

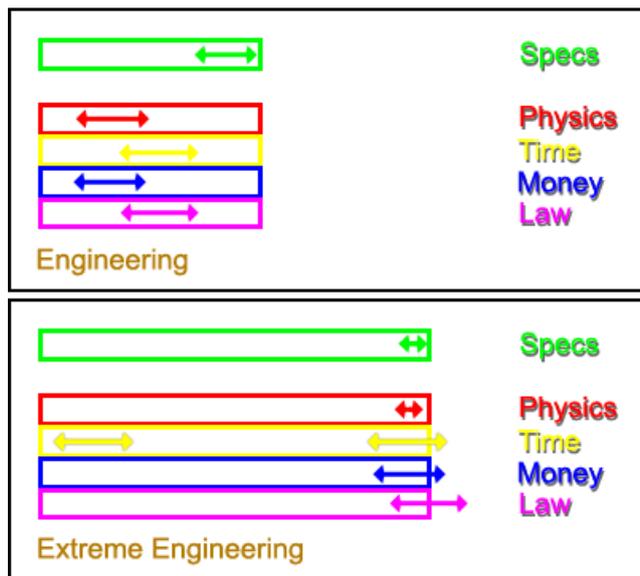
Extreme Engineering



Helmo Gramme
B. Michel
2014-2015

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 situées 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.

Chapitre 1

Les haveuses 'Bagger 288, 292 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 km², des gisements de 55 milliards de tonnes de lignite, vieux de 12 à 20 millions d'années et exploités depuis le XVIII^e siècle. Leur pouvoir calorifique correspond à celui des gisements de pétrole d'Iran et d'Irak.

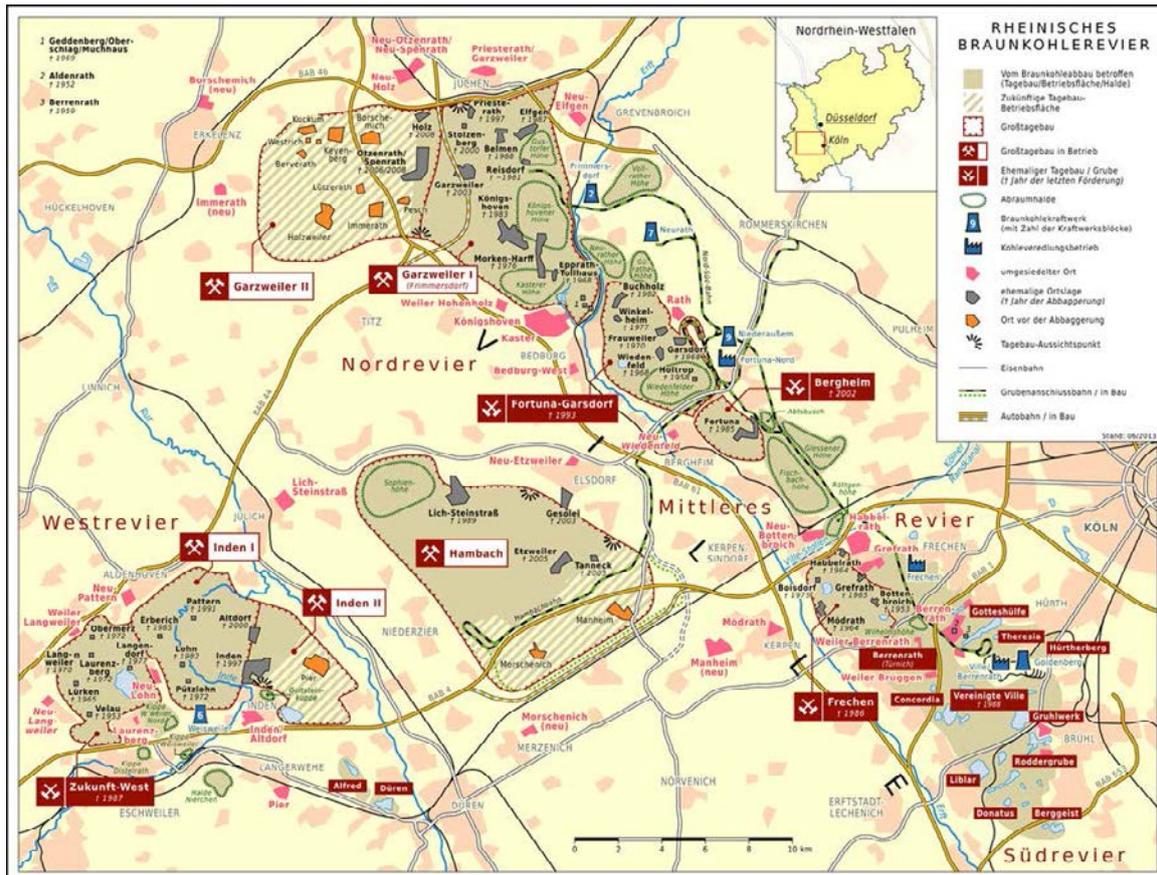
Les déblais et le lignite sont acheminés respectivement vers les terrils et les centrales par des stéréoducs qui parcourent la mine sur plusieurs kilomètres. Les lignes électriques et de commande des excavateurs suivent le tracé de ces convoyeurs. Les faisceaux de câbles aboutissent au poste de commande 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 Km²) a permis de garantir l'approvisionnement des générations futures avec un planning s'étendant actuellement jusqu'à 2045 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 8.500 hectares et 399 mètres de profondeur par rapport au sol environnant (en 2013, 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^{ème} 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 (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 câbles haute tension qui alimentent les moteurs électriques principaux de la machine.

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 dû être démontées devant les excavatrices. Cela en accord avec les fournisseurs d'énergie, qui ont dû 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 installées d'origine sur les machines en prévision de ces déplacements. En fait, la pression au sol de 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 le 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 km² (environ le tiers du site creusé), et contiendra 2 milliards de m³ 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.

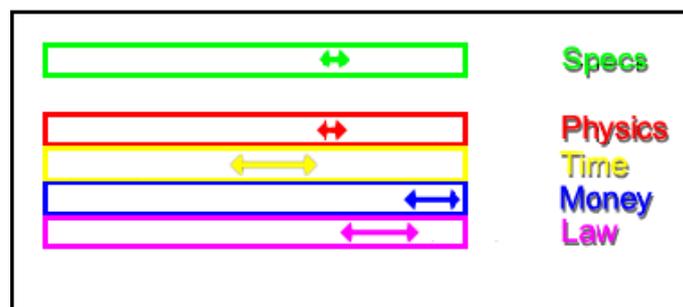
Les aspects financiers et légaux

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 RB288 (Bagger 288)	MAN TAKRAF RB292/293 (Bagger 292/293)
Année de construction	1978	1999
Equipage	5 hommes	5 hommes
Poids total à vide	12.840 Tonnes	14.877 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	20
Volume des godets	6,6 m ³	15 m ³
Nombre de chenilles	12 (8 au train avant, 4 à l'arrière)	12
Pression au sol	17.1 N/cm ²	17.9 N/cm ²
Rayon de braquage	100 mètres	50 mètres
Capacité	240.000 m ³ /jour	240.000 m ³ /jour
Puissance totale	16.560 kW	17.500 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 3 m x 14 m de long)

Une machine en cours de fonctionnement
sur le site de Garzweiler I



Remarquer 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.



