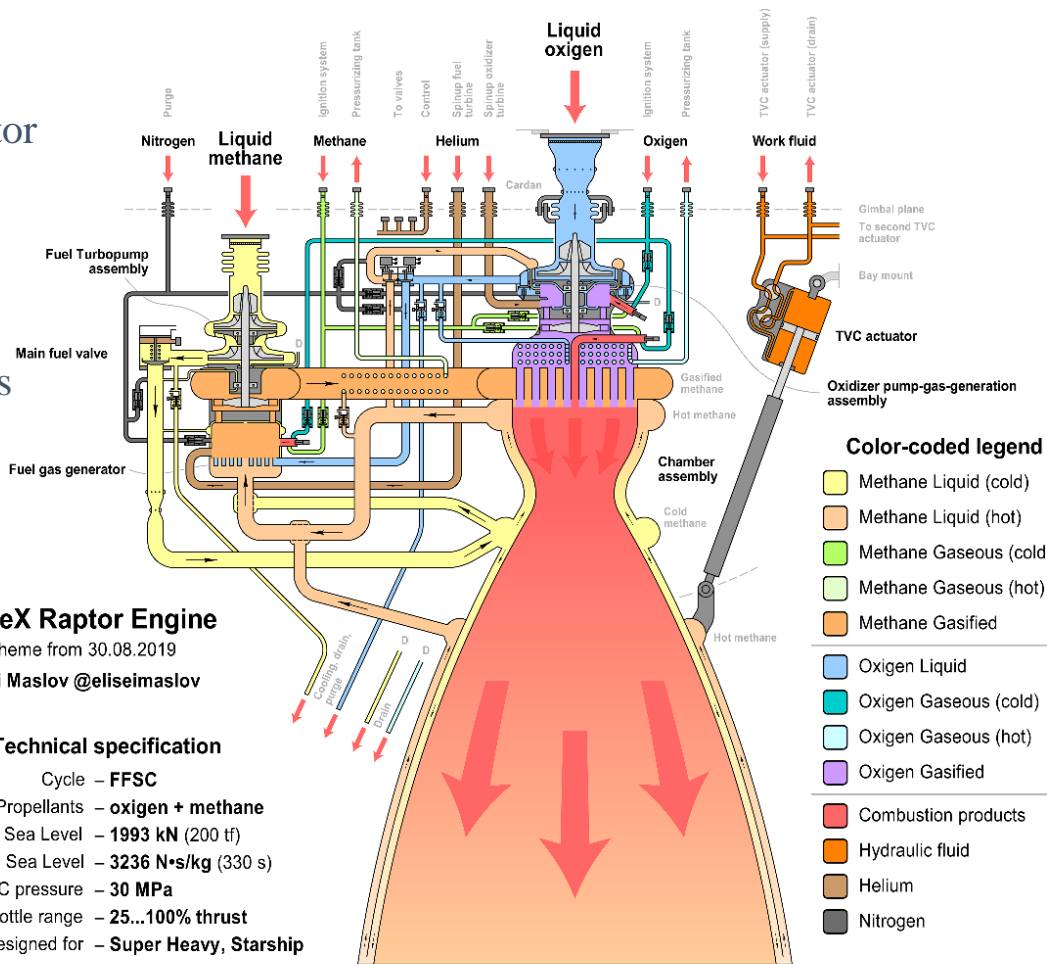
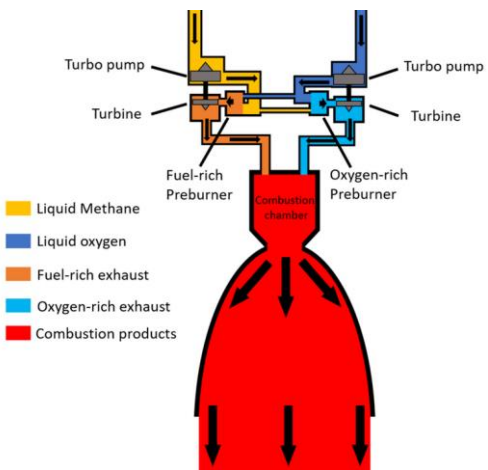
. Nouveau moteur très hautes performances : Raptor

- . LOX-Méthane
- . Combustion étagée Full-Flow Ox et Fu
- . 269 tonnes de poussée (Raptor 3)
- . Pression chambre 350 bars

↳ Progressivement montée de 250 à 350 bars

Record du monde...

