

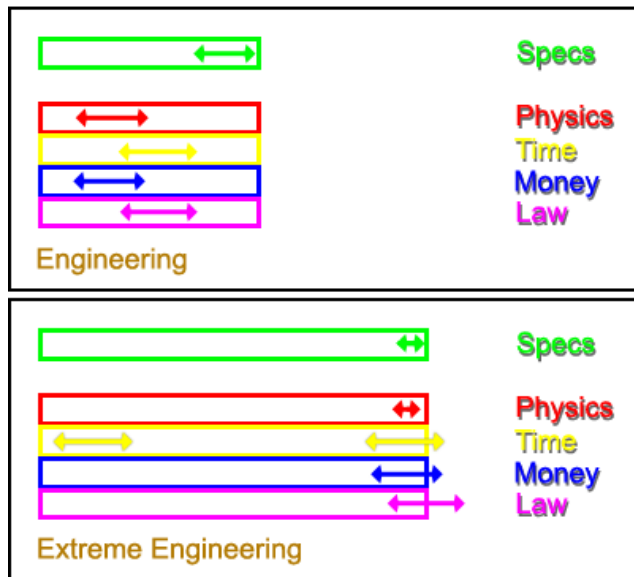
# EXTREME ENGINEERING



HELMO GRAMME  
B. MICHEL  
2011-2012

## Introduction

L'art de l'ingénieur est celui du compromis entre coûts, performances et risques physiques et juridiques. Usuellement, la faisabilité et le prix de revient sont des éléments très importants mais dans certains cas extrêmes, ces contraintes sont presque ignorées et la performance technique prend le pas sur tout le reste. L'ingénieur doit malgré tout trouver le meilleur compromis, mais ce n'est plus celui que l'on imagine habituellement. On approche alors de beaucoup plus près les limites théoriques des matériaux et des procédés connus et, surtout, on doit remettre en questions nombre d'idées reçues. De plus, en pratiquant l'engineering de l'extrême, il n'y a plus de références sur lesquelles se baser. L'ingénieur se retrouve seul face à son problème, armé de ses connaissances de base et de son meilleur outil: son cerveau !



Dans les chapitres suivants, nous étudierons divers compromis où certaines des contraintes sont situés dans les zones extrêmes : paramètres physiques tels que résistance des matériaux, délais (qui peuvent être serrés ou extrêmement allongés), coûts (même très ambitieux, tout projet a un plafond à respecter) et aspects juridiques : certaines actions sont interdites par la loi, d'autres ne sont couvertes par aucun texte légal.

## **Ch1 : Les haveuses 'Bagger 288' et '293'**

Le visiteur s'approchant de la mine à ciel ouvert de Garzweiler (Rhénanie du Nord-Westphalie) par l'ancienne route nationale 1 découvre un spectacle saisissant. À l'avant-plan, semblables à des dinosaures, de gigantesques haveuses fouillent le sol, tandis qu'à l'arrière-plan, les centrales électriques tournent à plein régime. Nous sommes au cœur du bassin houiller de l'ouest de l'Allemagne.

La mine n'est accessible qu'en véhicule tout-terrain. Dès l'abord, on se trouve au pied de veines de lignite de plusieurs mètres de haut que viennent dévorer les pelles des puissantes haveuses. Presque aussi haute que les tours de la cathédrale de Cologne, les haveuses numéro 288 et 293 sont les plus grandes du monde. La roue-pelle du 288 a une hauteur équivalant à celle d'une maison de sept étages (21,6 mètres de diamètre). Le constructeur est la société Takraf/Tenova.

### **D'immenses gisements**

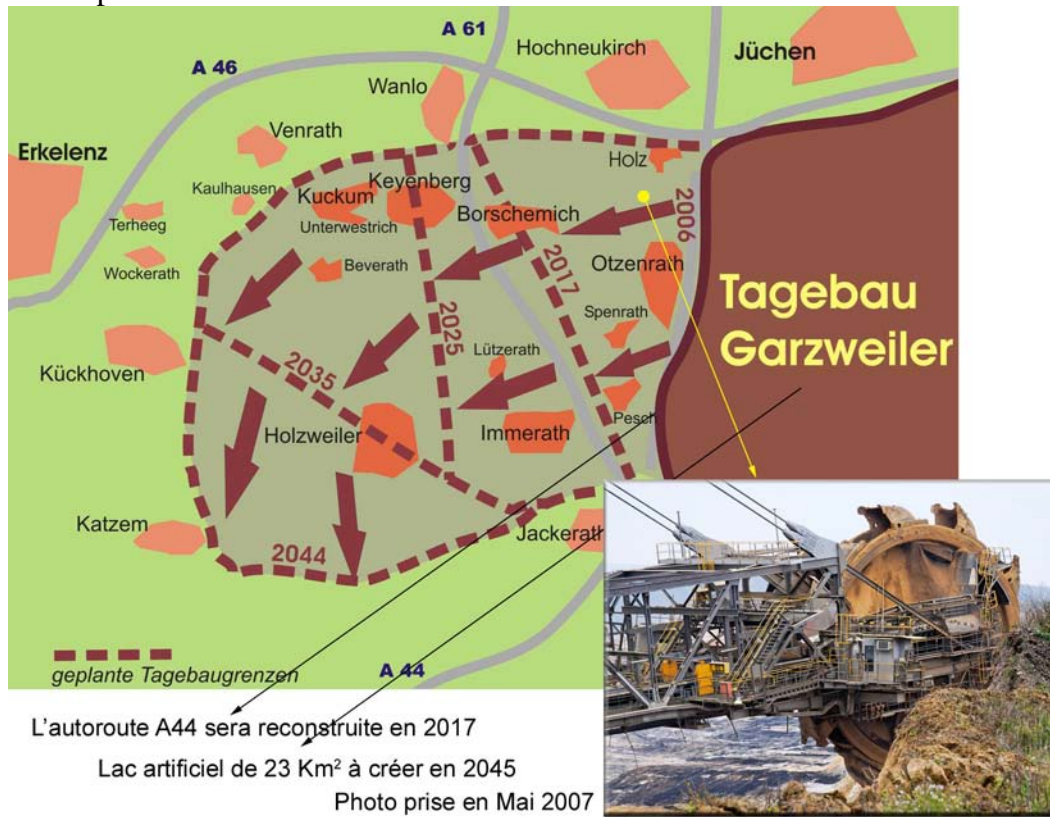
Chaque année, les huit haveuses géantes du site de Garzweiler-Hambach extraient 40 millions de tonnes de lignite destinées aux centrales électriques qui desservent les conurbations de Cologne et de Düsseldorf. A l'ouest de Cologne s'étendent, sur une surface de 2.500 km<sup>2</sup>, des gisements de 55 milliards de tonnes de lignite, vieux de 12 à 20 millions d'années et exploités depuis le XVIIIe siècle. Leur pouvoir calorifique correspond à celui des gisements de pétrole d'Irak et d'Irak.

Les déblais et le lignite sont acheminés respectivement vers les terrils et les centrales par des stéréoducs qui parcourent la mine sur plusieurs kilomètres. Les lignes électriques et de commande des excavateurs suivent le tracé de ces convoyeurs. Les faisceaux de câbles aboutissent au poste de commande où les collaborateurs de RWE Power dirigent l'extraction du lignite. Seule source d'énergie fossile capable de concurrencer le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, les réserves de lignite allemandes sont loin d'être épuisées. Après Garzweiler I, l'ouverture d'un deuxième site, Garzweiler II en 2006 (48 Km<sup>2</sup>) a permis de garantir l'approvisionnement des générations futures avec un planning s'étendant actuellement jusqu'à 2044 et qui implique la destruction d'une douzaine de villages. L'installation des infrastructures nécessaires est terminée et l'exploitation est en cours sur le premier front de taille.

Les mines de lignite comptent aussi parmi les plus grands trous creusés au monde. Le fond de la mine de Hambach est à 293 mètres sous le niveau de la mer; c'est un trou de 8500 hectares et 399 mètres de profondeur par rapport au sol environnant (en 2007, mais il grandit tous les jours...)!

**Pourquoi?** « L'Allemagne a peu de réserves énergétiques propres et dépend donc fortement des importations. Le charbon et le lignite comptent pour 47% de la production domestique d'électricité (chiffres de 1999), le nucléaire fournit 30%, le gaz naturel 14%, le pétrole 2% et les sources renouvelables (hydroélectricité, éolien) environ 7%. Le pétrole représente, lui 41% de la consommation». De façon surprenante, même si le charbon est la principale source d'énergie locale en Allemagne, le pays en importe malgré tout. L'Allemagne est le plus gros consommateur d'énergie d'Europe. Elle est aussi classée 4<sup>ème</sup> au monde en capacité nucléaire, derrière les USA, la France et le Japon.

A cause de son faible pouvoir énergétique et de son poids, le lignite doit être consommé sur place. On a donc installé les centrales thermiques à côté des mines à ciel ouvert. Les résidus solides (cendres) des centrales sont rejetés sur le site d'exploitation quand le niveau plancher de l'exploitation est atteint.



**Pollution** : Même si les centrales modernes sont assez performantes, les rejets d'eau de refroidissement et les fumées ( $\text{CO}_2$  principalement) sont fort importants, mais restent localisés au site de production.

**Derrière le gigantisme, la haute technologie** : Au poste de commande, le contraste est flagrant, et le visiteur se rend compte que les spectaculaires engins, aux gestes si lents, sont pilotés par des processus complexes et dynamiques entièrement informatisés, où télécommunications et transferts de données jouent un rôle prépondérant. A l'avenir, les haveuses pourront même être commandées à distance par des signaux GPS; les installations de transport se repositionnant automatiquement. Des câbles à fibres optiques amèneront les données aux différents engins. En raison de l'exiguïté des postes de commande, les commandes sont ramenées sur quelques ordinateurs de contrôle.

Chacun des 12 godets de la roue de 21 mètres de diamètre extrait environ 1 à 2 tonnes de minerai en une passe. Le front de taille des machines est haut de 20 à 40 mètres. Le taille enlève tout le paysage sur une profondeur importante, faisant disparaître au passage des routes, des fermes et même parfois des villages entiers. La nappe phréatique a aussi subi de graves altérations ; les villages avoisinants doivent s'approvisionner en eau à de grandes distances car la nappe a baissé de plusieurs dizaines de mètres. Malgré cela, le site minier doit être en permanence drainé par pompage pour être maintenu sec.

## La machine

Elle est constituée de deux parties : la partie 'creusement' avec une roue à godets au bout d'un bras articulé. Un second bras sert de contrepoids à l'ensemble. Cette partie est la plus lourde. Elle est reliée à la partie arrière par un long convoyeur à lignite qui évacue la roche extraite par la partie frontale vers une voie de chemin de fer où attendent les trains qui conduisent aux centrales électriques. Sous le convoyeur se trouvent aussi les tuyaux qui amènent le mazout aux moteurs principaux de la machine qui pompe ainsi directement son carburant dans un réservoir amené par chemin de fer.

## Les déplacements

En 2001, à la fin de l'exploitation du site de Bergheim par l'exploitant *RWE Rheinbraun AG*, La haveuse 288 a été déplacée de l'exploitation à ciel ouvert de Hambach à celle de Garzweiler et la 259, plus ancienne, de Bergheim à Hambach. Les deux excavatrices ont traversé l'autoroute A61. La durée du transfert a été de 2 semaines.

En 2004, la machine 755 est passée de Bergheim à Garzweiler et les 260, 744 et 931 de Garzweiler à Hambach, sur à peu près le même trajet. Le démontage, transport et remontage des machines auraient été plus coûteux et plus difficile que de simplement traverser la campagne à travers champs. Les déplacements ont coûté environ 7 millions € au total, une paille à côté du prix des machines déplacées, dont le coût total dépassait les 300 millions €

Les deux monstres (288 et 259) ont dû franchir beaucoup d'obstacles durant leur voyage vers leurs nouveaux lieux de travail. Les routes fédérales 477 et 55, l'autoroute 61, la ligne de chemin de fer Neuss-Horrem, la rivière Erft et plusieurs routes. Le moment de ces traversées ont du être choisis en accord avec les autorités compétentes de telle sorte que les dérangements soient minimisés. Les usagers des voies de communications ont du être déviés plusieurs jours, voire même parfois plus de 2 semaines. Le 10 février 2001, la traversée de l'autoroute a attiré de nombreux curieux près de Bergheim. Pour protéger la chaussée des dommages, des bulldozers ont étalé 2.000 mètres cube de gravier et de remblais sur le lieu de passage de 60 mètres de large. L'autoroute est restée bloquée environ pendant 14 heures, pendant lesquelles le passage réel n'a duré que 20 minutes : La préparation et le dégagement de la voie ont pris plus de temps que la traversée elle-même.

De même, les rails de la liaison ferroviaire Neuss-Horrem sont couverts de 120 mètres cube de remblai pour former un passage un mètre au-dessus des voies. Les rampes d'accès au niveau des voies ont demandé plus de 1 000 mètres cube de gravier de part et d'autre des voies. La rivière Erft a été traversée en deux endroits. Pour cela le cours de l'Erft a été détourné dans une série de tubes d'acier de 1,3 mètre de diamètre. Le lit de fleuve lui-même a ensuite été comblé avec de grosses pierres. Les travaux de préparation et de rétablissement du site ont duré environ six jours. Les lignes aériennes à haute tension ont du être démontées devant les excavatrices. Cela en accord avec les fournisseurs d'énergie, qui ont du dévier l'alimentation en courant de leurs clients sur des réseaux de diversion. Ce fut le cas pour les lignes parallèles à l'autoroute 61.

Au total, près de 200.000 mètres cube de gravier et de terres ont été apportés par train sur les sites des obstacles à franchir. De tels trajets n'étant possibles que sur des chenilles, celles-ci avaient été installée d'origine sur les machines en prévision de ces déplacements. En fait, la pression au sol des ces immenses monstres est inférieure à celle des bulldozers et des camions

tout-terrain sur pneus. Le seul véhicule sans chenilles qui a pu constamment accompagner les haveuses, est une voiture spécialement équipée pour dérouler et traîner le câble d'alimentation en courant des moteurs de traction. Son train roulant avait été remanié afin qu'aucun sillon profond ne naisse sur les terrains parcourus.

## Les incidents

En 1974, une des excavatrices de lignite est restée bloquée en bord de taille et a menacé de tomber. Le sauvetage de machine le plus coûteux de l'histoire Allemande s'en est suivi. En 2001, un autre incident a vu une haveuse coincée par des déblais tombés de sa propre bande transporteuse. Elle a finalement été dégagée par des bulldozers classiques. On a dû remplacer toutes les chenilles de la partie principale et une bonne partie de l'hydraulique de contrôle associée, mais cela a pu se faire sur place sans trop de pertes de temps.

A noter aussi : un bulldozer en panne près du bord supérieur de l'exploitation a été avalé par erreur par la 293 et précipité 30 mètres plus bas. Heureusement, le chauffeur n'était plus à bord !

## La restauration du site

La mine de Hambach, la plus grande, avec ses 8.500 hectares et 399 mètres de profondeur sera transformée en lac entre 2040 et 2080, après la fin de l'exploitation. Le site deviendra alors la plus grand et le plus profond lac d'Allemagne. Ce lac représente pour l'entreprise minière une façon très peu onéreuse de remplir ses obligations de remise en état paysagère et de renaturation, étant donné qu'alors la quantité de déblais à remobiliser sera moins importante, et augmentera encore la rentabilité de cette activité, par ailleurs soutenue par des subventions octroyées par l'État au titre de préservation du paysage. À partir de 2045 seront ainsi détournés chaque année, pendant environ 40 ans, quelque 60 millions de mètres cubes d'eau du Rhin vers la cuvette.

Le lac aura une profondeur de 185 m et une superficie de 23 km<sup>2</sup> (environ le tiers du site creusé), et contiendra 2 milliards de m<sup>3</sup> d'eau. Afin d'éviter que le futur lac ne vienne à s'acidifier, de la chaux est dès à présent ajoutée aux déblais. On voit d'ailleurs très facilement du ciel et sur Google Earth les zones blanches où la chaux est déposée.

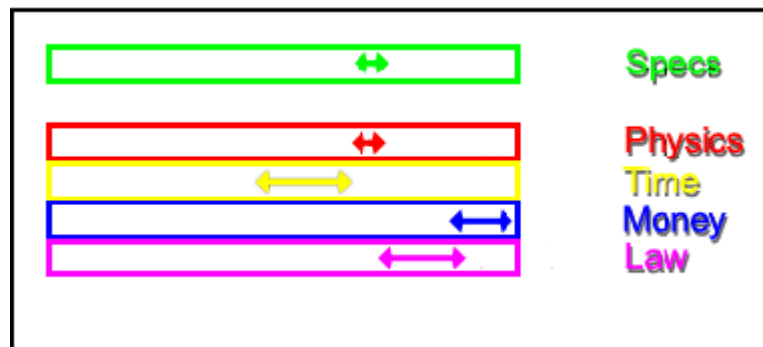
## Les aspects financiers et légaux

Des engins de cette taille ne pouvaient qu'être partiellement construits en usine et une bonne partie de l'assemblage final s'est donc fait sur site. En conséquence, le temps de construction de la machine a atteint 2 ans et demi et son coût est de l'ordre de 100 millions d'euros.

Vu la taille de l'engin, il est exclu de la faire circuler sur route ou de la démonter. Donc pour le transfert – heureusement rare- entre les sites de production, ces machines circulent tout simplement tout droit à travers la campagne. On se contente de tout écraser au passage et de réparer après. Evidemment, il faut faire des aménagements, comme démonter des lignes à haute tension, combler des fossés, recouvrir les autoroutes et leur talus de quelques mètres de terre, etc. Mais, au final, ça revient bien moins cher que de démonter et reconstruire les machines. Le dédommagement des parties lésées fait l'objet de discussions et de contrats préalables, y compris avec les autorités, le ministère des routes, etc. Les frais d'avocats et de justice peuvent représenter plus de dix pourcents du prix du déplacement.

## Caractéristiques techniques

Nom :	MAN TAKRAF RB293 (Bagger 288)	MAN TAKRAF RB293 (Bagger 293)
Année de construction	1978	1999
Equipage	5 hommes	5 hommes
Poids total à vide	12.840 Tonnes	13.500 Tonnes
Hauteur maxi	96 mètres (30 étages)	96 mètres
Longueur	200 mètres	225 mètres (2,5 terrains de foot)
Vitesse maxi	0,6 km/h (10 m/minute)	0,6 km/h
Diamètre de la roue	21,6 mètres	21,6 mètres
Nombre de godets	18	18
Volume des godets	6,6 m <sup>3</sup>	6,6 m <sup>3</sup>
Nombre de chenilles	12 (8 au train avant, 4 à l'arrière)	12
Pression au sol	17.1 N/cm <sup>2</sup>	17.9 N/cm <sup>2</sup>
Rayon de braquage	50 mètres	50 mètres
Capacité	240.000 m <sup>3</sup> /jour	240.000 m <sup>3</sup> /jour
Puissance totale	16.560 kW	17500 kW
Puissance roue	4 x 840 kW	4 x 880 kW
Prix estimé	80.000.000 €	100.000.000 €
Durée de l'étude	30 mois	-
Durée construction	30 mois	-



Les compromis de la '293'

Comme on le voit, et malgré son gigantisme, ce type de machine ne déborde pas des limites accessibles des paramètres, mêmes si certains comme le prix, frôlent les maxima envisagés.

## Quelques images



Vue générale du site de Garzweiler I

Le train de chenilles principal  
(16 chenilles de 3m x 14 m de long)Une machine en cours de fonctionnement  
sur le site de Garzweiler IRemarquer le travailleur debout à côté  
de la roue à godets.Traversée d'un champ puis d'une route  
pour passer d'un site à l'autre.





Une des deux centrales de Grevenbroich qui brûlent le lignite.



Briquette de lignite



Le plus gros véhicule terrestre jamais construit pèse 13.500 tonnes à vide et mesure 225 mètres de long.

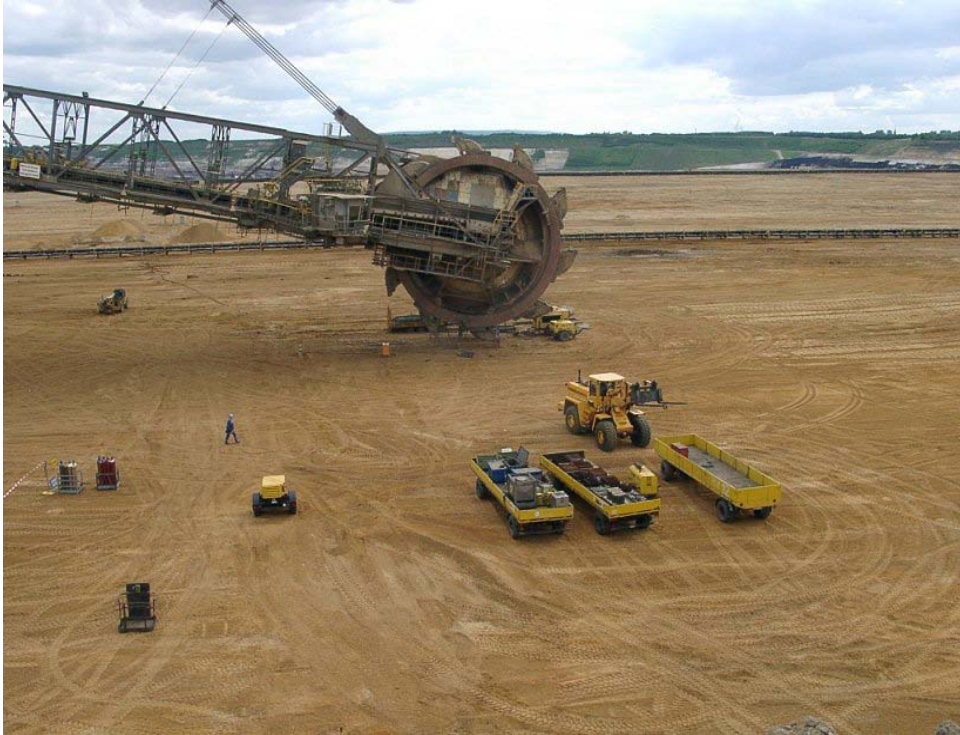
Le site web du constructeur est <http://www.takraf.com>



Travail de jour comme de nuit pour arriver à extraire 150.000 M3 de lignite par jour.