Briquelette de lignite



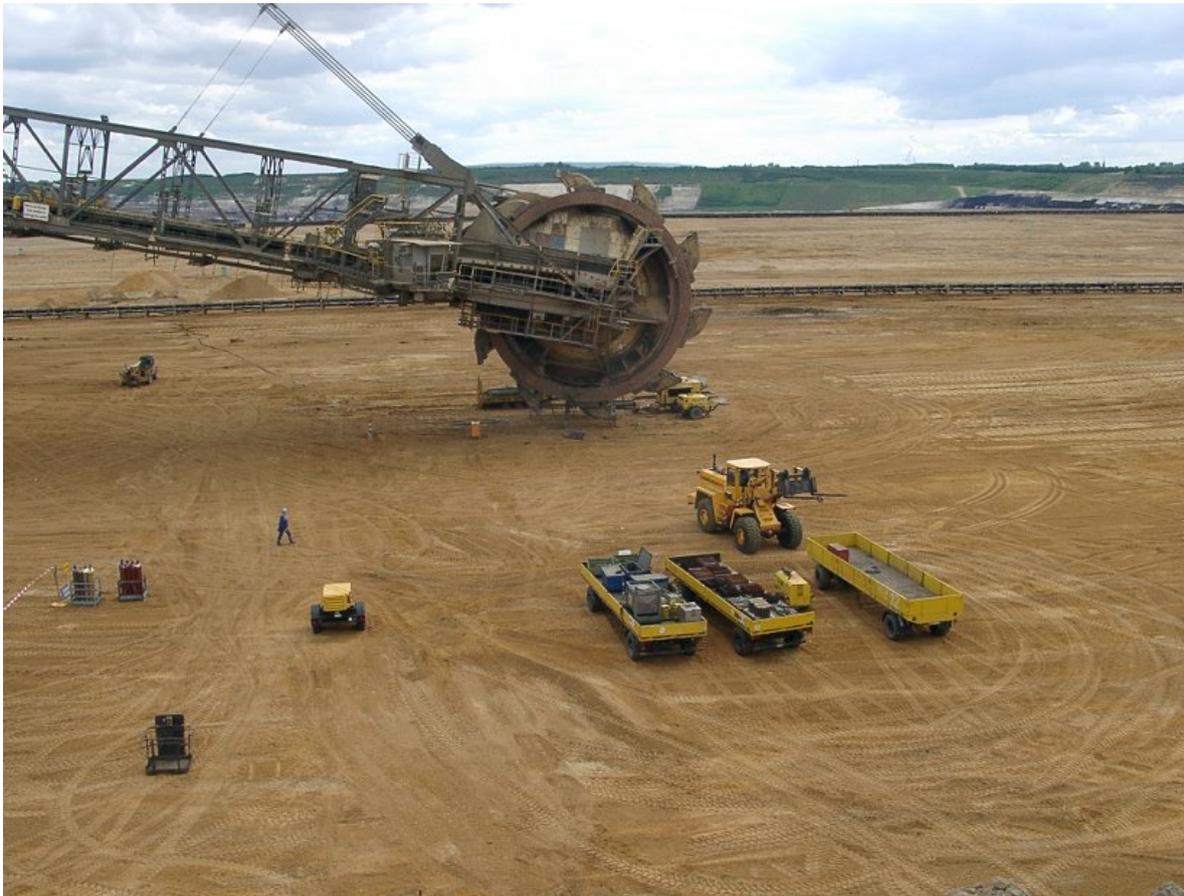
Le plus gros véhicule terrestre jamais construit pèse 14.877 tonnes à vide et mesure 225 mètres de long. Le site web du constructeur est <http://www.takraf.com>



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



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



La roue d'une des 'petites' haveuses (Bagger 259) avec seulement 10 godets de 2,6 m³.
Le site entier compte une dizaine de machines, de 7.800 à 14.800 tonnes.



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

Carte du site sur Google Maps : <http://goo.gl/hEkRn6>

Chapitre 2

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 » (skyscrapers) 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 apparurent. 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 800 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* (2004) ou le *Burj Khalifa* (2010) le démontrent. Ainsi, les tours Petronas (page précédente) sont connectées par une passerelle au niveau du 42^{ème} 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 / KVLV-TV	Fargo, USA	629	TV	World record!
KXJB-tower	Galesberg, USA	628	TV	
KZFX TV-tower	Lake Jackson, USA	615	TV	
CN Tower	Toronto, Canada	554	Observation + TV	
Stratosphere Tower	Las Vegas, USA	325	Observation + Restaurant	Record de catégorie

Les 11 Immeubles les plus hauts du monde

#	Building	Ville	Etages	Hauteur	Année
1	Burj Khalifa	Dubai	163	828 m	2010
2	Shanghai Tower	Shanghai	121	632 m	2015
3	Makkah Clock Royal Tower [Abraj Al Bait]	Makkah	120	601 m	2012
4	One World Trade Center [New World Trade Center]	New York City	104	541 m	2013
5	Chow Tai Fook Center	Guangzhou	111	530 m	2016
6	Taipei 101	Taipei	101	509 m	2004
7	Shanghai World Financial Center	Shanghai	101	492 m	2008
8	International Commerce Centre [Union Square]	Hong Kong	118	484 m	2010
9	Petronas Tower 1 [Petronas Towers]	Kuala Lumpur	88	452 m	1998
10	Petronas Tower 2 [Petronas Towers]	Kuala Lumpur	88	452 m	1998
11	Zifeng Tower	Nanjing	66	450 m	2010

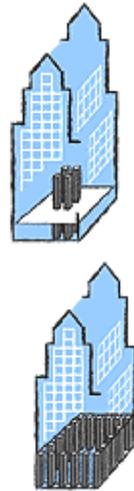
Ci-dessous, la Stratosphere Tower de Las Vegas

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^{ème} 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/m² et le John Hancock de 100 étages qui ne pèse que 139 Kg/m².



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 antisismiques 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 hau-



tes 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 M² 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^{ème} 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 RWDI¹ 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^{ème} étage (sur 101 comme l'indique le nom 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).

¹ RWDI : Rowan Williams Davies & Irwin, inc. est un bureau d'études canadien (www.rwdi.com)

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/).

Elle forme 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 m³ de béton armé, 39 000 tonnes de poutres en acier, 142 000 m² 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

Kingdom Tower

Jeddah, Arabia: 1007 mètres de haut, à terminer en 2019.

Architectes: Adrian Smith et Gordon Gill.

Surface réelle occupable : 530,000 mètres carrés, 54 ascenseurs dont 5 à double niveau, coût: 1.2 milliards de dollars.

La terrasse extérieure de 30 mètres de diamètre au 167^{ème} étage est liée à l'appartement "d'en haut"...

La construction est en cours depuis 2013.

Pingan International Finance Center

Situé en Chine, à Shenzhen, ce building devrait mesurer 660 mètres et devenir le 4ème plus haut du monde.

Terminé en 2016, il aura 125 étages.

Changsha Sky City

Ce projet de 208 étages a commencé en 2008. Il a pris du retard pour raisons administratives en 2014, mais a maintenant redémarré et est déjà le plus haut de la ville. Il est destiné à mesurer 838 mètres et surpasser le Burj Khalifa de 10 mètres courant 2016.

Autres

De très nombreux projets pour détrôner les 10 premières places au classement sont en cours. Principalement en Chine et à Hong Kong, mais aussi à Doha (Qatar), Seoul (Corée), et Mumbai (Inde).