- . Isp sol 330 s, Isp vide 350 s
- . Variation de poussée : 25-100%



SpaceX Raptor Engine

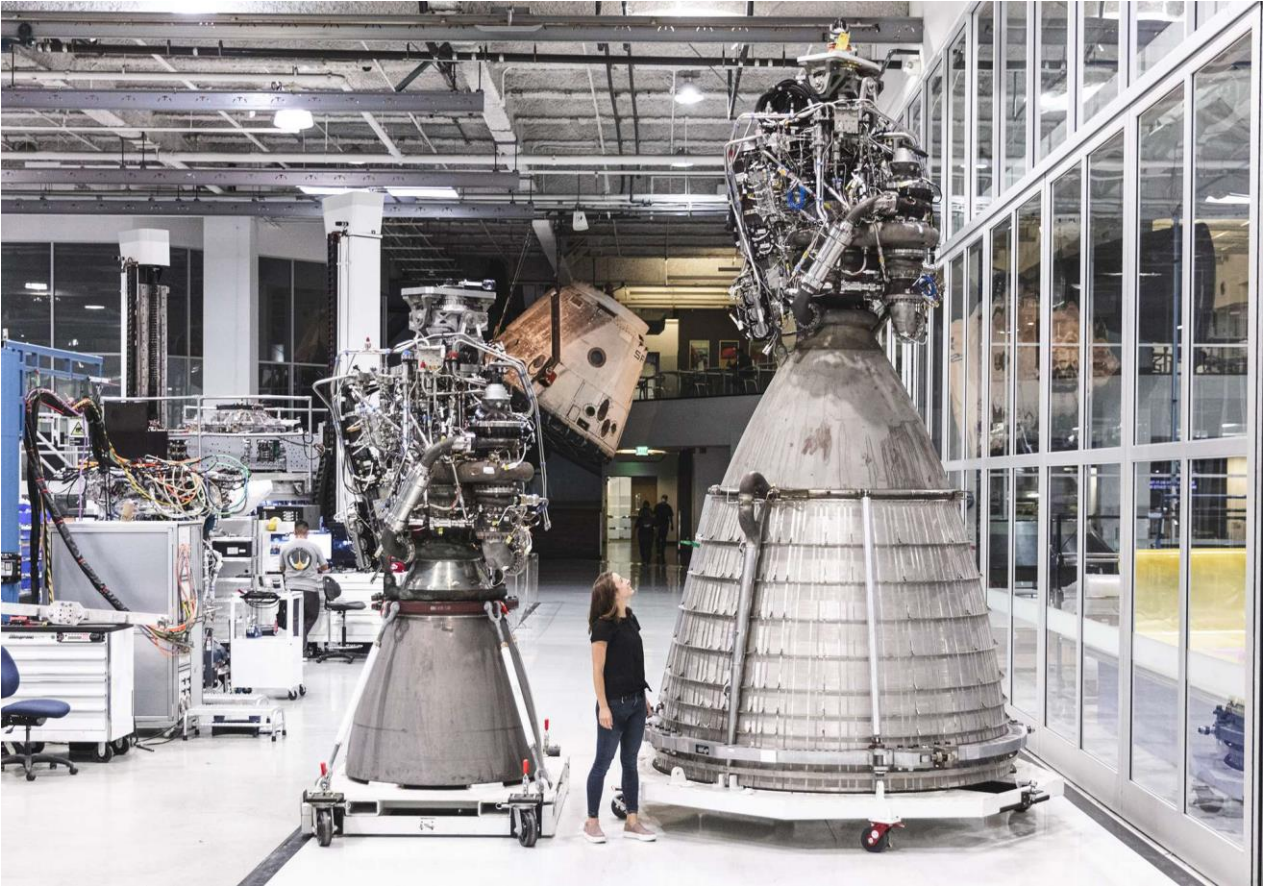
Scheme from 30.08.2019

Elisei Maslov @eliseimaslov

Technical specification

- Cycle – FFSC
- Propellants – oxigen + methane
- Thrust Sea Level – 1993 kN (200 tf)
- ISP Sea Level – 3236 N*s/kg (330 s)
- CC pressure – 30 MPa
- Throttle range – 25...100% thrust
- Designed for – Super Heavy, Starship

❖ Raptor : version sol (à gauche) et version vide (à droite)



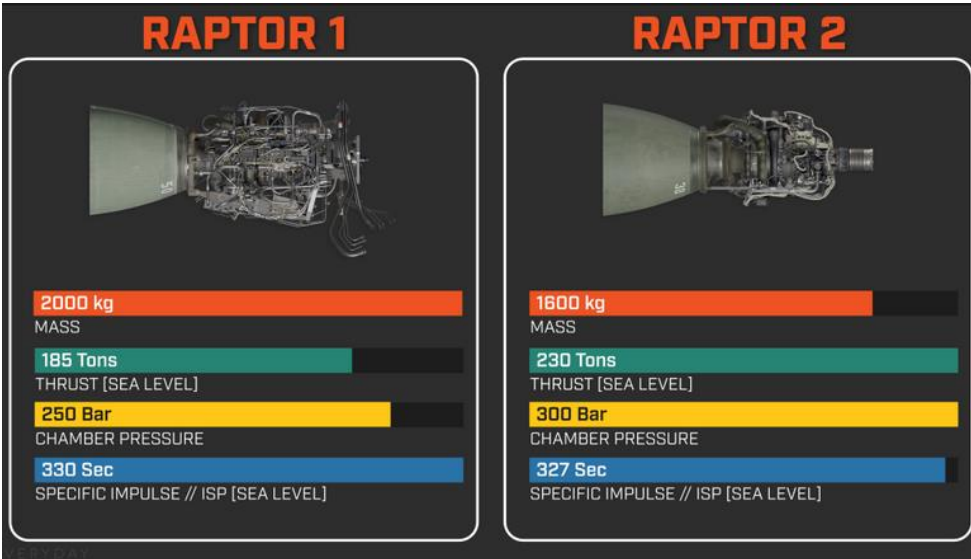
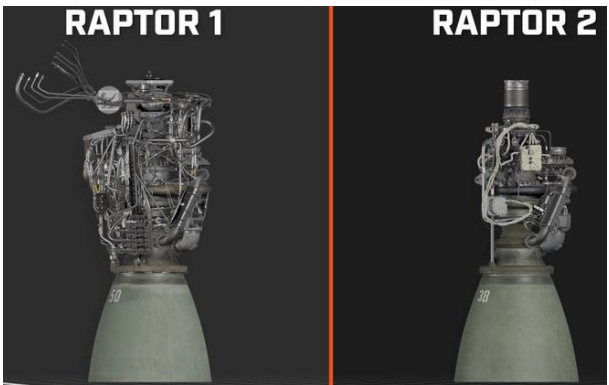
« *ce qui est compliqué, ce n'est pas de concevoir un moteur, mais de concevoir l'usine qui le fabriquera* »



❖ **Raptor 1 : plus de 100 fabriqués et recettés début juillet 2021**

- Mais, insatisfaction quant au coût de production
- Remise à plat et développement du Raptor 2 !
 - . Bien plus simple, bien moins coûteux à la fabrication
 - . Rapport poussée sur poids T/W = 144 tf/tm
- ⇒ Plus de 200 Raptor 2 produits fin novembre 2022 ! Objectif : un tous les 2 jours à 250 k\$/moteur
- Mais encore insatisfait... Donc Raptor 3, Rapport T/W 192 tf/tm, 350 bars, 270 tonnes
- Mais... Nombreuses variantes en cours de développement