Carte du site de Garzweiler I  
(largeur carte = 6 km)



La roue d'une des 'petites' haveuses (bagger 259) avec seulement 10 godets de 2.6 m<sup>3</sup>.  
Le site entier compte une dizaine de machines, de 7.800 à 13.500 tonnes.



Une des deux plus grosses du monde : la haveuse Bagger 288 au travail

## CH2 : Immeubles et ponts de grande taille

Les immeubles de grande hauteur et les immenses ponts modernes sont le fruit de nombreux compromis au point de vue de la résistance des matériaux, de la résistance aux tremblements de terre et aux vibrations dues au vent. Mais ils doivent aussi être lumineux, aérés, accessibles et construits sans perturber leur environnement. Les coûts très importants de ces structures doivent aussi être gardés sous des seuils tolérables. De nombreuses techniques ont été mises au point uniquement pour ces grands monuments comme le béton hyper-fluide pour faciliter la mise en œuvre ou les masses stabilisatrices suspendues pour amortir les vibrations.



### Les gratte-ciels

Le terme « Gratte-ciel » date de 1880, date des premiers immeubles de haute taille aux USA. Mais dès avant les gratte-ciels, on construisait déjà des tours (voir ci-dessus les tours médiévales de San Gimignano, Italie). En pierre, elles avaient des murs épais et les pièces étaient sombres et étroites car trop de fenêtres auraient affaibli la structure portante.



Ensuite, les cathédrales gothiques apparaissent. Une structure plus légère, suivant les lignes de force montre clairement les progrès en connaissance des matériaux des architectes. Les arcs-boutants supportaient les murs, permettant de les ajourer avec de larges vitraux.

Les gratte-ciels modernes sont apparus avec l'acier amené par la révolution industrielle. Le HIB (Home Insurance Building) de Chicago, haut de 10 étages, était le premier building à armature métallique avec une structure de colonnes verticales et de poutres transversales. Mais, même avec des fenêtres, les espaces libres entre les colonnes ne laissaient place qu'à des pièces étriquées. L'invention de l'ascenseur en 1857 a rendu utilisables les grandes constructions qui, sans lui, ne pouvaient en pratique dépasser cinq à six étages.



Avec la taille, les immeubles devaient aussi affronter les vents de plus en plus forts en altitude. Les gratte-ciels d'aujourd'hui, avec plus de 500 mètres de haut, supportent des vents 50 fois plus forts qu'un immeuble de 50 mètres des années 1940.

Les technologies modernes comme le calcul par éléments finis et les simulations informatiques, permettent d'affronter les éléments, vents et tremblements de terre avec une variété de style inconnue auparavant. Les immeubles les plus hauts du monde comme le *Taipei 101*, inauguré en 2004 ou le *Burj Khalifa* le démontrent. Ainsi, les tours Petronas (page précédente) sont connectées par une passerelle au niveau du 42<sup>ème</sup> étage, une solution qui améliore la circulation et la sécurité des occupants.

## Les plus hautes structures du monde

Le Burj Khalifa de Dubaï est le plus haut immeuble du monde. Terminé en Janvier 2010, il mesure 828 mètres. A part le *Burj Khalifa*, les plus hautes structures érigées à ce jour sont des tours de télécommunication. Viennent ensuite nombre de tours d'observation avec ou sans accès public, puis les grands immeubles habitables. Nous en avons relevé quelques-unes parmi les plus hautes répertoriées :

Tours	Localisation	H (m)	Usage	Notes
KTHI TV-tower	Fargo, USA	629	TV	World record! Nom changé en KVLV-TV
KXJB-tower	Galesberg, USA	628	TV	
KZFX TV-tower	Lake Jackson, USA	615	TV	
Guangzhou TV	Guangzhou, China	611	TV	Finie en 2009
WITN-tower	Grifton, USA	610	TV	
KATV-tower	Jefferson County, USA	610	TV	
?	Devers, USA	607	TV	
Senior Road FM Site	Houston, TX, USA	603	TV	
WFMY TV-Tower	Greensboro, USA	583	TV	
Coweta TV-Tower	Coweta, USA	582	TV	
CN Tower	Toronto, Canada	554	Observation + TV	
Stratosphere Tower	Las Vegas, USA	325	Observation + Restaurant	Record de catégorie

Immeubles	Building, city	Year	Etag-es	Hauteur	
				m	ft
1.	Burj Khalifa, UAE (Architecte : Adrian Smith)	2010	162	828	2716
2.	Taipei 101, Taipei, Taiwan (architecte:C.Y.Lee)	2004	101	509	1,670
3.	Petronas Tower 1, Kuala Lumpur, Malaysia	1998	88	452	1,483
4.	Petronas Tower 2, Kuala Lumpur, Malaysia	1998	88	452	1,483
5.	Sears Tower, Chicago	1974	110	442	1,450
6.	Jin Mao Building, Shanghai	1999	88	421	1,38

					1
7.	Two International Finance Centre, Hong Kong	2003	88	415	1,362
8.	CITIC Plaza, Guangzhou, China	1996	80	391	1,283
9.	Shun Hing Square, Shenzhen, China	1996	69	384	1,260
10.	Empire State Building, New York	1931	102	381	1,250
11.	Central Plaza, Hong Kong	1992	78	374	1,227
12.	Bank of China, Hong Kong	1989	72	369	1,209
13.	Emirates Tower One, Dubai	1999	54	355	1,165
??	Tommy Landau project, Abu Dhabi	2015	224	>1000 ?	

Ci-dessous, la Stratosphere Tower de Las Vegas .



## La structure portante

En rassemblant les colonnes porteuses et leurs poutres transversales dans le noyau central des immeubles, les ingénieurs ont créé un noyau solide, sorte de colonne vertébrale de l'immeuble, capable de résister aux vents les plus violents. On emploie cette colonne centrale comme cages d'ascenseur et pour le passage des câbles, tuyaux et cheminées. Ce design autorise une grande liberté de conception dans les vastes plateaux restants.

Dans les immeubles les plus modernes comme le Burj Khalifa, le Taipei101, la Sears Tower et les tours Petronas, les ingénieurs ont déplacé la structure portante en périphérie, y compris la triangulation. Ceci crée une sorte de tube ajouré, d'une extrême rigidité en flexion et torsion, d'une résistance bien supérieure à celle de la solution conventionnelle pour un poids inférieur.

La triangulation des rectangles formés par les colonnes et les poutres permet une rigidité de flexion et de torsion bien plus importante qu'avec un simple quadrillage hyperstatique. Par exemple, le John Hancock Center, 16<sup>ème</sup> plus haut immeuble du monde à ce jour, possède cinq jeux d'énormes diagonales sur chacune de ces quatre faces. L'avantage de poids est notable : comparons l'Empire state building de 102 étages qui pèse 197 Kg/m<sup>2</sup> et le John Hancock de 100 étages qui ne pèse que 139 Kg/m<sup>2</sup>.



## Les oscillations dues au vent

La limite de stabilité des structures légères modernes est souvent celle imposée par le confort des occupants lors de grands vents, bien avant d'atteindre celle de la résistance des matériaux portants. Ceci oblige la présence dans tous les grands immeubles d'amortisseurs de mouvements latéraux. Les vibrations dues aux vents et aux tremblements de terre en imposent aussi l'usage, mais dans une mesure moins importante.

Les exigences de confort sont le plus souvent plus difficile à satisfaire que celles des règlements anti-sismiques et celles du simple calcul de résistance aux charges.

### Etude de cas : Les tours Petronas

Le projet financé par le pétrolier malais Petronas qui donne son nom à l'ensemble est constitué de deux tours identiques liées par une passerelle. Les tours sont situées sur un ancien champ de courses à Kuala-Lumpur en Malaisie et sont hautes de 452 mètres. La section des tours est en forme d'étoile à huit branches, forme proche du cercle donnant un volume quasi-cylindrique et donc un excellent rendement volume/poids.



### Quelques faits

- Le coût des deux tours était de 1,6 milliards de \$,
- 770.000 M<sup>2</sup> de surface vouée au shopping et aux loisirs, un parking souterrain pour 4.500 voitures, un musée, une salle de concert, une mosquée et un centre de conférence,
- le temps d'accès au sommet depuis le parking souterrain est de 90 secondes.
- les deux tours ont 88 étages et une passerelle flexible de liaison au 42<sup>ème</sup> étage,
- elles ont nécessité 36.900 tonnes d'acier et 32.000 fenêtres.

### TMD

Les études de stabilité sur les tours Petronas ont notamment conduit à l'installation d'amortisseurs par masse de contre-réaction passive TMD (Tuned Mass Damping) à l'intérieur des jambes de support de la passerelle. La firme RWDI<sup>1</sup> a servi de consultant à ce projet comme à de nombreux autres.

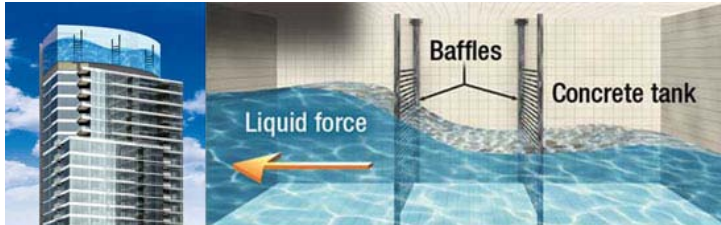
A droite, un TMD dans le building Taipei 101. Cet immeuble de 509m avec ses antennes a son toit à 448m du sol. Il contient 3 TM, sphères dont la plus grosse mesure 5.5 mètres de diamètre en acier pour un poids de 662 tonnes et située au 90<sup>ème</sup> étage (sur 101 comme l'indique le nom



<sup>1</sup> RWDI : Rowan Williams Davies & Irwin, Inc. Est un bureau d'études canadien ([www.rwdi.com](http://www.rwdi.com))

de l'immeuble). L'oscillation naturelle est ainsi réduite de 40%.

L'eau est aussi parfois utilisée comme amortisseur de vibrations dans les gratte-ciels. Deux chambres contiennent une masse de liquide communiquant à travers un réseau d'obstacle freinant son déplacement. L'exemple ci-contre est le building antisismique "One Rincon Hill" de San Francisco (195m, 60 étages, le plus haut immeuble d'habitation de San Francisco).



## Le Burj Khalifa à Dubaï

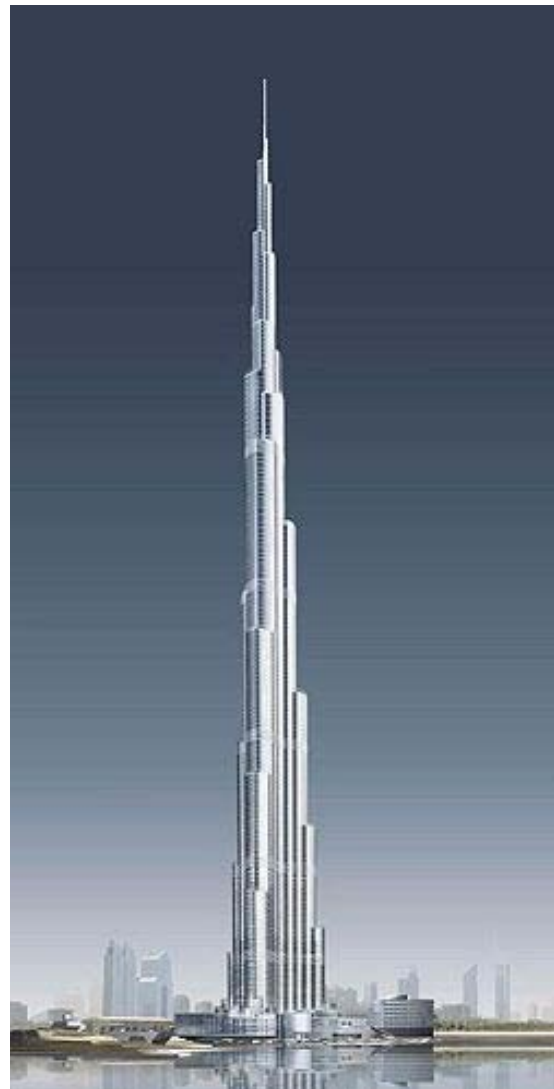
La construction du *Burj Khalifa* a débuté en Septembre 2004 et s'est terminée le 4 Janvier 2010 à une hauteur de 828 mètres ([www.burjdubaiskyscraper.com/](http://www.burjdubaiskyscraper.com/)).

Elle doit former le cœur d'un nouveau quartier : *Downtown Burj Dubai*. La tour est l'œuvre des architectes [Skidmore, Owings and Merrill](#) de [Chicago](#) et en particulier, d'Adrian Smith. Elle est construite par un consortium dirigé par l'entreprise sud-coréenne [Samsung](#).

160 étages, 35.000 occupants, 2/3 de la hauteur sont en béton, le dernier tiers est une structure en acier.

Le gratte-ciel aura nécessité l'équivalent de 330 000 m<sup>3</sup> de béton armé, 39 000 tonnes de poutres en acier, 142 000 m<sup>2</sup> de verre ainsi que 22 millions d'heures de travail pour tous ceux ayant contribué à son édification. Plus de 5 000 ingénieurs, spécialistes et ouvriers ont travaillé sur le site du projet.

La tour Burj Khalifa est principalement construite par des ingénieurs et travailleurs immigrés pakistanais, indiens, bengalis, chinois et philippins. Des articles de presse rapportent que des charpentiers qualifiés travaillant sur le site gagnaient à peu près 7,60 dollars américains soit 5,50 euros par jour et que les ouvriers gagnaient 4 dollars américains soit 2,85 euros.



La **Burj Khalifa** ou **tour de Dubaï**  
(en [arabe](#) : [برج خليفة](#)),



## Projets futurs



On peut citer la « Freedom Tower » renommé en "One World Trade Center" de New-York, prévue pour 541 m environ (vue en Septembre 2010 ci-dessous, à gauche le projet tel que terminé), ce qui en fera le plus haut immeuble des USA.



## Burj Mubarak al Kabir

Le suivant sur la liste des hauts immeubles est le *Burj Mubarak al Kabir*, à terminer au plus tôt en 2016 au Koweït, 1001 mètres de haut (dernier étage, hors antennes éventuelles), environ 200 étages, surface occupable de 390.000 m<sup>2</sup>, Architecte : Eric Kuhne (Londres). Coût estimé : 7,37 Milliards US\$. Design sous forme de trois tours interconnectées pour raison de stabilité au vent. Chacune des trois tours se tire-bouhonne sur elle-même de 45° et possèdent des ailerons de déflexion au niveau des arêtes. Il sera accompagné d'une trentaine de 'petits' immeubles de 30 étages.

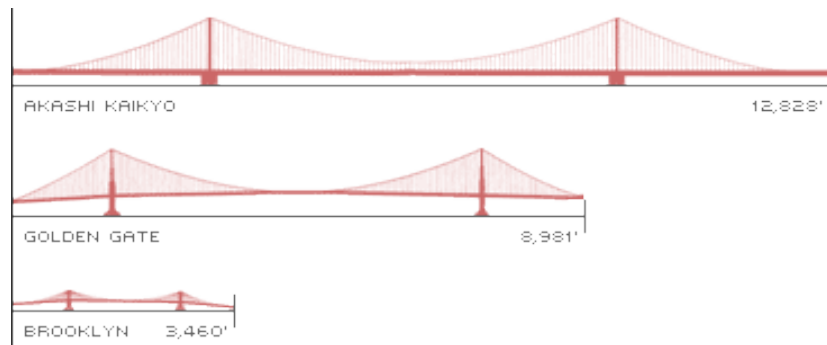
## Autres

- *Jeddah Kingdom Tower* en Arabie Saoudite, une tour de 1000 mètres de haut conçue par la groupe Belge Besix, qui a travaillé aussi sur le Burj Khalifa.
- *Murjan Tower* à Bahrain, une tour de 1022 mètres.

## Les ponts suspendus

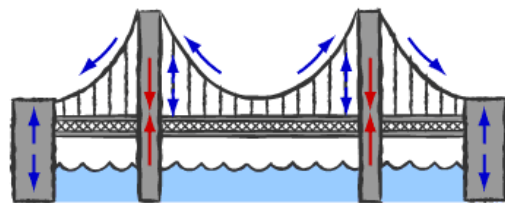
Pourquoi des ponts suspendus ? Parce que les meilleurs matériaux du monde résistent mieux à la traction qu'à la compression. Et que les câbles, parce qu'ils sont des structures unidimensionnelles, utilisent le matériau de

façon prévisible. Il est donc possible de se rapprocher davantage des contraintes maximales que dans les cas de sollicitations complexes, comme c'est le cas dans les grands immeubles.



## La structure portante

Tous les ponts suspendus utilisent des câbles principaux, deux ou plusieurs tours et des points d'ancrage aux extrémités. L'ensemble des câbles est tendu et seules les tours et les massifs d'ancrage sont en compression. Cette simplification du rôle des divers éléments des structures les rend plus simple à calculer. Le poids total de l'ouvrage est supporté quasi intégralement par les tours principales.



## Stabilité

La stabilité des ponts suspendus est étudiée de très près depuis la catastrophe du pont de Tacoma en 1940. Il est apparu a posteriori que les fréquences propres du pont en torsion et en déplacement sur l'axe vertical étaient trop proches (rapport = 1.25). Depuis, tous les ponts suspendus sont spécifiés avec une rigidité en torsion bien supérieure (rapport pour le Golden Gate Bridge = 1.9). Les vents souvent violents dans les grandes étendues libres où sont construits les grands ponts favorisent les prises d'énergie à des fréquences assez basses. On évite les prises d'amplitude par des amortisseurs dynamiques, par des structures les plus rigides possibles (pour augmenter les fréquences de résonance) et en évitant les couplages entre les divers modes de résonance.



## Etude de cas : Le pont Akashi Kaikyo

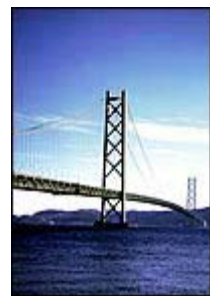


### Quelques faits

- C'est un pont routier en acier entre Kobe et Awaji-shima au Japon,
- Le coût du pont était de 4,3 milliards de \$ en 1998,
- Il est long de 3.911 mètres avec une arche principale de 1.991 mètres et deux petites de 960 mètres.
- Altitude de la chaussée au centre du pont : 97 mètres.

### Historique

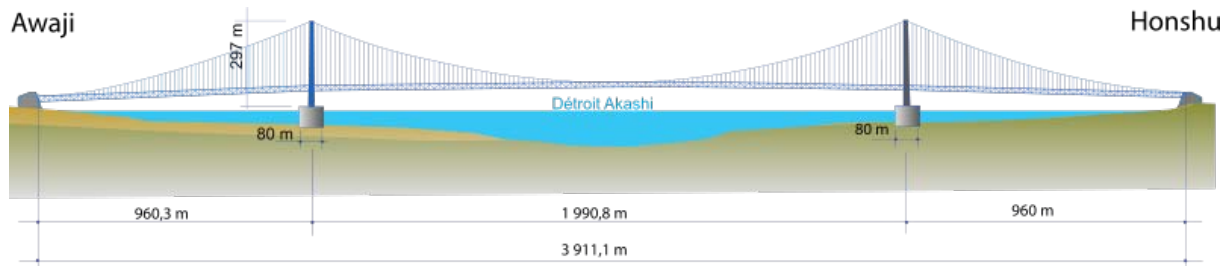
Le pont Akashi Kaikyo (AK) est un pont suspendu à trois arches et deux tabliers rigides qui traverse le détroit d'Akashi entre Maiko (Kobe) et Matsuho, sur l'île d'Awaji. Le plan initial prévoyait un chemin de fer qui fut abandonné. La construction a commencé en 1988 et a duré 10 ans. Il a dépassé le record du Humber Bridge (UK, arche centrale de 1.410 mètres) de 581 mètres, se mettant clairement en tête du classement mondial. Bien que l'AK ait été prévu pour 3.910 mètres de long en 1985, le grand tremblement de terre de Hanshin (Janvier 1995) a fait passer sa longueur à 3.911 mètres. Il est presque aussi long que quatre ponts de Brooklyn mis bout à bout ! C'est aussi le pont le plus haut du monde avec des tours de 283 mètres. Et c'est aussi le plus cher du monde avec une facture dépassant les 4 milliards de dollars.



Le trafic maritime du port ne pouvant être interrompu, le pont devait être plus haut que les plus grands navires et sa construction ne pouvait bloquer le détroit. La météo (vents violents et 144 cm de pluies annuelles, deux fois plus qu'en Belgique), une des pires de la planète est aussi intervenue dans l'écriture du cahier des charges. Les ouragans, les tsunamis et les tremblements de terre quasi-annuels dans l'archipel ne font rien pour simplifier le problème.

Les solutions? Un tablier sous la route très rigide, fortement triangulé, mais très ouvert pour ne pas faire obstacle au vent. Les tours sont aussi munies de 20 amortisseurs de mouvements TMDs (tuned mass dampers) répartis sur la hauteur. Ces masses se déplacent en sens inverse

de la déflexion due au vent pour faire contreponds et casser toute amorce de vibration. En résultat, l'AK supporte des vents jusqu'à 290 Km/h et peut supporter un tremblement de terre de 8.5 sur l'échelle de Richter.



## Cahier des charges

Route nationale (Highway#28), 3 voies dans chaque sens parcourues à 100 Km/h.

Largeur du détroit = 4 Km, longueur du pont = 3.911 mètres.

Profondeur des sites de construction = 110 m.

Vitesse du courant = 4.5 m/s (16 Km/h).

Vitesse du vent pour le calcul du tablier = 60 m/s (216 Km/h)

Vitesse du vent pour le calcul des tours = 67 m/s (241 Km/h)

Type de pont : suspendu à trois arches (960, 1.991 et 960 mètres) et deux tabliers triangulés hyperstatiques.

Construction asismique (normes spéciales du gouvernement Japonais pour le pont Akashi).