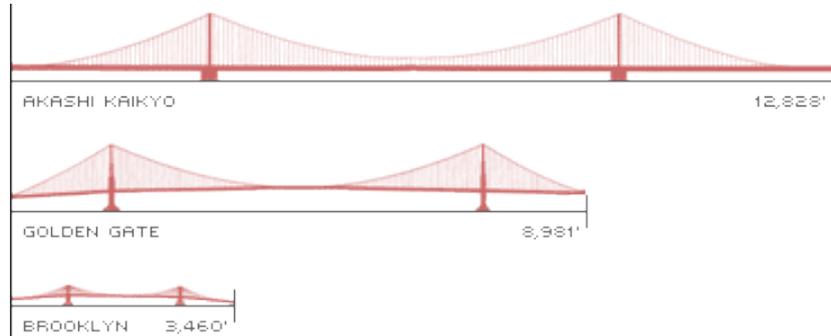
Voir skyscraperpage.com pour de superbes illustrations du classement.



Chapitre 3

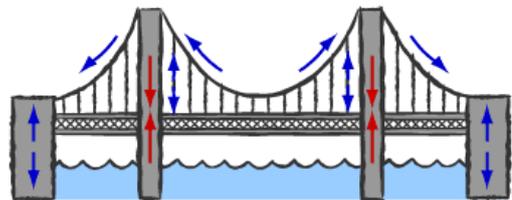
Les ponts suspendus

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

simple à calculer. Le poids total de



les fréquences propres du pont en



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

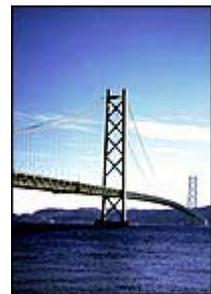


Quelques faits

- 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.

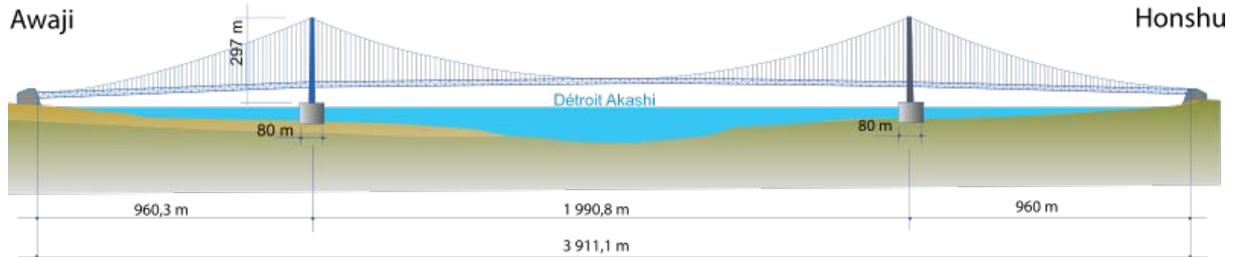
Historique

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 contre-poids 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.

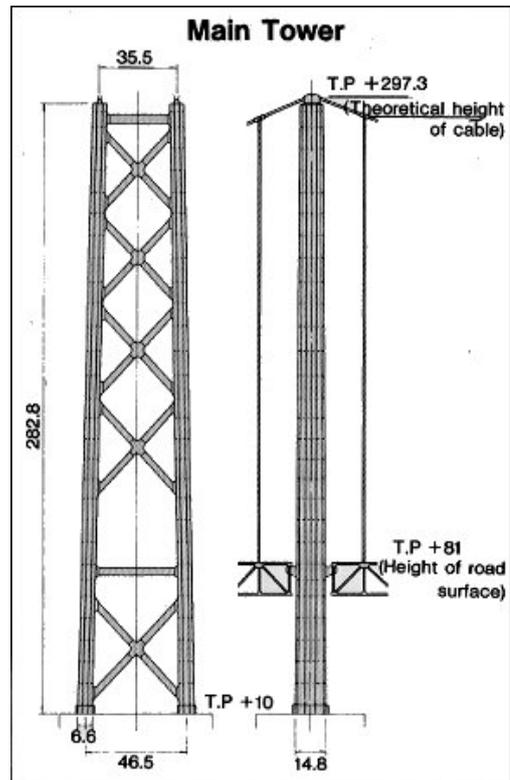
Les ancrages de câbles

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 M³.
- Ancrage 1A, bloc d'ancrage en béton hyperfluide de 140.000 M³ (350.000 tonnes).
- Ancrage 4A, bloc d'ancrage en béton hyperfluide de 150.000 M³ (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

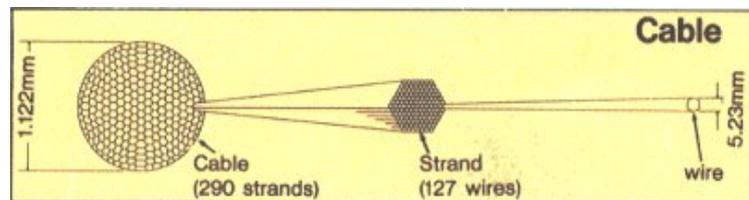
(Détails côté Ancrage 1A)

- 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^{ème} à 21^{ème} 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 kg/mm^2 et les nouveaux atteignent 180 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.