	Raptor 1	Raptor 2	Raptor 3	Raptor 3.1	Raptor 3.2	Raptor X
Mass	2000 kg	1600 kg	1400 kg	1400 kg	1400 kg	1200 kg
Thrust	185 tons	230 tons	269 tons	276 tons	300 tons	320 tons
Chamber Pressure	250 bar	300 bar	350 bar	370 bar	400 bar	450 bar
Specific Impulse	330	327	327	327	327	327
TW engine only	93	144	192	197	214	292



Les installations de Boca Chica (Starbase)



Les installations de Boca Chica (Starbase)



AIRBUS

© CNES 2023, Distribution AIRBUS DS





S T A R B A S E

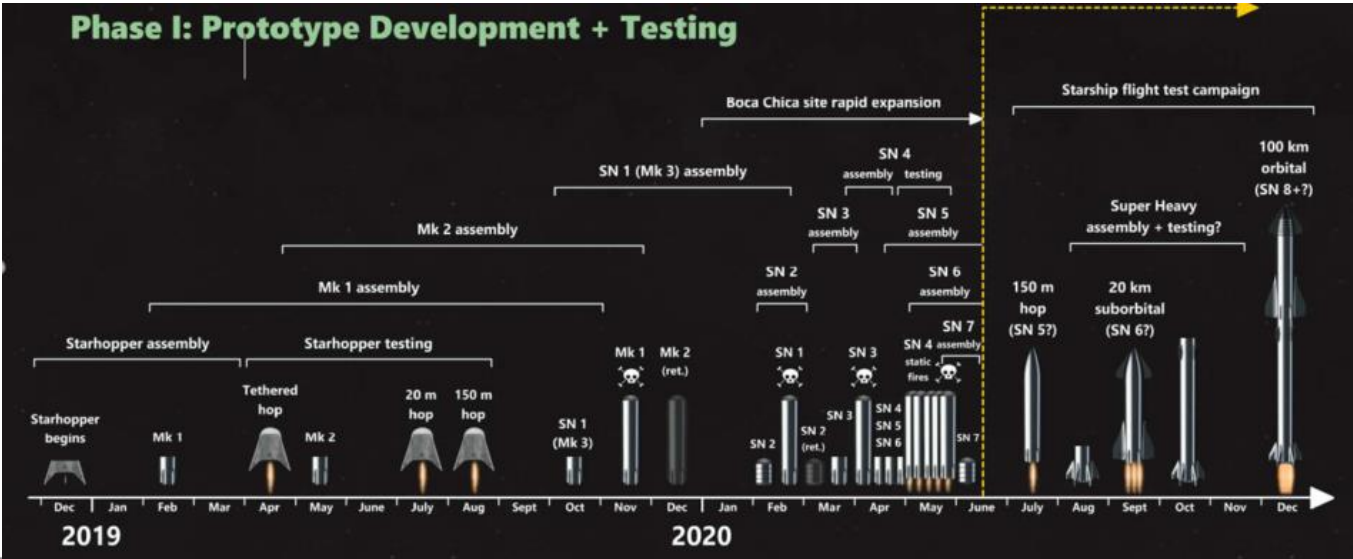


❖ Développement « spiral »¹

- . Utilisé dans l'industrie du logiciel
- . Permet de construire très rapidement un système, de le tester (en acceptant l'échec) et d'itérer pour la version suivante (comme les release d'un logiciel βversion, 1.0, 1.1, 1.2, 2.0)

➤ Essais de prototype de Starship

- . Tests structuraux et d'étanchéité des réservoirs : SN1 à SN7
- . Tests de vols verticaux à basse altitude : SN5 et SN6
- . Vols à 10 km d'altitude (avec 3 Raptor) avec manœuvre de redressement final : SN8, SN9, SN10, SN11, SN15
- . Succès complet du SN15 le 15 mai 2021



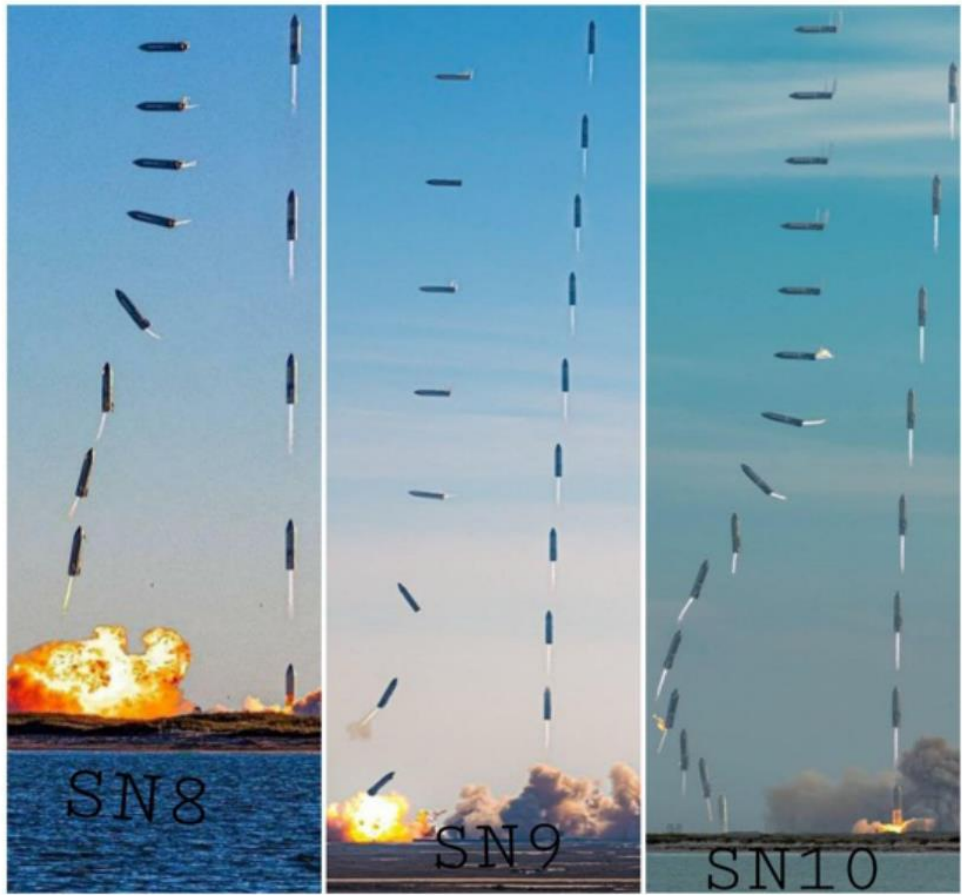
¹ Alain Dupas [R1]