Hauteur libre sous tablier (minimum pour l'arche centrale) : 65 m.

## Quelques chiffres

- Masse d'acier des tours : 46.200 tonnes
- Masse d'acier des câbles : 57.700 tonnes
- Masse d'acier des tabliers : 89.300 tonnes
- Masse d'acier total : 193.200 tonnes

## Les caissons de fondations

Ils sont construits à 60 mètres de profondeur et ils supportent la quasi-totalité du poids du pont. Le fond marin a été excavé par une drague à godet. Divers engins, dont des chariots téléguidés sans pilote (ROVS = Remotely Operated Vehicle System) ont été utilisés pour permettre de travailler malgré la météo inclemente. Les courants et les vagues induisaient des vibrations dans les godets de l'excavatrice. En dépit de tout cela, le fond a été nivelé à 10 cm près avant de couler les caissons préfabriqués en place. Une fois installés, ceux-ci ont été remplis de béton spécial sous-marin et de béton standard. Les caissons circulaires n'ont pas d'effet en cas de changement de direction des courants et ont ainsi été plus stables pendant leur approche et leur coulage sur place. Un nouveau type de béton a même été développé spécialement pour l'occasion (nommé "underwater nondisintegration concrete,").



## Quelques chiffres

- Diamètre des caissons = 80 mètres.
- Masse d'acier : 15.800 et 15.200 tonnes
- Cubage de béton : 355.000 et 322.000 mètres cube.

## Les ancrages de câbles

L'ancrage 1A côté Kobe est sous forme de mur emboué. La fondation sous le bloc mesure 85 mètres de diamètre et est profonde de 63,5 mètres. C'est le bloc d'ancrage le plus gros du monde.

L'ancrage 4A est un mur de retenue plus classique à fondation répartie. Ils sont tous deux coulés en béton hyperfluide (highly workable concrete). Ces deux blocs supportent toute la traction des bouts de câbles. Le béton hyperfluide développé spécialement pour ce pont, ne nécessite pas de compactage et a ainsi grandement amélioré l'efficacité du coulage et réduit le temps de construction.

### Quelques chiffres

- Ancrage 1A, fondation à mur emboué de 232.600 M<sup>3</sup>.
- Ancrage 1A, bloc d'ancrage en béton hyperfluide de 140.000 M<sup>3</sup> (350.000 tonnes).
- Ancrage 4A, bloc d'ancrage en béton hyperfluide de 150.000 M<sup>3</sup> (370.000 tonnes).

## Les tours

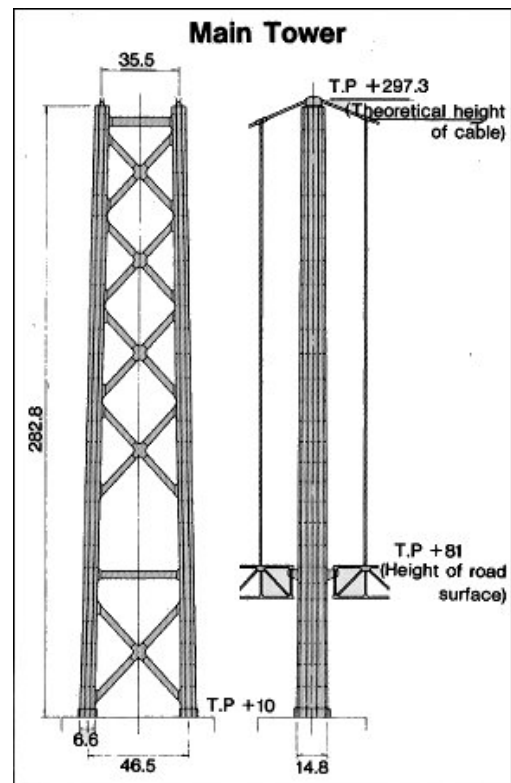
Les selles au sommet des tours transmettent le poids des 100.000 tonnes du pont et des câbles aux fondations. Les colonnes des tours sont divisées horizontalement en trente rangées, dont chacune est divisée verticalement en trois blocs de 160 tonnes chacun au maximum. Avec 300 mètres de hauteur, les tours rivalisent avec la tour Eiffel, et leur taille extrême les rend sensibles aux vents violents. Pour contrecarrer ceci, on a utilisé une section cruciforme et on a installé des stabilisateurs à masses accordées [TMD = tuned mass dampers].

### Quelques chiffres

*(Détails côté Ancrage 1A)*

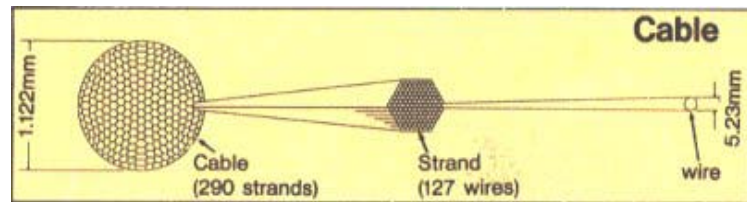
- hauteur du câble = 297,3 m.
- hauteur de la tour = 282.8 m.
- poids supporté par tour = 50.000 tonnes
- Matériau = Acier SM570
- Poids de la tour = 23.000 tonnes
- Poids des stabilisateurs TMD = 10 tonnes (20 par tour, 1 dans chaque colonne aux 17<sup>ème</sup> à 21<sup>ème</sup> rangs).

*(Notez que la tour Eiffel, de même hauteur ne pèse que 7.000 tonnes, mais elle ne supporte pas un pont !)*



## Les câbles

Chaque câble comporte 290 brins, chaque brin comporte 127 fils d'acier à haute limite élastique galvanisés. Chaque fil mesure 5,23 mm de diamètre. Les brins ont une forme hexagonale et sont produits en usine. La grande avancée technologique de ce pont se situe ici avec la mise au point d'un nouvel acier à très haute limite élastique : Les meilleurs fils atteignaient  $160 \text{ kg/mm}^2$  et les nouveaux atteignent  $180 \text{ kg/mm}^2$ . Ceci a rendu possible l'emploi d'un seul câble au lieu des deux initialement prévus. La longueur totale des fils est de 300.000 Km.



Le câble pilote a été tiré par hélicoptère pour éviter les problèmes des courants et de l'incessante navigation dans le détroit. Le câble pilote était en Kevlar avec un diamètre de 10 mm. Un seul a été utilisé pour les trois arches.

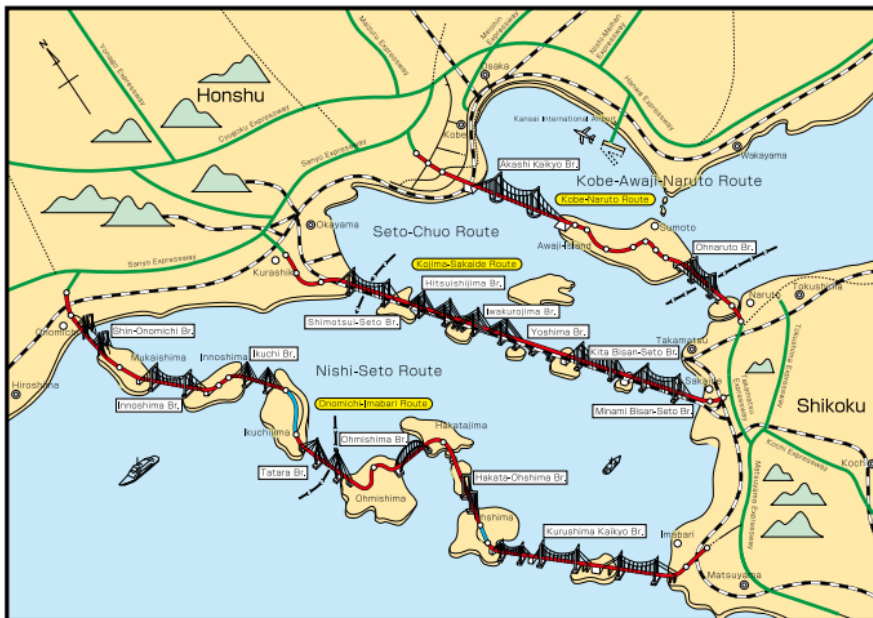
### Quelques faits sur le pont Akashi Kaikyo

- Plus long que 8 fois la hauteur de la Sears Tower de Chicago.
- Longueur totale des câbles du pont : 300,000 kilomètres.
- La longueur initiale du pont était de 3.910 mètres. Mais le 17 Janvier 1995, le grand tremblement de terre de Kōbe du 17 janvier 1995 l'a allongé d'un mètre.
- Trois records du monde (valides en 2004): Le pont plus long, le plus haut et le plus cher du monde jamais construit à ce jour.

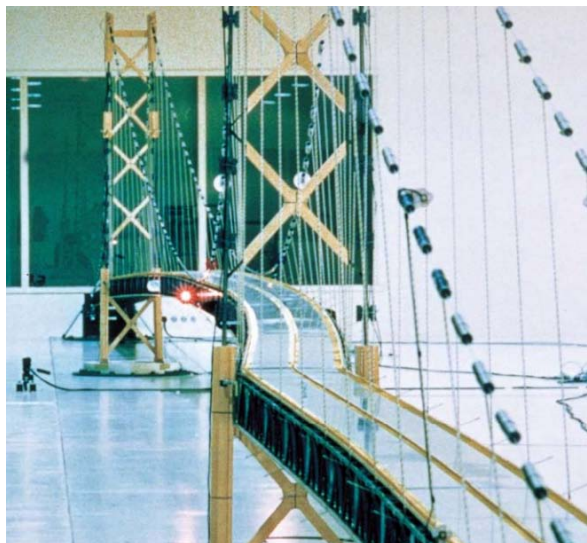




Vue de nuit du pont Akashi-Kaikyo.

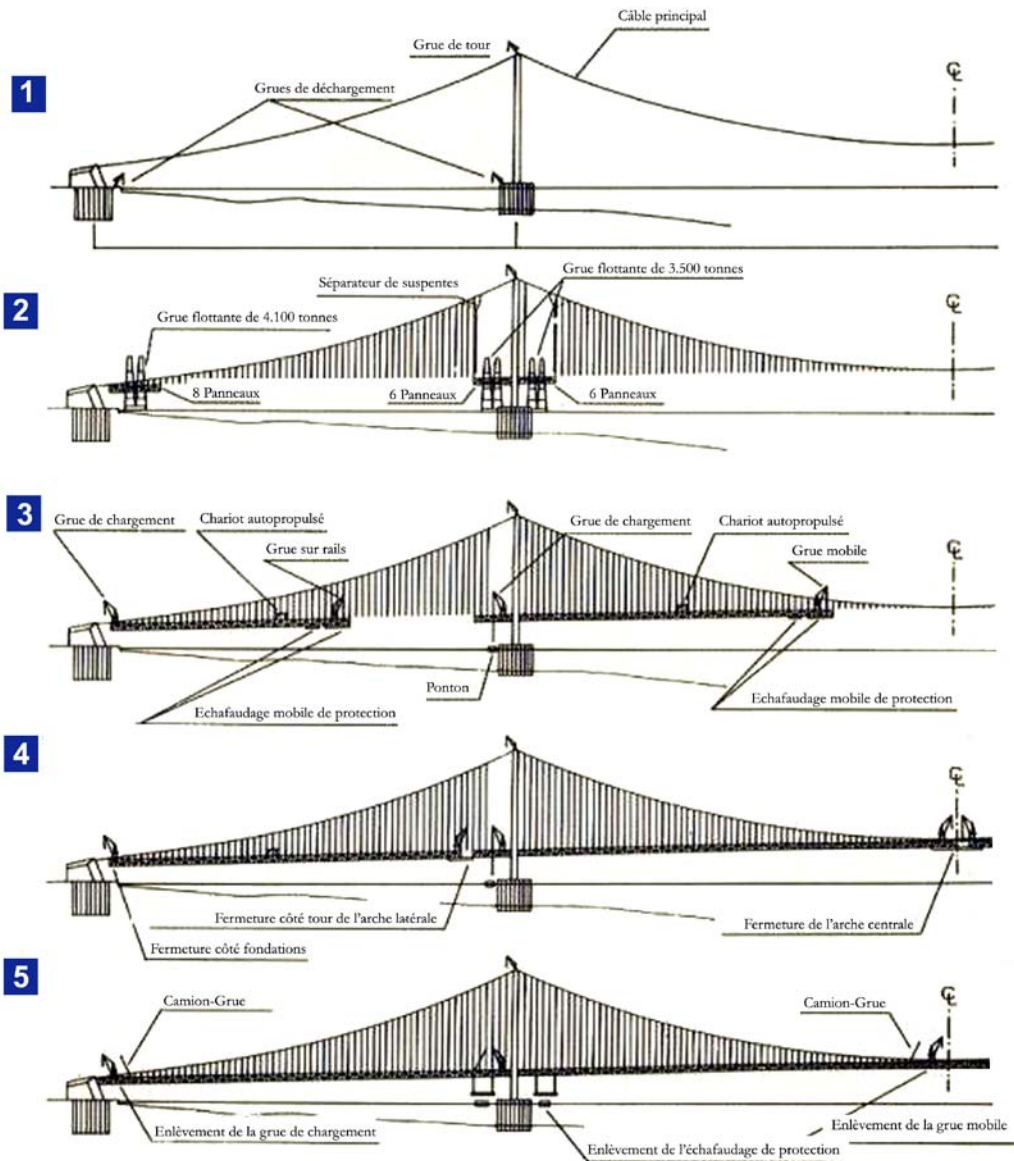


Les divers ponts entre Honshu et Shikoku



Le modèle au 1/100ème du pont Akashi-Kaikyo en soufflerie.

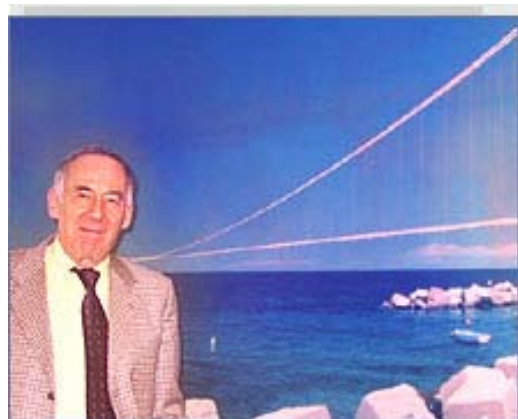
## Les étapes de la construction



### Le (peut-être ?) prochain grand pont

Le prochain défi sur la liste est le détroit de Messine. Les banques italiennes et l'état italien ont annoncé en Septembre 2009 l'accord de financement du pont à hauteur de 4,6 milliards €  
Portée centrale = 3666 m, largeur = 61 m, 4 câbles de 1,24 m de diamètre, 2 tours de 382 m et 56.000 tonnes, longueur totale = 5070 m.

Le pont devrait accueillir un trafic journalier de 200 trains et de six à neuf mille véhicules avec un temps de traversée de trois minutes. Du côté de l'aérodynamisme, le pont sur le Détroit de Messine a





été dessiné avec un profil alaire, conçu pour résister à des vents ayant une vitesse supérieure à 216 km/h, sans aucune perturbation dans le déroulement du trafic.

Le pont est également en mesure d'offrir une résistance sans aucun dommage à un séisme correspondant à une magnitude de 7,1 sur l'échelle Richter (soit un tremblement de terre plus violent que celui qui frappa Messine en 1908).

A droite, plan du pont sur le détroit de Messine en Italie.

Inauguration prévue en 2017 si la politique Italienne en confirme le financement à chaque étape...



### Les ponts suspendus peuvent être dangereux s'ils sont mal conçus

A titre d'exemple, le pont "Passu" sur le lac Hussaini- Borit au Pakistan est une attraction touristique majeure par sa dangerosité...



## Les grands dômes

Les grands dômes sont des cas particuliers des ponts suspendus dans la mesure où leur masse est aussi suspendue en un petit nombre de points. Ils sont en général construits dans un matériau résistant à la compression comme le voile de béton. Le plus grand du monde est le dôme en acier du Cowboys Stadium à Dallas, USA qui a 275 mètres de diamètre et est aussi connu pour ses deux TV géantes de format 16x9 mètres.

### Etude de cas : Le Georgia Dome d'Atlanta

Avec 256 mètres de diamètre, le dôme d'Atlanta est presque le plus grand du monde, mais de plus, il est constitué d'un voile tendu et non comprimé. Cette toile de tissu Téflon-fibre de verre est tendue sur une structure triangulée portée par des câbles ; elle ne pèse que 31 Kg tout en étant capable de supporter une charge qui se chiffre en dizaines de tonnes. Le secret réside dans sa forme dite 'tensegrity', nom donné par son inventeur *Buckminster Fuller*, qui a aussi inventé les dômes géodésiques.



Le tensegrity est en fait une séquence complexe de triangles dont la courbure est alternée couche par couche. Des piliers verticaux supportent le dôme ; ils sont maintenus en place par des câbles sous contrainte fixés au sommet et à la base de chaque poteau. Les câbles tirant dans toutes les directions avec des forces égales, forment des triangles allongés très solides. Les efforts dans le dôme sont repris par une couronne circulaire en béton le long du périmètre extérieur de 852 mètres de circonférence. Elle repose sur des patins de glissement en Téflon qui autorisent une certaine flexion de l'ensemble par grand vent pour répartir les charges au mieux.

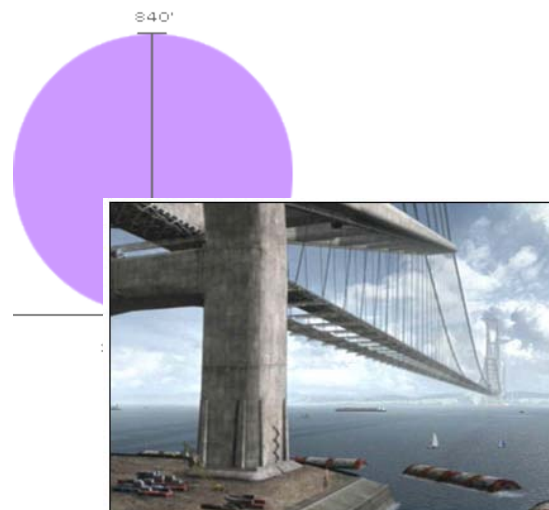


### Quelques chiffres

1992, coût: 214 millions \$, diamètre: 260 mètres, Hauteur : 28 étages, type: Tensegrity à support par câbles, but: Stade sportif et salle de concerts, matériaux: Béton, Acier, Téflon renforcé, surface : 37920 m<sup>2</sup>, béton: 110.000 m<sup>3</sup>, acier = 8.300 tonnes.

### Projet utopique : Le pont de Gibraltar

Réunir le Maroc et l'Espagne par un pont sur le détroit de Gibraltar est plus un défi technologique



**Gibraltar Bridge**

The proposed bridge over the Straits of Gibraltar would allow automobile traffic between Spain and Morocco.

qu'une réponse à un besoin économique. Néanmoins, divers bureaux d'architectes se sont penchés sur le problème et ont ouvert des voies de solutions, notamment par l'usage de matériaux légers comme les plastiques armés de fibre de verre pour la constitution du tablier. Le défi est de taille : 14.500 mètres à franchir en une travée centrale et deux latérales seulement, des vents de 130 km/h, les tempêtes de sable du Sahara...

La salinité différentielle de la Méditerranée, et les thermoclines qui l'accompagnent développent des courants de 2,5 m/s et des vagues de 12 mètres de haut dont la période est de 21 secondes. Les piles devront supporter de potentielles collisions avec des supertankers pouvant atteindre 700.000 tonnes et devront être déposées à 300 mètres de fond. Les accélérations sismiques peuvent atteindre 0,3 g dans cette zone.

La solution proposée en 1996 est due au professeur T. Y. Lin de l'université de Californie à Berkeley et à OPAC Engineers. Les deux tiers des travées seraient supportés de façon classique pendant que les 1/6 extérieurs seraient supportés en cantilever directement par les piliers, à la manière du nouveau pont de l'A602 à Liège.



**Travées:** 2 x 2500 mètres (latérales) et 2 x 5000 mètres (centrales)

**Hauteur:** Les trois tours devraient atteindre 930 mètres de haut.

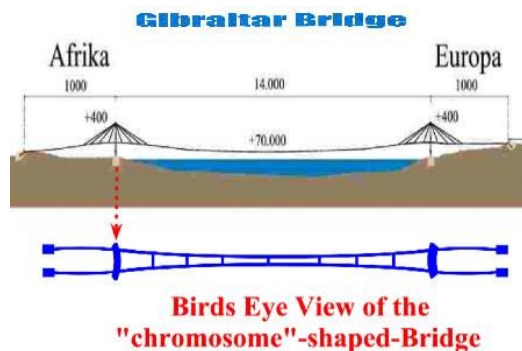
**Trafic:** autoroute à 2 directions de 5 voies+1 de secours de chaque côté.

**Tablier:** GRP (Glass Reinforced Polyester)

**Câbles:** 1.600.000 Km de fils d'acier

**Coût estimé:** 15 milliards €

Certains proposent une pile supplémentaire au centre, réduisant les portées, tandis que le bureau d'études CarGlider propose une seule travée de 14.000 mètres sans tablier. Les câbles étant structurés pour servir de 'tube de transport' (voir figure).



## Le pont flottant sur Gibraltar

Une variante assez délirante est le "Strait of Gibraltar Flating Bridge" (<http://www.tdrinc.com/gibraltar.htm>)



## **CH3 : La Supercavitation**

L'accident du sous-marin Kursk en Août 2000 a été officiellement attribué à l'explosion à bord de plusieurs torpilles prototypes. Cet accident a attiré l'attention des médias sur les engins sous-marins ultrarapides à supercavitation.

La supercavitation est un phénomène physique qui permet de réduire presque à zéro la traînée hydrodynamique d'un corps se déplaçant à grande vitesse sous l'eau. La cavitation est connue pour ses effets destructeurs sur le matériel marin et en particulier sur les hélices. Une dépression suffisante à l'arrière d'une pale suffit parfois à provoquer un décollement de l'écoulement hydraulique. Une bulle de vide, ou plus exactement d'air ou de vapeur à faible pression se crée temporairement. L'affaissement de la bulle provoque un choc violent qui endommage les matériaux les plus résistants. La supercavitation, c'est la création contrôlée d'une de ces bulles de gaz de façon à ce qu'elle entoure complètement le mobile en déplacement, lui permettant ainsi de se déplacer dans un gaz et non plus dans un liquide. La traînée étant réduite à une fraction de ce qu'elle est dans l'eau, le mobile peut alors atteindre des vitesses de plusieurs centaines de Km/h, dépassant parfois la vitesse du son dans l'eau. L'intérêt des militaires pour cette technologie est évident quand on sait que les torpilles classiques les plus évoluées ne dépassent pas 120 km/h.