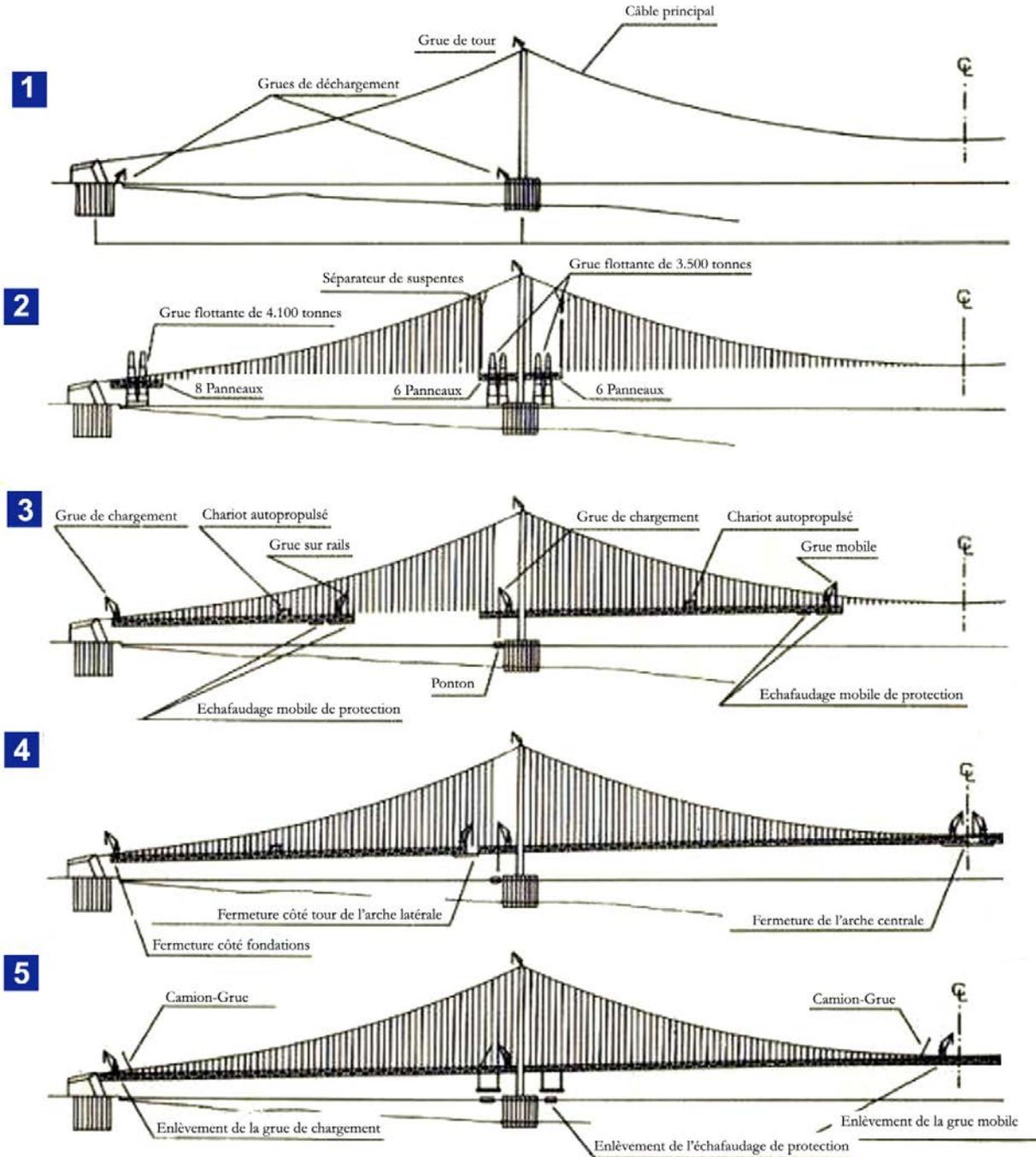


Vue de nuit du pont Akashi-Kaikyo.



Les divers ponts entre Honshu et Shikoku

Les étapes de la construction



Le (probablement pas) prochain grand pont suspendu

Le plus grand défi sur la liste des ponts en étude est celui sur 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 €, mais il a finalement été abandonné fin 2012.

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 devait 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 de 216 km/h et à des séismes de 7,1 sur l'échelle de Richter (soit un tremblement de terre plus violent que celui qui frappa Messine en 1908).



L'autre (peut-être) prochain grand pont suspendu

L'Indonésie envisage un pont sur le détroit de la Sonde. Longueur totale : 27 Km, en plusieurs parties se servant de petites îles existantes comme ancrages. la partie principale étant un pont suspendu de 3.000 mètres de portée centrale. Le budget est estimé entre 10 et 20 Milliards de dollars pour l'ensemble. Des décisions importantes sont attendues fin 2014: participations privées, banques, implication du gouvernement,...



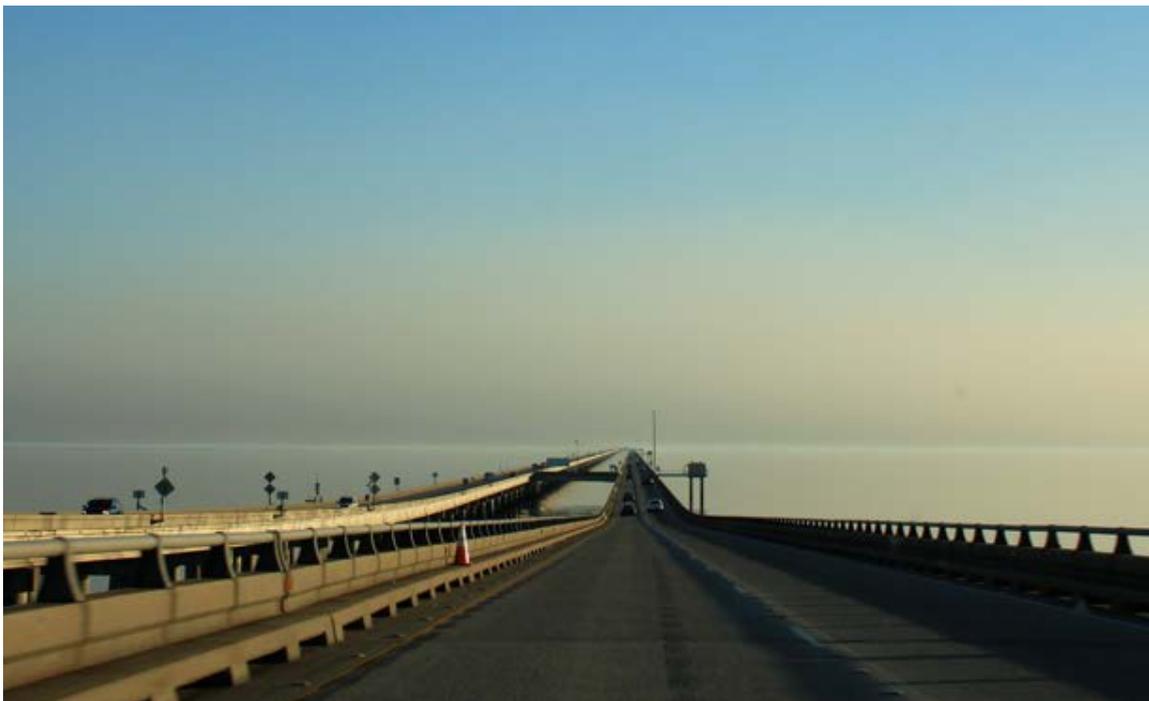
Affaire à suivre sur Wikipedia et autres (http://en.wikipedia.org/wiki/Sunda_Strait_Bridge).

Quel est le plus long pont du monde?

Le plus long pont du monde (en plusieurs travées) est le "*Danyang–Kunshan Grand Bridge*" situé entre Beijing et Shanghai, il mesure 164,8 kilomètres de long, surplombant des canaux, des rivières, des lacs, et des rizières inondables.



Le plus long pont entièrement au-dessus de l'eau est le "*Lake Pontchartrain Causeway*" dans le sud de la Louisiane, aux USA. Il est long de 38,35 km.

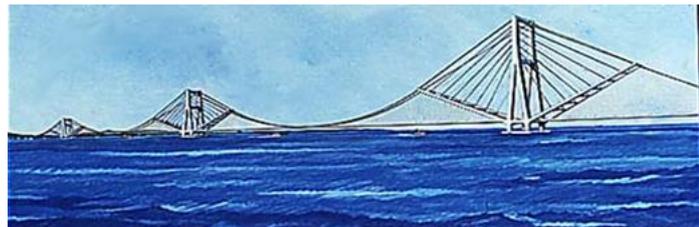


Projet utopique : Le pont de Gibraltar

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



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

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).



Birds Eye View of the "chromosome"-shaped-Bridge



Le pont flottant sur Gibraltar

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

La partie centrale est une île artificielle flottante de 3 km; elle est reliée aux extrémités par des tunnels flottants semi-immergés.

Les 150 éoliennes et les 80 turbines sous-marines suffisent à alimenter en énergie tout le Maroc, plus la province Espagnole de Cadiz. 24 voies pour autos et camions, 4 lignes de chemin de fer.



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.



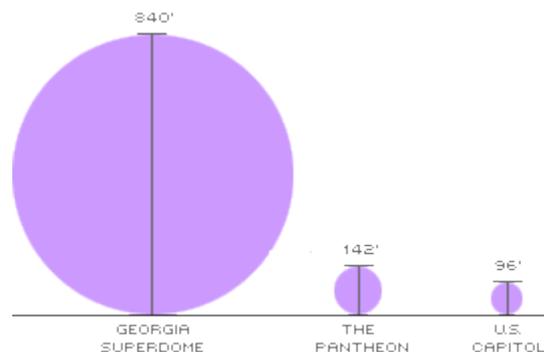
Le tensegrity est en fait une séquence complexe de triangles dont la courbure est alternée couche par couche. Des piliers verticaux supportent le dôme ; ils sont maintenus en place par des câbles sous contrainte fixés au sommet et à la base de chaque poteau. Les câbles tirant dans toutes les directions 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 m², béton: 110.000 m³, acier = 8.300 tonnes.