Evolution
des
prototypes
du Starship
De 2019 à
2021


@spacexfanclub


Manœuvre de redressement (Belly Flop) du Starship




❖ Vol réussi du SN15



 The Ring Watchers

 @RINGWATCHERS

 .gg/RINGWATCHERS


BOOSTER PRODUCTION


THE CORE TEAM: Ryer · Jax · RohanB17 · Sam/SN18 · Neuralink · Nick/Cham · McSlinPlay · MannsOfNaz · Quango · PKALeader · Mouser · Oskar Wróbel · Indnstar · Brendan Lewis


October 17th 2023 | ❄️ Cryogenic Test | 🌀 Spin Prime | 🔥 Static Fire

○ Section not stacked. | 🌀 Dome not sleeved. | ● Transparency indicates uncertainty of assignment.



 The Ring Watchers

 @RINGWATCHERS

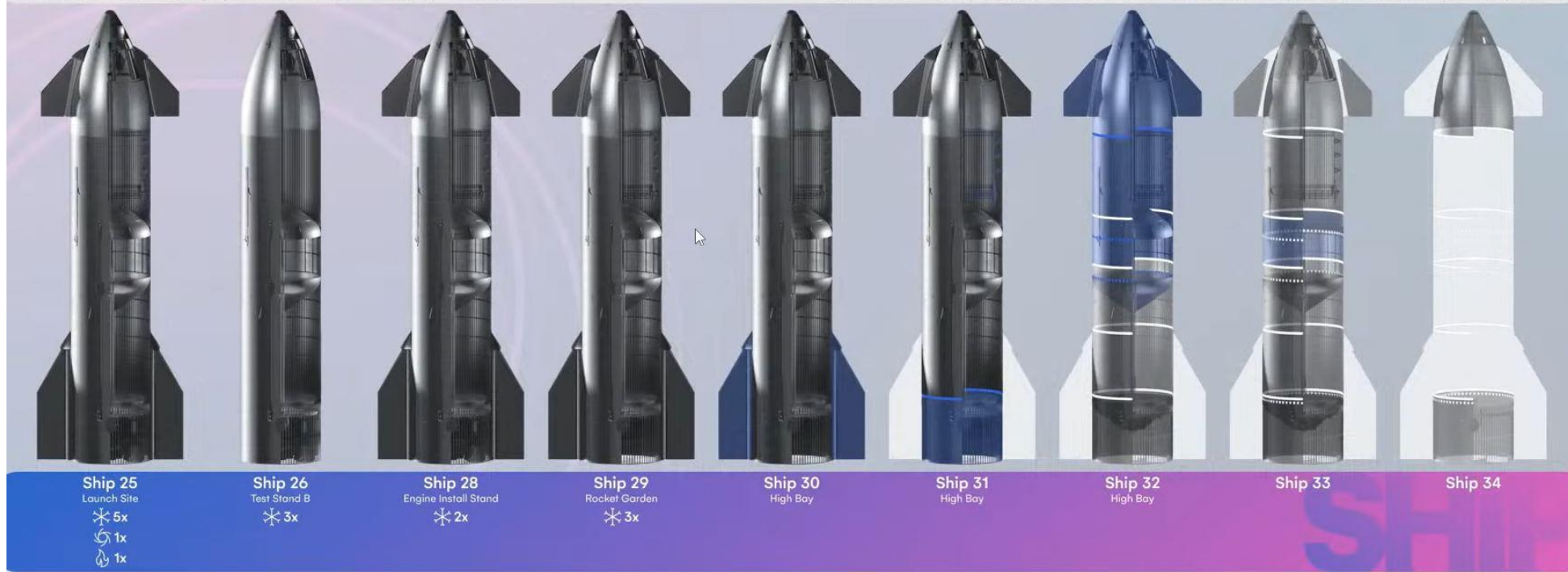
 .gg/RINGWATCHERS

STARSHIP PRODUCTION

THE CORE TEAM: Ryer · Jax · RohanB17 · Sam/SN18 · Neuralink · Nick/Cham · McSlinPlay · MannsOfNaz · Quango · PKALeader · Mouser · Oskar Wróbel · Indnstar · Brendan Lewis

October 17th 2023 | ❄️ Cryogenic Test | 🌀 Spin Prime | 🔥 Static Fire

○ Section not stacked. | 🌀 Dome not sleeved. | ● Transparency indicates uncertainty of assignment.



❖ Premier lancement sub-orbital complet le 20 avril 2023

- . Appelé IFT1 (Integrated Flight Test 1) – Booster 7 + Ship 24
- . Explosion après 4 minutes de vol
- . Nombreuses anomalies