Les premières armes à supercavitation sont russes : les Shkvall (squalo en russe) ont été développés à partir de 1965. Les 7 torpilles qui ont causé la perte du Kursk en explosant à bord (suite à l'incendie d'une torpille d'exercice classique) étaient des prototypes basés sur le Shkvall (Estimation: vitesse > 400 km/h, portée 8 km). La nouvelle version atteindrait 720 km/h pour une portée de 100 km (Estimation). Les USA explorent également cette voie depuis une vingtaine d'années.

### **La Cavitation**

La cavitation est une propriété fondamentale des liquides ; c'est le fait de ne pas résister à certaines conditions. Les propriétés de l'eau changent très peu avec la pression. Elle supporte des milliers d'atmosphères sans changer de propriétés. Toutefois, si la pression descend sous la pression de saturation de vapeur (0,021 MPascal), des discontinuités se forment : bulles et cavités qui se remplissent de vapeur. La cavitation se produit typiquement à la face arrière des hélices faiblement immergées où le choc d'implosion des bulles de cavitation provoque d'importants dégâts, allant jusqu'à la destruction rapide des hélices.

On distingue trois stades :

1. La cavitation initiale accompagnée d'un intense bruit de chocs provoqué par l'éclatement des bulles. Durant ce stade, les hélices, pompes et turbines sont très vulnérables.
2. La cavitation partielle où des cavités dans le liquide couvrent une grande partie de la surface des pales ou autres objets en déplacement dans le liquide. La cavitation partielle est un état fondamentalement instable.
3. La cavitation complète ou supercavitation où la cavité atteint une taille considérable, supérieure à celle du mobile qui la provoque. Elle nécessite usuellement des vitesses de l'ordre de 250 Km/h mais certaines formes particulières la provoquent dès 10 Km/h au niveau de la surface de l'eau.

La cavitation est dépendante d'un facteur numérique appelé 'Nombre de cavitation' ou sigma.

$$s = 2 (p - p_c) / \rho V^2$$

où  $p$  est la pression hydrostatique,  $p_c$  la pression dans la cavité,  $\rho$  la densité de l'eau et  $V$  la vitesse. On remarquera que la vitesse intervient au carré et est donc prépondérante dans l'apparition du phénomène.

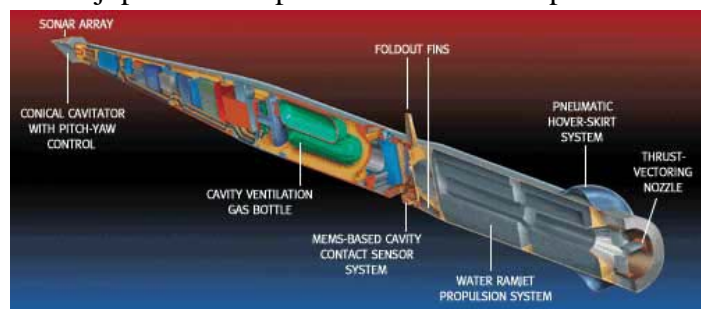
## La Supercavitation

Une torpille à supercavitation nécessite un propulseur extrêmement puissant, des dispositifs de guidage et de contrôle et enfin un dispositif frontal appelé 'caviteur' qui est chargé de générer la bulle de gaz dans laquelle l'engin reste englobé.

La résistance de l'air est 1000 fois inférieure à celle de l'eau pour des raisons évidentes de densité et de viscosité. L'idée est donc de réduire la surface humide du mobile sous-marin à sa portion congrue. En fait, dans ce nouveau type de véhicules, seule la pointe du nez (le 'caviteur') touche l'eau. Sa forme et les injecteurs de gaz situés juste derrière elle provoquent un décollement de la couche liquide par rapport à la coque après quelques centimètres seulement et la surface humide est donc maintenue très petite. La bulle de gaz générée doit rester stable pour éviter au maximum le choc des parois liquides contre la coque et garantir une stabilité directionnelle. Le véhicule sera donc axisymétrique et la section de la bulle ellipsoïdale englobera l'ensemble de la coque. Comme les gaz vont rapidement être dispersés dans l'eau immobile qui entoure la bulle se déplaçant à grande vitesse, le générateur de gaz doit être puissant. La solution la plus simple est d'utiliser un moteur-fusée pour la propulsion et de dériver une partie de son flux pour générer la bulle. Un moteur-fusée secondaire muni d'éjecteurs insérés dans le caviteur est aussi possible.

La forme du caviteur est une sorte de cône muni de lobes et d'orifices d'éjection pour les gaz. Sa forme exacte est bien sûr gardée secrète, mais il est certain que les matériaux mis en œuvre sont extrêmement robustes ; on cite divers carbures et céramiques, sans plus de précisions. Une chose est plus que probable : la forme a des angles vifs qui favorisent le décollement du flux liquide et la création de la bulle de gaz. Le caviteur est monté sur un mécanisme permettant d'orienter la bulle de gaz qui détermine en grande partie l'orientation du déplacement. Le corps de la torpille est cylindrique et se termine par le propulseur qui est un moteur-fusée entraînant une turbine à gaz utilisée pour éjecter de l'eau à grande vitesse vers l'arrière, ce qui donne une poussée bien supérieure à celle de gaz éjectés.

L'arrière du mobile est conçu pour stabiliser la bulle de gaz dont la forme et la stabilité se dégradent vers l'arrière. On utilise donc des jupes ou des patins effleurant les parois de la bulle pour stabiliser l'arrière de l'engin. L'extrême pointe arrière du véhicule revient au contact de l'eau à l'endroit où le jet d'eau ou de gaz propulsé à grande vitesse par le moteur vient en contact avec l'extrémité arrière de la bulle. La tuyère de propulsion est elle aussi contrôlée par des servomécanismes

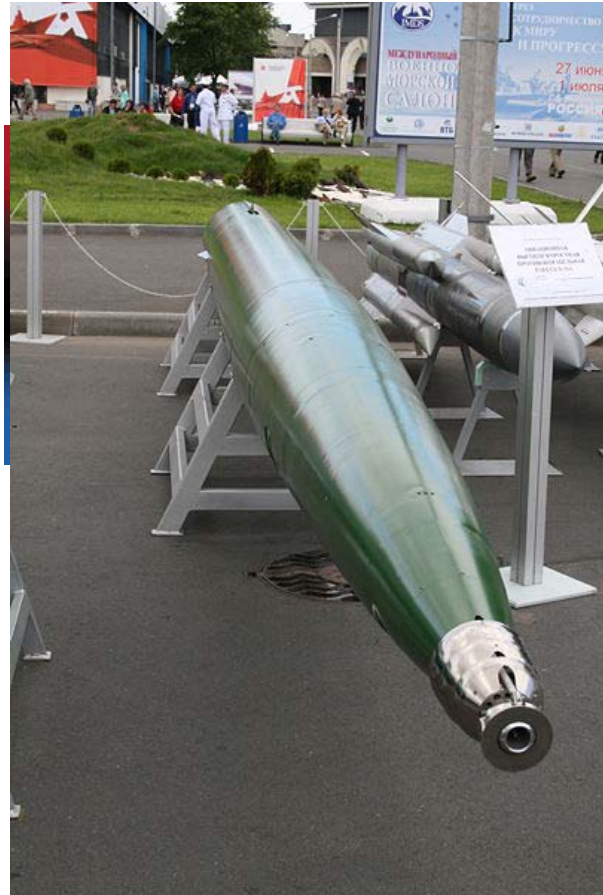


pour stabiliser la trajectoire.

## Le contrôle de trajectoire

Le Shkval tel que les russes l'ont montré et vendu est une arme rustique capable de mouvement en ligne droite et sans aucun contrôle de trajectoire autre que la stabilisation de la direction préétablie au départ. Des contrôles d'attitudes sont théoriquement possibles grâce à des sortes de patins montés sur ressorts qui s'appuient sur les parois de la bulle de gaz, par des ailerons plongeant dans le liquide ou par des jets d'eau ou de gaz directionnels. Mais les deux plus graves problèmes que pose un contrôle actif de la trajectoire sont la stabilité de la bulle de supercavitation dans les virages serrés et la communication entre le mobile et l'extérieur.

Si on peut se permettre de limiter l'amplitude des mouvements pour contourner le premier problème, le second est plus fondamental. Les ondes radio ne se propagent pas sous l'eau, les lasers ne franchissent pas les turbulences très importantes qui entourent l'engin et les ultrasons sont tout simplement trop lents pour le suivre. Le guidage par fil reste la seule possibilité crédible, mais les turbulences et la violence des chocs d'implosion des bulles de cavitation ( $> 40$  g) sont des obstacles majeurs.



Quant au guidage autonome, il implique des capteurs de détection de cible, comme les sonars, mais ici aussi les mêmes barrières technologiques restent à franchir.

## La propulsion

Les propulseurs actuels sont des moteurs fusée similaires à ceux des missiles air-air. Il est toutefois évident que le rendement puissance/ volume de cette solution est insatisfaisant. L'avenir semble appartenir à des moteurs qui oxydent des poudres métalliques en présence d'eau. On évite d'emporter le comburant et le carburant est dense et peu volumineux. L'oxydation de l'aluminium en poudre permet d'atteindre plus de 10.000° Celsius. Les gaz brûlés sont éjectés par une tuyère classique ou peuvent entraîner une turbine qui actionnerait une hélice (ou plutôt deux hélices contrarotatives) entourant le mobile et dont les pales s'appuient sur l'eau extérieure. Si le rendement théorique de cette dernière solution est double de celui de la simple tuyère, on n'a cependant observé que 20% de gain en laboratoire. Le design de ces solutions futures est encore loin d'être terminé et nombre d'inconnues restent à déchiffrer dans les interactions entre le jet propulseur et l'eau dans les conditions de supercavitation.

## Les applications

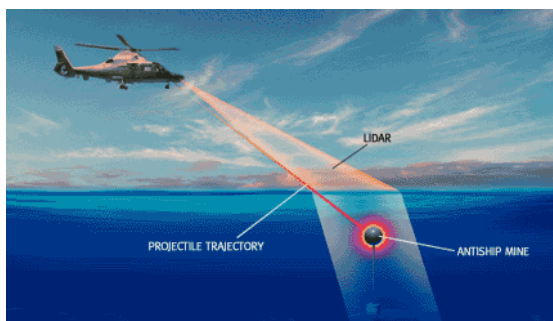
Les applications de la supercavitation dans le domaine militaires sont innombrables : des armes à courte et moyenne portée comme des projectiles destinés à faire exploser à distance des mines ou des torpilles ennemies en approche, des torpilles, voire même de gros missiles sous-marins destinés à détruire une flotte entière avec un charge pouvant être nucléaire. Des études portent aussi sur des engins de surface basés sur le même principe.

Les projectiles de petite taille qui sont étudiés, semblables à des obus (de 20 à 40 mm) n'embarquent pas de moteurs, ni de servomécanismes et sont mus uniquement par la force d'impulsion de démarrage donnée par un canon plus ou moins classique. Le seul secret réside dans la forme aplatie du caviteur qui génère la bulle de vapeur autour du corps de l'obus. Une portée sous-marine de l'ordre de quelques centaines de mètres et une vitesse de plus de 500 Km/h semblent possibles.

Un exemple pratique est le système RAMICS développé par *CTech Defense Corporation* pour *Raytheon* et qui est une sorte de canon tirant des obus supercavitants vers des mines sous-marines. Le but de RAMICS est le nettoyage des anciens champs de mines qui polluent toujours nombre de zones côtières.



**PROJECTILE ANTIMINE :** Les projectiles supercavitants tirés d'au-dessus de la surface de l'océan doivent rester stables dans l'air et dans l'eau, un but difficile à atteindre pour l'ingénieur. L'obus RAMICS (*partiellement visible*) est développé by C Tech Defense Corporation.



**DEMINAGE :** Les héros de cinéma évitent les balles en plongeant à quelques mètres de profondeur. Les balles ricochent et perdent leur énergie très rapidement dans l'eau à cause de la traînée hydrodynamique. Pour éliminer les mines flottantes, on a choisi des projectiles supercavitants nommés RAMICS (*Rapid Airborne Mine Clearance System*), développé pour l'U.S. Navy par une équipe dirigée par *Raytheon Naval & Maritime Integrated Systems* à Portsmouth, USA. Un système lidar (light



detection and ranging), calcule la position de la mine malgré la réfraction de l'eau et la vise avec les obus supercavitants qui restent stables dans l'air et dans l'eau. Ces projectiles spéciaux contiennent une charge détonante qui fait exploser ou brûler les explosifs contenus dans la mine.

**La balle supersonique.** En 1997, une équipe de recherche de la Naval Undersea Warfare de Rhode Island a effectué un tir de démonstration avec un canon submergé et un projectile supercavitant qui a atteint une vitesse d'émergence de 1.549 mètres/seconde (5500 Km/h), ce qui est supérieur à la vitesse du son dans l'eau.



Un autre usage des petits calibres est le canon sous-marin de défense rapprochée contre les torpilles en approche. Ci-dessous un article en allemand sur la balle 'superpenetrator'.



## Le futur

En [2004](#), le fabricant d'armes allemand *DIEHL BGT* a annoncé sa propre torpille à supercavitation appelée *Barracuda* qui atteindrait une vitesse de 800 km/h.

Même si les armes à supercavitation sont encore rares, chères et difficiles à contrôler, leur simple existence a, ces dernières années, fortement influencé les stratégies navales des grandes puissances. Ainsi, un rapport daté de 1998 fait état de la vente de 40 torpilles Shkval du Kazakhstan à la Chine. Ce qui a rendu très circonspecte la flotte américaine dans le Pacifique. Et si on voit l'avantage de cette technologie pour la destruction des mines sous-marines, on ne peut que craindre son utilisation par des petits pays à tendances impérialistes, une menace que les ventes récentes de certaines de ces armes par les ex-pays du bloc soviétique ont rendue particulièrement crédibles.

## Références

- Général : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Supercavitation>  
 Théorie : <http://cav2001.library.caltech.edu/archive/00000159/00/Savchenko.pdf>  
<http://cav2003.me.es.osaka-u.ac.jp/Cav2003/Papers/Cav03-GS-6-006.pdf>  
 RAMICS : <http://www.raytheon.com/products/ramics/>  
 Shkval : [http://www.diodon349.com/Kursk-Memorial/storm\\_over\\_the\\_squall.htm](http://www.diodon349.com/Kursk-Memorial/storm_over_the_squall.htm)  
<http://www.fas.org/man/dod-101/sys/missile/row/shkval.htm>



## CH4 : La fusion nucléaire

C'est certainement là que se trouve notre avenir énergétique à long terme. Mais les défis pour les ingénieurs sont immenses : pression et température gigantesques, niveau de rayonnement élevé, flux de chaleur, champ électrique et magnétique, vide poussé, cryostats et supraconducteurs doivent tous être présents dans la même machine de quelques mètres de côté. ITER, le premier prototype de réacteur à fusion capable de 'diverger', c'est-à-dire de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme devrait commencer à opérer en 2010. C'est le plus grand des Tokamaks conçus à ce jour (voir figure).

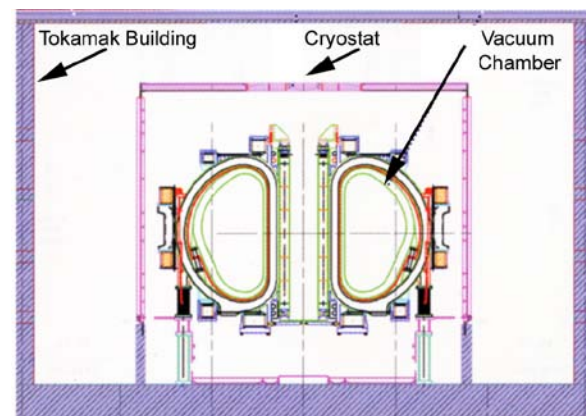
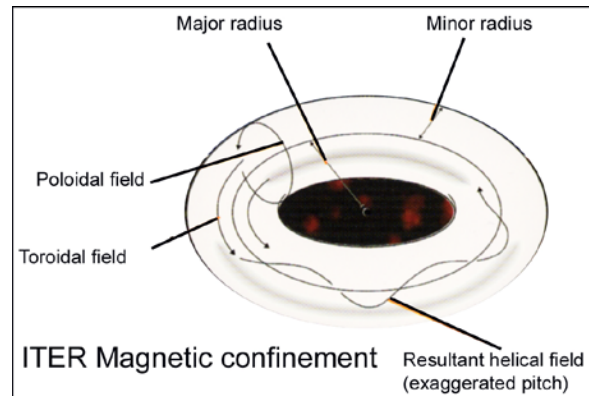
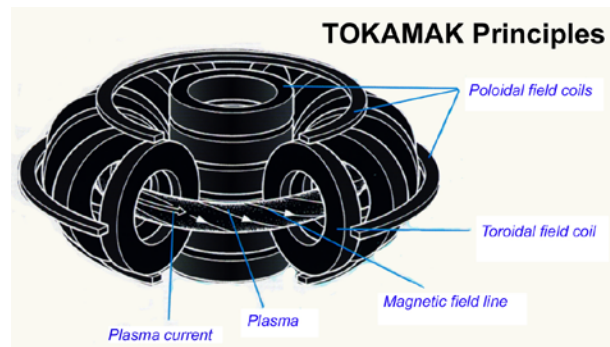
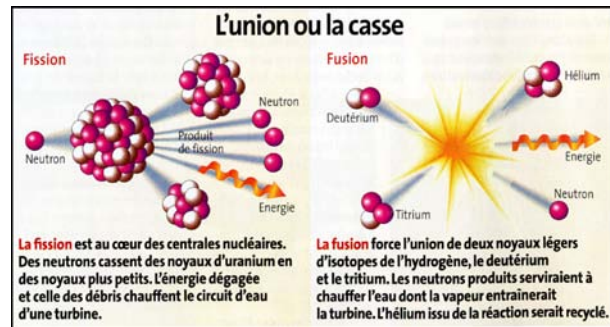
Le site a été fixé en Europe (Cadarache, France) début 2006, retardé par les discussions politiques. La construction a démarré fin 2007. Le site devrait occuper plusieurs milliers de personnes dont un bon millier de physiciens pendant au moins trente ans. Et si les plans existent déjà, de nombreux éléments sont encore impossibles à fabriquer de nos jours.

Nous passons en revue la structure d'ITER pour mettre en évidence les grands défis : nombre d'éléments sont à des cryotempératures d'un côté et à des milliers de degrés de l'autre tout en étant traversés par des flux électriques en milliers d'ampères par millimètre carré et à des flux de chaleur se chiffrant en mégawatts par  $M^2$  et par seconde.

L'ensemble baignant dans un bain de radiations mortel, tous les éléments doivent pouvoir être réparés ou remplacés par des robots télécommandés. Les matériaux les plus rares et les plus chers seront utilisés (plaques en titane, boulons en béryllium), mais on se demande s'ils seront suffisants... ITER sera certainement la cocotte-minute la plus chère de l'histoire !

### Principe de fonctionnement

Le tokamak est une enceinte de confinement toroïdale constituée d'une chambre à vide entourée d'électro-aimants. Ceux-ci génèrent

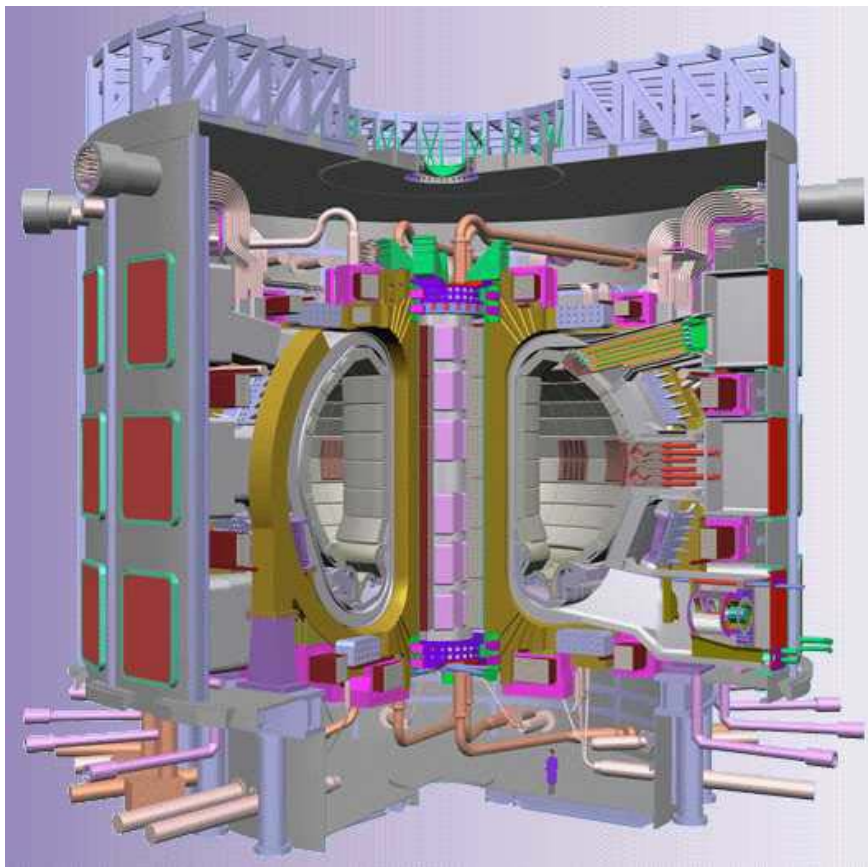


Les 3 enceintes de confinement de ITER

des champs magnétiques qui confinent un plasma de deutérium et de tritium sur une trajectoire circulaire, sous forte pression et forte température. L'énergie de chauffage est apportée au faisceau de plasma par des antennes hautes fréquence et par l'injection d'ions accélérés extérieurement. La température du plasma est de l'ordre de 100 millions de degrés.