Chapitre 4

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 medias 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 basé 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, ρ 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.

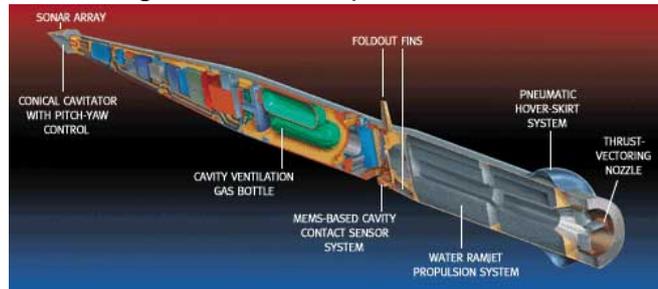
La Supercavitation

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.

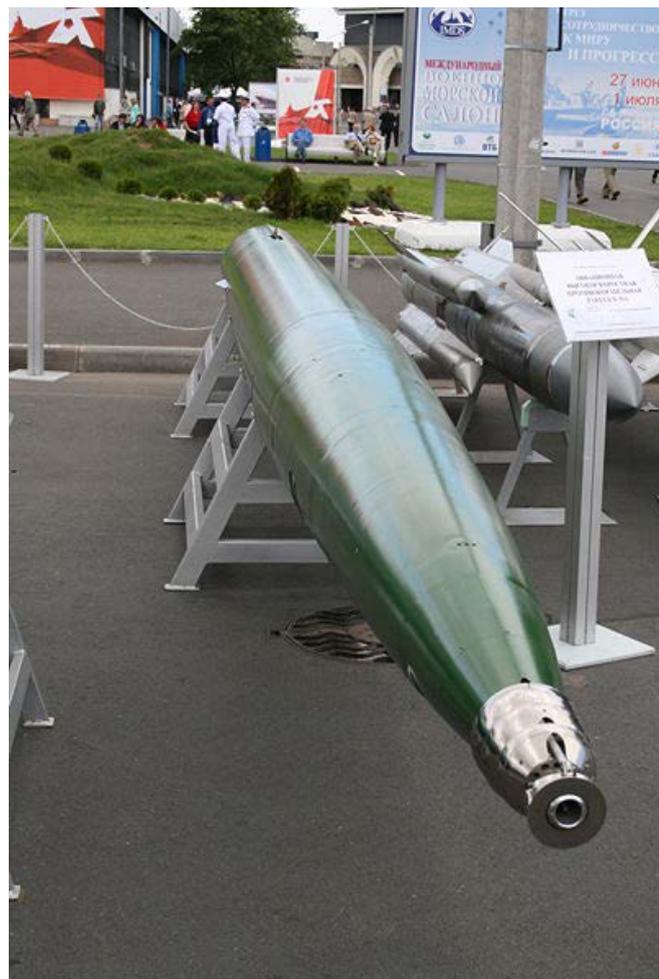
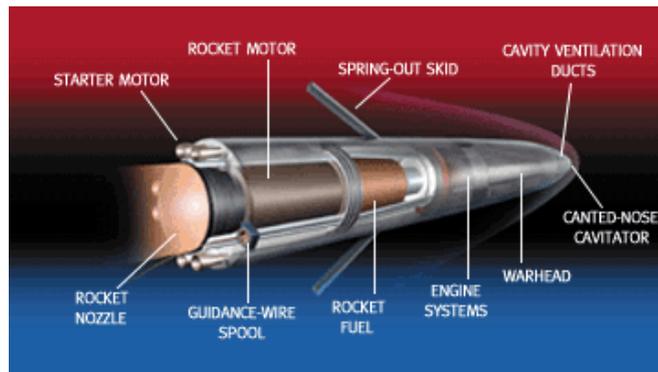
La forme du caviteur est une sorte de cône muni de lobes et d'orifices d'éjection pour les gaz. Sa forme exacte est bien sûr gardée secrète, mais il est certain que les matériaux mis en œuvre sont extrêmement robustes ; on cite divers carbures et céramiques, sans plus de précisions. Une chose est plus 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 Shkvall 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.

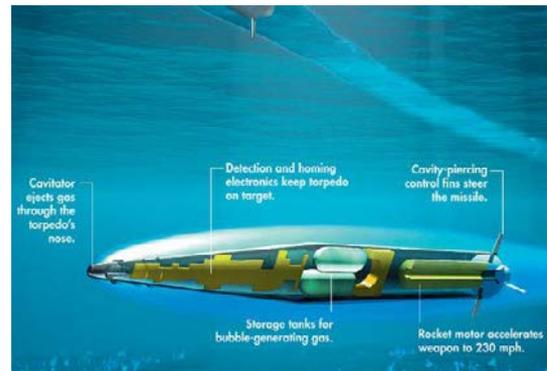


Si on peut se permettre de limiter l'amplitude des mouvements pour contourner le premier problème, le second est plus fondamental. Les ondes radio ne se propagent pas sous l'eau, les lasers ne franchissent pas les turbulences très importantes qui entourent l'engin et les ultrasons sont tout simplement 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.



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 engins de surface

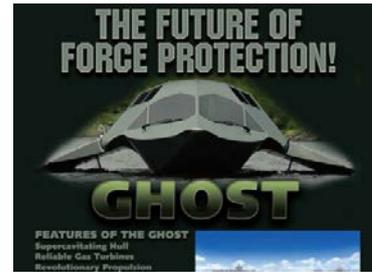
Depuis 2011, le bateau léger Ghost de la société Juliet Marine (www.julietmarine.com, USA) est proposé en démonstration sous le vocable SWATH (Small Waterplane-Area Twin-Hull), en version militaire ainsi qu'en version civile pour applications commerciales, scientifiques, ou comme "véhicule de transport privé de luxe". Il est certifié à 60 km/h mais aurait été testé jusqu'à 90 km/h et est capable de naviguer en conservant un assiette stable par des creux de 3 mètres.



Il déjauge à partir de 8 noeuds et survole l'eau porté par deux "pods" de 20 mètres de long, sortes de torpilles étroites qui ont une friction hydrodynamique réduite d'un facteur 900 par