6 moteurs en panne dès le décollage + fuites enflammées

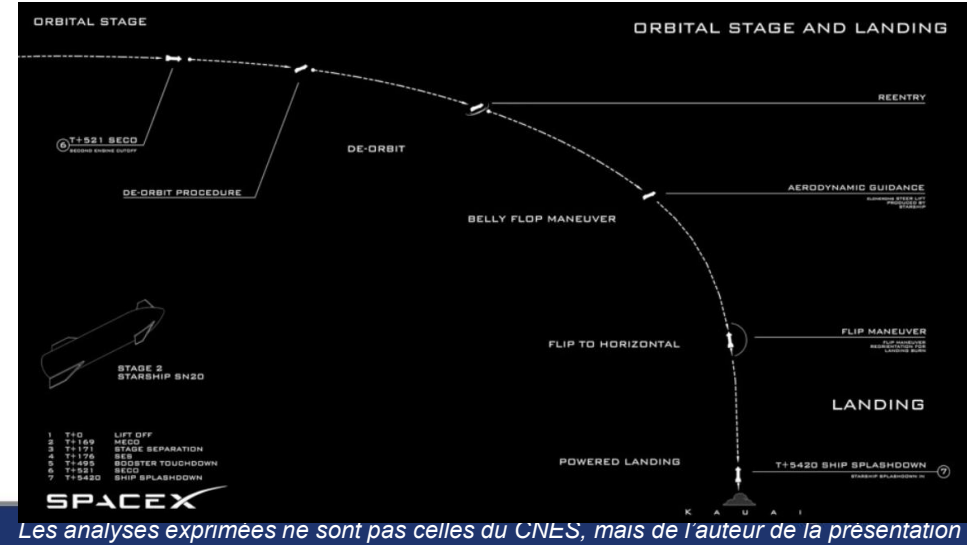
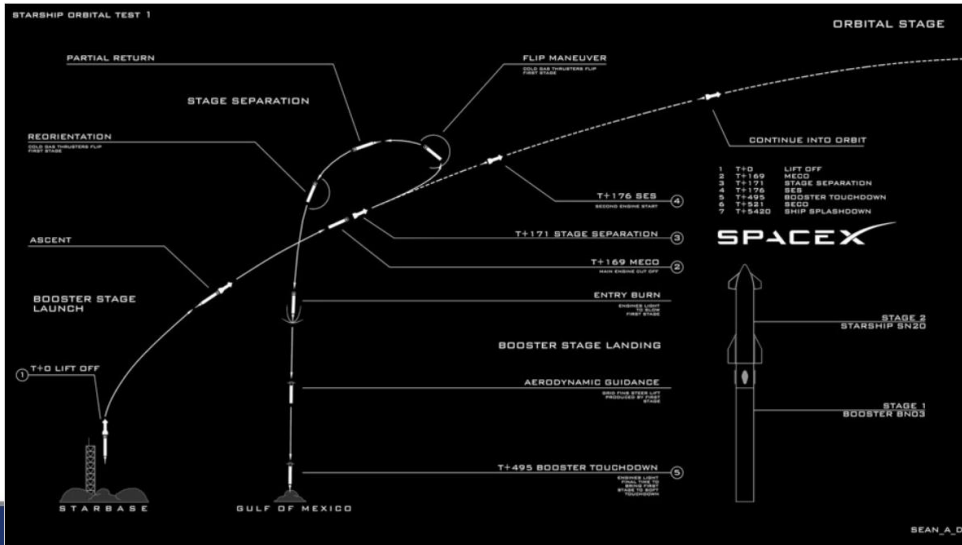
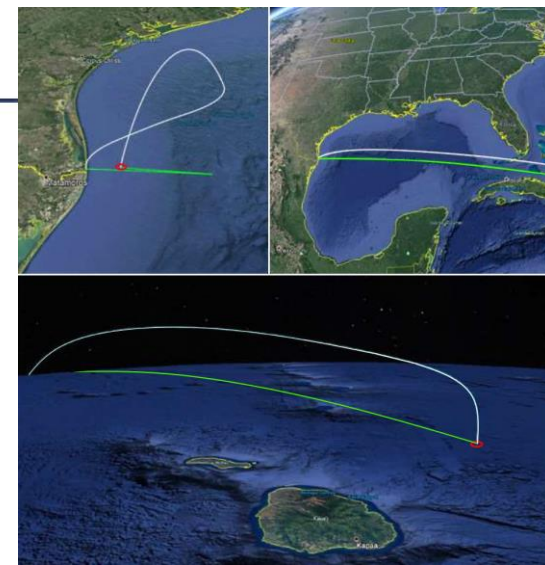
Endommagement des liaisons entre ordinateur de bord et moteurs

Contrôle d'attitude sur trajectoire non nominale

Séparation 1-2 non réussie

Déclenchement de la sauvegarde vol très tardive

↳ Un essai riche d'enseignements !



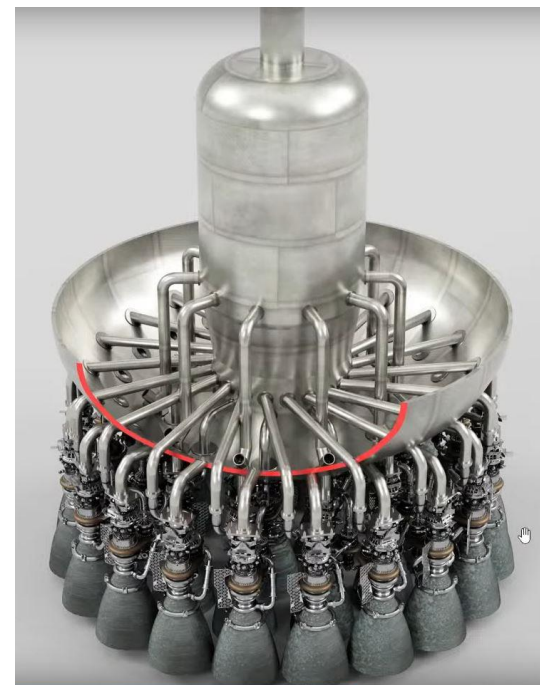
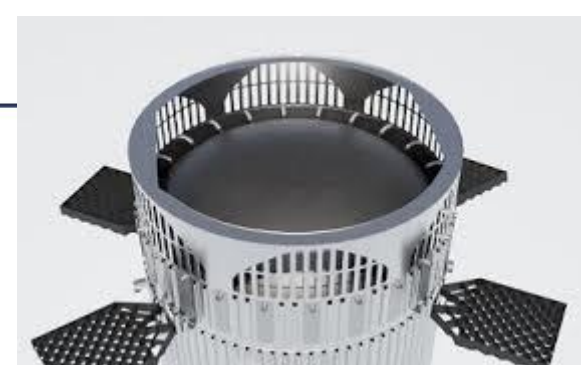