Le tokamak fonctionne en mode pulsé avec des durées actives de 300 (premières expériences) à 3000 secondes (but plus lointain).

L'enveloppe intérieure (la couverture ou blanket) doit résister et absorber les neutrons à 14 MeV générés par les réactions de fusion. Juste à l'extérieur de cette paroi, les cryostats nécessaires aux électro-aimants à supraconducteurs doivent rester à quelques degrés Kelvin. La partie basse où les injections d'ions et d'atomes ont lieu est la plus critique : c'est le 'Divertor'.



### Quelques chiffres

Puissance totale de fusion	500 MW
Facteur multiplicatif Q espéré	>10 (chauffage = 50 MW, puissance=500 MW)
Diamètres (Int et ext.) du plasma	2.0 et 6.2 mètres
Courant plasma	15.000.000 A
Volume du plasma	850 M3
Flux de chaleur au divertor	jusqu'à 20 MW/M <sup>2</sup>
Champ toroïdal (suivant l'axe)	5.3 Tesla
Carburant	Deutérium et Tritium
Coût estimé	4 milliards €
Durée de vie	construction 10 ans, exploitation >20 ans.
Personnel	> 1000 personnes

## Les matériaux

Les défis sont nombreux et pas évidents à résoudre, malgré l'ampleur des moyens mis en œuvre. Les matériaux sont évidemment en tête au vu des contraintes auxquels ils seront soumis (typiquement des flux de neutrons à 14 MeV). On recherche d'abord des matériaux à forte résistance aux radiations. Si on réalise la première paroi de confinement en acier inoxydable austénitique, ITER y produira des dommages typiques de 3 dpa (déplacement par atome) sur sa durée de vie prévue. En choisissant un bon acier à faible teneur en Cobalt<sup>2</sup>, cela devrait être suffisant pour éviter de produire des déchets radioactifs de plus de 100 ans d'activité. Pour un réacteur commercial comme celui qui devra succéder à ITER, les dommages se monteraient à 500 dpa sur une durée de vie de 30 ans. Ceci devient impossible pour l'acier qui ne résiste pas à plus de 30 dpa typiquement. Des candidats pour le poste se trouvent dans les familles d'aciers ferritiques et dans les composites à base de carbure de silicium. Un réacteur (IFMIF) sera construit en parallèle à ITER dans le seul but de tester ce type de matériau.

Les matériaux 'sensibles' ne sont pas que ceux des parois : il y a aussi les aimants supraconducteurs et leurs soudures d'assemblage (indispensables vu leur taille), les matériaux proches du plasma qui doivent aussi évacuer la chaleur et canaliser les fluides de refroidissement et les câbles supraconducteurs.

Les matériaux d'ITER sont, outre l'acier inoxydable déjà bien connu dans les réacteurs à fission, le béryllium, le tungstène et les composites de fibre de carbone (CFC). Les soudures avec les radiateurs de chaleur en alliage de cuivre seront aussi des points critiques à étudier. Pour les aimants, les alliages supraconducteurs niobium-étain (pour les champs élevés du solénoïde central) et niobium-titane (pour le champ poloidal) sont envisagés.



Vertical target divertor prototype

Les 429 modules de la paroi en contact avec le plasma (blanket) seront réalisés en un composite de béryllium soudé aux éléments thermiques en alliage de cuivre, le tout monté sur une structure en acier inoxydable SS316LN. Les 54 éléments du divertor (bas de la chambre à plasma) seront en composite tungstène-carbone, le tout sur une structure cuivre et SS316LN comme ci-dessus.

## Le refroidissement

Refroidir l'hélium à 4,5°K demande 660kW. On n'a encore jamais construit de frigo de cette taille !

## Le chauffage du plasma

Plusieurs cyclotrons différents seront utilisés avec une puissance initiale de 73 MW, portée ultérieurement à 100 MW. La consommation électrique sur le réseau devra atteindre des pointes de 500 MW en opération avec une moyenne de 100 MW pour l'ensemble du réacteur.

## Les bâtiments

40 hectares de bâtiments sont prévus avec une possibilité de doublement. Les enceintes extérieures sont en béton additionné de bore pour ralentir les neutrons. Les enceintes étanches sont triplées et les fondations anti-sismiques prévues pour les pires conditions.

---

<sup>2</sup> L'enceinte de confinement serait réalisée en SS316LN pour la structure et SS304 avec 2% de bore pour les boucliers avec des inserts en SS340 (ferromagnétique).

## Collaboration internationale

La mise au point de ITER, en route depuis plus de 10 ans, est le fruit de la collaboration de chercheurs du monde entier et coordonner des efforts à l'échelle planétaire n'était pas le moindre des problèmes. Sept grandes maquettes ou prototypes ont été construits en Europe, au Japon, en Russie et en Amérique du Nord. Les robots de montage du revêtement sont japonais (positionner des pièces de 6 mètres avec une précision du millimètre) ; ceux qui monteront le divertor sont européens ; les pièces du manteau proviennent du Japon, de Russie et d'Europe ; les pièces du divertor soumises à plus de 20 MW/M<sup>2</sup> ont été testées dans tous les labos concernés.

## Statut en 2010

Les travaux sur le site ont commencé depuis 2008 : fondations, routes, adaptation des routes existantes depuis la mer : des camions de 61 mètres de long doivent pouvoir atteindre le site ! Le visitor center a reçu 11.000 visiteurs sur l'année 2009.

Travail : ITER engage. Depuis 2008, de nombreux postes à pourvoir existent, de « Radioactive Waste Process Engineer » à « Vacuum Vessel Manufacturing Engineer » ou encore « High Voltage Magnet Engineer »... Un site mis à jour en permanence reprend l'état des postes vacants : <http://www.iter.org/fr/jobs>.

## Historique de la fusion

- 1983 JET (Culham, UK) 16 MW pendant 1 seconde ( $Q < 1$ ).
- 1985 Décision de construire ITER
- 1996 TORE SUPRA (Cadarache, France) 7 MW pendant 120 secondes ( $Q < 1$ ).
- 2002 TORE SUPRA (Cadarache, France) 240 secondes ( $Q < 1$ ).
- 2004 Choix du site ITER et début de construction.
- 2010 ITER (Japon ou France) 500 MW pendant 400 secondes ( $Q > 10$ ).
- 2030 DEMO (où ?) 4 GW (plasma), 1.3 GW (sortie) en production continue ( $Q = n$ ).

Les défis à relever pour la construction et l'évolution d'ITER sont typiques de l'Extreme Engineering' : d'énormes budget pour faire reculer les limites des matériaux et les frontières de la connaissance que nous avons de la physique des plasma, tout ceci dans le but d'assurer l'avenir énergétique de l'humanité à moyen terme. Cette course, entamée dans les années 80 est un vrai effort de recherche à long terme : cinquante ans de travail pour arriver à la première centrale électrique utilisable. Maintenant que nous sommes à mi-chemin, le travail paraît toujours aussi difficile, mais avec ITER, une étape importante se doit d'être franchie et elle semble à la portée des ingénieurs de notre génération.

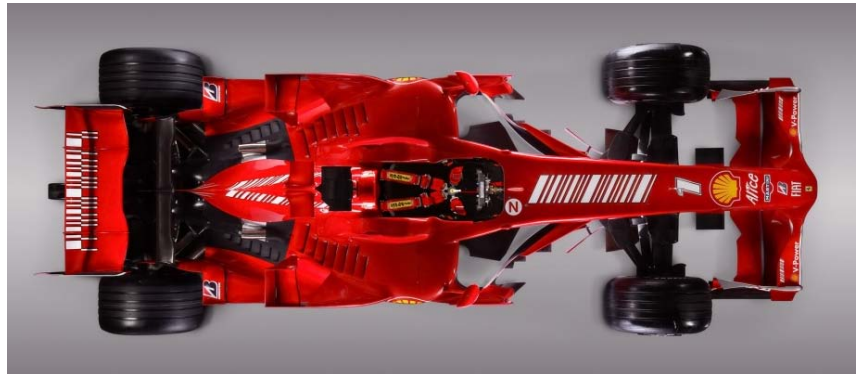
## Références

<http://www.iter.org>

<http://www-fusion-magnetique.cea.fr>

[www.itercad.org](http://www.itercad.org)

## CH5 : La formule un



Cette discipline sportive est certainement la vitrine d'engineering la plus médiatisée. Ici aussi, les budgets sont élevés et le but unique est de gagner des courses, donc de construire la voiture la plus efficace sur l'ensemble des circuits imposés par le championnat. Les contraintes sont très complexes, mais quasi toutes artificielles : un règlement impose des paramètres de sécurité, mais aussi des dimensions, des formes et autres paramètres techniques qui vont le plus souvent à l'encontre du bon sens élémentaire. Il n'empêche que le résultat des efforts donne des véhicules extrêmement impressionnants. Une F1 moderne pèse 640kg (en 2011) et subit une charge aérodynamique qui dépasse les 2.000 kg en pointe. Un moteur thermique qui tourne à 18.000 tours par minute et dégage plus de 600 Kilowatts donne des accélérations et des freinages de plus de 4g. Les accélérations latérales résultantes atteignent 5g en pointe.

On détaillera ici certains de ces défis techniques comme l'aérodynamique, la boîte de vitesses séquentielle, la géométrie des suspensions arrière. Les compromis où les ingénieurs doivent se montrer les plus créatifs concernent la fiabilité mécanique, les phénomènes transitoires comme l'appui aérodynamique en virage, le régime thermique des freins et l'électronique de contrôle.

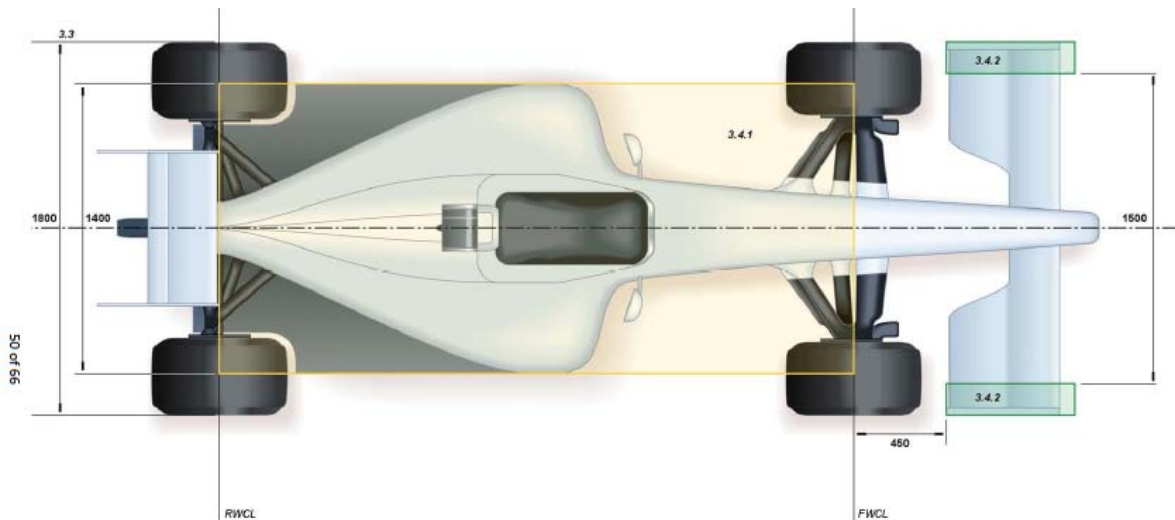
### Finances

Commençons par un aperçu du budget qui fixe les limites des moyens mis en œuvre. Le budget moyen annuel d'une équipe est de 75 M€ répartis comme suit :

Frais de déplacements	3.000.000 €
Pilotes	7.000.000 €
Relations publiques	3.000.000 €
Frais financiers	3.000.000 €
Salaires	12.000.000 €
Matériaux et fournitures	20.000.000 €
Recherche et développement	22.000.000 €
Divers	3.000.000 €
Taxes	2.000.000 €

Parmi les matériaux et fournitures, voici les plus onéreux (pour un exemplaire d'une voiture, ne comprenant ni les salaires, ni le développement):

Monocoque en fibre de carbone	100.000 €
Ailerons avant et arrière	25.000 €
Moteur	200.000 €
Boîte de vitesse	130.000 €
Jeux de pignons de boîte	100.000 €
Télémetrie	125.000 €
Freins et garnitures (carbone)	70.000 €
Volant et électronique intégrée	20.000 €
Divers	130.000 €
<b>Total</b>	<b>900.000 €</b>

**3.3 - Overall width :**

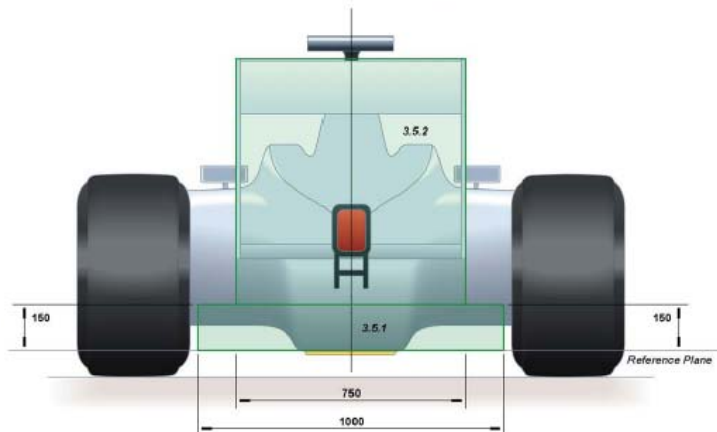
The overall width of the car, excluding tyres, must not exceed 1800mm with the steered wheels in the straight ahead position.

**3.4 - Width ahead of the rear wheel centre line :**

3.4.1 Bodywork width between the front and the rear wheel centre lines must not exceed 1400mm.

3.4.2 In order to prevent tyre damage to other cars, any bodywork outboard of the most inboard part of the bodywork used to define the area required by Article 3.7.5, and which is more than 450mm ahead of the front wheel centre line, must be at least 10mm thick (being the minimum distance when measured normal to the surface in any direction) with a 5mm radius applied to all extremities.

  
FEDERATION INTERNATIONALE DE L' AUTOMOBILE  
Appendix to the 2011 FIA Formula One Technical Regulations



## Les forces en jeu et le centre de gravité

Les principales dimensions des voitures sont fixées par le règlement technique. Les dimensions principales de tous les concurrents sont donc fort proches: 180 cm de largeur pour tous, des empattements entre 300 et 318 cm. Même la hauteur minimum du centre de gravité du moteur est imposée! Les pneus ayant des tailles strictement contrôlées, les surfaces de



contact au sol et donc les efforts maximaux transmissibles sont à peu près identiques pour tous. La course technologique se joue donc sur les rigidités, les poids et la disposition des masses. Sur une hauteur de 95 cm maxi, le centre de gravité oscille entre 20 et 25 cm de hauteur. Quand on sait que la garde au sol est de 5 cm, on se rend compte des prouesses nécessaires à un tel abaissement des masses.

Le poids des F1 est de 640 kg, mais tous les constructeurs fabriquent un véhicule plus léger et le complètent par un ballast qui peut être très dense et très bas et situé à l'endroit optimal pour obtenir une répartition des poids idéale. On soupçonne les meilleures équipes d'avoir un ballast de près de 100 kg.

Estimated values for 2001	Cz	Cx	Eff.	S km/h	D kg
Australia	2.634	0.951	2.77	306	1527
Malaysia	2.678	0.991	2.70	310	1593
Brazil	2.592	0.949	2.73	316	1602
San Marino	2.590	0.957	2.71	310	1541
Spain	2.681	0.979	2.74	308	1574
Austria	2.733	0.920	2.97	303	1553
Monaco	2.804	1.040	2.70	290	1460
Canada	2.389	0.801	2.98	323	1543
Europe	2.675	0.988	2.71	304	1530
France	2.501	0.911	2.75	307	1459
Great Britain	2.641	0.962	2.75	310	1572
Germany	2.193	0.761	2.88	350	1663
Hungary	2.769	0.999	2.77	298	1522
Belgium	2.554	0.928	2.75	320	1619
Italy	2.151	0.739	2.91	345	1585
Usa	2.531	0.919	2.75	325	1655
Japan	2.799	0.998	2.80	310	1660

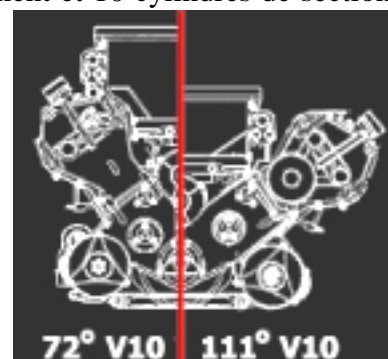
Les efforts aérodynamiques dépendent des réglages des ailerons, de la puissance du moteur et de la vitesse de pointe. Le tableau ci-contre donne une idée des efforts aérodynamiques. Les efforts d'accélération dus au moteur sont moins importants que ceux dus aux freins. En 2011 (avec des V8 2.4 litres), la puissance motrice en jeu est entre 700 CV (520 kW) et 780 CV (582 kW). Les puissances de freinage frôlent les 1000 KW (>1300 CV).

Le coefficient de friction des pneus dépasse nettement 1.0 aux températures normales de fonctionnement des pneus (85°C à 100°C) et les efforts aérodynamiques verticaux dépassant 15.000 Newtons à haute vitesse, les efforts latéraux en virages rapides peuvent dépasser largement les 20.000 Newtons. Ceci amène des accélérations longitudinales (4 G) et combinées (5 G) extrêmement élevées. On a observé des freinages à 5,5G sur le circuit de Suzuka en 2011.

### Evolution des moteurs à l'époque des V10 (< 2006)

Par règlement, les moteurs devaient avoir 3.000 cc de déplacement et 10 cylindres de section circulaire. L'alimentation en air doit être naturelle, c'est-à-dire que les turbocompresseurs sont interdits. Les matériaux exotiques comme le béryllium et les composites métaux-céramiques sont interdits. Les grands paramètres que l'on peut faire varier sont l'angle du V (de 72° à 111°, mais 90° pour quasi tous les teams) et le rapport course/alésage des cylindres. Plus les courses sont courtes, plus le moteur sera bas et plus les soupapes auront de surface. Par contre, les courses courtes sont synonymes d'accélérations élevées au niveau des bielles et des pistons, ce qui limite les régimes de rotation.

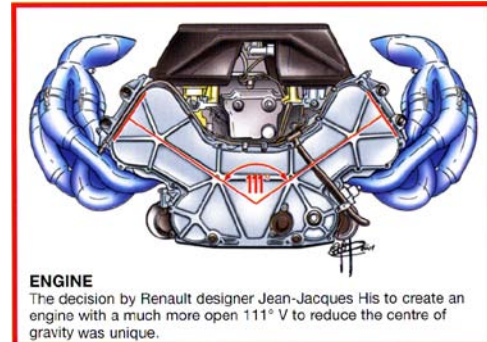
Les chiffres réels sont secrets, mais on estime que le moteur BMW P83 (la version 2004) a un alésage de 98mm, ce qui donne des accélérations maximales au niveau du piston de 10.000 g (effort dans la bielle = 2 tonnes environ). Ceci permet un régime de rotation de 19.200 rpm (limité à 19.000 en course). Le rapport course/alésage correspondant de 0,41 est le plus bas observé dans un moteur thermique. Autres chiffres connus à propos de ce moteur : vitesse de ralenti : 4000 rpm, poids



inférieur à 90 kg, puissance supérieure à 900 CV, température d'échappement : 900°C, débit d'aspiration : 1995 M<sup>3</sup> à l'heure.

Les moteurs pèsent entre 90 et 98 Kg (en 2003) et leur centre de gravité est d'autant plus bas que les faibles courses autorisent un petit diamètre de vilebrequin. Evidemment, il a fallu concevoir des embrayages en proportion : 10 cm de diamètre pour faire passer plus de 900 CV dans un embrayage n'est pas non plus une mince affaire.

Le moteur Renault a offert entre 2001 et 2003 un angle de 111°, ce qui en fait le moteur le plus bas de sa catégorie. Toutefois, les montées en régimes sont limitées par des vibrations dues à la géométrie moins favorable et à une rigidité torsionnelle du bloc inférieur. Pour 2004, Renault a prévu de réduire son angle d'ouverture à 90°, comme Ferrari et BMW, les deux moteurs les plus puissants en 2003.



La technologie des matériaux prend ici une place très importante. Par exemple, les pièces les plus sollicitées comme les axes de piston et les soupapes d'échappement, subissent un durcissement de surface au nitrure de titane déposé en phase vapeur (TiN dureté = 2600 HV), plus dur que le nitrure de chrome plus usuel (CrN dureté = 2000 HV). Depuis 2001, des sociétés comme TecVac ont développé une méthode de déposition ionique sous vide (PACVD, Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) qui permet d'atteindre 4500 HV avec le TiN (couche de 3 à 5 microns). Un bombardement des pièces par des ions d'azote à haute vitesse donne aussi un durcissement de 30 à 50% sur des pièces plus classiques en acier ou en titane (couche de 0.1 micron). Ceci ne change pas l'aspect de surface, mais améliore la résistance à l'usure. Et ajoute à la facture un nombre respectable d'euros....

### Les moteurs V8 'figés' (2009-2013)

La nouvelle réglementation impose des moteurs V8 d'une cylindrée de 2 400 cm<sup>3</sup>. Les meilleurs V8 peuvent atteindre les 780 chevaux, alors que certains anciens V10 à trompettes variables (on parle de suralimentation acoustique) dépassaient les 900 chevaux. Pour des raisons de sécurité, le gain de puissance est devenu impossible car la FIA a imposé un gel de l'évolution des moteurs pendant cinq ans. Le régime maximal des moteurs est bridé à 18.000 tours/minute par un limiteur électronique.

Avec ce régime très restrictif, les améliorations possibles sont très limitées et portent sur la lubrification, la consommation des accessoires, des entrées d'air et des tuyaux d'échappement. Les coûts de recherche ont évidemment diminué ; ou plutôt, ils se sont déplacés vers d'autres départements comme l'aérodynamique ou les systèmes KERS de récupération d'énergie qui seront autorisés dès 2009.

