



# L'ASCENSEUR SPATIAL MYTHE OU RÉALITÉ ?

**Christophe Bonnal**

Expert sénior – Direction des Lanceurs – CNES

Fondation Arts & Métiers – Liancourt – 9 février 2019

# HISTORIQUE

## Nombreuses vieilles références :

### - Tour de Babel, Genèse 11

↳ Littéralement Bab-Ilani, Tour des Dieux

- Ziggourat, temple-tour à étages, censée permettre aux Babyloniens l'accès du domaine d'Anou, Dieu Suprême, qui vivait au-delà des nuages

- Limitations liées à la technique de construction :

- . base de briques moulées cuites au four,
- . bitume comme mortier,
- . caractéristiques mécaniques insuffisantes en compression pour dépasser quelques centaines de mètres d'altitude,
- . TRL trop bas
- . Mais échec final indépendant de l'équipe projet

### - Echelle de Jacob, Genèse 28

↳ Les avant-projets marchent toujours mieux en rêve qu'en réalité...

- Une échelle c'est bien ; un ascenseur c'est mieux !

### - Jack et le haricot

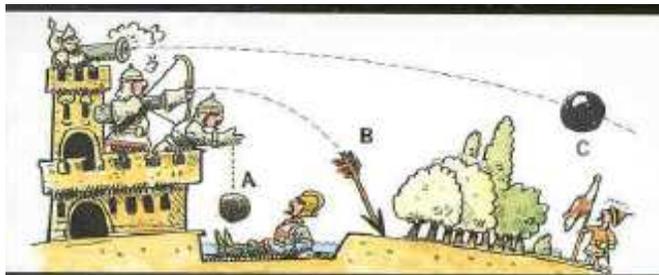
↳ Très connu aux USA, forte influence...



## Le principe d'un satellite est simple !

↪ A une altitude donnée, il faut une vitesse horizontale suffisante pour que Gravité et Force Centrifuge se compensent

⇒ Il faut donc : Monter haut, et Aller vite horizontalement

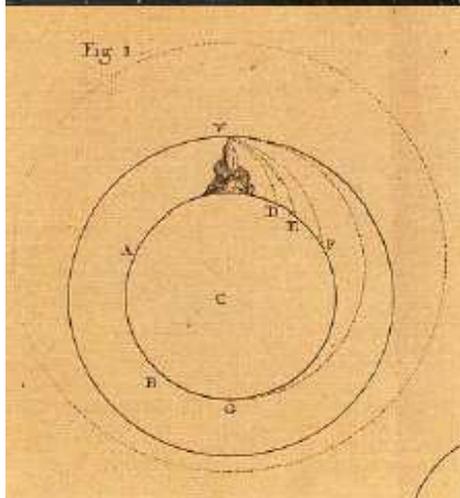
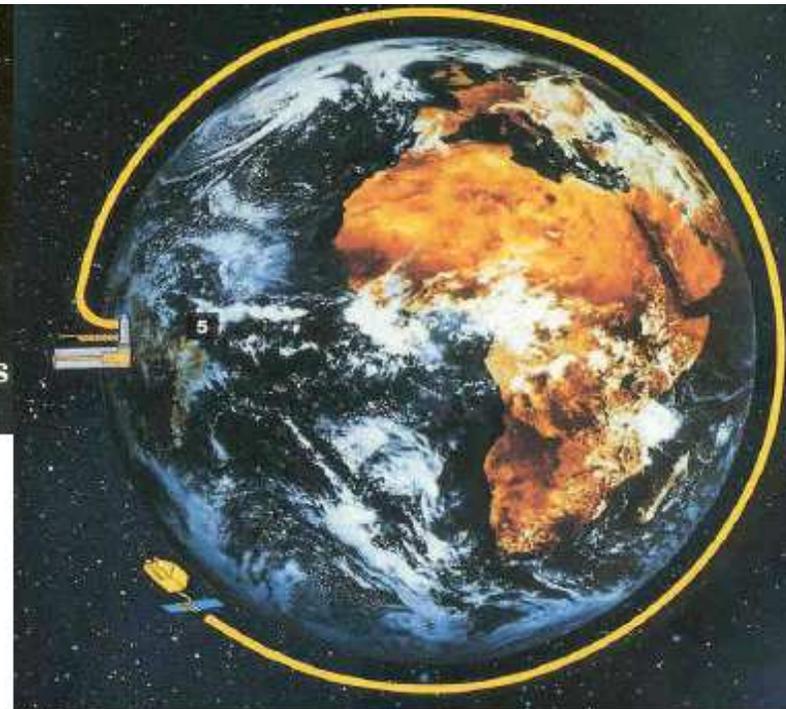


A  $V_{\text{initiale}} = 0$   
CHUTE VERTICALE

B  $V = 30 \text{ m/s}$   
ON DÉPASSE  
LES DOUVES

C  $V = 400 \text{ m/s}$   
ON DÉPASSE  
DÉJÀ L'HORIZON

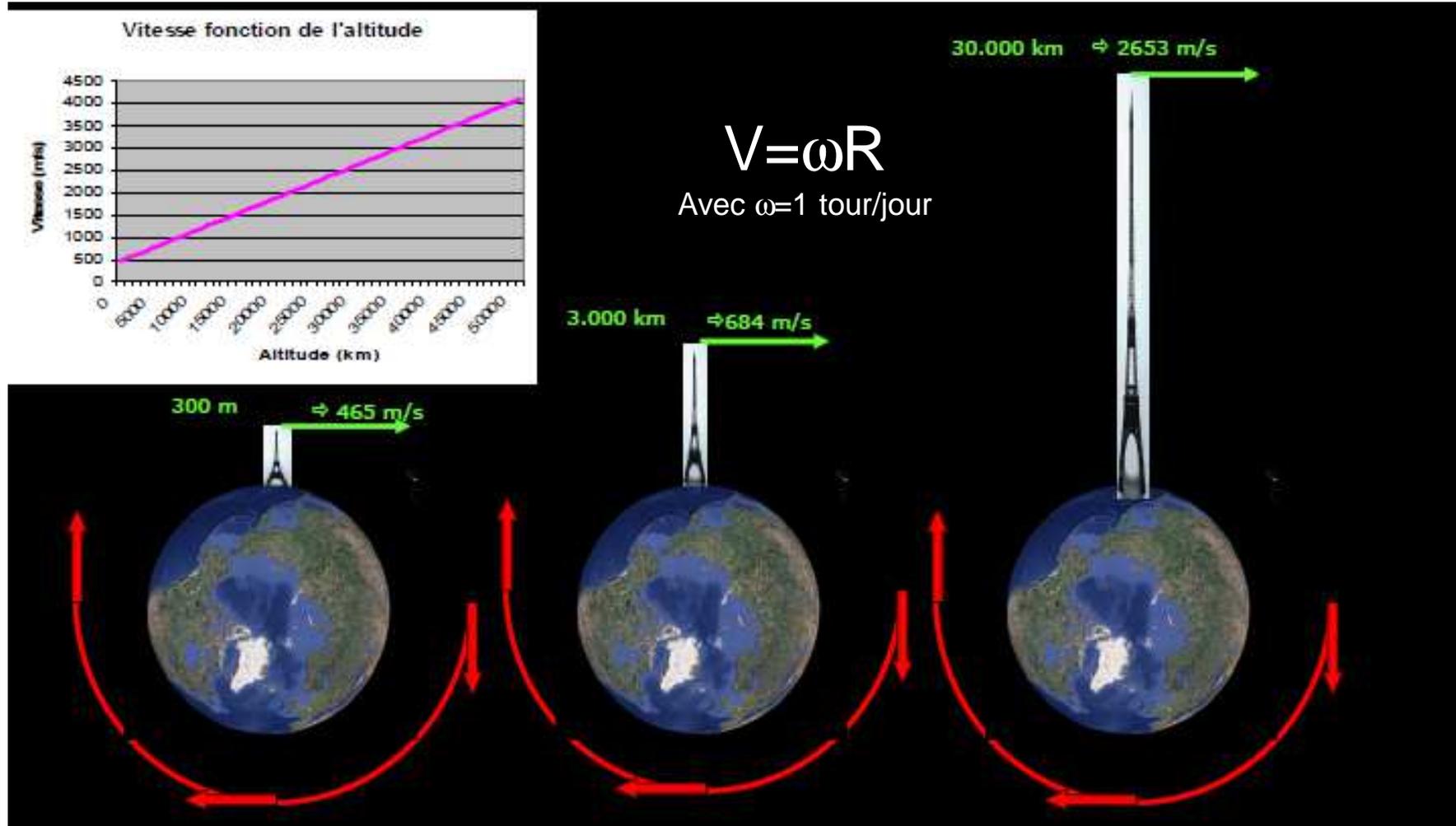
D  $V = 7800 \text{ m/s}$   
ON DÉPASSE  
LES ANTIPODES.



← Dessin de Newton  
1687

## Idée sous-jacente :

Et si on montait sur une très haute tour tout en profitant de la rotation de la Terre !



# HISTORIQUE



## Idée fondatrice :

### - Visite de Constantin Tsiolkovski à Paris en 1885

⇒ Révélation en voyant la Tour Eiffel

- Construction métallique, en treillis
- Courbe logarithmique

⇒ Publication en 1895 : « expérience de pensée »

- Tour gigantesque, placée sur l'équateur
- Un voyageur monte progressivement :

⇒ Lors de l'ascension, gravité et force centrifuge varient : le poids apparent, somme de la gravité centripète et de la force centrifuge diminue jusqu'à l'altitude Géostationnaire : (Altitude où ces deux forces se compensent exactement)

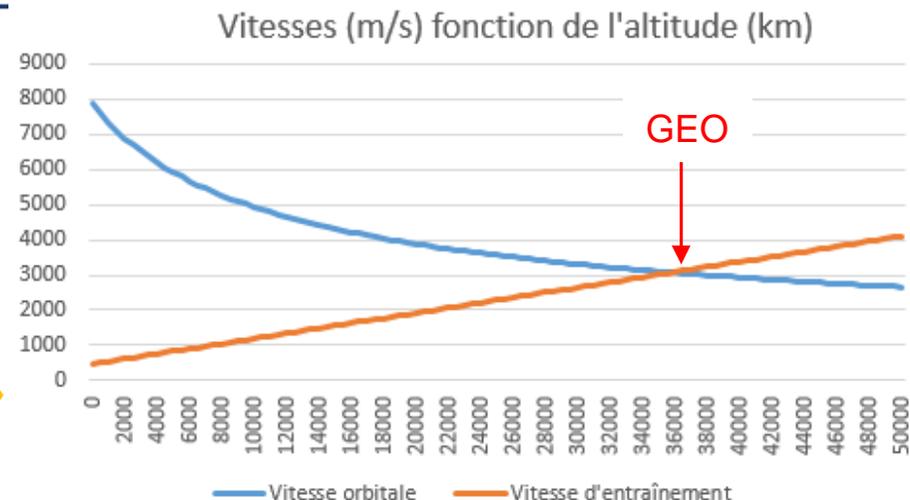
⇒ Notre sujet n'est plus soumis à aucune force et se trouve en impesanteur.  
- Il tourne librement avec la Terre en restant toujours à la même altitude.

- Tsiolkovski calcule l'altitude stationnaire pour la Terre, environ 36.000 km, ainsi que celle des cinq autres planètes connues à l'époque et pour le Soleil.

- Il explique que si le voyageur continue à grimper le long de la tour, la force centrifuge deviendra prépondérante, tendant à l'envoyer dans l'espace.

- Il calcule l'altitude nécessaire pour être envoyé vers la Lune et vers Mars.

### - Idée sans suite pendant 75 ans !



## Seconde idée d'Ascenseur Spatial :

### - Proposition de Youri Artsutanov

↪ Publication en 1960 « Vers le Cosmos en train électrique »

- Premier nom de « Funiculaire de l'Espace »
- Article méconnu jusqu'en 1967

↪ Premier calcul

- Impossibilité d'une telle tour
- Même avec les meilleurs aciers
- Travaillant en compression



↪ Proposition de la construire à l'envers, depuis GEO

- Malgré tout impossible
- Malgré le travail de l'acier en traction

⇒ Pour une épaisseur d'un cheveu au niveau de la Terre, il faut un diamètre de câble en GEO nettement supérieur à celui de la Terre

### - Abandon provisoire de l'idée !



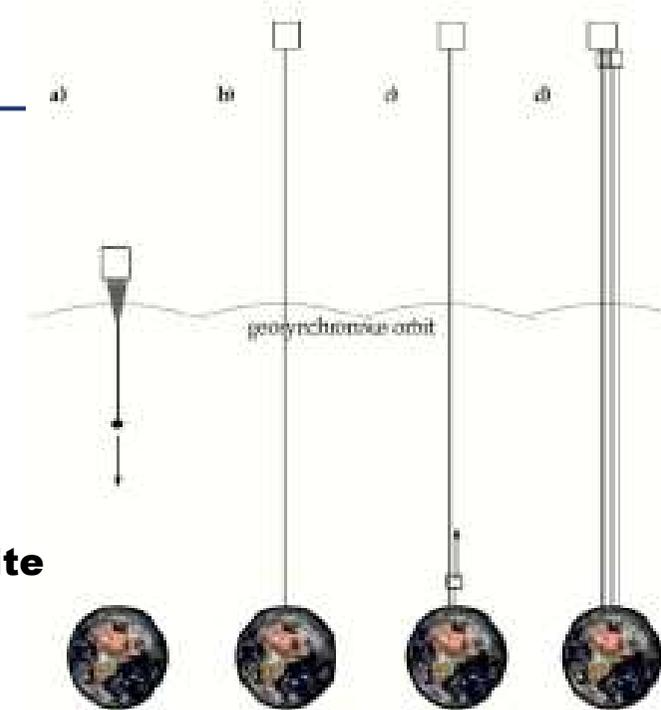
# HISTORIQUE

## Troisième idée d'Ascenseur Spatial :

- 1967 : groupe d'océanographes américains (John Isaacs et al. Revue *Science*)

### ↪ Schéma de référence de déploiement de l'ascenseur

- A partir d'un gros satellite en GEO
- Câble extrêmement fin, donc léger (500 kg)
- Déployé simultanément par-dessus et par-dessous le satellite
  - ↪ Permet de garder le centre de gravité en GEO
- Dès que le câble arrive à la surface de la Terre,
- Accrochage à son ancre
- Montée de la première cabine avec un second câble pour renforcer le premier
- N fois (N très grand...)
- Le câble devient suffisamment robuste pour monter de lourdes charges



### ↪ Question du matériau non résolue

- Quartz, Graphite ou Diamant
- Deux problèmes :
  - . Le premier micro-câble serait coupé immédiatement par une micro-météorite
  - . Coût du câble (cours du diamant...)