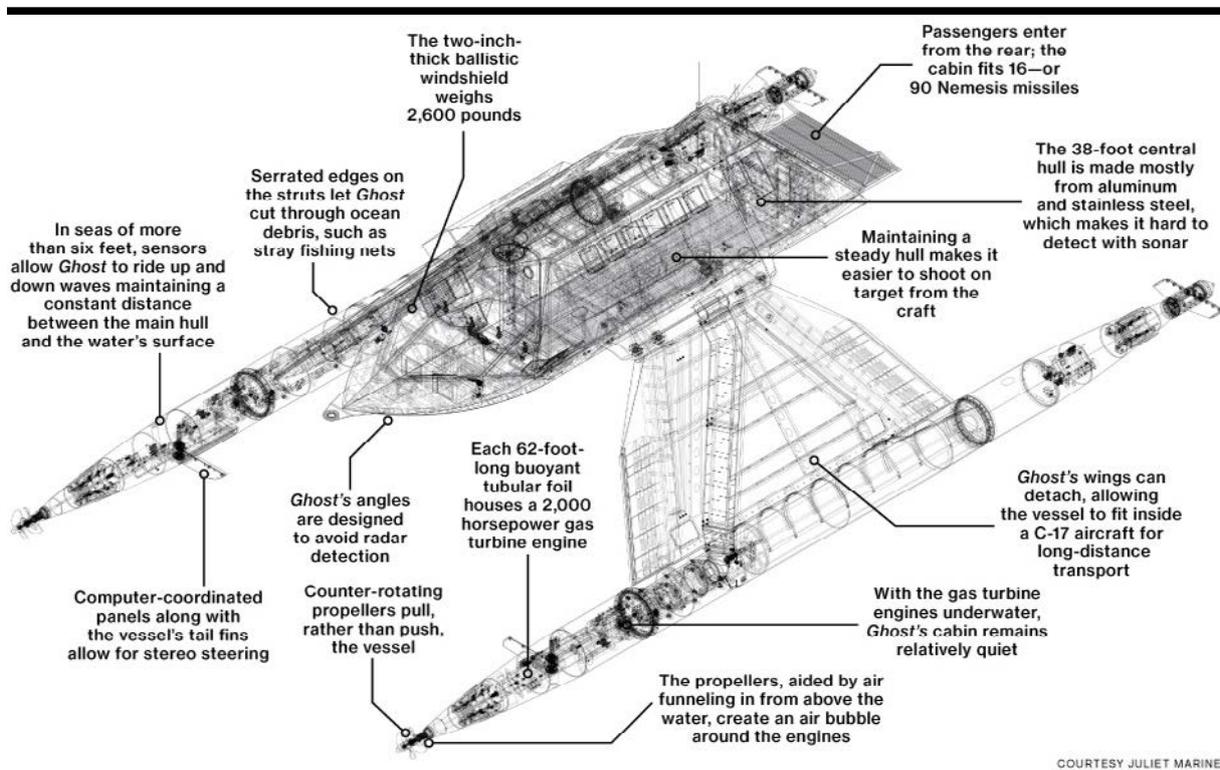
rapport à des coques conventionnelles à cause de leurs événements à supercavitation alimentés par quatre hélices situées à l'avant. L'énergie est fournie par deux turbines à gaz de 2.000 CV.

Les événements sont aussi utilisés pour diluer dans l'eau la signature thermique des lancements de missiles et autres armes. De plus, les turbines étant sous l'eau, l'engin fait peu de bruit et offre une faible signature thermique. Sa forme qui rappelle les "stealth fighters" minimise la signature radar, d'où le nom de "Ghost".



La stabilité est fournie par de multiples ailerons contrôlés par ordinateur sur les flancs des pods. La grande stabilité même par mer agitée en fait une plateforme de choix pour de futures armes énergétiques à laser.

Prix : 10 M\$, équipage 3 à 5 hommes, capacité de transport en cabine: 16 personnes, longueur de la coque: 10 mètres, longueur des pods: 20 mètres.



Les munitions à supercavitation

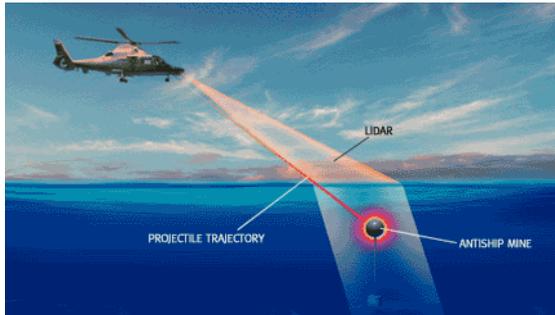
Les projectiles de petite taille qui sont étudiés, semblables à des obus (de 20 à 40 mm) n'embarquent pas de moteurs, ni de servomécanismes et sont mus uniquement par la force d'impulsion de démarrage donnée par un canon plus ou moins classique. Le seul secret réside dans la forme aplatie du caviteur 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.



loppé by C Tech Defense Corporation.

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 déve-



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'.



Les applications futures

Les applications de la supercavitation dans le domaine militaires sont nombreuses : 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. La chine a annoncé en 2013 travailler à un prototype de sous-marin capable d'atteindre 6,000 miles/hour.

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 surtout difficiles à contrôler, leur simple existence a 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.fas.org/man/dod-101/sys/missile/row/shkval.htm>
Ghost : <http://www.defenseone.com/technology/2014/10/could-be-navy-seals-boat-tomorrow/95627/>

Chapitre 5

L'Horloge de 10.000 ans



Jeff Bezos

Pourquoi ?

Un des rêves de Jeff Bezos, fondateur d'*Amazon* (la librairie en ligne la plus grande du monde) et de *Blue Origin* (une société privée qui construit des vaisseaux spatiaux) devient réalité, grâce à son obstination (et à sa fortune personnelle): passer à la postérité en construisant non seulement la plus grande bibliothèque en ligne du monde, mais aussi l'horloge la plus durable de l'histoire. Elle devrait fonctionner sans intervention humaine pendant 10.000 ans!



Les sociétés de Jeff Bezos

La "*10,000 Years Clock*" spéciale doit être un symbole, un sujet de réflexion sur le devenir de l'homme à long terme. Ce monument est en construction au cœur d'une montagne de la Sierra Diablo dans le comté de Culberson au Texas, sur les terres du ranch de Jeff Bezos, juste à côté du quartier général de Blue Origin.

Le père de l'horloge n'est pas Jeff Bezos, mais bien Danny Hillis qui travaille et réfléchit à son concept depuis 1989. Le projet est géré en collaboration avec la LongNow

Foundation (www.longnow.org) créée en 01996 pour développer l'horloge et un projet de librairie à long terme, ainsi qu'à servir de germe à une institution multiculturelle sur le long terme.

Daniel Hillis, l'inventeur du calcul massivement parallèle, voulait une horloge qui clique une fois par an, dont l'aiguille des siècles avance tous les cent ans, et dont le coucou sonne tous les millénaires. Sa vision est –et reste- d'afficher l'heure exacte durant 10.000 ans en encourageant le monde à réfléchir à plus long terme qu'habituellement.



La Sierra Diablo Mountain



Vue depuis le chemin d'accès à la caverne creusée dans le calcaire

Le Site

Rien que pour visiter le lieu, il faut le vouloir : Situé à plusieurs heures de voiture du plus proche aéroport, il n'est accessible que par un sentier grimpant à plus de 700 mètres au dessus du fond de la vallée. Et ceci est vrai aussi pour les travailleurs qui œuvrent à sa construction.



Avant qu'on ait tracé le sentier, l'accès était difficile.



Aménagement des accès



Le tunnel d'entrée



Le robot qui creuse les marches d'escalier dans les parois du puits.

Il a d'abord fallu créer un accès et un téléphérique pour amener les engins de génie civil nécessaires au creusement du premier puits, terminé fin 2011. La forme finale de la caverne, un cylindre muni d'un escalier hélicoïdal qui en fait le tour. La construction de l'escalier n'est pas encore achevée. La caverne elle-même (150 mètres de haut, 3m75 de diamètre) sera accessible par le bas et comportera un escalier en spirale donnant accès à cinq chambres spéciales, les chambres-anniversaires des 1 an, 10 ans, 100 ans, 1.000 ans et 10.000 ans.