❖ Premier lancement sub-orbital complet le 20 avril 2023

- . Dégâts très importants au sol
 - Le béton Fondag de la base n'a pas tenu : trou de 1000 m³
 - ↳ Pas de carreaux, pas de déluge
 - Endommagement des réservoirs de stockage à proximité
 - . Impact environnemental très différent de ce qui avait été annoncé : plaintes des habitants contre la FAA
 - Particules envoyées jusqu'à Port Isabel à 11 km
 - Débris sur la plage « protégée »
 - Bruit, onde de choc
- ↳ FAA a demandé 63 modifications, toutes faites à ce jour sauf 6 non nécessaires pour le 2nd vol







❖ Second lancement suborbital le 18 novembre 2023

- Integrated Flight Test 2 – Booster 9 + Ship 25
 - . Profil de vol identique à celui visé lors de ITF 1
 - . Très nombreuses modifications, notamment
 - . Séparation « chaude » 1-2 après allumage du Ship
 - . Redesign complet du socle avec déluge « Stardouche »
50 tonnes d'eau par seconde à 10 bars

 - Principales phases de vol:
 - . Décollage parfait : 33 moteurs
 - . Vol du 1^{er} étage très nominal :
 - . Trajectoire nominale
 - . Transsonique
 - . Pression Dynamique Maximale
 - . Séparation Heavy-Starship correcte
 - . Problème de rallumage du 1^{er} étage
 - . Explosion 10 secondes après
 - . Allumage nominal du 2nd étage : 6 moteurs
 - . Explosion commandée suite à déviation de trajectoire
- **En cours d'analyses... Peu de détails à ce jour**



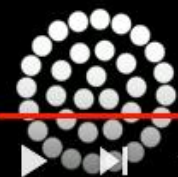
❖ Second lancement IFT 2 le 18 novembre 2023