- **Abandon provisoire de l'idée !**

# HISTORIQUE



## Quatrième idée d'Ascenseur Spatial :

- 1974 : publication dans *Acta Astronautica* par Jérôme Pearson

« *Lanceur de satellite utilisant l'énergie rotationnelle de la Terre* »

- 5 ans de négociations pour passer son papier !
- Pas de connaissance des travaux d'Artsutanov ni Isaacs
- Explication exhaustive de toutes les équations gouvernant la « *tour orbitale* »

- ↪ La hauteur totale de la tour doit être de 144.000 km (40% de la distance Terre-Lune)
  - ↪ Depuis l'extrémité du câble on peut atteindre n'importe quel point du système solaire
  - ↪ Tenue du câble soumis aux conditions météorologiques, dans l'atmosphère
  - ↪ Calcul des premiers modes oscillatoires du câble :
    - Identification des deux zones géographiques idéales pour la construction de la tour :
    - Sri Lanka et Galapagos (points de libration de l'orbite GEO = 75°E, 105°W)
  - ↪ Calcul des vitesses théoriques des cabines desservant l'ascenseur
  - ↪ Problème rédhibitoire de matériau pour rester dans des dimensions raisonnables :
    - 24.000 vols d'une hypothétique navette 30 fois plus grosse que celle de la NASA pour achever la tour !
- Abandon provisoire de l'idée !

# HISTORIQUE

## Quatrième idée d'Ascenseur Spatial (suite) :

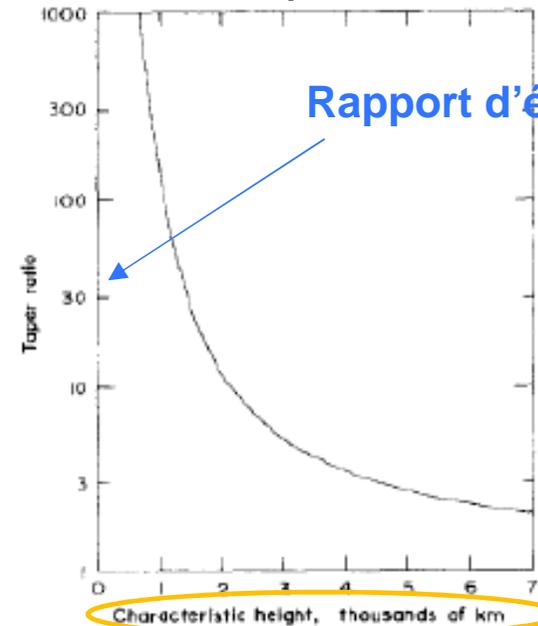
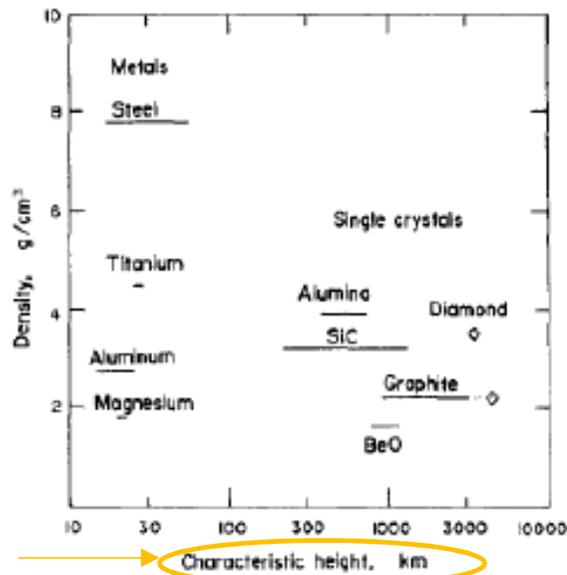
- 1974 : publication dans Acta Astronautica par Jérôme Pearson (⇒ Minute théorique !)



### ↳ Résistance du matériau nécessaire à la construction de l'ascenseur

- Notion de **hauteur caractéristique** = longueur de câble supportable sous 1 g
- On en déduit le **rapport** « épaisseur en GEO sur épaisseur sur Terre »
- Câble en acier de 1 µm sur Terre ⇒ 10<sup>30</sup> km en GEO ... : impossible complexe ☹
- Câble en Spectra de 1 mm sur Terre ⇒ 2 km en GEO, masse totale 60.10<sup>15</sup> kg
- Il faut du diamant pour avoir un rapport raisonnable 10 (1 mm sur Terre ⇒ 1 cm en GEO)

$$\left(\frac{\sigma}{\rho \cdot g_0}\right)$$



Hauteur caractéristique

Characteristic height, km

Rapport d'épaisseur

Characteristic height, thousands of km

# HISTORIQUE

## Cinquième idée d'Ascenseur Spatial :

- 1978 : publication d'Arthur C. Clarke

« *Les fontaines du Paradis* »

↪ **Correspondance fournie entre Clarke et Pearson**

↪ **Construction de la Tour des Etoiles sur l'île de Taprobane, en fait Sri Lanka**

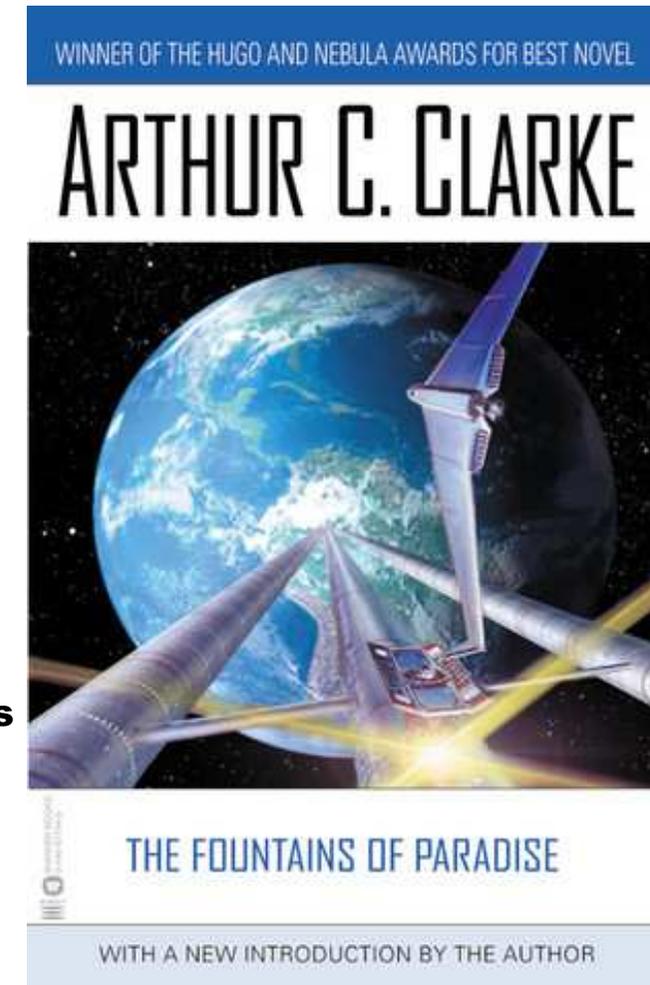
- **L'ingénieur en charge du projet, Vannevar Morgan, dispose d'un matériau révolutionnaire**

« **fil quasi invisible en cristal de diamant continu pseudo mono-directionnel** »

- **Identification dans le roman de tous les problèmes associés à un tel projet, depuis l'expropriation des moines propriétaires des lieux jusqu'aux difficultés de financement, pour terminer par** *Non au spoil !*

↪ **Roman passionnant, chaleureusement recommandé !**

- **Mais, pas d'avancée vers la réalisation concrète !**



# HISTORIQUE

## La révolution des nanotubes de Carbone :

- **Découverte en 1990**
- **Élément précurseur : Footballène = Buckminsterfullerène**

### ↪ Molécule en forme de ballon de foot

- **C60 comportant 60 atomes de Carbone avec le même motif de pentagones et d'hexagones que le ballon de foot standard**
- **Première synthèse en 1985 par Kroto, Curl et Samlley**

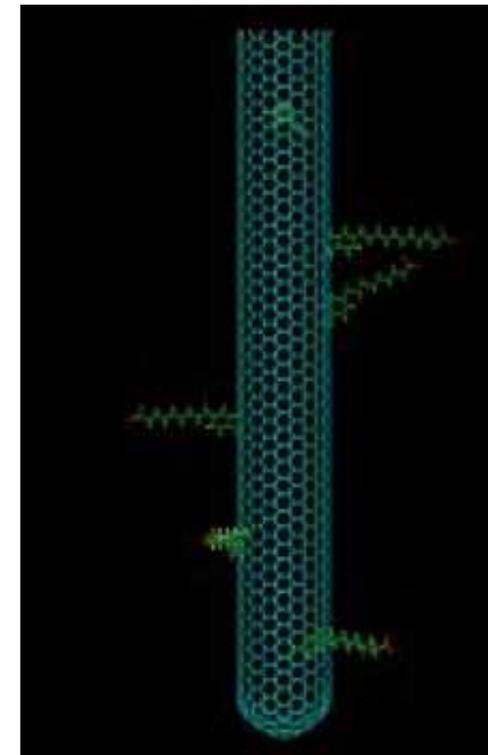
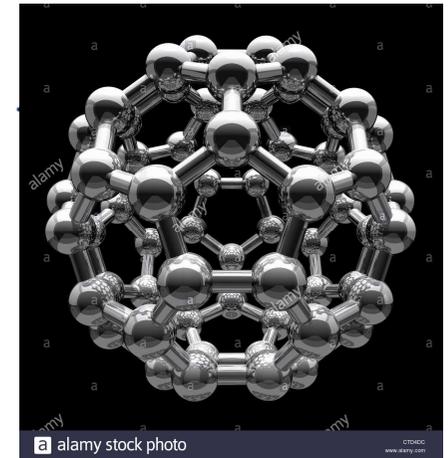
### ↪ Synthèse par Ijima en 1991 de nanotubes de carbone dérivés de ces fullerènes

- **Microscopiques**  
(quelques nanomètres, 50.000 fois plus fins qu'un cheveu)
- **Motif à base d'hexagones de Carbone, répétés à l'infini**

### ↪ Propriétés exceptionnelles !

- **30 à 60 fois plus résistant que le meilleur acier,**
- **mais 6 fois moins dense**
- **Module d'élasticité 5 à 10 fois meilleur que l'acier**

- **Graal des ingénieurs... ⇒ Ca y est, ça marche peut être !**



# HISTORIQUE

## Nanotubes de Carbone :

### ↳ Résistance mesurée 200 Gpa :

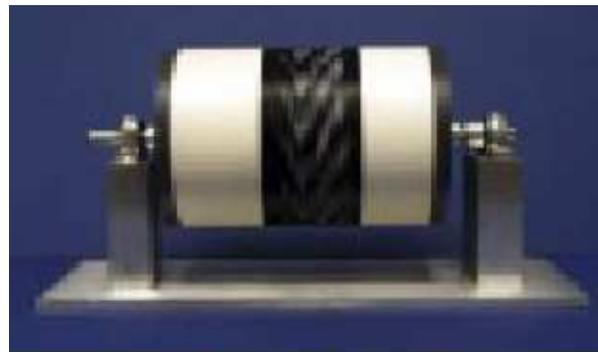
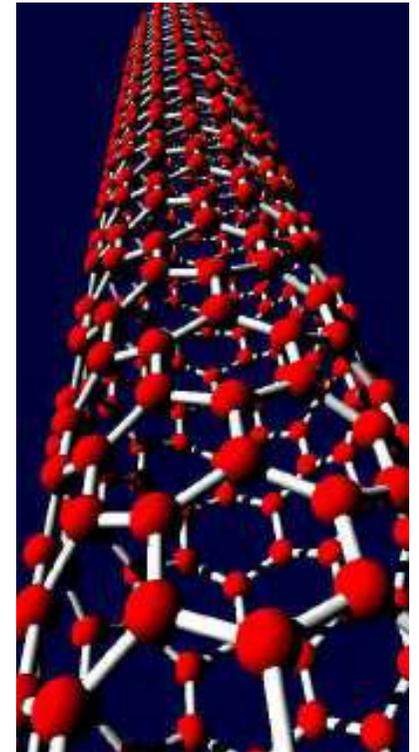
- 54 fois mieux que le Kevlar
- 70 GPa suffisent pour l'ascenseur  
Hauteur caractéristique 5.400 km, ratio d'épaisseur  $\leq 3$

### ↳ Production mondiale significative :

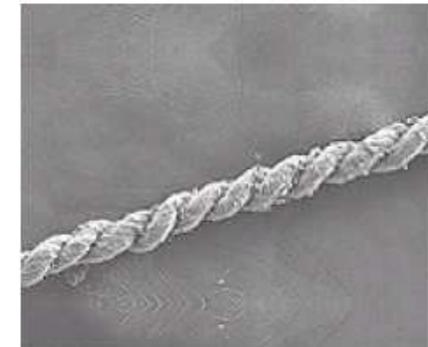
- Exemple Mitsui : 120 t/an CNT à 100 \$/kg
- ↳ Suffisant pour construire l'ascenseur :  
Besoin : 0,15 mm au niveau de la Terre, 0,4 mm en GEO  
Masse totale  $\approx 9,2$  tonnes pour une charge de 20 tonnes

### ↳ Fibres à base de Nanotubes : Propriétés exceptionnelles !

- 3-5% CNT, 3 GPa, longueur actuelle 5 km
- ↳ Insuffisant pour l'ascenseur, tant en résistance qu'en longueur, mais...