La Technique



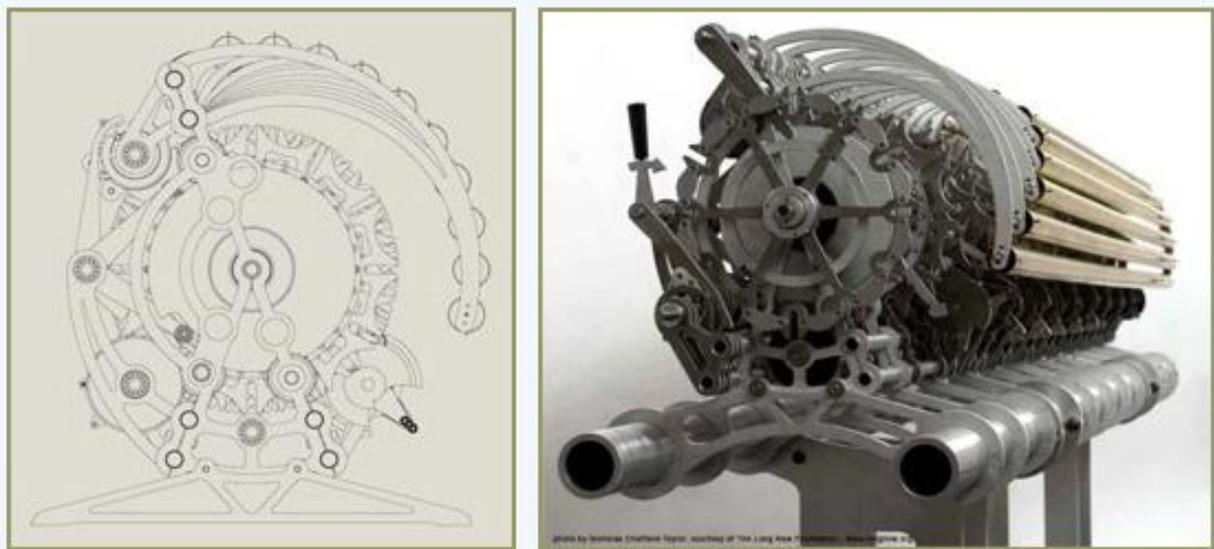
Maquette de l'horloge et certaines de ses pièces.



Gros plan d'un axe de pignon.



Tout a commencé à échelle réduite.



Plan et vue de la maquette du carillon aléatoire qui est au Science Museum de Londres.

Le cadran de la chambre annuelle indique les positions des planètes et de la lune; il est mis à jour par le mécanisme une fois par an à midi à une date prédéfinie. Le mécanisme de la chambre des 10 ans sera conçu et installé avant son premier 'clac'. Des interfaces mécaniques sont fournies aux chambres suivantes qui ne sont pas implémentées actuellement. Leur création mécanique est laissée aux prochaines générations.

Vos idées pour la chambre des 10 ans peuvent être envoyées à 10-year-chamber@10000yearclock.net.

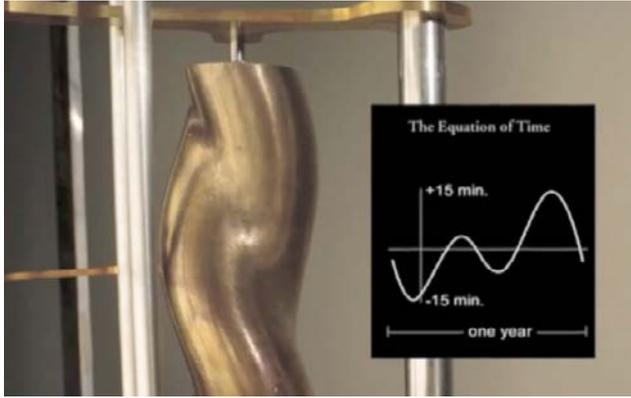
L'étape actuellement en cours est la taille de l'escalier en spirale; elle se fait en parallèle avec la construction de l'horloge proprement dite.

Les principes de design

- Construire dans un lieu géologiquement stable et sec.
- Construire dans un lieu reculé : les gens doivent y venir exprès.
- L'eau va entrer; elle doit s'évacuer naturellement.
- L'horloge va être perdue puis redécouverte: un lieu sous-terrain semble idéal. Un marquage monumental est nécessaire pour y conduire.
- Elle doit être difficile ou inutile à vandaliser : grande taille, accès difficile, comme un "bateau dans une bouteille", laisser des objets décoratifs faciles à voler, au contraire du mécanisme principal.
- Basée sur une institution de longue durée de vie (Long Now Foundation)
- Eviter toute maintenance sur 10.000 ans dont la complexité dépasse celle de l'âge du bronze.
- Le fonctionnement doit être compris rien qu'en observant le mécanisme.
- Le mécanisme doit pouvoir être amélioré sans tout démonter.
- On doit pouvoir en faire des modèles à diverses échelles.

La mécanique

L'ensemble est en fait une combinaison d'un calculateur binaire mécanique et de données analogiques comme une came tridimensionnelle qui donne le paramètre de correction de la durée du jour qui varie avec le temps mais est aussi saisonnier.



La came tridimensionnelle

La Synchro:

Un pendule compensé en température de 300 Kg en tungstène donne la période est de 10 secondes.

Le soleil servira par son cycle d'échauffement journalier, à resynchroniser l'horloge en cas de dérive trop importante. Ceci devrait empêcher de perdre une seule journée sur les 10.000 ans de durée prévue. L'échauffement de milieu de journée modifie la longueur d'un fil en métal à mémoire de forme qui déclenche un cliquet de synchronisation qui ramène le mécanisme sur midi s'il s'en est trop écarté.

Le carillon: il donnera à partir de 10 cloches, une séquence de notes différente tous les jours pendant 10.000 ans. La conception des cloches ne sera entamée qu'une fois son local finalisé, histoire d'en affiner l'acoustique.

L'énergie: le mécanisme de base de l'horloge est propulsé par la différence de température entre jour et nuit qui chauffe et refroidit alternativement un élément métallique de grande taille situé sous le sommet de la montagne, au sommet du mécanisme. Son action remonte un poids capable d'alimenter le mécanisme, même en cas de plusieurs années sans soleil.

L'énergie qui alimente les carillons et les affichages comme le planétaire est fournie par des roues que les visiteurs qui montent l'escalier doivent actionner: pas de visiteurs, pas d'affichage du jour ni de carillon... (et donc pas d'usure ces jours-là!).

L'usure: on utilise des roulements à bille en céramique sans lubrification pour les moyennes pièces et des supports flexibles sans roulements ni buselures pour les lourdes pièces.

Les copies dans des musées: Le Smithsonian Museum et le musée des sciences de Londres possèdent des copies de la "10,000 Years Clock".

Le coût: Jeff Bezos et les 3.300 supporters de LongNow ont déjà investi énormément dans ce projet purement privé (La cotisation est de 8\$/mois, mais la contribution de Bezos à ce jour et de plus de 43 millions de \$, soit 0,3% de sa fortune personnelle).