SpaceX Starship Flight Test
Super Heavy launches Starship
18 November 2023







SPEED 4929 KM/H
ALTITUDE 57 KM

LOX

C0242 / 4:18



T+00:02:27

STARSHIP FLIGHT TEST



SPEED 4929 KM/H
ALTITUDE 57 KM

LOX

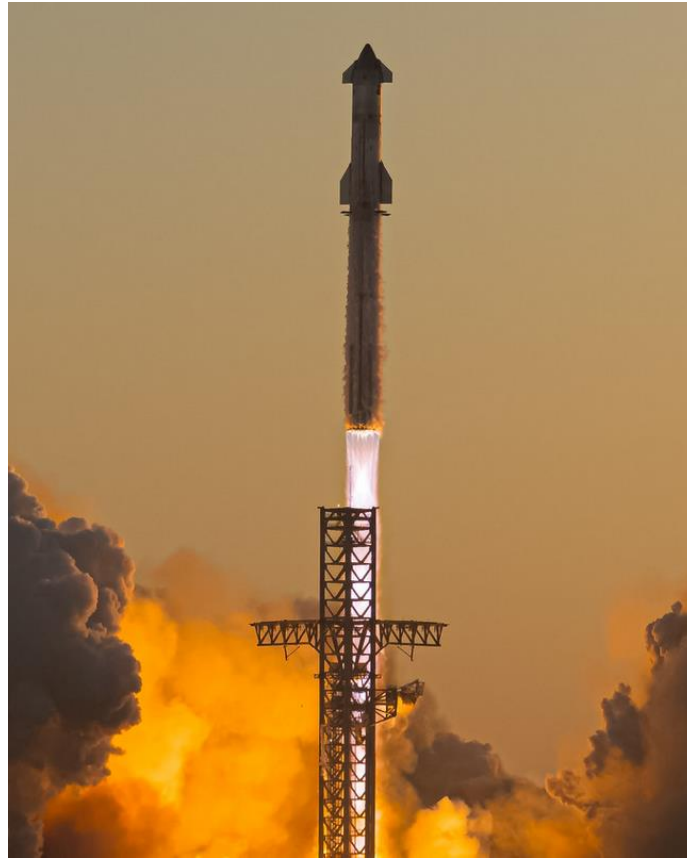
CH4



❖ Second lancement IFT 2



❖ Second lancement IFT 2

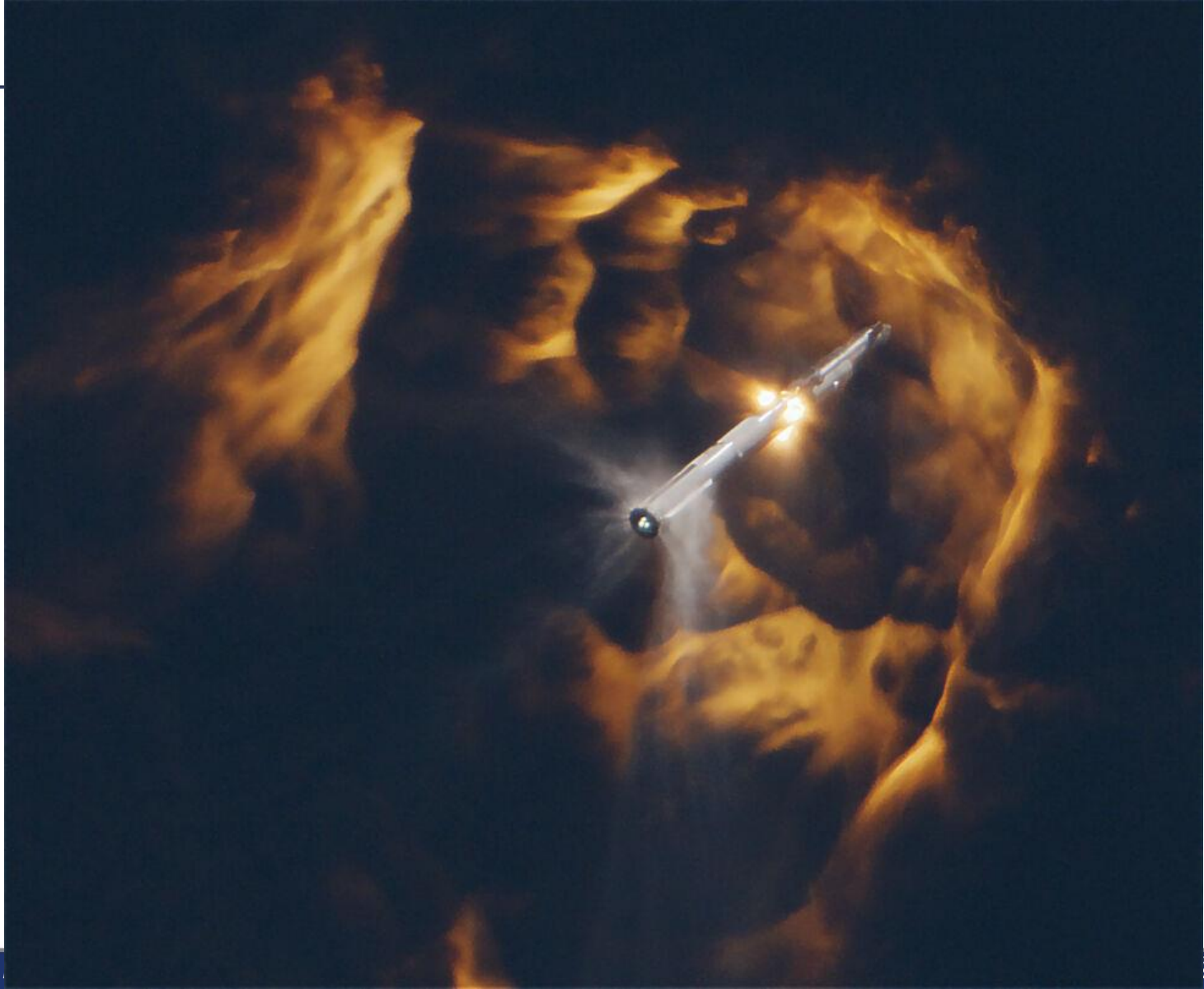


© John Kraus

❖ Second lancement IFT 2

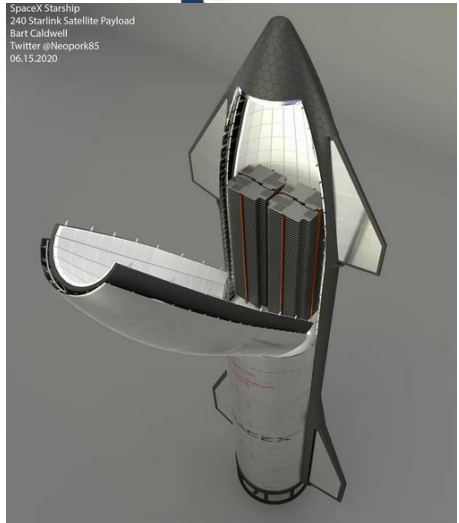


❖ **Second lancement IFT 2**



❖ Les défis à venir

- Troisième lancement annoncé avant Noël 😊
- Vol orbital
 - . Pas de détails à ce jour
 - . Capture du Heavy dans les « chopsticks »
 - . Phasage du Starship pour l’atterrissage
 - . Maintien en condition du Starship en orbite (ergols, puissance électrique, thermique...)
 - ⇒ Fonction de l’orbite choisie, donc de la performance
 - . Atterrissage du Starship après retour orbital
- Si tout cela fonctionne bien,
 - . Début de la phase opérationnelle avec Starlink 2
 - . Développement de la coiffe et des interfaces charge utile
 - . Pas d’informations fiables



Images de synthèse



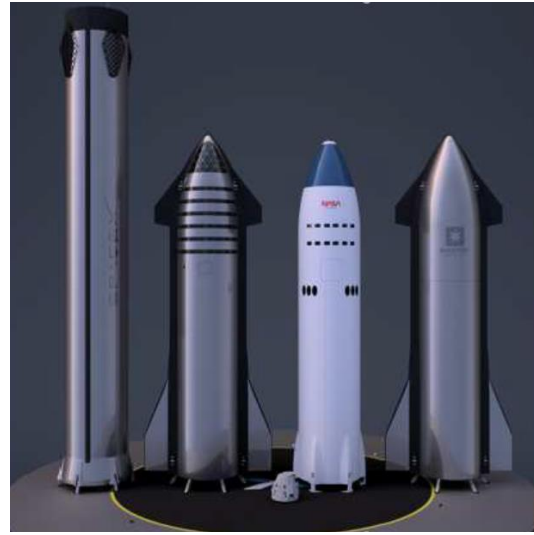
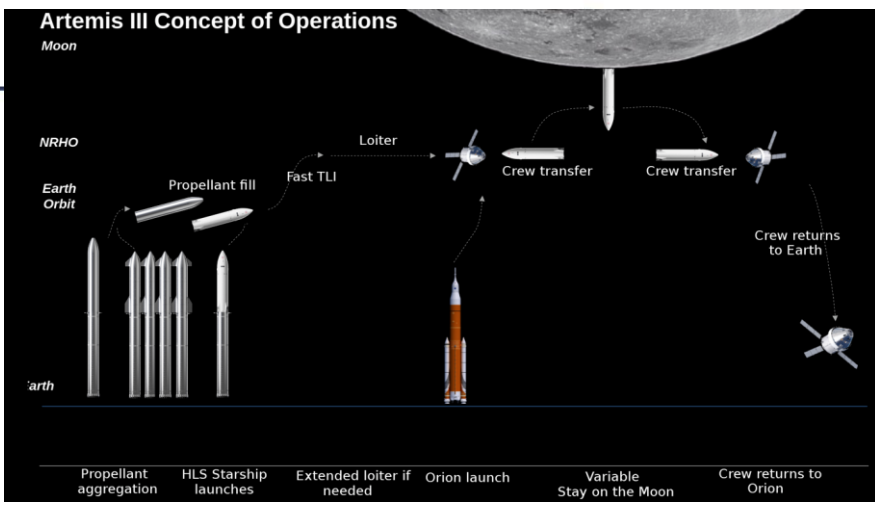
❖ Les défis à venir