Bobine 5 km à 1%



Tresse à 3%

# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

## Etude NASA MSFC (Smithermann) :

↪ Etude exhaustive menée en 2000

↪ Principes :

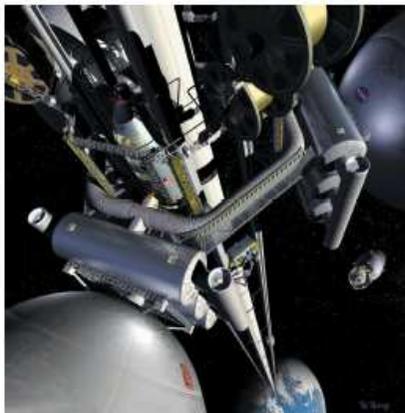
- Capture d'un astéroïde contre-poids
- Propulsion électromagnétique

NASA/CP—2000-210429

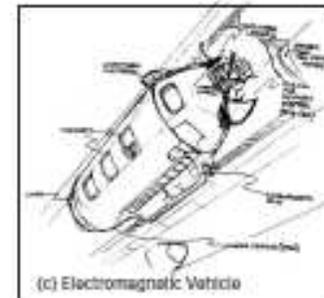


Space Elevators  
An Advanced Earth-Space Infrastructure  
for the New Millennium

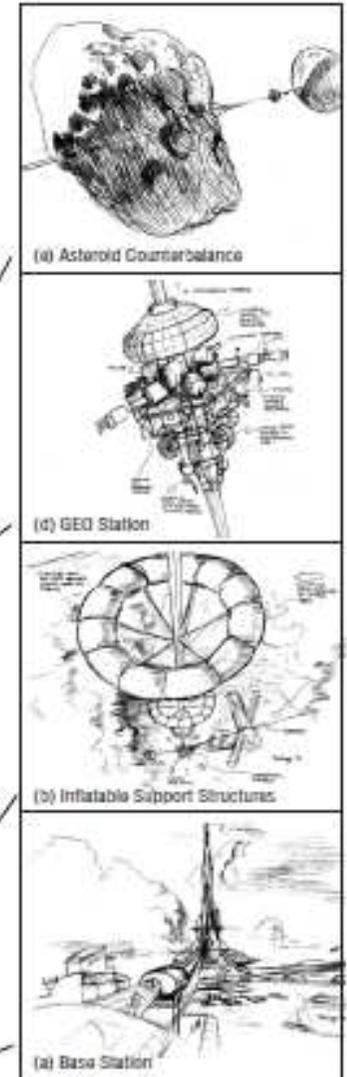
Compiled by  
D.V. Smitherman, Jr.  
Marshall Space Flight Center, Huntsville, Alabama



This publication is based on the findings from the Advanced Space Infrastructure Workshop on Geostationary Orbiting Tether "Space Elevator" Concepts, NASA Marshall Space Flight Center, June 8-10, 1999.



(c) Electromagnetic Vehicle

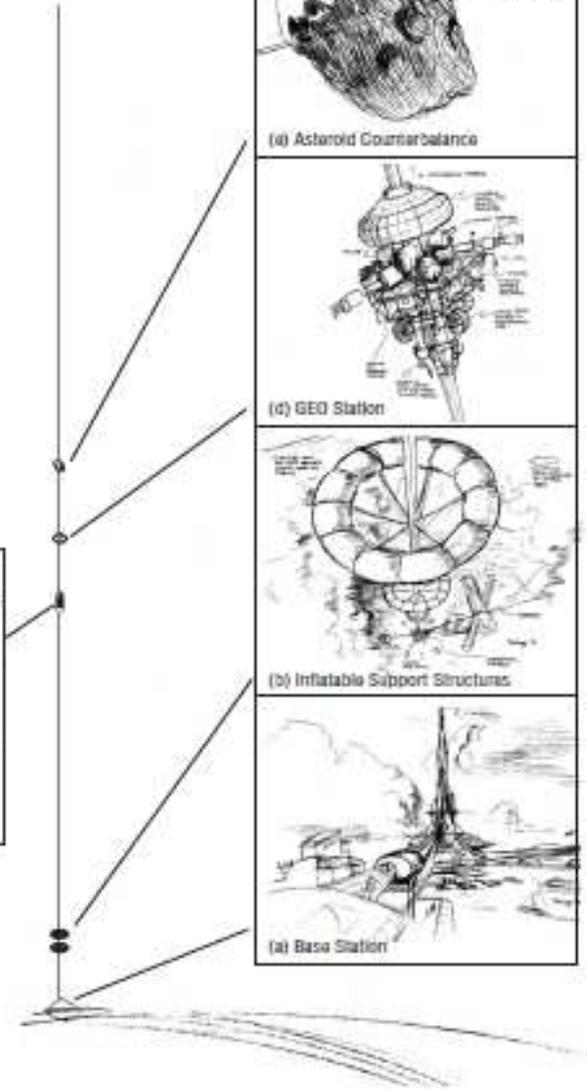


(d) Asteroid Counterbalance

(c) GEO Station

(b) Inflatable Support Structures

(a) Base Station



# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

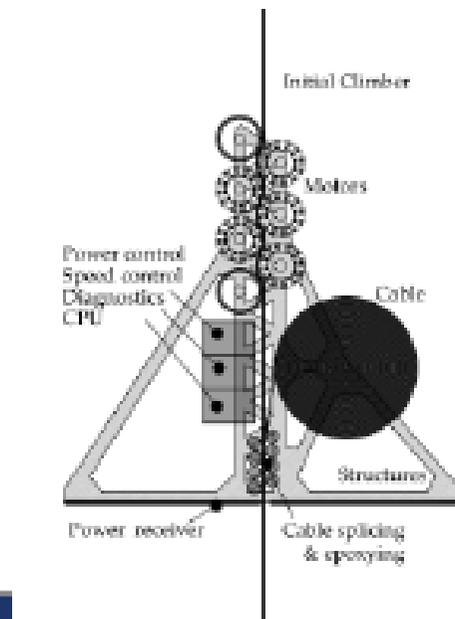
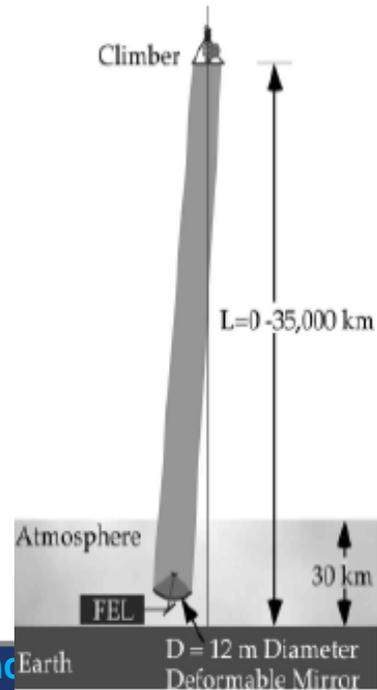
## Etude NIAC Phase 1 (Edwards 2000) :

↪ NIAC = NASA Institute for Advanced Concepts

↪ Etude menée en parallèle de celle de Smithermann

↪ Principes :

- Assemblage progressif du câble
- Propulsion électrique
- Transmission d'énergie par faisceau laser depuis le sol
- Ancrage sur une plateforme marine
- Contrepoids composé des premiers « crawlers »

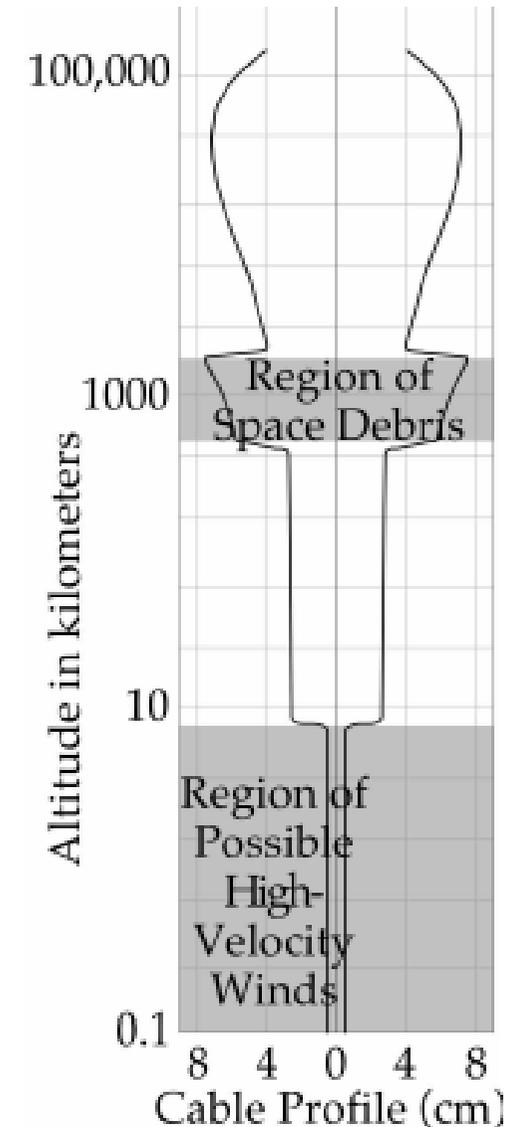
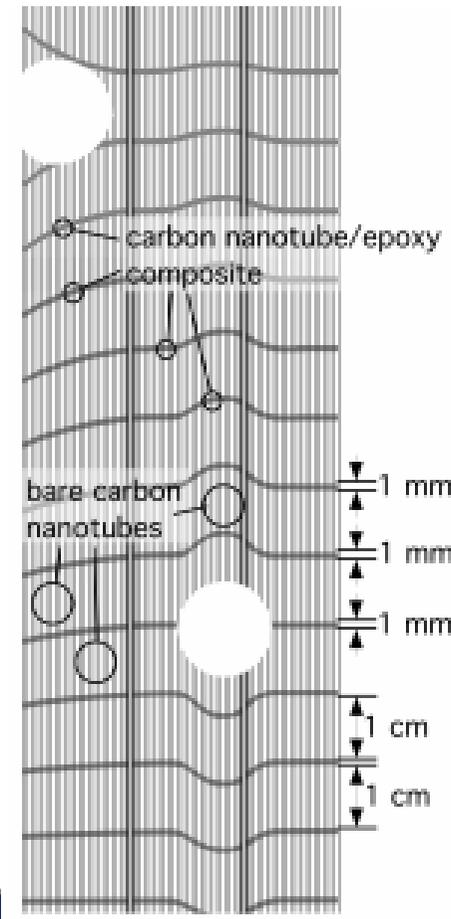
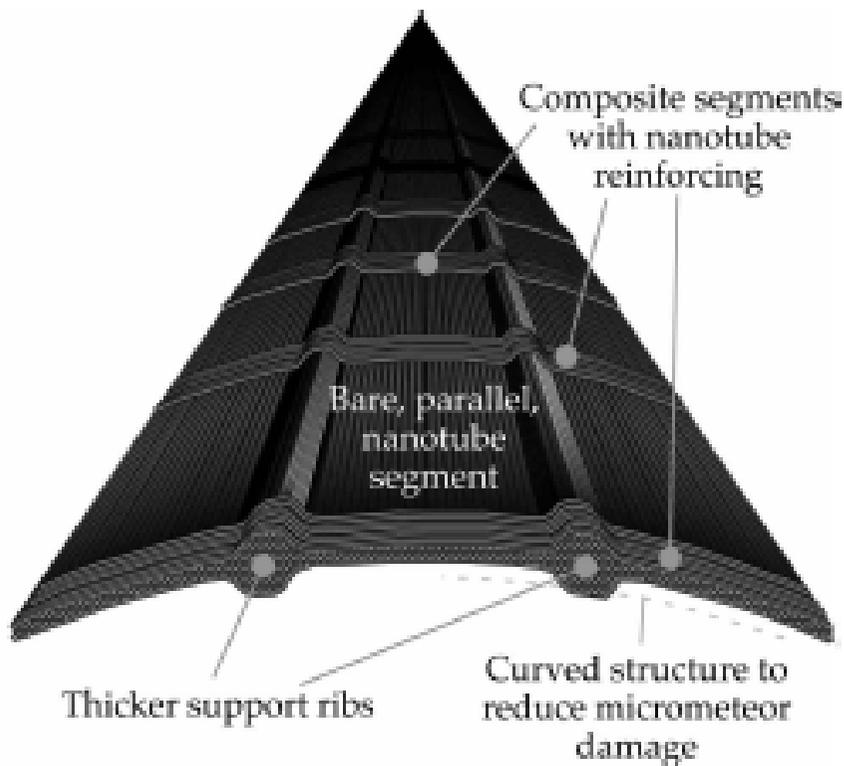


# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

## Etude NIAC Phase 1 (Edwards 2000) (suite) :

### ↪ Principes :

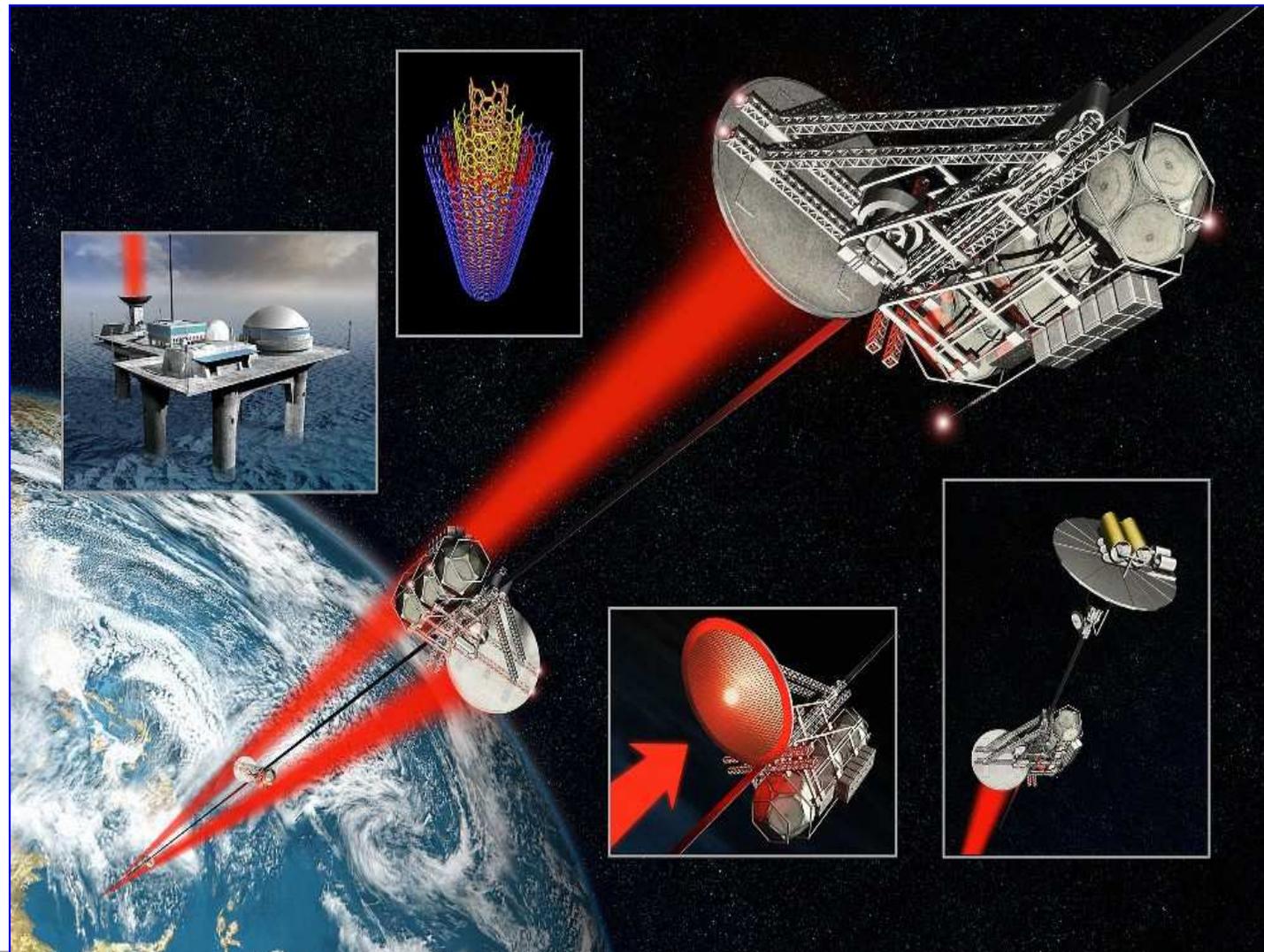
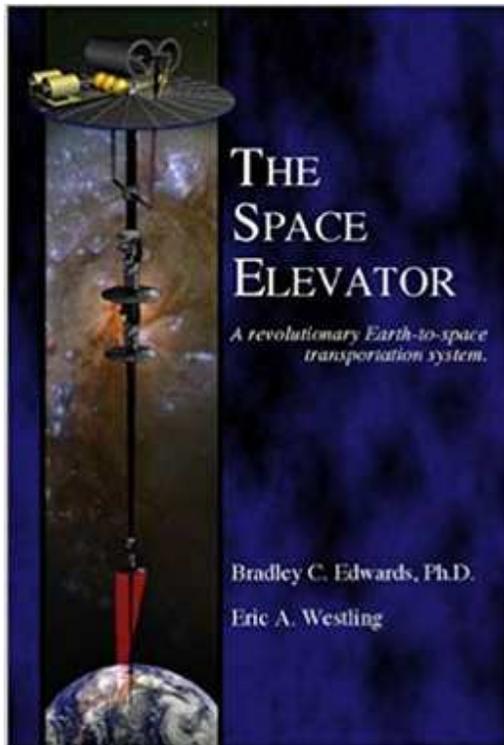
- Câble plat et fin en tresse de nanotubes
- Design courbé et entrelacé tolérant aux petits impacts
- Largeur variable en fonction de l'altitude



# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

## Etude NIAC Phase 1 (Edwards 2000) (suite) :

- 1<sup>er</sup> ascenseur : capacité 20 tonnes
- Charge utile 13 tonnes
- Développement 15 ans, 10 G\$
- Coûts opérationnels 250 \$/kg



# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL



## Etude NIAC Phase 2 (Edwards 2003) :

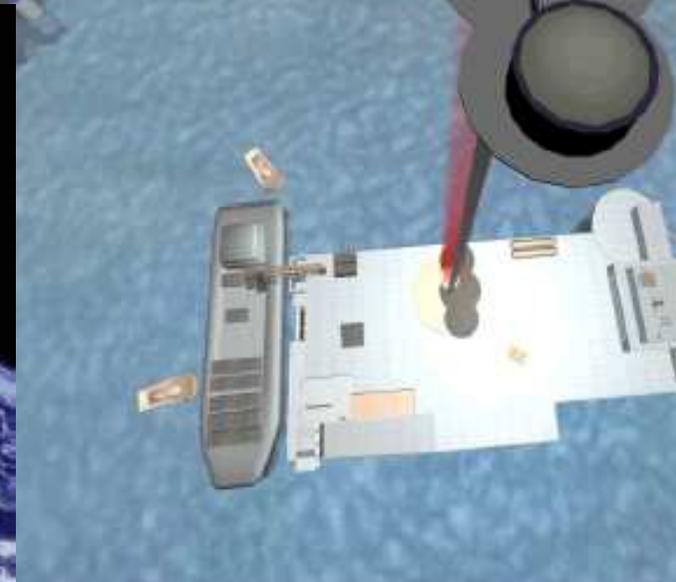
### ↪ Amélioration de tous les points critiques

- Travail essentiel sur le crawler
- Identification de l'effet du crawler sur la dynamique du câble
- Référence : câble de 110.000 km, crawler de 7 t, satellite de 13 t

### ↪ Démission d'Edwards pour fonder sa start-up !



- Individual fibers
  - CNT composite
    - tensile strength= 130 GPa
    - 50%+ resin
  - 10  $\mu\text{m}$  dia
  - 50 Gpa tension
- Interconnects
  - Kapton or COTS modified
    - tensile strength= 1 Gpa
    - 1 mm ht, 7,5  $\mu\text{m}$  thickness
  - 1% transfer load
  - 10-20 cm intervals

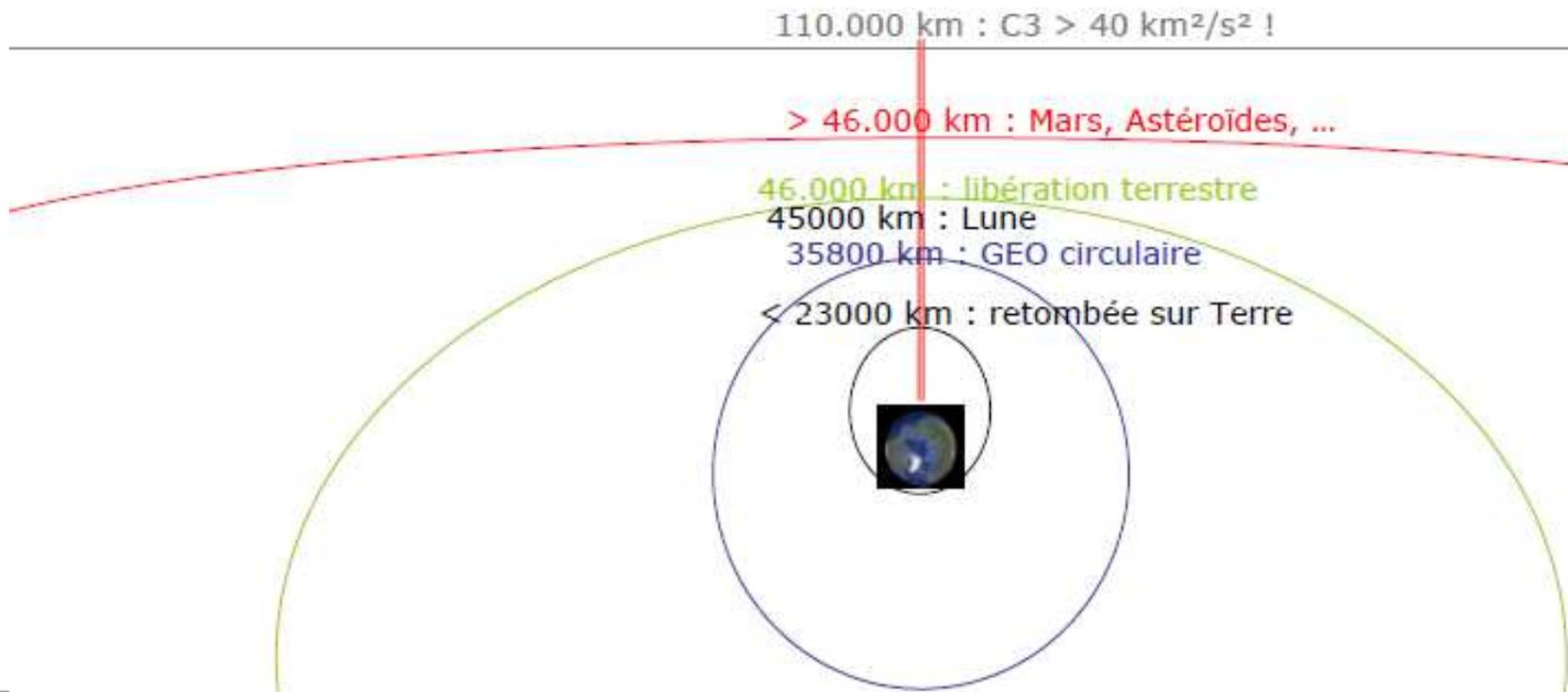


# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

## Etude NIAC Phase 2 (Edwards 2003) (suite) :

### ↳ Intérêt de l'Ascenseur Spatial :

- Destinations potentielles fonction de l'altitude sur l'ascenseur
- Limité pour les orbites terrestres au seul GEO
  - . Plan équatorial imposé
  - . Vitesse orbitale non atteinte en dessous de 23.000 km
- Très fort potentiel pour l'exploration : porte ouverte vers tout le système solaire



# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

## Etude ISEC (Swan et al. / IAA 2013) : International Space Elevator Consortium

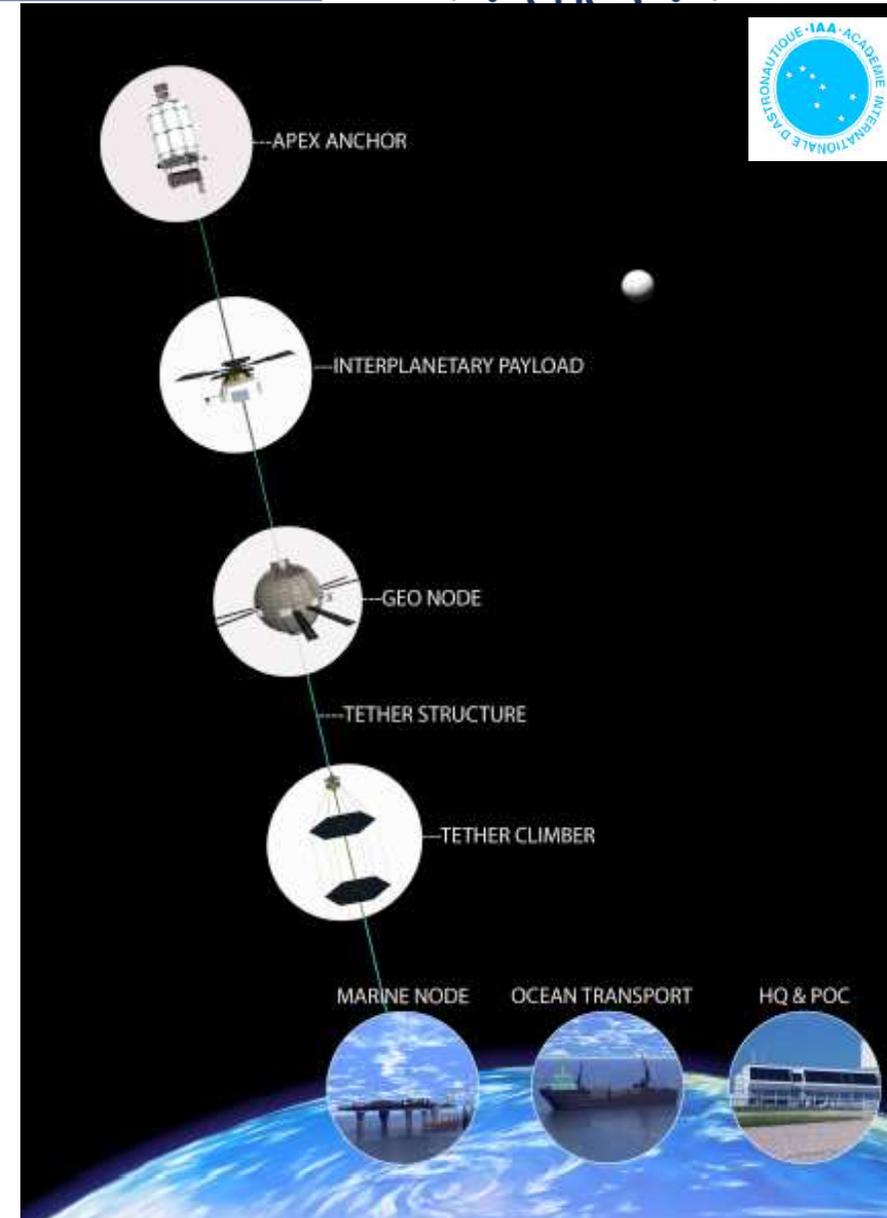
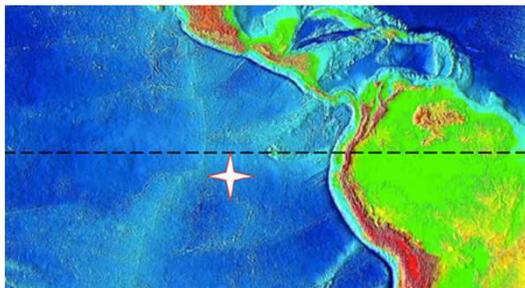
↗ Travaux importants depuis 2004 <https://isec.org/>

- Hors Agences
- Nombreuses activités de recherche

↗ Modifications importantes apportées au concept

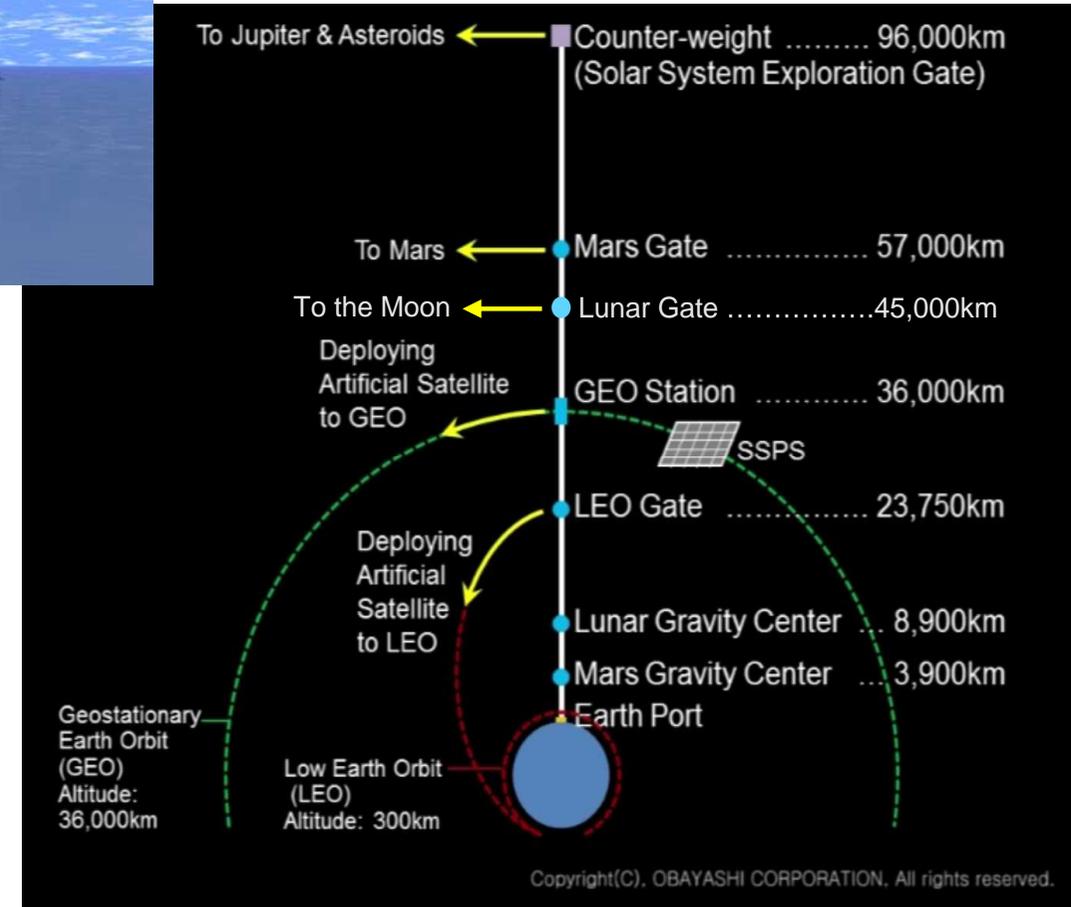
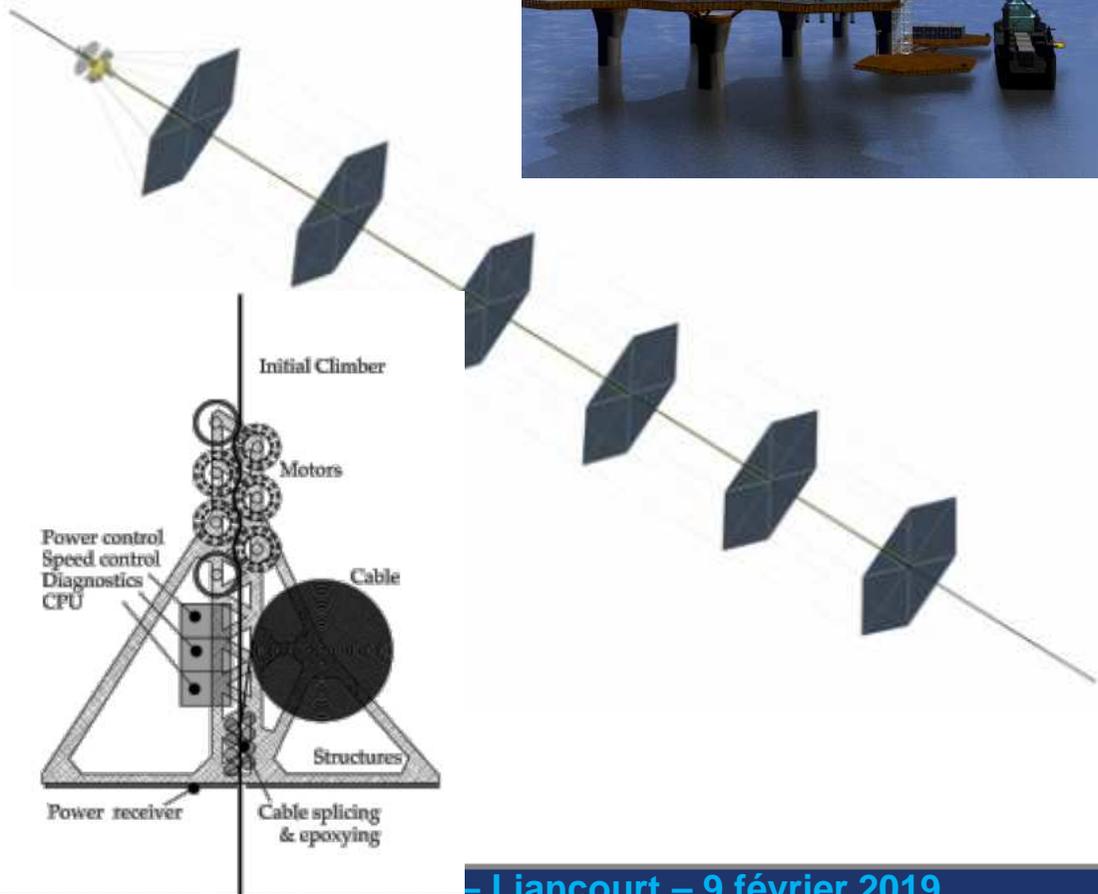
- Panneaux solaires à la place du laser (590.000 m<sup>2</sup> en 6 panneaux de 310 x 3100 m)
- Référence câble : tenue nanotube 36 GPa . largeur 1 m, épaisseur 10 à 60 μm
- Satellite initial en GEO 86 tonnes, transféré depuis LEO en électrique
- Implantation du côté des Galápagos

↗ Enormément de détails techniques, pas toujours très crédibles !



# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

## Etude ISEC (Swan et al. / IAA 2013) (suite) :



# CONCEPTION MODERNE DE L'ASCENSEUR SPATIAL

## Obayashi (2014) :

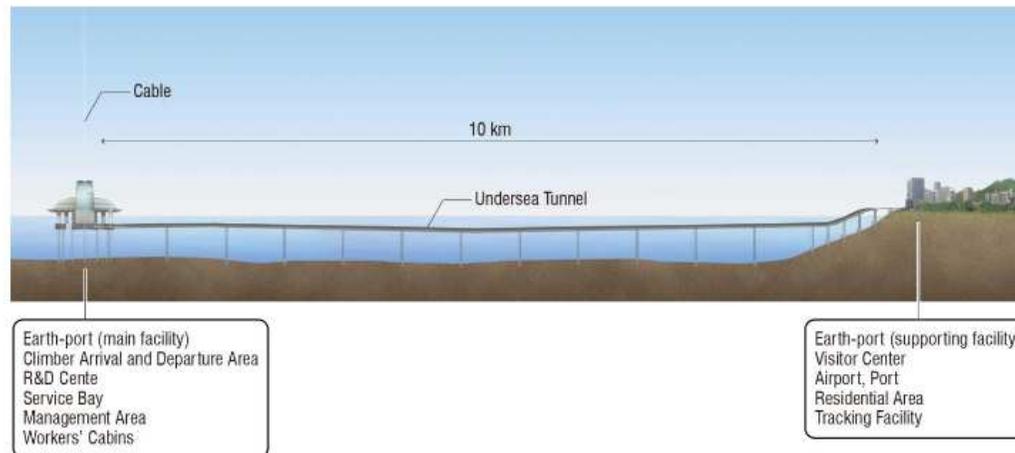
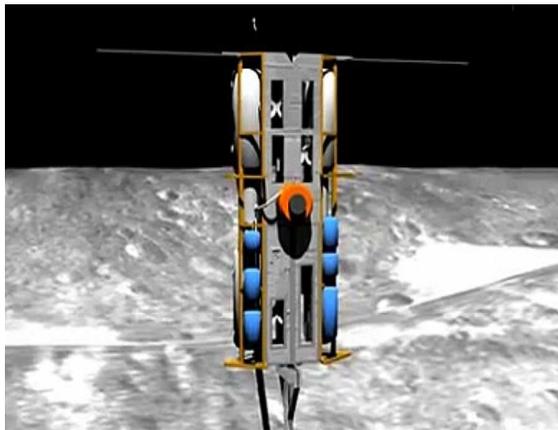
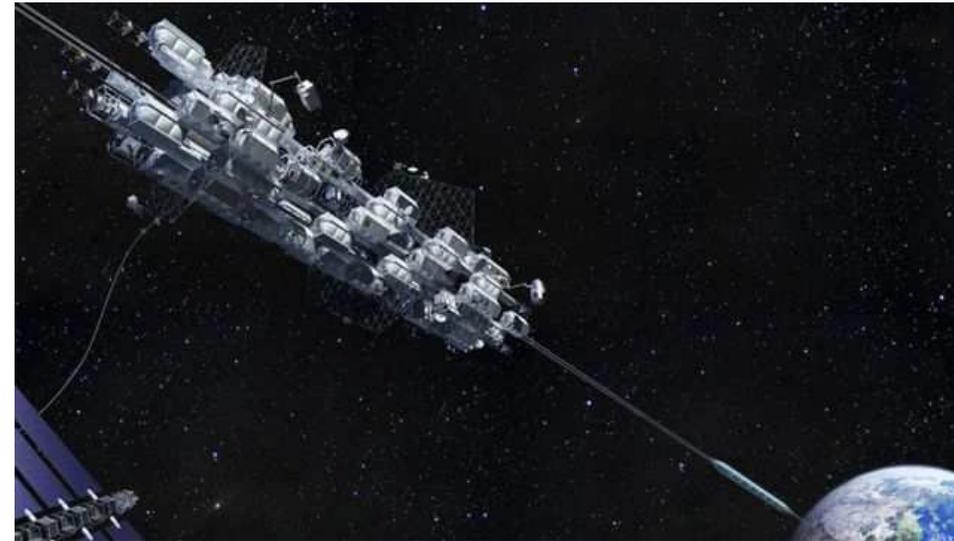
### ↳ Géant Japonais du Bâtiment

- Annonce sans dossier technique associé
- Crédibilité faible
- Essentiellement coup de pub

### ↳ Financement d'une petite expérience orbitale

- Université Shizuoka
- STARS-E lancé par HTV-7, déployé depuis l'ISS
- 2 cubesats 1U reliés par 10 m de câble
- « Cabine » 3x3x6 cm mobile sur le câble

↳ Démonstration très limitée et pas trop réussie...