En trois ans, l'évolution des (2008-2011) huiles synthétiques et de leur gestion durant la course ont triplé la durée de vie des moteurs et des boîtes de vitesse !

### Quelques chiffres

- Chaque voiture ne peut utiliser que 8 moteurs pour les 19 ou 20 courses, essais compris, soit 750 Km de vie utile au moins par moteur, et donc une vie totale probable

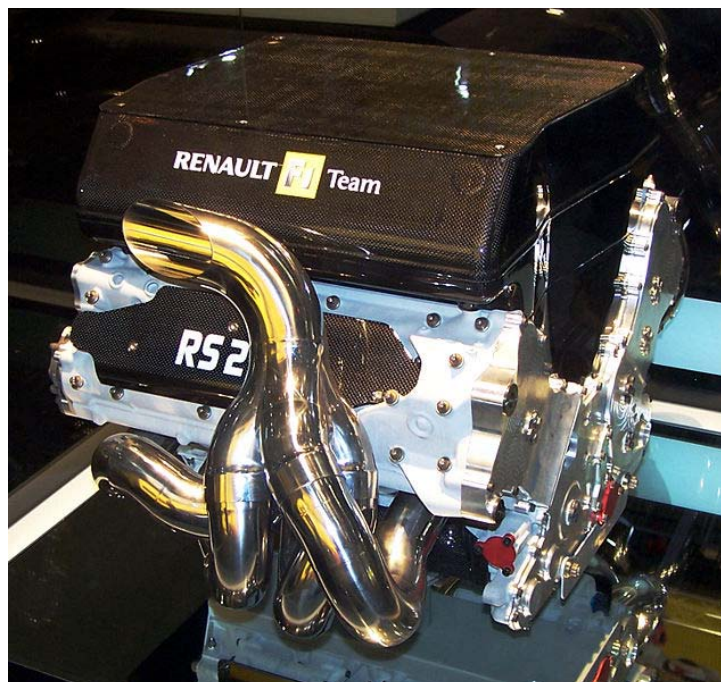
de l'ordre de 1.500 km. En comparaison, les moteurs des années 2000 avaient une vie de 300 km environ seulement (et ils coûtaient 3x plus cher).

- Un moteur de F1 s'entend à 15 Km (132 dB à 1 mètre, plus qu'un 747 au décollage)
- Composition du moteur : Aluminium 63% (bloc, pistons), Acier 30% (arbre à cames, vilebrequin, engrenages de distribution), Magnésium 1% (pompe à huile), Titane 6% (bielles). Le béryllium a été interdit pour restreindre les coûts.
- 5000 pièces dont 1000 différentes
- 1950 dessins de CAO pour le moteur BMW 2004. En 2003, le design du moteur BMW a vu 1388 modifications sur l'année de son existence.
- 80 heures pour assembler un moteur, 20 heures pour vérifier par scanner radiographique la qualité d'une seule culasse et 3 à 4 heures de durée de vie utile.
- 150 personnes par team travaillent au développement et à la construction des moteurs.
- Sorties d'échappement à 950°C
- Accélération des têtes de bielle : 10.000 G,
- Vitesse maxi des pistons : 40 m/s, moyenne = 25 m/s
- Efforts latéraux maxi = 4G (virage 130R du circuit de Suzuka)
- Charge maxi : 73% du temps avec l'accélérateur ouvert à fond à Monza pendant environ 1 heure 30.
- Consommation : 60 à 70 litres/100 Km
- Volume aspiré = 450 litres/seconde soit 2000 M<sup>3</sup>/heure.
- Régime de ralenti : 4000 rpm.
- Puissances estimées à 18.000 rpm : 720 à 760 CV suivant les réglages.
- Puissance en configuration 'Max-Boost' des moteurs 1500cc turbo Honda en 1986 : 1200 CV (appelés les « grenade-engines »).
- Cycle d'existence de 2 ans depuis les premiers dessins jusqu'à la dernière utilisation : conception en Novembre, design et modèles jusqu'en Mai, essais et développement de Juin à Janvier, 1 saison de course qui se termine fin Octobre.
- La consommation moyenne d'une Formule 1 est de 75 litres d'essence (sans plomb) pour 100 km.

## Complexité

La lubrification nécessite environ 8 litres d'huile dont 5 dans le moteur et le reste servant de réserve pour compenser les pertes durant les 2 heures d'une épreuve. Trois pompes sont nécessaires : une de vidange du carter et deux de mise en pression des organes mécaniques. Le rappel des soupapes déplacées par les arbres à cames est produit par des ressorts pneumatiques : de l'air comprimé à haute pression (valeurs non publiées) et plus de 200°C repousse les soupapes en place.

Un moteur de F1 comporte environ 1000 pièces (8 bielles et pistons, 4 arbres à cames entraînés par 10 pignons, 40 soupapes, 5 à 8 pompes annexes, un alternateur, plus de 50 capteurs pour la gestion électronique... C'est l'organe le



plus complexe de toute la voiture (voir la photo ci-jointe du Renault 2008).



## L'intérieur d'un V10 BMW 2008

### Echappement

Les tubulures d'échappement doivent, suivant le règlement, avoir une géométrie fixe. On ne peut donc les accorder que pour une plage de régimes moteur optimale assez étroite. Le matériau est de l'Inconel, un acier à haute résistance présentant peu de dilatations thermiques. Il est recouvert d'une couche externe de céramique pour limiter la dissipation à l'intérieur de la coque. Les régimes élevés des moteurs actuels ont besoin d'échappements accordés, c'est-à-dire de plus en plus courts quand les régimes augmentent. Or ceci est interdit en F1 depuis 2010. On doit donc privilégier un seul régime (qui peut changer de circuit en circuit).

Pour améliorer l'efficacité aérodynamique de l'auto, depuis le courant de 2010, tous les constructeurs suivent l'approche "Renault", qui au lieu de ramener les gaz à la surface supérieure de la coque, les injecte sous le châssis pour donner plus d'appui au diffuseur arrière. Ceci oblige de modifier la cartographie moteur pour continuer à souffler des gaz sans produire de puissance lorsque l'accélérateur est fermé, sous peine de perdre de l'adhérence au freinage. Renault est le constructeur qui se débrouille le mieux dans ce domaine en 2010 et 2011.

C'est en fait l'accord aérodynamique des tubulures d'échappement au régime optimal qui impose l'ordre d'allumage des cylindres et donc la géométrie du vilebrequin, ce paramètre prenant de plus en plus le pas sur les considérations de vibrations et de résistance en torsion du vilebrequin.

### Freins

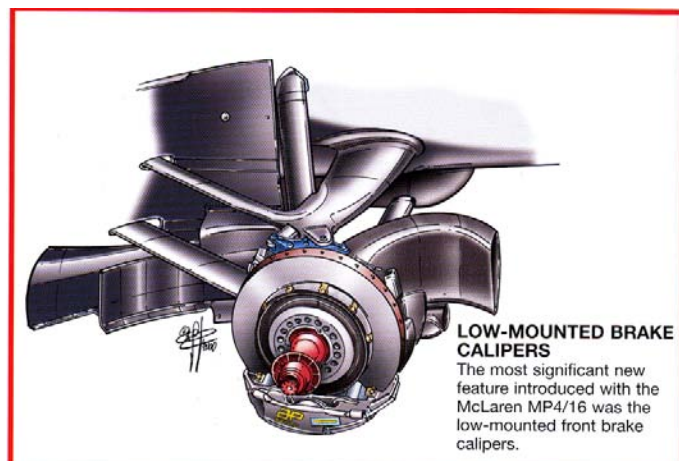
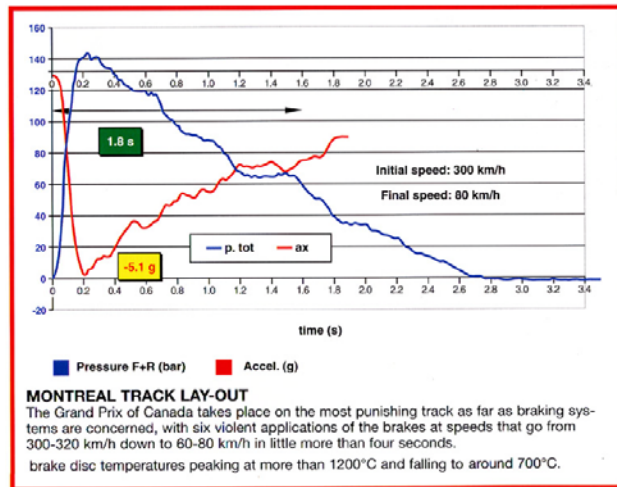


Le règlement oblige à situer les freins dans les roues. Pour diminuer les masses non suspendues, pour abaisser le centre de gravité et pour respecter les contraintes de place et de refroidissement, de véritables prouesses sont nécessaires (comme le positionnement inférieur des pinces de freins à six étriers des McLaren, Ferrari et certains autres).

Les disques et plaquettes sont en carbone-carbone<sup>3</sup>, coûteux en matériaux et surtout en temps de fabrication (plusieurs centaines d'heures sont nécessaires pour fabriquer un disque). Les perforations qui les refroidissent radialement sont parfois ovales (disques Brembo pour Ferrari), ce qui demande un usinage complexe et onéreux. Les patins sont fabriqués dans le même matériau. Comme le règlement stipule qu'ils doivent être d'une seule pièce, certains (comme Williams) les strient parfois jusqu'à 90% de leur épaisseur pour permettre une meilleure dilatation.

Les efforts de freinage dissipent énormément d'énergie en une période très brève : passer de 300 Km/h à 80 km/h prends environ 4 secondes. Les disques dont les dimensions sont limitées par le règlement à 278mm de diamètre et 28mm d'épaisseur passent de 700°C à plus de 1000°C. Deux des problèmes cruciaux ont été de développer des liquides hydrauliques qui ne se dégradent pas à des températures dépassant 300°C et de maintenir les vérins hydrauliques en-dessous de cette température critique.

Le volume intérieur des roues est rempli par un couvercle aérodynamique qui a pour effet d'améliorer le flux d'air contre la face centrale du pneu et d'aider à canaliser le flux d'air entrant vers le disque. Une partie du flux est dérivée vers les étriers pour refroidir le liquide hydraulique. C'est la jante elle-même qui sert de turbine d'extraction des gaz chauds vers l'extérieur. On a mesuré plus de 5G au freinage à Valence en 2008 sur la BMW.



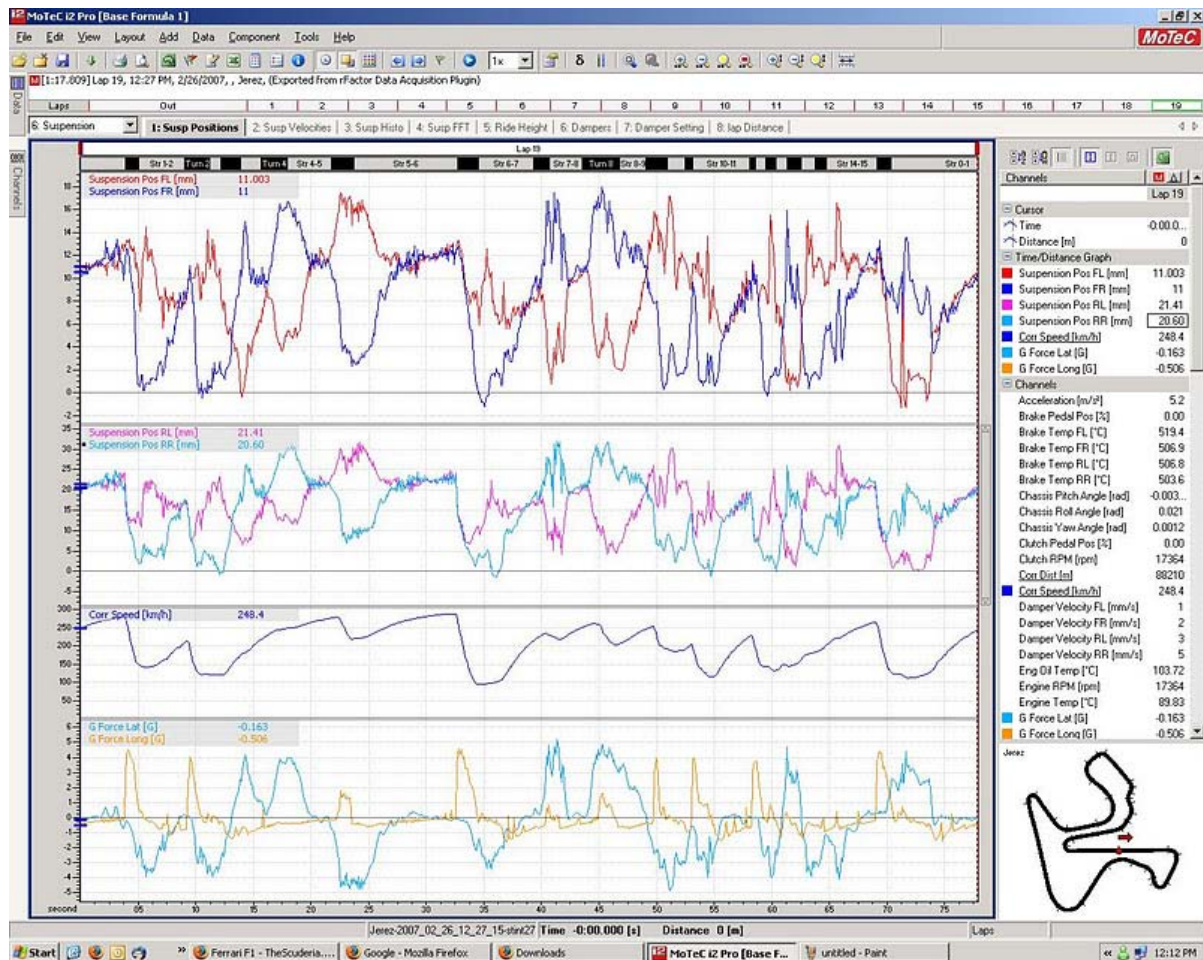
<sup>3</sup> Disques en carbone-carbone: un volume de fibres de polyacrylonitrile (PAN) pré-orientées est carbonisé en une sorte de feutre en forme de disque. Ce feutre est ensuite placé dans un four parcouru par des gaz hydrocarbonés qui déposent du carbone pur sur les fibres et densifient ainsi le matériau. Un disque terminé pèse environ 1,4 Kg avec un coefficient de friction de 0.6 entre 400°C et 1000°C. Ceci est à comparer avec les disques de frein en acier (3 Kg, 0.1 de coefficient de friction).

## Télémétrie

La télémetrie représente la face la plus visible de la révolution que l'électronique a apporté au sport automobile. Un simple boîtier (l'ECU<sup>4</sup>) noir connecté à plus de 300 capteurs enregistre à tout moment et plus de mille fois par seconde tous les paramètres de fonctionnement de la voiture, et modifie le comportement de celle-ci dans toute la mesure autorisée par le règlement. Par exemple, le changement de vitesse était automatique jusque fin 2003 (A partir de 2004, il est redevenu à nouveau manuel).



Engine ECU



Les données sont enregistrées sur des cartes mémoire compact-flash. Certaines données plus vitales sont transmises en temps réel vers le stand, tandis que le gros des mesures est transféré lors du passage de la voiture (un 'burst' de 3 à 5 mégaoctets est transmis en 100 millisecondes avec les données accumulées sur un tour). La totalité des données vitales et non-vitales représente entre 40 et 500 Mégaoctets et est lue par un ordinateur portable dès le retour au stand de la voiture pour analyse ultérieure.

<sup>4</sup> ECU = Electronic Control Unit : comprend l'ordinateur de gestion du moteur et de la boîte, de 'affichage au tableau de bord, des radios d'émission/réception de données et l'enregistreur de données.

Dans les usages de la télémétrie, on trouve tout d'abord l'optimisation des réglages de transmission (rapports de boîte), d'embrayage, puis le contrôle des débattements de suspension, des températures de pneus et le suivi des paramètres du moteur qui peuvent signaler par des vibrations, des chutes de pression ou des élévations de températures des débuts de comportements anormaux. Il est ainsi possible de limiter le régime moteur ou de modifier le comportement d'un organe pour diminuer les efforts demandés et prolonger sa durée de vie.

Extrait d'un commentaire de Patrick Head à propos de l'ECU de Hewlett-Packard utilisée par Williams Grand Prix : « *Every lap there is approximately 17Mb of data collected from approximately 80 sensors that are measuring over 200 parameters on the car, such as engine and brake temperatures and oil, hydraulic and tyre pressures. This data is summarised and the reduced data set, approximately 4Mb, is transmitted using a high frequency microwave link once every lap as the car passes the pit wall. In addition, the car continuously transmits a low-bandwidth stream of essential performance data in real time as it races around the circuit. Both types of transmission are encrypted to prevent eavesdropping. Onboard there is storage for an additional 50Mb or so of logged data that can be downloaded by cable to a laptop once the car returns to the pits. In the pits the incoming data is decrypted, stored, and analysed on high performance HP ProLiant DL380 servers. The data is then shared over a local area network to the servers and Evo notebooks that the Race Engineers use to analyse the behaviour of the FW25. And note that The Williams F1 BMW FW25 cannot be started without being connected to an HP notebook computer* »

On peut trouver sur le site Internet de Williams des données de télémétrie relevées sur tous les circuits du championnat (<http://www.bmw.williamsf1.com/>) .

## Aérodynamique

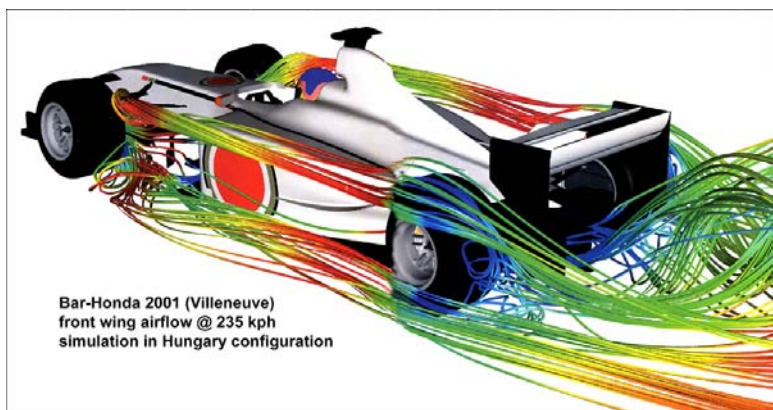
L'aérodynamique est vitale pour la vitesse en ligne droite, mais surtout pour la tenue de route. C'est donc lors des freinages et en virage, et donc souvent en léger dérapage, qu'elle est la plus importante. Les niveaux d'appui obtenus (voir le tableau ci-dessus) sont très élevés ; on le vérifie aux valeurs de  $C_z$  (coefficient d'appui vertical, usuellement entre 2.5 et 3.0) ceci au détriment du  $C_x$  (coefficient de traînée) qui est proche de 1.0, ce que l'on peut comparer au  $C_x$  d'une voiture de tourisme actuelle (<0.35).

Imaginons un peu : Sur une route située au plafond, toutes les formules 1 collent à la route sans tomber à partir de la vitesse de 160 km/h.

Ces valeurs ne sont pas le fruit du hasard, mais d'un travail très important en soufflerie et en simulation. Vu leur coût et les demandes incessantes de tests, ces installations sont en service



Pininfarina's tunnel in Italy - with moving belt for ground effect simulation

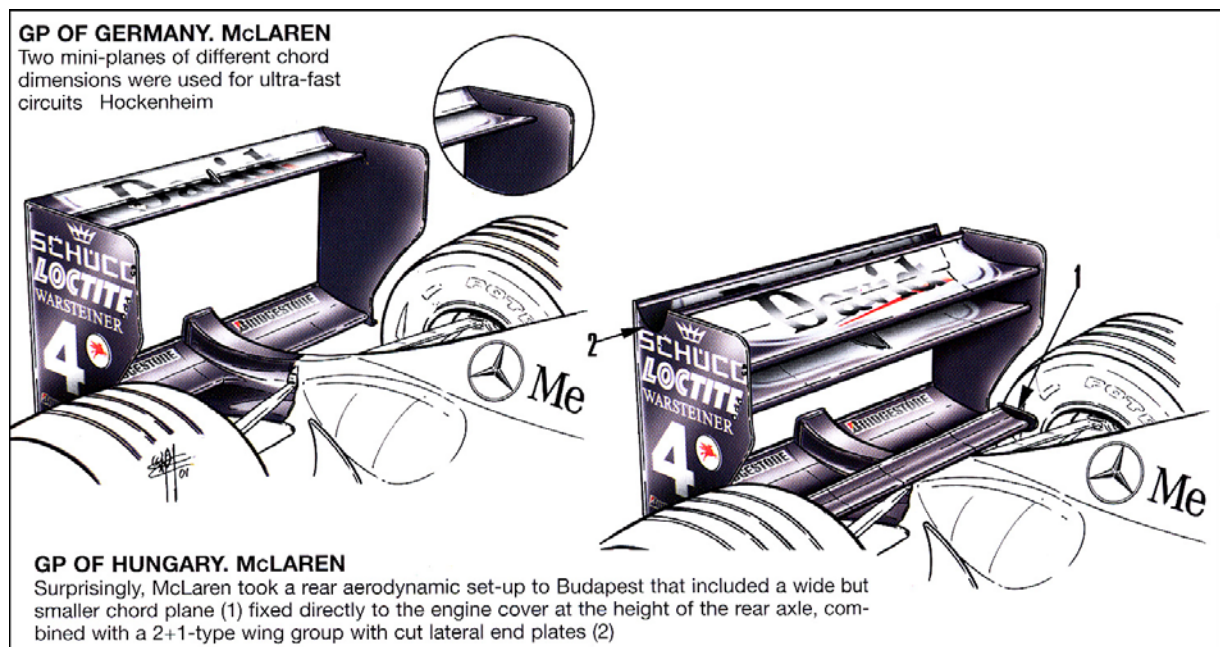


Bar-Honda 2001 (Villeneuve)  
front wing airflow @ 235 kph  
simulation in Hungary configuration

7 jours sur 7, toutes les semaines de l'année.