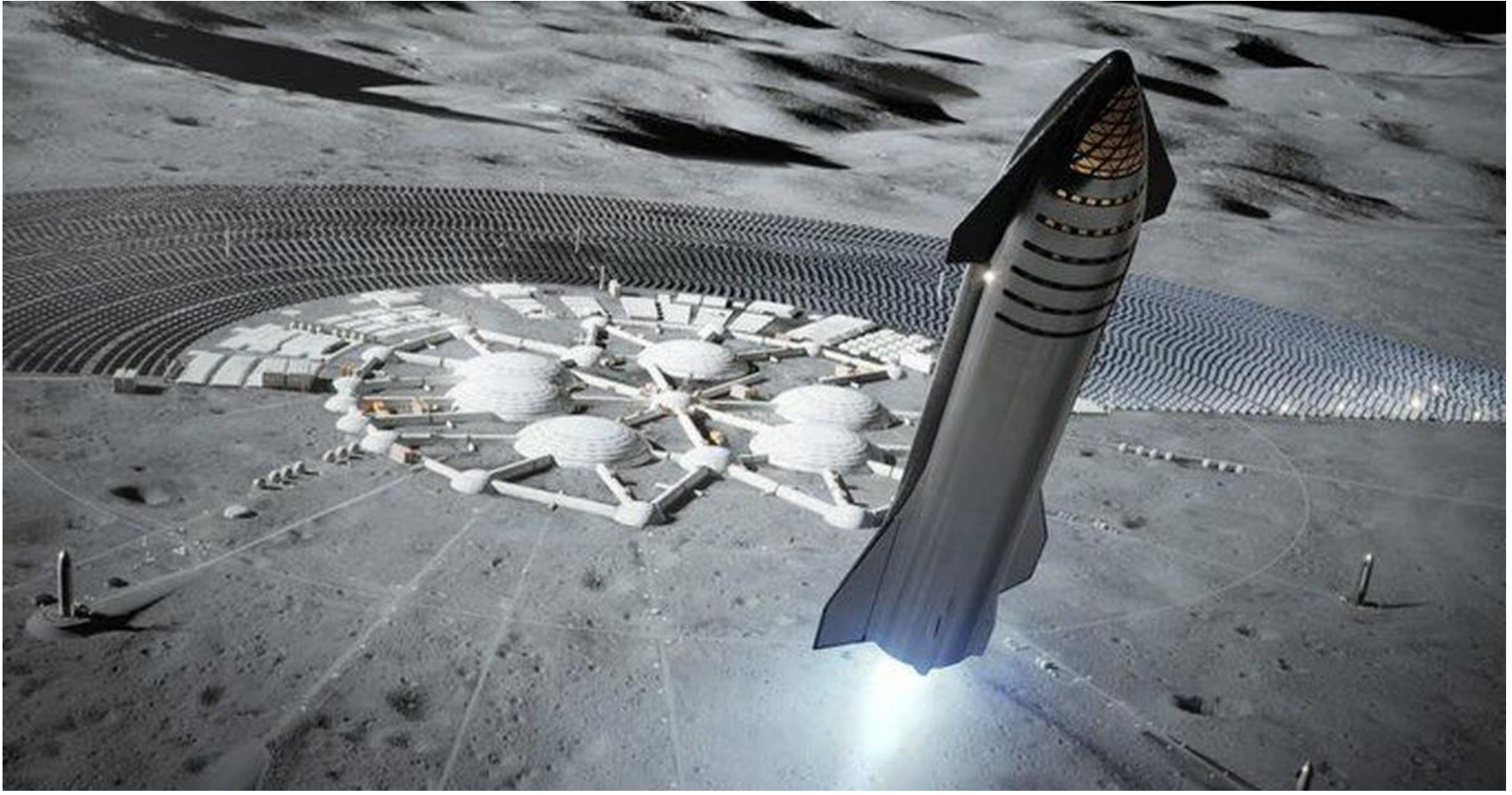
➤ Lune

- . 3 Starships différents au moins
- . Lancement de passagers
 - . Lander lunaire HLS (Human Landing System)
 - . Ravitailleur en orbite basse
- . Stratégie Lunaire NASA Artemis III peu claire
 - . Pas de rôle pour la Gateway dans la vision SpaceX
 - . 4 ou 5 (10 ?) re-remplissages en orbite : 1.200 tonnes LOX-CH4
 - ⇒ Jamais réalisé (publié) en cryotechnique
 - . Transfert d'ergols complexe
 - . Maintien en condition thermique
 - . Phasage dans le temps des lancements
 - . Robustesse aux aléas
- . Atterrissage complexe : stabilité ? Projections ?

➤ Puis Mars ? 1^{er} atterrissage annoncé en 2027 par Musk...

⚡ Ne jamais dire jamais... C'est juste un peu complexe 😊
Peut être un peu de patience, mais ça arrivera !





- ❖ **On vit une époque formidable ☺ :**
 - . Très « série télé » : feuilleton dont on ignore tout du prochain épisode
 - . Volonté très claire de Musk d'être disruptif
 - . Attendez vous à être surpris !

- ❖ **Quelques points à ne pas négliger :**
 - . Ne sous-estimez jamais SpaceX :
 - . Musk a toujours fait ce qu'il a dit qu'il ferait
 - « *My mentality is that of a samurai... I'd rather commit Seppuku than fail* »
 - . Souvent avec de fortes variations techniques
 - . Jamais dans le calendrier théorique affiché au début
 - . N'attendez pas pour réagir :
 - . Foncez, et acceptez de prendre des risques
 - . Changement majeur de mentalité : Culture du risque, test to fail, « *failure is an option* »
 - . Soyez acteurs du monde de demain : innovez, soyez créatifs.
 - . Poussez aux limites autorisées par la physique
 - « *Ce n'est pas grave de se tromper ; ce qui est grave, c'est de ne pas essayer* »

Merci de votre attention !