# QUELQUES PROBLÈMES POTENTIELS

## ↳ Environnement externe :

### ↳ Vent :

- Propagation non atténuée de vibrations le long du câble
- ⇒ Amortissement actif à prévoir

### ↳ Oxygène atomique :

- Très agressif entre 60 et 800 km d'altitude
- ⇒ Revêtement de Nickel (25  $\mu\text{m}$ ) sur le câble

### ↳ Charges électriques induites et radiations :

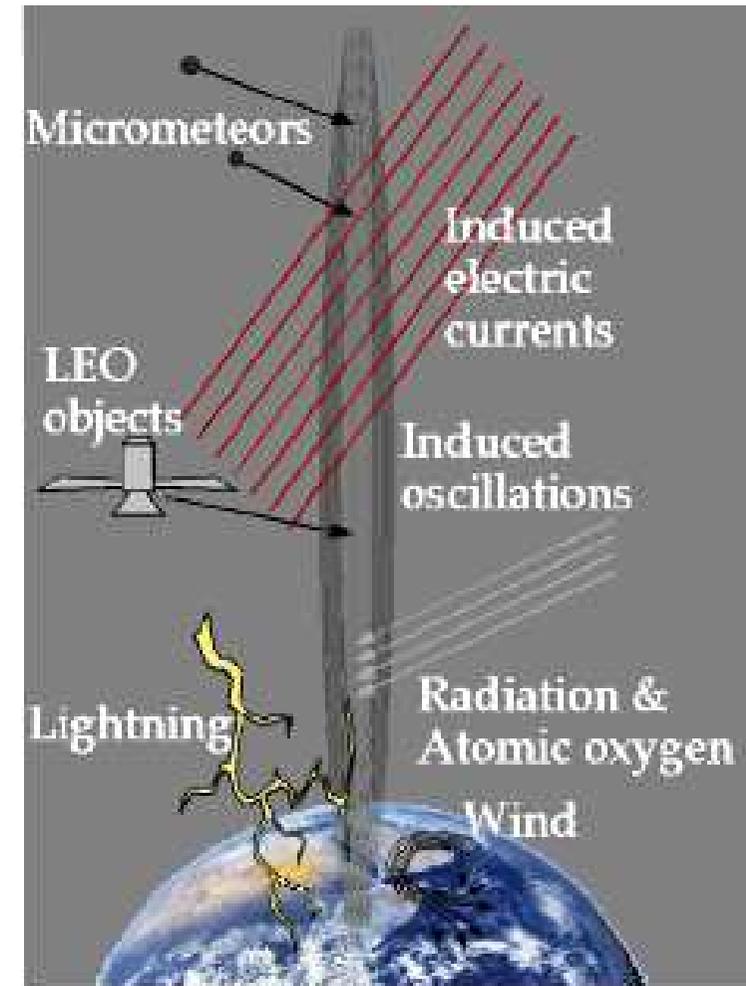
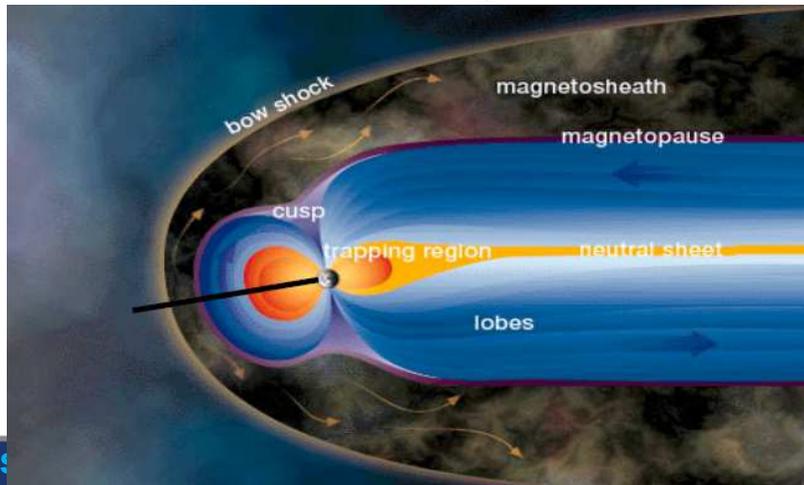
- Courants très faibles (mW), pas de problème a priori

### ↳ Foudre :

- Choisir les zones ad-hoc pour le déploiement du câble

### ↳ Extrémité du câble au-delà de la magnétopause :

- Conduction de particules chargées vers la Terre ?



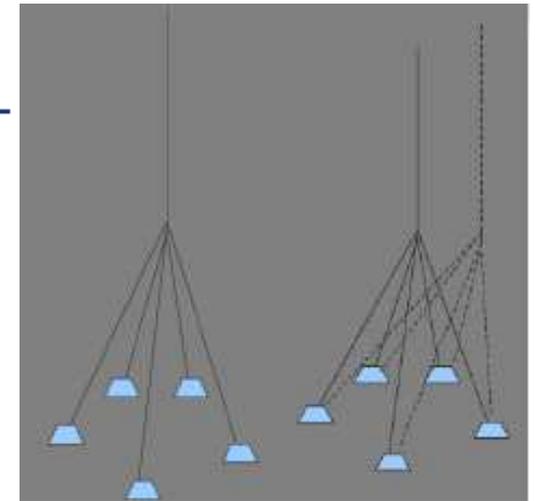
# QUELQUES PROBLÈMES POTENTIELS

## ↳ Environnement externe :

### ↳ Impact par débris orbitaux :

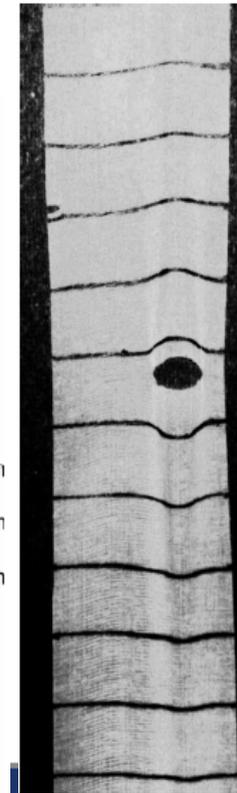
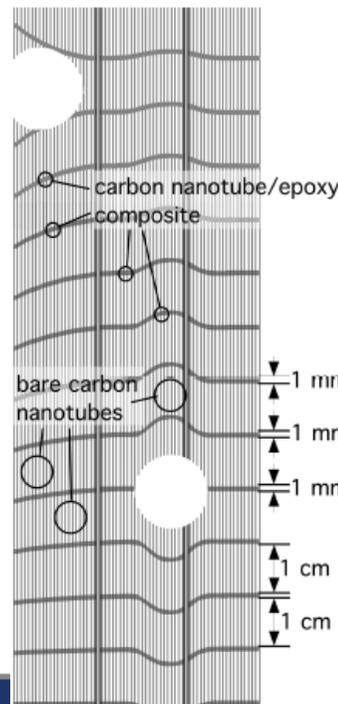
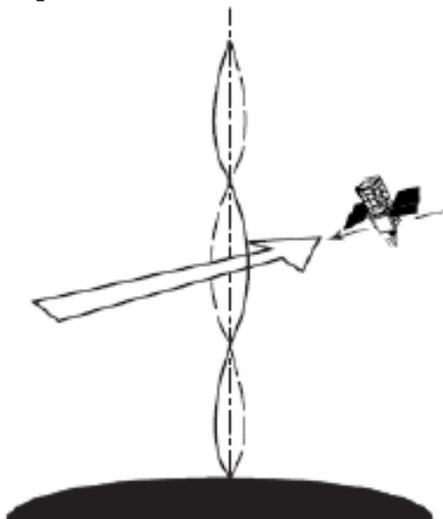
#### ⇒ Gros débris catalogués (> 10 cm)

- Très fréquents : 2 passages par jour à moins de 1 km
- Évitable, mais problème des fausses alertes
  - . Evitement statique : gestion du point d'ancrage
  - . Evitement dynamique: utilisation des modes propres du câble



#### ⇒ « Petits » débris non catalogués (< 10 cm)

- 14 impacts par jour > 1 cm
- trou 4 fois plus gros que le débris
- 1 cm  $\cong$  1 MJ
- Réparations continues à prévoir



Approach Distance (km)	Number of Encounters - GEO elevator
0 - 0.1	0
0 - 0.5	12.5
0 - 1.0	52.5
0 - 5.0	1077.5
0 - 10.0	2410
0 - 20.0	5082.5

*Distances d'approche, sur 30 jours*

# QUELQUES PROBLÈMES POTENTIELS

## ↳ Environnement dynamique :

### ↳ Très basse fréquence :

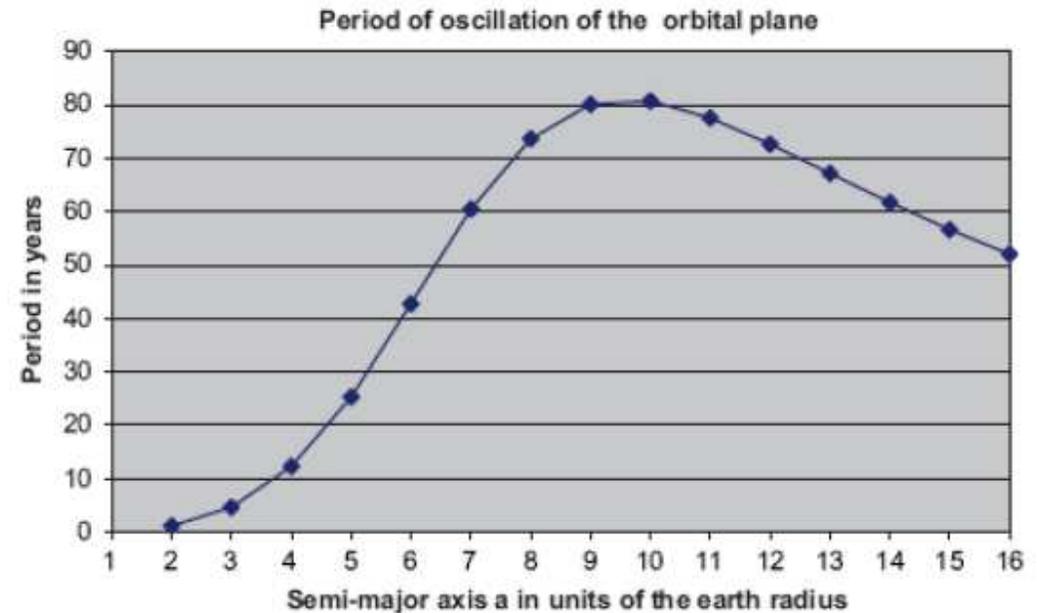
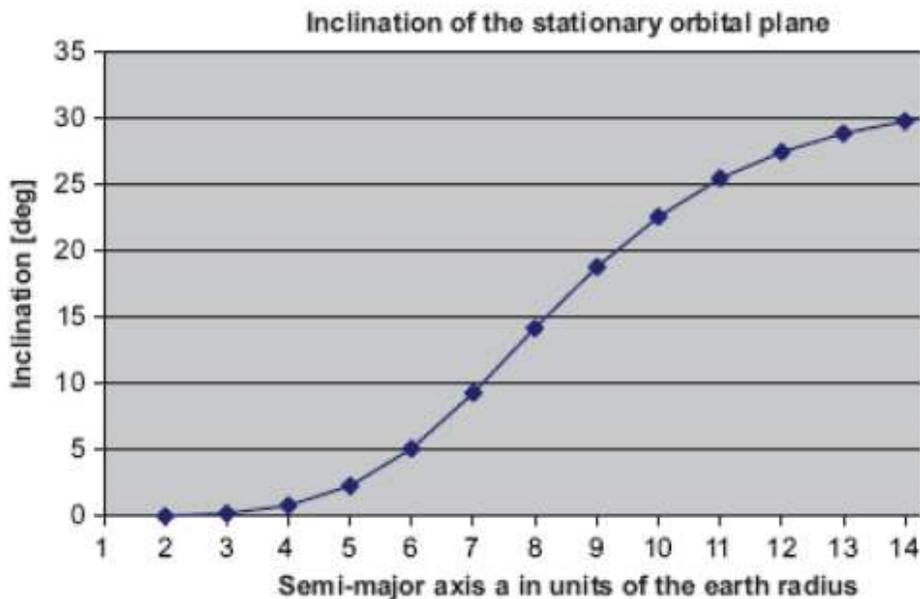
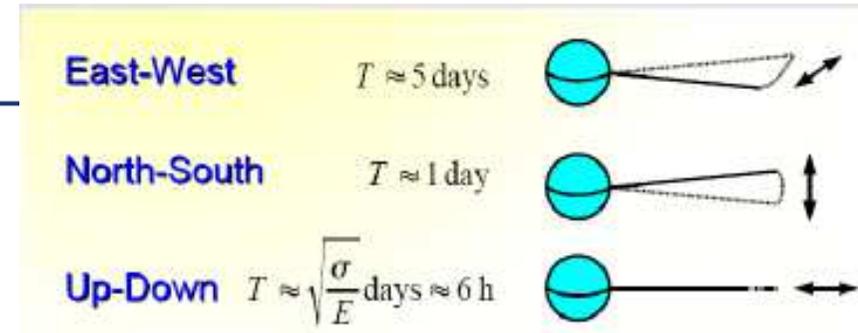
⇒ **L'orbite GEO n'est pas stable**