Bien entendu, si le règlement n'était pas si contraignant, les formes des F1 seraient très différentes. Les roues non carénées par exemple représentent une énorme pénalité. Le jeu des ingénieurs consiste donc à minimiser le problème en orientant des flux d'air judicieux en direction des zones où toute carrosserie est interdite pour créer une sorte de paroi immatérielle qui améliorera l'efficacité de l'ensemble.

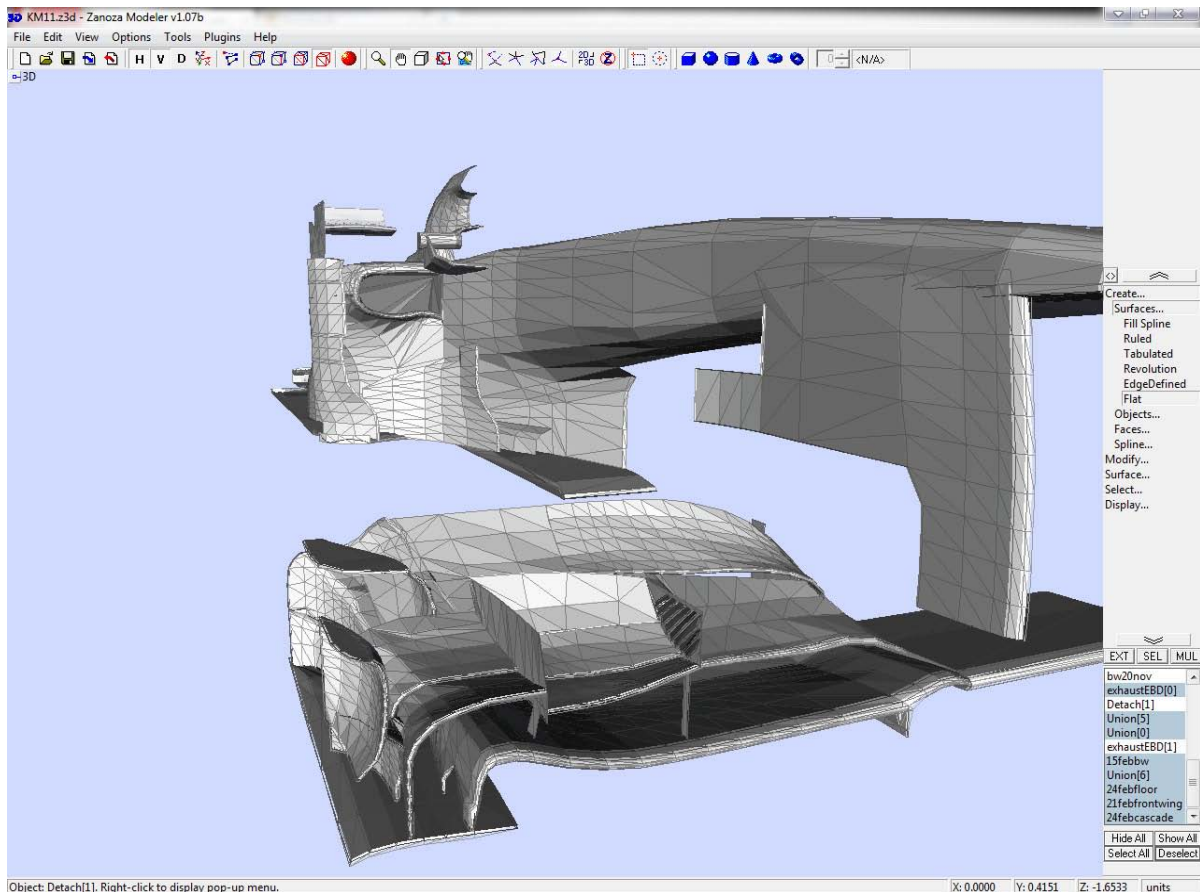
Les effets aérodynamiques les plus profitables sont dépendants des phases de course : virage, ligne droite, freinage, dépassement. Ils dépendent aussi des conditions extérieures comme les pressions, températures, taux d'hygrométrie, intensité de la pluie, direction et vitesse du vent... Et comme le règlement interdit les appendices aérodynamiques mobiles, il faut trouver une seule configuration qui représente le meilleur compromis pour toutes ces situations. Ce compromis est bien sûr, différent d'un circuit à l'autre. Les grands prix d'Angleterre et d'Italie sont les plus rapides, ceux de Monaco et de Hongrie sont les plus lents, ce qui donne des réglages visiblement très différents. Sur la vue ci-dessous, on constate que le nombre et la disposition des ailettes de l'aileron arrière sont très différents.



L'aileron avant est le plus critique, car tout l'air qui entoure la voiture passe d'abord par lui. Les modifications les plus minimes de cet élément ont donc des répercussions disproportionnées sur la tenue de route et les performances globales de la voiture.

On remarque par exemple les échancrures au sommet des plaques d'extrémité qui servent à améliorer le flux d'air sous la voiture dans les virages en glissade, un des moments où l'appui aérodynamique est le plus vital et où la distance critique sol-véhicule est la moins certaine à cause des vibreurs et autres bordures. Les petites ailettes triangulaires à l'extérieur des plaques d'extrémité ont pour but de réduire les turbulences générées par les roues avant.



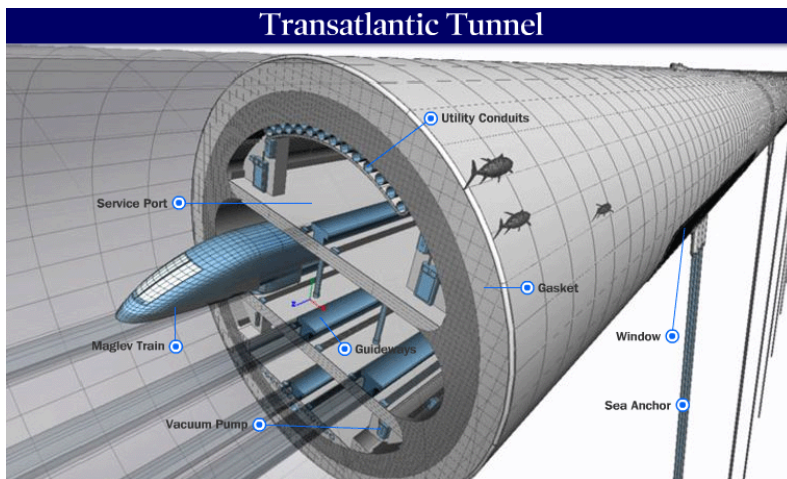


## Conclusion

Les innombrables compromis et leur évolution au fil du temps que nous n'avons fait qu'évoquer ci-dessus démontrent l'inventivité des ingénieurs sur un problème après tout très simple à définir : concevoir l'engin le plus rapide du monde respectant un règlement d'une cinquantaine de pages. Bien sûr, le fait de disposer de plus de 25 millions d'euros par voiture et par an permet d'étudier sérieusement les solutions envisagées et de reculer nombre de paramètres à une fraction de pourcent de ses limites théoriques....

## CH6 : Le tunnel transatlantique

Avec ce projet, nous restons dans le domaine du possible, mais nous entrons dans celui de l'incertain. Le projet de tunnel transatlantique est en effet un projet tellement extrême que, même s'il semble réalisable, il reste douteux qu'il soit jamais rentable. Ceci n'empêche pas nombre de bureaux d'études de se pencher sérieusement sur le problème.



### Le concept

Rendre le trajet New-York-Londres plus court que le trajet Londres-Paris, une utopie ? Tel est le défi du tunnel transatlantique. L'idée est de construire un tunnel flottant à 50 mètres sous la surface pour éviter les problèmes qui y sont liés (vents, vagues, débris, bateaux, etc.) et les problèmes de profondeur (pressions extrêmes). Construire un tube ne suffit cependant pas. Encore faut-il pouvoir s'y déplacer rapidement. La solution retenue est celle du train à sustentation magnétique. Il faut donc acheminer du courant électrique jusqu'au plus profond du tunnel. De plus, pour atteindre des vitesses élevées, le tube devra être vidé de son air. Une accélération constante pendant 1/3 du trajet, 1/3 à vitesse constante et 1/3 pour la décélération nous amène à 54 minutes de temps de trajet pour une vitesse de croisière de 8.000 Km/h. Les trains pourraient se suivre toutes les 15 minutes, voire moins, assurant un débit de passagers et de marchandises très élevé. Des solutions moins radicales, avec des vitesses moindres et un vide partiel sont aussi étudiées.

### Les défis

Les défis sont liés à la taille du projet. Les technologies de base sont connues mais la logistique sera le problème principal. Les



Pompe à vide



Tunnel de service supérieur



Voie de guidage des trains maglev.



Le joint entre 2 des 54.000 sections du tunnel



Un des 100.000 points d'ancrage et ses câbles

problèmes à résoudre ont trait plus à l'exploitation qu'à la construction : alimentation électrique, équipes de maintenance, régulation de position du tunnel, maintien du vide, gestion des situations d'urgence.

**La construction :** A elle seule, la construction du tunnel mobilisera des ressources énormes. La quantité d'acier nécessaire à la construction représente la production mondiale d'acier pendant une année entière.

Les sections de tunnel, construites à terre et acheminées en place, demanderont l'emploi de barges de transport résistant aux conditions météo les plus dures. Les ancrages dans les fonds marins seront réalisés à distance depuis des navires en surface, par un procédé dit « à cloche de succion ».

**Les courants marins et l'activité sismique :** Ce sont les deux sources majeures d'efforts tendant à déplacer le tunnel. Les 100.000 points d'ancrage devront donc être capables d'ajuster leurs longueurs de câble automatiquement pour maintenir l'intégrité et la rectitude du tunnel. Ces câbles et leurs automatismes devront bien entendu être maintenus en état en permanence, ce que l'on imagine difficile sans intervention humaine.

Les courants, tel que le gulf stream sont particulièrement actifs aux profondeurs envisagées et la pression résultante est la cause d'effort la plus importante pour le tunnel. Quant à l'activité sismique dans la zone du rift mid-atlantique, on y dénombre en moyenne trois tremblements de terre par jour, ce qui indique le niveau de complexité et de redondance des ancrages qui seront nécessaires dans cette zone.

**La maintenance :** Elle nécessitera plus que probablement des postes d'équipage en poste répartis tout au long du tunnel pour veiller au bon fonctionnement des rails du maglev, des pompes à vide, de la signalisation, des systèmes de secours, etc.

**Le vide :** L'énergie nécessaire pour vider le tunnel de son air représente la puissance de 50 turbines d'avion fonctionnant en continu pendant trois mois.

### Quelques chiffres

- Tunnel flottant à 50 mètres sous la surface.
- 4.800 Km de longueur
- 2 voies maglev+ 1 voie de service
- 54.000 sections de 89 mètres construites à terre et assemblées sur place
- 108.000 ancrages dont certains à plus de 5.000 mètres de profondeur.
- > 500 millions M<sup>3</sup> à maintenir sous vide.



The 54,000 tunnel sections would be transported by a specialized ship called an immersion pontoon, then lowered into place.



#### Ocean Currents

The tunnel would have to withstand some of the Atlantic's strongest currents, including parts of the Gulf Stream. Its tethering system would allow it to sway slightly with the moving water.

- 1 milliard de tonnes d'acier
- 50 ans de durée de construction
- Vitesse max du train maglev : 8.000 Km/h
- Durée du trajet : 54 minutes
- Coût > 12.000 milliards €

## Rentabilité

Sachant qu'une quinzaine de millions de personnes traversent l'atlantique chaque année pour un tarif moyen de 300€ le chiffre d'affaire passagers annuel est estimé à 4,5 milliards d'euros. Ajoutons un montant légèrement supérieur pour le trafic marchandises et on arrive à un total de 10 milliards € par an. On voit donc difficilement la rentabilité du tunnel transatlantique qui coûtera plus de 12.000 milliards €, même en imaginant qu'il susciterait un accroissement notable des échanges intercontinentaux.

Par contre, le concept, encore jamais testé à l'heure actuelle, du tunnel flottant est intéressant dans d'autres situations (légèrement) moins extrêmes. Ainsi, une traversée de fjord près de Stavanger en Norvège est à l'étude (1000 mètres de long, profondeur du fond supérieure à 400 mètres). D'autres sont aussi à l'étude aux USA et au Japon.

## Références

### Tunnel transatlantique

<http://dsc.discovery.com/convergence/engineering/transatlantictunnel/interactive/interactive.html>

[http://www.ananova.com/news/story/sm\\_337462.html](http://www.ananova.com/news/story/sm_337462.html)

[http://www.halfbakery.com/idea/Trans-Oceanic\\_20Tunnel](http://www.halfbakery.com/idea/Trans-Oceanic_20Tunnel)

### Projets similaires

[www.msft.no](http://www.msft.no) tunnel flottant norvégien.

<http://www.subterra-inc.com/Bulletins/SFT.pdf> tunnel flottant sous le lac Washington

## Le tunnel du Saint-Gothard : le chantier du siècle

C'est un chantier titanesque qui s'achève le 15 Octobre 2010, après dix-sept ans de travaux. Les TGV franchiront le Gothard en 2017.

Le plus long tunnel ferroviaire du monde est enfin percé. Après dix-sept ans de travaux et soixante ans de planification, le chantier du siècle devient réalité au Saint-Gothard. Plus long que le tunnel sous la Manche, celui du Gothard mesure 57 kilomètres! le Gothard sera plus long que deux autres tunnels en construction: le Brenner (55 km), entre Innsbruck (A) et Bressano (I), et le Moncenisio (53 km), entre Turin (I) et Lyon (F). C'est la première fois qu'une ligne de plaine franchira les Alpes sans dépasser les 550 mètres. La faible déclivité du tracé (maximum 12,5 pour mille) présente surtout un avantage pour les trains marchandises, qui ne devront plus s'équiper d'une locomotive supplémentaire.

Des trains, il en passera 300 par jour. Cette nouvelle liaison ne favorisera pas seulement le transbordement des marchandises de la route vers le rail, avec 400 millions de tonnes de marchandises par an: elle permettra aux voyageurs de franchir le Gothard chaque jour pour se rendre au travail, ce qui ouvre de nouvelles perspectives sur le marché de l'emploi et du logement.

### Le jour de la jonction : 15/10/2010

La jonction est réalisée par un tunnelier géant qui creuse le dernier mètre de roche entre Faido (TI) et Sedrun (GR), à 2500 mètres sous terre. Elle marque une étape décisive de ce projet herculéen, entre le portail nord d'Erstfeld (UR) et l'entrée sud de Bodio (TI). Une fois la jonction établie, il faudra mettre les deux tubes du tunnel aux gabarits définitifs. Il s'agira ensuite de les équiper, ce qui prendra encore sept ans.

## RECORD MONDIAL BATTU

Ses 57 kilomètres font du Gothard le tunnel ferroviaire le plus long du monde.

Tunnel du Gothard	<b>57 km</b>
Tunnel de Sei-Kan (Jap.)	<b>53,85 km</b>
Tunnel sous la Manche	<b>50,45 km</b>

# 152

En kilomètres, la somme de tous les tunnels, puits et galeries nécessaires pour un ouvrage de 57 km. C'est le tube est qui sera inauguré le 15 octobre: le tube ouest ne sera achevé qu'au printemps.

# 45

En degrés, la température mesurée dans la montagne, à une profondeur de 2500 mètres. Les refroidisseurs la réduisent au maximum légal de 28 degrés.

# 2700

En tonnes, le poids des quatre tunneliers d'une longueur de 450 m (diamètre: 8,8 m ou 9,6 m) capables de creuser 40 mètres par jour. Seul le tronçon de Sedrun a été escavé à l'explosif.

# 2500

Le nombre de mineurs, d'ingénieurs, de géomètres, de contrôleurs et de guides qui travaillent simultanément, sur les chantiers ou dans les bureaux.

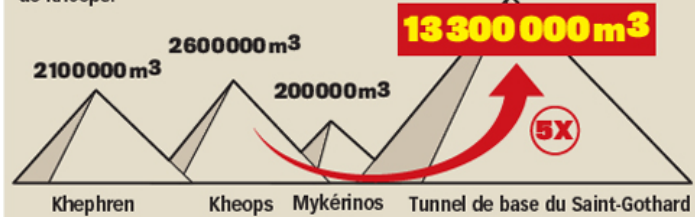
# 8

Le nombre d'employés qui ont perdu la vie. Pour le premier tunnel ferroviaire inauguré en 1882, 200 ouvriers sont morts pour creuser 15 kilomètres.

# 9,8

En milliards de francs, le montant financé par la redevance sur le trafic des poids lourds (65%), la taxe sur les carburants (25%) et la TVA (10%).

Les 13,3 millions de mètres cubes déblayés représentent cinq fois la pyramide de Kheops.



## CH7 : L'ascenseur spatial

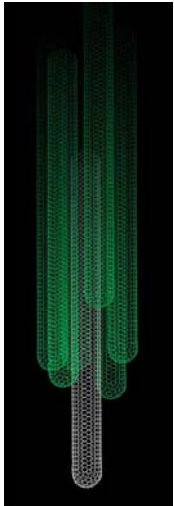
### Le concept

Le concept de l'ascenseur spatial est celui d'une structure s'étendant de la terre jusqu'à l'orbite géostationnaire et au-delà. Suivant les lois de Newton, il devrait avoir son centre de gravité à 36.000 Km d'altitude au dessus de l'équateur pour rester en synchronisme avec la rotation de la terre. Une masse fixée à l'extrémité externe maintiendrait la structure (un câble) tendue comme une fronde qu'on fait tourner autour de sa tête. L'intérêt de l'ascenseur spatial réside dans le fait qu'il est possible de le construire d'ici 15 à 20 ans pour un prix raisonnable (disons, moins cher que le projet Apollo) et qu'il réduirait le prix du kilo en orbite géostationnaire de 40.000€ à 200 €, ce qui révolutionnerait toute l'industrie spatiale.

### Un peu d'histoire

L'idée d'un ascenseur spatial existe depuis 1895, date à laquelle Konstantin Tsiolkovski (le précurseur des fusées à carburant liquide) a fait les premières estimations. Les calculs ont rapidement montré que même le meilleur acier est incapable de supporter son propre poids sur de telles hauteurs. Cependant, l'avènement des nanotubes de carbone, ce nouveau matériau du 21<sup>ème</sup> siècle change la donne et rend la chose possible.

Le concept moderne basé sur les câbles en nanotubes est dû à Yuri Artsutanov de Saint-Petersburg (1960). Le livre 'The Fountains of Paradise' de Arthur Clarke en 1978, met en scène le concept de façon réaliste.



Structure de nanotubes de carbone

Une conférence annuelle sur le sujet est organisée depuis 2002. Celle de 2003 a eu lieu à Santa Fe au Nouveau Mexique.

Actuellement une équipe de la NASA<sup>5</sup> et divers laboratoires gouvernementaux américains<sup>6</sup> et quelques privés<sup>7</sup> étudient sérieusement la faisabilité des ascenseurs spatiaux. Les travaux de l'ISR ont fait l'objet d'une publication et montrent les divers aspects du problème.



<sup>5</sup> Au NAIRC (NASA Institute for Advanced Concepts), l'équipe 'space elevator' fondée par Bradley Edwards.

<sup>6</sup> Par exemple, le Marshall Space Flight Center

<sup>7</sup> ISR, créé et dirigé par Bradley Edwards.

## Les défis

- Développer des filaments continus de nanotubes de carbone 100 fois plus résistants que l'acier. La recherche est en cours, les progrès sont constants et la limite théorique montre qu'il est possible, quoique difficile, d'y arriver.
- Améliorer la technologie des filins spatiaux, le contrôle et la résistance de ces structures dans l'espace.
- Développer le transfert d'énergie par faisceau électromagnétique à longue distance ainsi que la propulsion électromagnétique sans contact.
- Etudier les infrastructures de grande taille en orbites basse et géostationnaire.
- Améliorer et fiabiliser les techniques de détection de débris en orbite basse et des météorites.

## La physique

### Le câble

L'acier pèse 7,8 Kg/litre et a une tension de rupture de 42 tonnes/cm<sup>2</sup>. Les calculs montrent que sous une gravité de 1g, la longueur de câble en acier de section constante capable de s'auto-supporter est de 53,8 km. Le câble devrait donc avoir une section décroissante depuis son point de suspension jusqu'au sol. Les calculs donnent un diamètre de câble qui doit doubler tous les 27 km, soit plus que le diamètre du système solaire à 38.000 km d'altitude ! L'acier n'est donc pas la solution. Par contre, un nanotube de carbone idéal a une résistance de 1.327 tonnes/cm<sup>2</sup> pour une masse volumique de 1,3 kg/litre, ce qui donne une longueur autoportante sous 1g de 10.204 km. (En fait la limite théorique des nanotubes est supérieure à 3 millions de kg/cm<sup>2</sup>).

De plus en considérant que la gravitation diminue avec l'altitude, tout se passe comme si le câble, étant soumis à 1g de force partout, n'avait que 4.940 km de long. Un câble de largeur constante pourrait donc remplir le rôle de support. Avec un câble de dimensions optimisées (décroissant donc légèrement), on arrive à un câble utilisable pouvant supporter 20 tonnes de charge utile ne pesant que 22 tonnes.