- Effets J2, Luni-Solaire, ellipticité de l'équateur...
- Contrôle en position NSEO d'un satellite GEO  $\approx 50$  m/s/an

↳ Inclinaison d'équilibre fonction de l'altitude

↳ Période orbitale fonction de l'altitude

⇒ **Sur un câble continu, complexe à gérer, réputé acceptable**



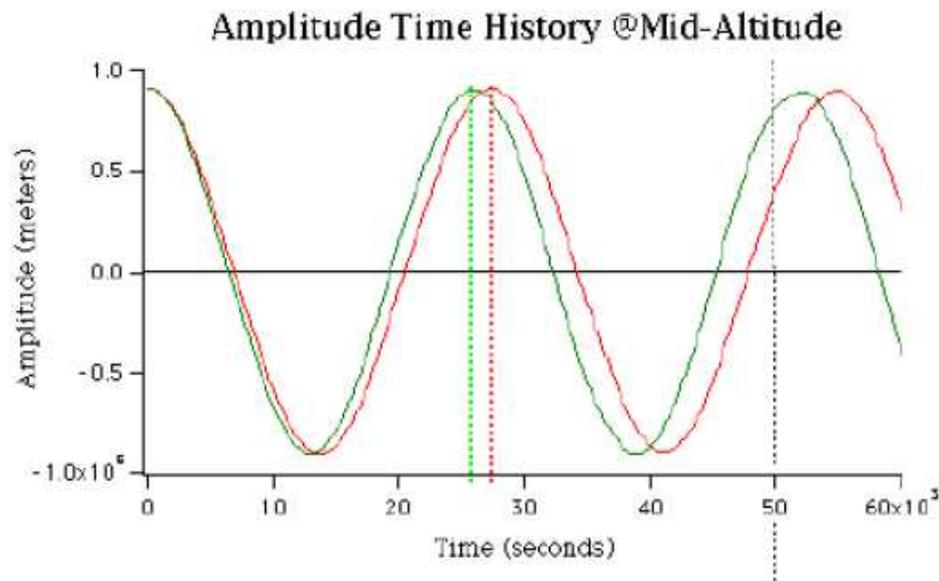
## ↳ Environnement dynamique :

### ↳ Basse fréquence :

- ⇒ **Modes propres (corde de piano) : périodes de l'ordre de 7 h ?**
  - **Excitation par le vent, et force de Coriolis induite par les climbers**
  - **Fréquences et amplitudes différentes entre « in-plane » et « off-plane »**
  - **Amortissement naturel inexistant**
  - ↳ **Atténuation par la plateforme d'ancrage...**

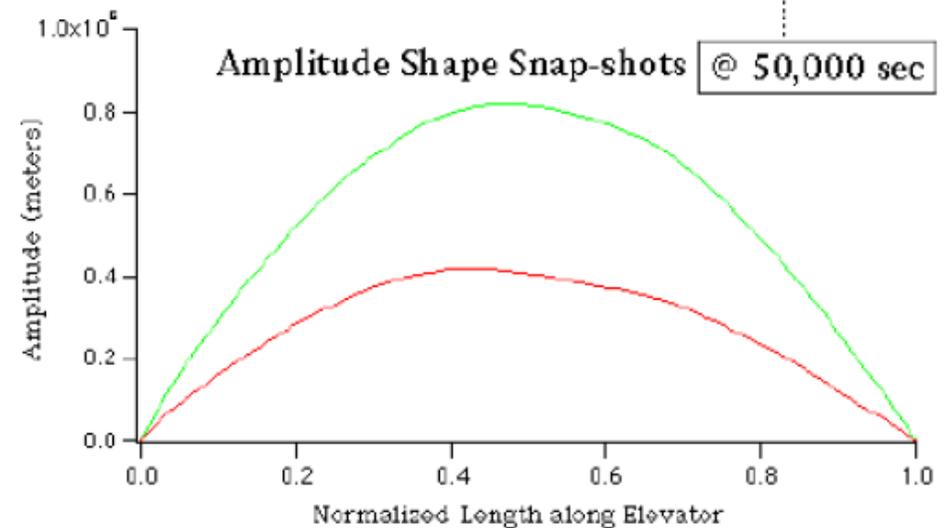
#### • Initial In and Out-of-Plane Deflections

In-Plane — Out-of-Plane



#### • Initial In and Out-of-Plane Deflections

In-Plane — Out-of-Plane



# QUELQUES PROBLÈMES POTENTIELS

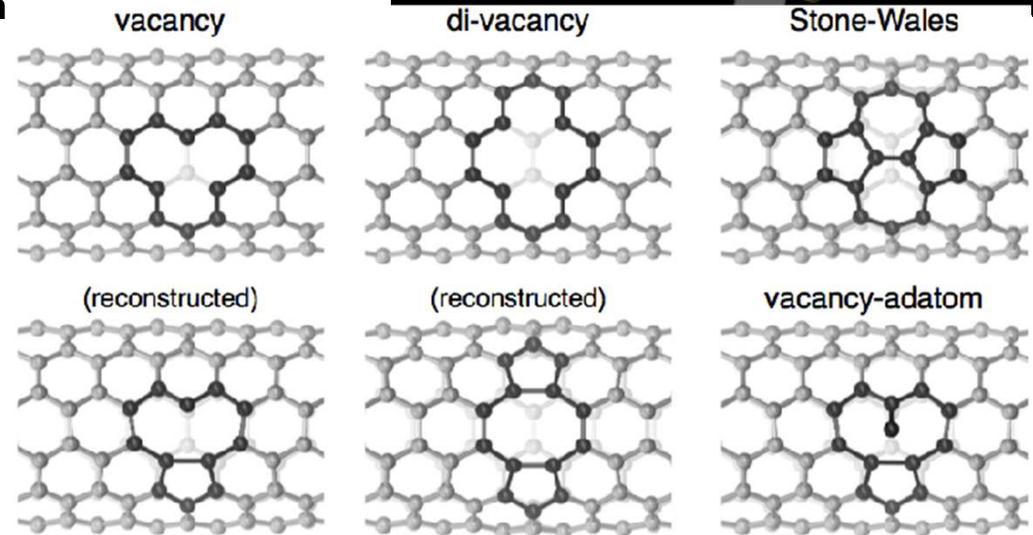
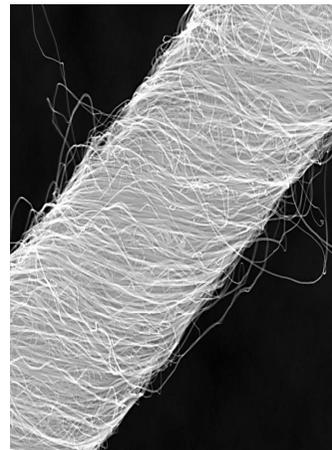
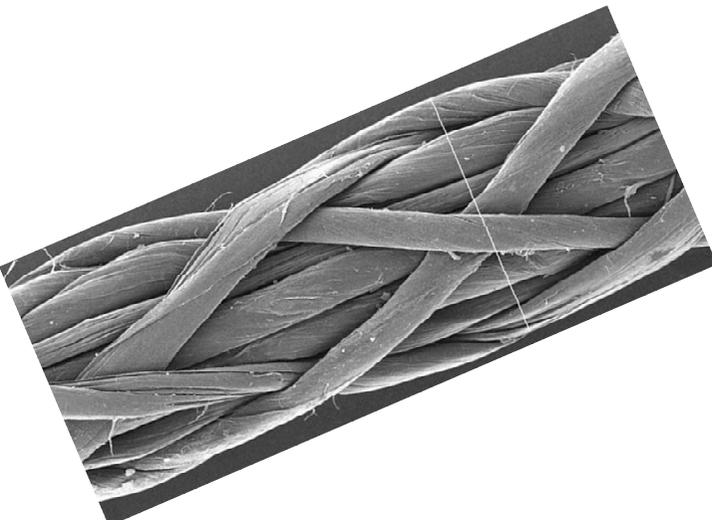
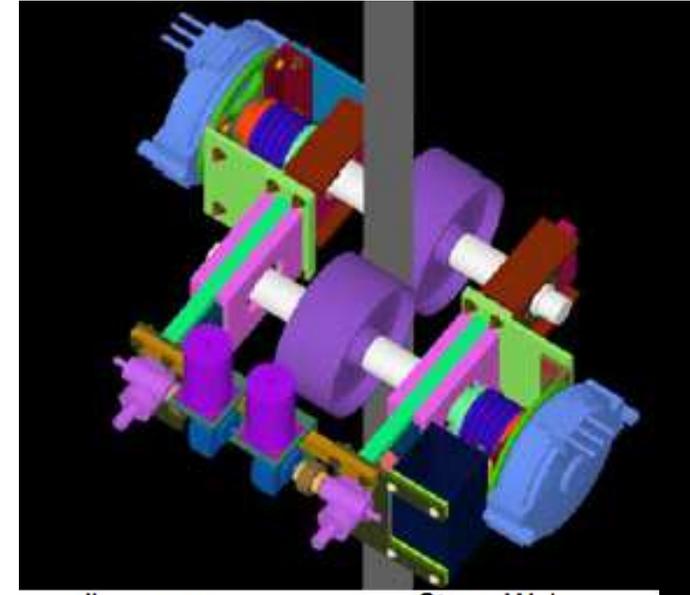
## ↳ Complexité technique :

### ↳ Définition du crawler :

- Montée le long du câble par friction
- Combinaison entre pression forte du câble et entraînement
- Aller-retour  $\approx 80.000$  km : tenue mécanique des pièces ?  
⇒ Puissance mécanique nécessaire : 20 MW  
(locomotive de 200 t : 5 MW, TGV : 10 MW)

### ↳ Caractéristiques réelles du matériau :

- Défauts : fragilités
- Perte de résistance due aux tresses
- Perte de résistance due à la compression



# QUELQUES PROBLÈMES POTENTIELS

## ↳ Sécurité – Fiabilité – Santé – etc... :

### ↳ Panne d'un climber ou de son alimentation électrique à mi-chemin :

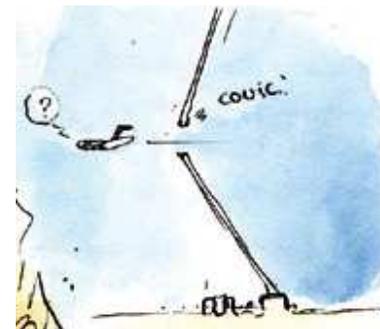
- Scénarios de retour extrêmement complexes
- « Ré-enroulement » partiel du câble ?

### ↳ Très forte nocivité attendue des nano-tubes de Carbone :

- Microfibres comparables à l'amiante
- Industrie potentiellement interdite

### ↳ Effet de la rupture accidentelle du câble :

- Enroulement le long de l'équateur ?
- Effet sur les populations ?
  - . Similaire à une feuille de papier tombant à l'arrêt ?
  - . Similaire à une faux fauchant tout sur son passage ? \*



### ↳ Protection de la base :

- Cible de tous les saboteurs du monde...

### ↳ Vitesse du climber limité par la force de Coriolis (200 km/h ?) :

- Transfert très long (1 semaine)
- Traversée lente de ceinture de Van Allen : vol habité douteux

\* Merci à Marion Montaigne ! <http://tumorrasmoinsbete.blogspot.com>

# QUELQUES PROBLÈMES POTENTIELS

## ↳ Bilan financier :

**Attention : valeurs affichées par les promoteurs !**

## ↳ Révolution au niveau des coûts d'accès à l'espace

- 250 \$/kg à comparer à 15.000 \$/kg avec un lanceur  
(opinion personnelle : ne paye même pas le transport du satellite jusqu'à la base de l'ascenseur... Bilan énergétique ? Maintenance ? Réparation ?..)
- Coût indépendant de la destination GEO, Lune, Mars, Astéroïdes
- Coût total de développement  $\cong$  10 G\$ pour 2 ascenseurs

### Annual Operating Budget per year in US\$M

Climbers	0.2 - 2 each
Tracking system	10
Anchor station	10
Administration	10
Anchor maintenance	5
Laser maintenance	20
Other	30

TOTAL (50 launches) 135

This is ~US\$250/kg

<u>Component</u>	<u>Cost Estimate</u>
Launch costs to GEO	\$1.02B
Cable production	\$390M (100 %contingency.)
Spacecraft	\$507M (100 %contingency.)
Climbers	\$367M
Power beaming stations	\$1.5B
Anchor station	\$120M
Tracking facility	\$500M
Other	\$430M
Contingency (30%)	\$1.44B
TOTAL	~\$6.2B

# QUELQUES PROBLÈMES POTENTIELS

## ↳ Bilan financier :

**Attention : valeurs affichées par les promoteurs !**



	Rockets	First Space Elevator	Future Space Elevator
Vibrations	Multiple "G's"	Negligable	Negligable
Launch Capacity	LEO: 20 tons GEO: 5 tons Moon, Mars: ??	13 tons	Hundreds of tons
Annual Capacity	---	1500 tons	30,000 tons / elevator
Envelop Restrictions	Meters on a side	None	None
Cost	LEO: \$2k - \$10k GEO: \$20k - \$40k Moon, Mars: ???	Operating: \$100/lb	Operating: \$20/lb
Safety Issues	Propellants, re-entry, launch environment	Ribbon breakage, climber malfunction	---

# SYNERGIES

## Très nombreuses activités connexes :

### Travail important sur la transmission d'énergie à distance :

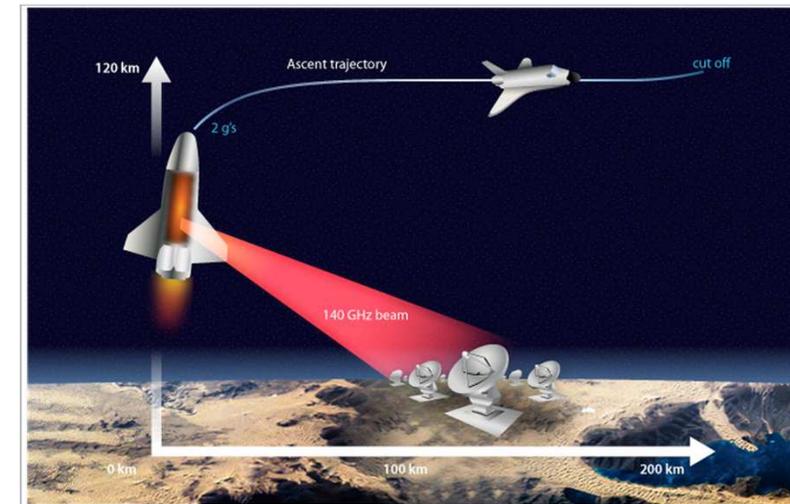
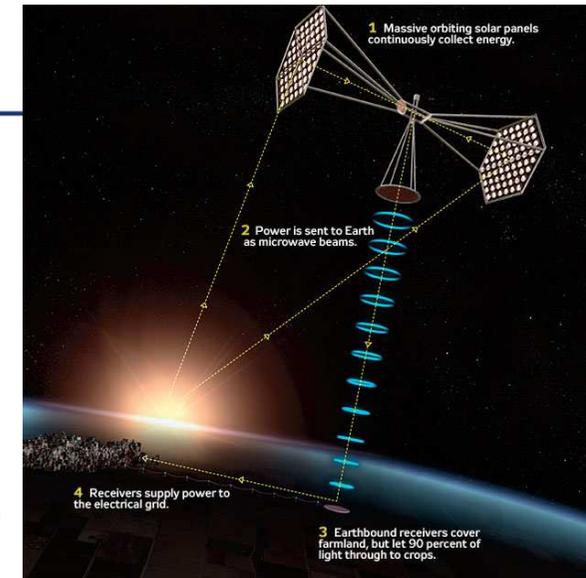
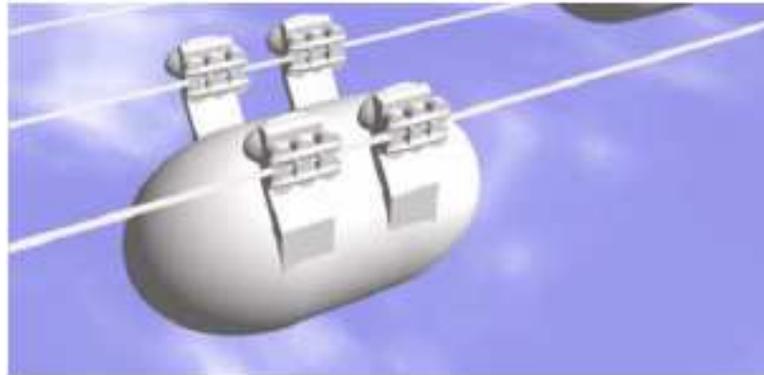
- Très nombreuses start-ups suite aux travaux sur l'Ascenseur
- Intervention robotique en milieu dangereux avec déport de la source d'énergie
- Travaux proches de ceux des SPS (Space Power Stations)
- Concepts récents similaires sur les lanceurs (Escape Dynamics)

### Travail significatif sur le transport ferroviaire

- Etude de funiculaires utilisant le même procédé de propulsion
- Propositions en cours sur les téléphériques ou assimilés

### Techniques de déploiement de câbles

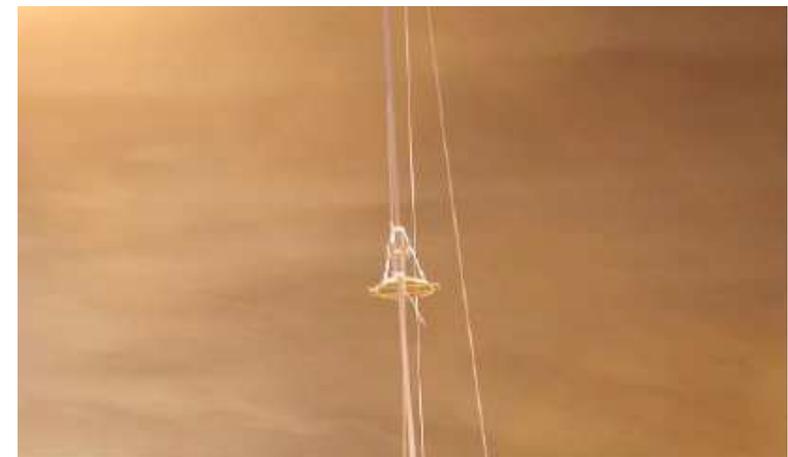
- Utilisation pour la réparation des suspentes de ponts





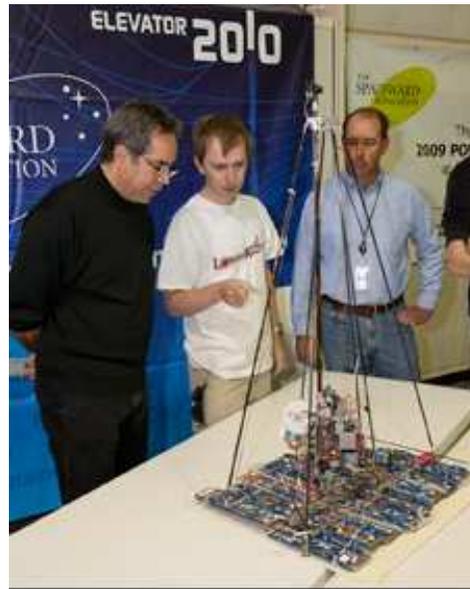
↪ **Très nombreuses activités connexes :**

↪ **Motivation extrême au niveau étudiants :**



↪ **Très nombreuses activités connexes :**

↪ **Motivation extrême au niveau étudiants :**



## EUSEC

European Space Elevator Challenge

make it ecology-minded  
make it efficient  
make it european!

An elevator to the stars?  
Is that really possible?

The concept is pretty easy. An elevator drives on an extremely tear-resistant tether at least 48000 km up to the space. At the top of the tether a satellite or a space station is placed. The tether is permanently strained by the balance of the gravitation and the centrifugal forces.

Get in touch with us and participate in the first European Space Elevator Challenge in June 2011!

Further information at: [eusec.warr.de](http://eusec.warr.de)

WARR Space Hubnet TUM Klaus Repenstorfer Stiftung lt

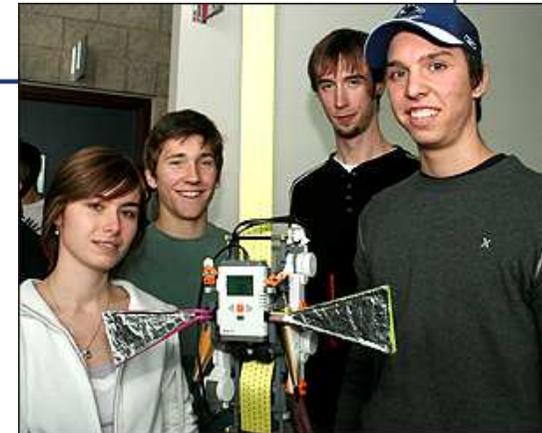
# SYNERGIES

↪ **Très nombreuses activités connexes :**

↪ **Motivation extrême au niveau jeunes :**



Detail of climber DC drive and mounted traction wheel



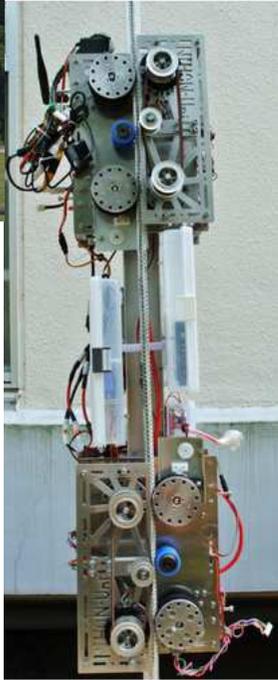
The winning team (L-R): Agnes Soos, Paul Boone, Zachary Dunnewold and Michael Sterling watch their robot climb the ribbon. / Photo by Ken Bendiktsen



# SYNERGIES

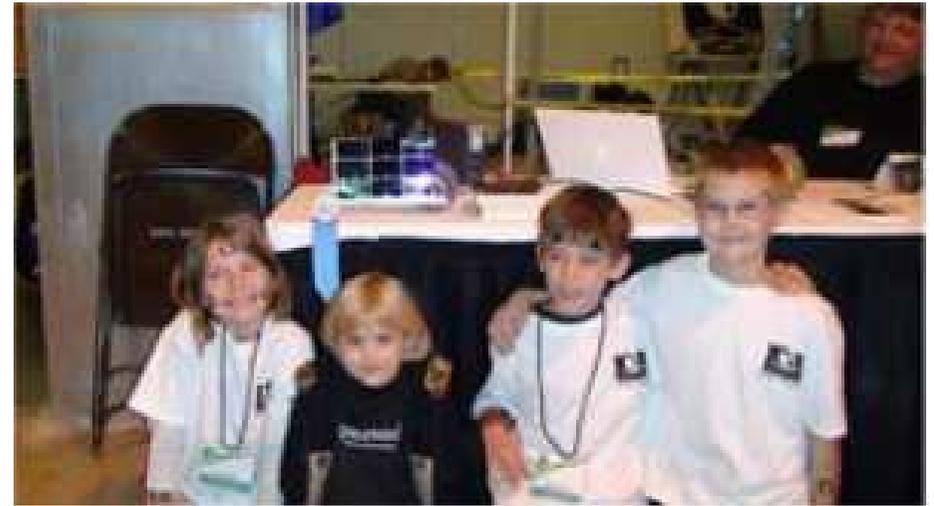
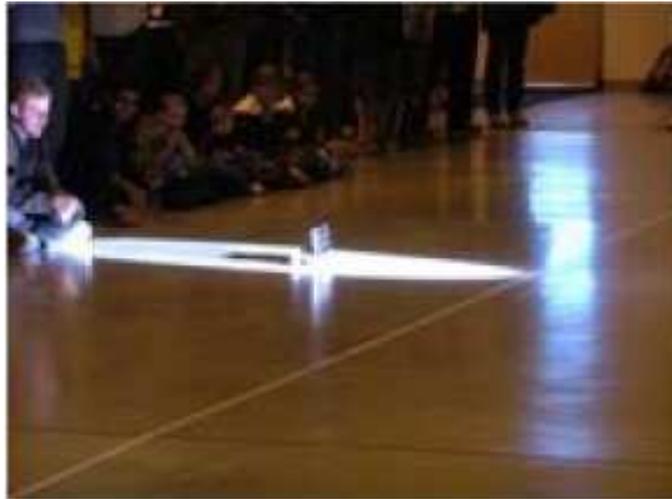
## ↳ Très nombreuses activités connexes :

- ↳ Motivation extrême au niveau jeunes :
  - European Space Elevator Challenge à TU Munich



## ↳ Motivation extrême au niveau jeunes :

### ↳ Compétitions de voitures propulsées par faisceau lumineux :



# CONCLUSION

## ↳ Faisabilité technique :

- Mise au point de nanotubes, caractéristiques réelles ?
- Gros progrès en cours avec les graphènes
- Nombreuses études autour de l'Ascenseur Lunaire
- Transfert longue distance d'énergie par Laser ?
- Dynamique du câble ?
- Environnement externe

↳ Pas de point résolument bloquant identifié

- Evitement ou tenue aux impacts de débris orbitaux

↳ Vrai problème, pas de solution identifiée

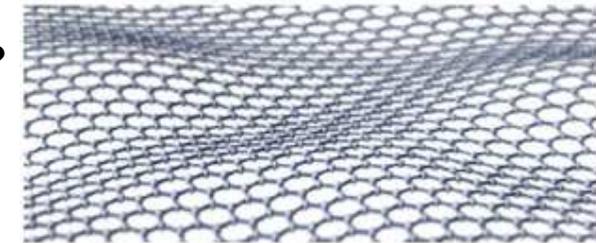
## ↳ Faisabilité et intérêt économique :

- Intérêt limité à GEO et exploration
- Bilan financier non crédible

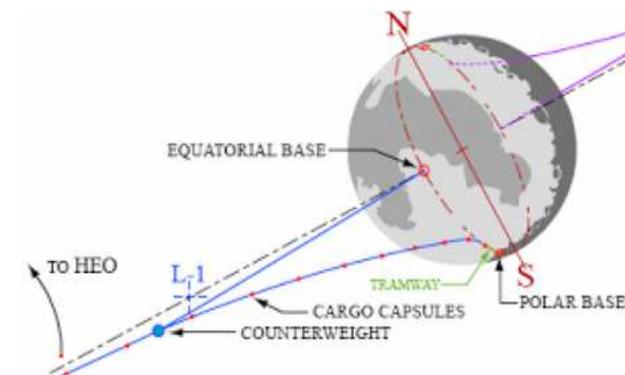
↳ Pas d'analyse sérieuse à ce jour

## ↳ Alors, cette porte vers les étoiles s'ouvrira t'elle un jour ?

« L'Ascenseur Spatial se fera 50 ans après que les derniers rieurs se seront tus »



Graphene:  
2D material



*Sir Arthur C. Clarke*

---

# Merci de votre attention

## Des questions ?

[Christophe.bonnal@cnes.fr](mailto:Christophe.bonnal@cnes.fr)