Le câble serait en pratique un ruban extrêmement plat de 1 micron d'épaisseur, 13 cm de large au sol et 35 cm de large en son centre de gravité (à 38.000 km) pour 100.000 km de long ! Le déploiement se ferait à partir de l'orbite géostationnaire (GEO) avec une bobine de câble amenée par des vols de navette ou d'Ariane 5 et assemblée en orbite basse (LEO), puis enlevée en GEO par des

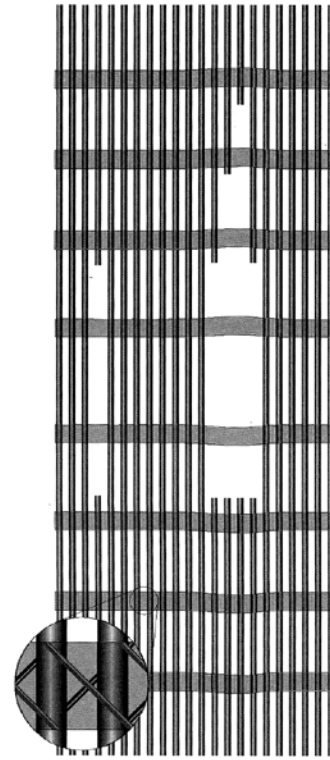
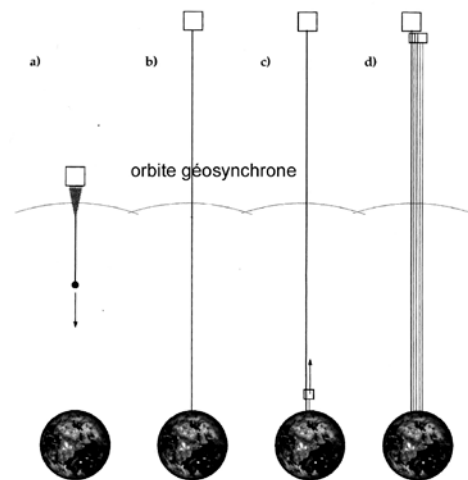
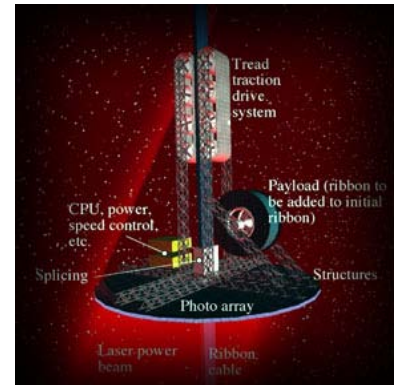


Figure 2.3: Proposed ribbon design. Fiber with carbon nanotube reinforced tape sandwich interconnects are shown (inset). Damaged areas with fibers which have slid are shown.



fusées, elles aussi lancées par les mêmes moyens. La charge utile de ce ruban initial serait de 1.800 kg et son rôle serait évidemment de permettre à bon compte la construction d'un câble plus épais avant qu'il ne casse. On utiliserait pour cela des «cabines d'ascenseur» propulsées le long du câble et déroulant derrière elles des brins supplémentaires renforçant le câble de base à chaque passage et terminant leur course comme contrepoids pour maintenir le câble tendu. Les études du NIAC montrent que les 230 premiers véhicules se déplaçant le long du câble initial pourraient déployer, à raison d'un tous les 3 à 4 jours, un câble de 20 tonnes de résistance en moins de 2 ans et demi.



La section idéale du câble est fonction de l'altitude car la gravité change de 1 g au sol à 0 g en orbite GEO et à des valeurs négatives au-delà. Mise en formule, la masse totale du câble est :

$$M_c = \frac{\rho}{\sigma} \frac{m M_p G}{r_o^2} e^{\left( \left( 1 + \frac{\rho M_p G}{\sigma r_o} + \frac{3\rho}{2\sigma} \sqrt{(M_p G w_p)^2} - \frac{3r_o}{2} \sqrt{\frac{w_p^2}{M_p G} + \frac{r_o^3 w_p^2}{2 M_p G}} \right) r_i - \frac{\rho}{\sigma} \left( \frac{M_p G}{r} + \frac{1}{2} w_p^2 r^2 \right) \right) dr}$$

## L'énergie

Alimenter en énergie les véhicules montant le long du câble reste un problème crucial. La solution envisagée actuellement est de transmettre cette énergie en focalisant un faisceau d'énergie lumineuse ou micro-ondes vers le mobile muni de capteurs appropriés. Par exemple, un laser à électrons libres (émettant sur 840 nm) et un ensemble de capteurs photovoltaïques (GaAs) de 13 mètres de diamètre pourraient transmettre les 100 à 2.400 KW nécessaires à monter 20 tonnes à 200 km/h le long du câble. La propulsion des mobiles serait assurée par des rouleaux s'appuyant sur le ruban du câble.

Une autre solution serait de faire un double ruban monté sur des poulies d'extrémités et entraîné mécaniquement par des moteurs aux extrémités (au sol et sur une station à énergie solaire en bout de câble).

## Les risques

### Les Débris

Le risque principal est la destruction du câble par des météorites ou autres débris circulant en orbite basse autour de la terre. Pour minimiser les dégâts dus aux petits débris et aux micrométéorites, on réalise un câble en forme de ruban (largeur 1 mètre, épaisseur 10 microns, section nette 2 mm<sup>2</sup>). Un mince ruban ne sera que peu vulnérable aux chocs avec des mobiles de quelques millimètres ou centimètres. Les débris de plus grande taille seront repérés par les réseaux de surveillance radar de l'espace proche. Ces réseaux existent déjà mais devront être renforcés. Une fois une trajectoire de collision détectée, on déplacera la base au sol de quelques kilomètres afin d'éviter la trajectoire du mobile dangereux.

La base au sol sera donc idéalement établie sur une plateforme flottante similaire aux plateformes pétrolières. Par un déplacement planifié, les obstacles en orbite seront évités. Les



risques de collision sont d'un peu plus de deux par jour, mais un déplacement de la base de l'ordre du kilomètre par jour suffira à maintenir le câble à distance de sécurité compte tenu de l'incertitude sur les orbites recensées de satellites et de débris en orbite basse.

## Les orages

Les décharges électriques d'un orage seront irrémédiablement attirées par le câble qui sera approximativement au même potentiel électrique que le sol. La solution la plus évidente est donc d'éviter totalement les orages. Heureusement, la zone de la terre la moins affectée par les orages est justement une bande de quelques cent kilomètres de largeur sur mille kilomètres de long le long de l'équateur dans le pacifique. Cette zone serait donc idéale pour y fixer la base de l'ascenseur. Les mouvements de la plateforme flottante seront utilisés aussi pour se tenir à distance des orages qui peuvent malgré tout s'y promener quelques fois par an.

## L'oxygène atomique

La présence d'oxygène atomique et d'ozone dans l'air est la cause d'un important risque de corrosion des nanotubes de carbone et des polymères utilisés pour les 'coller' entre eux dans le ruban en matériau composite. Un revêtement spécial et un entretien spécifique (remplacement et/ou recouvrement par un vernis de protection) doivent donc être prévus sur les premières dizaines de kilomètre du câble. Cette zone aura d'ailleurs probablement une forme différente du large et fin ruban idéal aux altitudes moyennes car, près de la terre les risques de collision avec des micrométéorites est plus faible. Par contre, l'effet du vent doit être minimisé, ce qui est plus facile avec un ruban plus étroit.

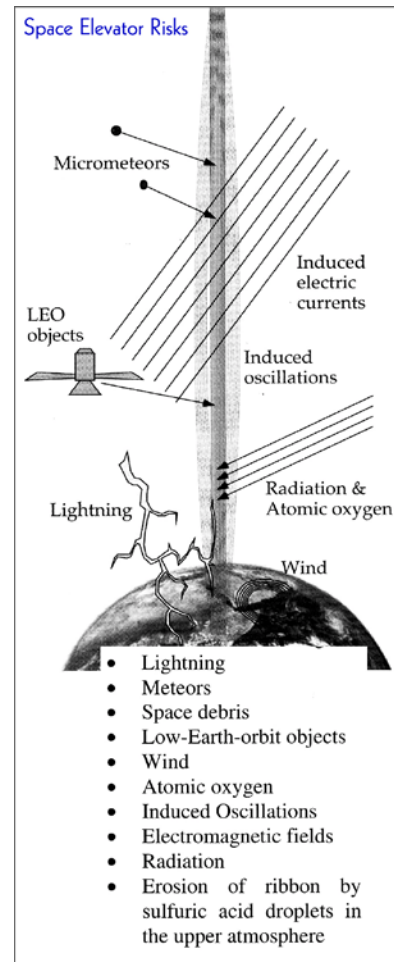
## Les oscillations latérales

Les oscillations pourraient devenir dangereuses si elles se produisent à la fréquence de résonance. Cette dernière correspond à une période propre de 7 jours dans le cas du ruban étudié par ISR. Les oscillations pourront être aisément amorties par un déplacement approprié de la station de base.

## Point de vue économique

### Financement

Le prix de revient du premier ascenseur spatial est estimé à 6 milliards €, recherche et développement inclus. Par comparaison, le projet Apollo qui a mené l'homme sur la lune a coûté 125 milliards €(au cours actuel), soit 20 fois plus cher<sup>8</sup>.



<sup>8</sup> On peut en déduire que le transport d'un des 383 kilos de roches lunaires ramenées dans le cadre d'Apollo revient donc à 326 millions €le kilo.

Le financement pourrait être privé, public, ou une combinaison des deux. Comme le projet semble extrêmement rentable, les investisseurs privés seront assez faciles à trouver. Un amortissement de l'investissement sur 20 ans montre que le coût de l'investissement par jour est de 822.000 € auxquels s'ajouteront les frais d'exploitation, ce qui mène à un coût journalier total d'environ 1.000.000 €

Avec des véhicules de 20 tonnes, dont 13 de charge utile, se déplaçant à 200 km/h, le trajet durera 7,5 jours pour l'orbite géostationnaire. Le prix de l'énergie électrique consommée pour un trajet revient à moins de 3€/kg.

Une astuce intéressante vient du fait que, la gravité diminuant rapidement avec l'altitude<sup>9</sup>, on peut lancer plusieurs véhicules sur le câble sans dépasser la charge maximale ; on peut donc avoir entre 3 et 4 véhicules à la fois sur le câble s'ils se déplacent dans le même sens. Si on se débarrasse des véhicules montants –par exemple pour contribuer à créer le contrepoids nécessaire en bout de câble- ce départ toutes les 70 heures environ, nous amène le prix, amortissements et coût du véhicule compris, de la charge en orbite GEO à 224 €/kg, ce qui se compare très favorablement au coût actuel par Ariane 5 (15.000 €/kg) ou par la navette (60.000€/kg).

### **Economie d'échelle et gestion de trafic**

Avec une gestion de trafic intelligente et compte tenu du fait que nombre de charges ne montent pas jusqu'à l'orbite GEO, mais seront larguées bien avant comme les satellites en orbite basse, et que d'autre part, certaines charges doivent être ramenées au sol, on obtient des coûts situées entre 200 et 250€/kg de charge envoyée en orbite GEO.

Evidemment ce raisonnement devient caduc dès la construction d'un second ascenseur spatial, car chacun pourra être utilisé dans un seul sens, montée au descente, et ainsi augmenter le débit. De plus, comme le coût du second sera bien inférieur car le coût de mise en orbite sera celui d'usage du premier ascenseur et plus celui de la méthode Ariane 5 ou navette, une économie d'échelle important s'installe :

---

<sup>9</sup> A 14.000 KM d'altitude, la gravité n'est plus que de 0.1g.

*Cost of Producing additional Ribbons*

Component	First Ribbon	Second Ribbon	Third Ribbon	Fourth Ribbon
Launch cost to GEO	\$1,000M	0	0	0
Spacecraft	\$587M	0	0	0
Ribbon production	\$390M	\$150M	\$75M	\$30M
Climbers	\$161M	\$80M	\$40M	\$30M
Power beaming station	\$2,100M	\$1,600M	\$1,000M	\$600M
Power gen. station	\$40M	\$40M	\$40M	\$30M
Anchor station	\$120M	\$120M	\$100M	\$100M
Tracking facility	\$36M	0	0	0
Admin Facilities	\$202M	0	0	0
Operation	\$210M	\$30M	\$20M	\$10M
Misc. & contingency	\$1,154M	\$280M	\$125M	0
<b>TOTAL</b>	<b>~\$6B</b>	<b>~\$2.3B</b>	<b>~\$1.4B</b>	<b>~\$0.8B</b>

Avec 2 câbles en service ou même plus, les coûts descendent sous les 150€/kg (aller) et 190€/kg (aller et retour). Et à ce stade, renforcer le troisième câble pour le faire passer à une capacité de 200 tonnes à la place de 20 ne prendrait que six mois pour des véhicules spécialisés (les 'splicers') conçus pour ajouter des fibres au câble existant, pour les renforcer et pour les réparer. Le poids d'un ruban de 200 tonnes de capacité serait de 8.907 tonnes et son prix ne devrait pas dépasser les 5 milliards €. On peut donc envisager un état (dit 'seconde génération') où sont présents deux câbles de 13 tonnes de charge utile et deux câbles de 140 tonnes de charge utile par véhicule, chaque paire de câbles comprenant une voie montante et une voie descendante. Les coûts des 4 premiers câbles s'élevant à 6, 2,3, 5 et 4 milliards €représentent un investissement total de 17,3 milliards €, l'ensemble n'offrant plus alors qu'un coût par kg transporté de 51 €! En optimisant le trafic avec des véhicules plus légers que le maximum autorisé, mais plus nombreux, il est même possible dans cette configuration, d'arriver à 13,5 €/kg.

## Destinations

A quoi servira un tel trafic ? Est-ce réaliste d'imaginer une demande importante pour le trafic LEO et GEO ?

Les destinations seront celles qui existent maintenant mais aussi celles qui deviennent possibles suite à la réduction du prix du transport :

- Le lancement, la réparation et la récupération de satellites en orbite GEO (Seul le premier est possible actuellement).
- Le lancement de satellites en orbite LEO : la totalité des satellites en fonction actuellement pourraient être lancés pour quelques pourcents du prix actuel. On pourrait aussi les faire plus lourds et moins résistants aux chocs et vibrations, ce qui réduirait leur coût et augmenterait d'autant leur nombre.
- La construction de stations permanentes géostationnaires
- Les centrales électriques solaires géostationnaires
- L'industrie en apesanteur, l'industrie travaillant sous vide.
- Les stations d'émission d'énergie vers les vaisseaux lointains
- L'exploration de la lune et l'exploitation de l'hélium3 lunaire pour les centrales à fusion (ITER, etc).

- Les télescopes spatiaux géants
- Le tourisme spatial (1 personne = 1.000 à 2.000 Kg avec bagages, air et nourriture pour un séjour de durée raisonnable).
- La construction d'ascenseurs spatiaux sur Mars, la lune, les satellites de Jupiter et Uranus.

Par exemple, la seule industrie des stations solaires orbitales, qui n'existe pas actuellement faute de transport à prix abordable, pourrait utiliser un an de trafic du système pour établir ses premières centrales. Les centrales orbitales sont étudiées par la NASA depuis plus de 30 ans. Une unité devrait déployer une surface de 5x10 km de cellules solaires et transférer l'énergie récoltée vers la terre par faisceau de micro-ondes ou de lumière laser. Elle pèserait 50.000 tonnes environ et il en faudrait 60 pour alimenter les USA en électricité. La NASA a même déjà planifié la construction : 600 personnes et deux ans de travail, sans compter l'utilisation de 25% de la capacité de charge du premier ascenseur spatial de 20 tonnes de capacité. La NASA a abandonné ces projets après avoir déterminé que le coût du transport devrait être inférieur à 100\$/kg, ce qui ne semble pas possible avec les systèmes à propulsion par fusée. Mais avec un ascenseur spatial, ça le devient...



### L'AS martien

L'ascenseur spatial martien serait un des premiers candidats sur la liste des destinations extraterrestres. En effet, un lancement à 54.000 km d'altitude sur notre câble terrestre suffit à

donner les 4/5 de l'impulsion pour se placer en orbite martienne. Les 20 derniers pourcents ne peuvent être donnés par le câble : le changement d'orbite autour du soleil est gratuit (balistique), mais pas le changement de plan orbital<sup>10</sup>, qui devra être fait avec des moteurs fusées classiques. Lancer un ascenseur spatial sur Mars est bien moins cher que sur terre ; en effet, pour Mars, on part de l'orbite pour descendre et non l'inverse.

On devra donc envoyer une (grosse) bobine de câble depuis la terre et la dérouler une fois en orbite martienne. A partir de là, une station solaire peut focaliser un faisceau laser sur l'ascenseur et lui fournir l'énergie nécessaire à remonter sans les problèmes d'absorption atmosphérique que nous avons sur terre. Quant à la descente, elle ne consomme pas d'énergie. Les problèmes sont d'autant moindres que la gravité martienne n'est que de 0,38g et le câble sera donc plus court d'un tiers et plus mince de deux tiers.

Par contre, Mars pose un gros problème : les deux lunes de Mars, Phobos et Deimos, croisent l'orbite de notre futur ascenseur martien si on l'ancre à l'équateur. Il sera donc indispensable de placer l'ancrage hors de l'équateur. Heureusement, l'écart maximal des lunes martiennes est inférieur à 2° d'angle, ce qui permet de ne décaler l'ancrage que de 1000km. Et comme le mont Olympus est justement à 1000 km de l'équateur dans l'hémisphère nord de Mars, il ferait un site idéal comme base d'ancrage.

### **Sur terre**

L'économie collatérale induite par l'extension du trafic orbital serait d'un ordre de grandeur plus important que le trafic lui-même : construction au sol des câbles, des ascenseurs, des satellites et autres éléments de stations orbitales, des centrales solaires ; le transport depuis les USA et l'Amérique du sud vers la ou les stations de base en mer dans le Pacifique, etc.

### **Où en est-on ?**

Les expériences de la NASA et de l'ESA sur les câbles spatiaux ont permis de vérifier la tenue de câbles de quelques dizaines de kilomètres (en Kevlar et en carbone) en environnement spatial. Les câbles sont en général détruits par des impacts de micrométéorites ou par des décharges électriques en haute atmosphère.

Des études de corrosion par l'oxygène atomique de câbles composites attachés à des ballons captifs (à 1000 mètres d'altitude), de véhicules se déplaçant le long du câble et de transmission d'énergie par laser sont en cours d'évaluation actuellement.

Parallèlement, les recherches sur les nanotubes de carbone progressent à pas de géants. En Belgique, la société Nanocyl<sup>11</sup> fabrique des fibres de nanotubes. En France, près de Montpellier, on trouve la société Nanoledge<sup>12</sup> qui est un des leaders européens du domaine. Le prix des nanotubes est de 500€ le gramme en 2004, contre 3000€ le gramme en 2002. Quant aux propriétés mécaniques et aux quantités produites, elles sont encore loin des limites théoriques, mais doublent chaque année depuis leur découverte.

---

<sup>10</sup> L'orbite de Mars est inclinée par rapport à celle de la Terre autour du Soleil.

<sup>11</sup> Nanocyl : <http://www.nanocyl.com>

<sup>12</sup> Nanoledge : <http://www.nanoledge.com>

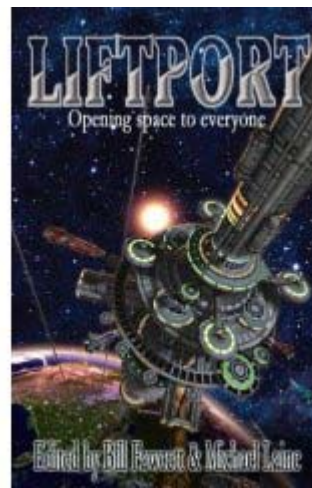
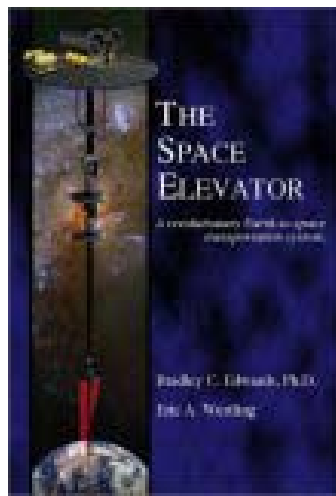
## Références

[www.spaceelevator.com/](http://www.spaceelevator.com/) Le site de référence pour le concept d'ascenseur spatial.  
<http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/nanotube.html> : le site de la recherche sur les nanotubes de carbone.  
<http://www.spaceward.org/> La fondation scientifique qui fait la promotion du concept.  
<http://www.spaceward.org/elevator2010-pb> les compétitions de chercheurs universitaires.  
<http://www.spaceward.org/elevator-howClose> le résumé des défis en une seule page.

Livre : « The space elevator » by Bradley Edwards and Eric Westling, ISBN 0-9726045-0-2.

Livre: "Liftport : Opening space to Everyone"

Livre : "Dynamics of Space Tether Systems (Advances in the Astronautical Sciences) by Vladimir V. Beletsky, Evgenii M. Levin, American Astronautical Society



## Table des Matières

Introduction.....	2
Ch1 : Les haveuses 'Bagger 288' et '293' .....	3
D'immenses gisements .....	3
La machine .....	5
Les déplacements.....	5
Les incidents .....	6
La restauration du site.....	6
Les aspects financiers et légaux .....	6
Caractéristiques techniques.....	7
Quelques images.....	7
CH2 : Immeubles et ponts de grande taille .....	11
Les gratte-ciels.....	11
Les plus hautes structures du monde.....	12
Etude de cas : Les tours Petronas.....	14
Les ponts suspendus .....	18
Le prochain grand pont .....	24
Les grands dômes .....	25
CH3 : La Supercavitation.....	29
La Cavitation .....	29
La Supercavitation .....	30
Le contrôle de trajectoire .....	31
La propulsion.....	32
Les applications .....	32
Le futur .....	33
CH4 : La fusion nucléaire .....	35
Principe de fonctionnement .....	35
Quelques chiffres .....	36
Les matériaux .....	37
Le refroidissement .....	37
Le chauffage du plasma .....	37
Les bâtiments.....	37
Collaboration internationale.....	38
Statut en 2010 .....	38
Historique de la fusion.....	38
Références .....	38
CH5 : La formule un .....	39
Finances .....	39
Les forces en jeu et le centre de gravité .....	40
Evolution des moteurs à l'époque des V10 (< 2006) .....	41
Echappement .....	44
Freins .....	44
Téléométrie.....	46
Aérodynamique.....	47
Conclusion .....	49
CH6 : Le tunnel transatlantique .....	50
Le concept.....	50
Les défis.....	50
Quelques chiffres .....	51
Rentabilité.....	52
Références .....	52
CH7 : L'ascenseur spatial .....	54
Le concept.....	54
Un peu d'histoire .....	54
Les défis.....	55
La physique.....	55
Les risques .....	56
Point de vue économique.....	57
Où en est-on ?.....	61
Références .....	62
Table des Matières .....	63