Références

<http://www.10000yearclock.net>

<http://longnow.org/clock/>

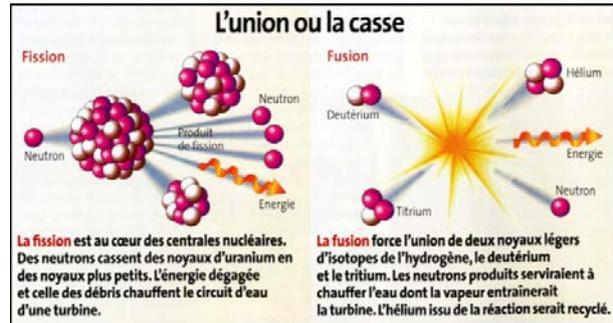
<http://www.youtube.com/user/longnow>

<http://www.wired.com/gadgetlab/2011/06/10000-year-clock/>

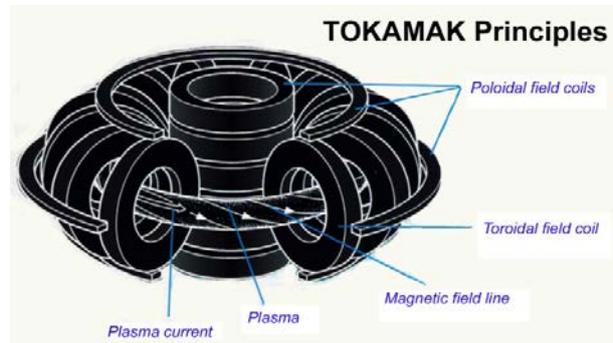
CHAPITRE 6

La Fusion Nucléaire

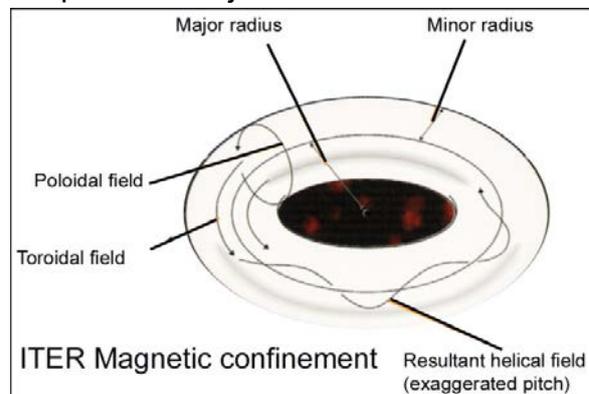
C'est certainement là que se trouve notre avenir énergétique à long terme. Mais les défis pour les ingénieurs sont immenses : pression et température gigantesques, niveau de rayonnement élevé, flux de chaleur, champ électrique et magnétique, vide poussé, cryostats et supraconducteurs doivent tous être 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 2020. 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, les fondations du bâtiment principales étaient finies fin 2012. 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.

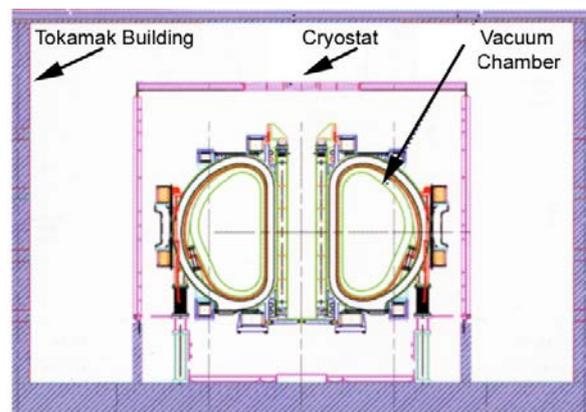


Nous passons en revue la structure d'ITER pour mettre en évidence les grands défis : nombre d'éléments sont à des cryotempératures d'un côté et à des milliers de degrés de l'autre tout en étant traversés par des flux électriques en milliers d'ampères par millimètre carré et à des flux de chaleur se chiffrant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



Les 3 enceintes de confinement de ITER

Le tokamak est une enceinte de confinement toroïdale constituée d'une chambre à vide entourée d'électro-aimants. Ceux-ci génèrent 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 haute fréquence et par l'injection d'ions accélérés extérieurement. La température du plasma est de l'ordre de 100 millions de degrés.

Deutérium : isotope d'hydrogène abondant dans l'eau de mer.

Tritium: isotope d'hydrogène créé artificiellement (par fission du Lithium); il en existe 20 Kg au monde et il doit être recréé en permanence car sa demi-vie est de 12 ans seulement; il en existe quelques ppm dans la poussière lunaire.



un "Traser", gadget à base de phosphore contenant des traces de Tritium.

L'enceinte intérieure (la couverture ou blanket) doit résister et absorber les neutrons à 14 MeV générés par les réactions de fusion. Cette enceinte devrait à terme produire du tritium (par bombardement de lithium par les neutrons de la réaction de fusion); Ce tritium sera réutilisé comme combustible.

For DEMO, the next step on the way to commercial fusion power, about **300g of tritium** will be required **per day** to produce 800 MW of electrical power. No sufficient external source of tritium exists for fusion energy development beyond ITER, making the successful development of **tritium breeding** essential for the future of fusion energy.



Un élément de Blanket

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'.



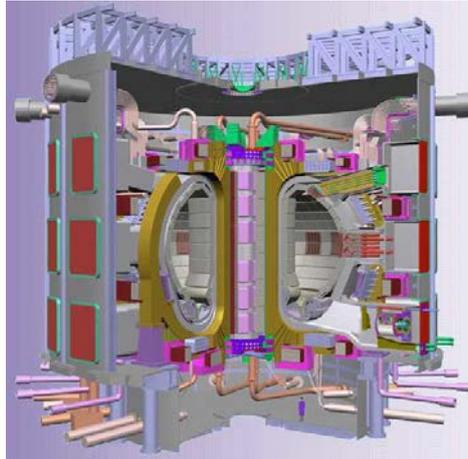
Situé sur le « plancher » de la chambre à vide, le divertor d'ITER est constitué de 54 cassettes qui peuvent être extraites par télémanipulation. Chaque cassette contient trois éléments qui font directement face au plasma, également appelés « cibles » : une cible verticale interne, une cible verticale externe et un dôme. Ces cibles sont placées à l'intersection des lignes de force du champ magnétique, là où les particules de plasma très énergétiques viennent percuter les composants, cédant leur énergie sous forme de chaleur. Les cibles sont soumises à une charge thermique d'une extrême intensité et doivent être refroidies de manière active par circulation d'eau. Le choix du matériau de surface du divertor est crucial: seuls quelques très rares matériaux sont capables de supporter des températures de l'ordre de 3000 °C pendant les vingt années que devrait durer l'exploitation d'ITER. Divers matériaux seront testés dans la machine ITER.

Au moment de sa mise en service, ITER devait être équipé d'une cible de divertor constituée d'un matériau composite en carbone renforcé de fibres de carbone (CFC), qui présente une excellente conductivité thermique. Une deuxième cible, en tungstène cette fois -un matériau qui s'érode plus lentement et offre donc une plus grande longévité- devait lui succéder.

Soucieuse de réduire les coûts de construction de la machine, la direction d'ITER examine aujourd'hui la possibilité de démarrer directement les opérations avec la cible de divertor en tungstène.

Mode Pulsé

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



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	650 M3
Flux de chaleur au divertor	jusqu'à 20 MW/M ²
Champ toroïdal (suivant l'axe)	5.3 Tesla
Carburant	Deutérium et Tritium
Coût estimé (2012)	13 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 auxquelles 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 (displacement per atom) sur sa durée de vie prévue. En choisissant un bon acier à faible teneur en Cobalt², cela devrait être suffisant pour éviter de produire des déchets radioactifs de plus de 100 ans d'activité. Pour un réacteur commercial comment 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 proche du plasma qui doivent aussi évacuer la chaleur et canaliser les fluides de refroidissement et les câbles supraconducteurs.

² 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).

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 poloïdal) 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.

Collaboration internationale

La mise au point de ITER, en route depuis plus de 20 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/M² ont été testées dans tous les labs concernés.

L'organisation internationale (ITER Organization)

Il s'agit d'une organisation comme celle mise en œuvre pour la station spatiale internationale. L'organisation Iter est régie par un traité international qui fixe les droits et obligations de chaque partenaire : Chine, Corée du Sud, Etats-Unis, Europe, Fédération de Russie, Inde, Japon. L'organisation internationale est responsable de la conception de l'installation de recherche, de sa construction prévue pendant 10 ans, de son exploitation pendant 20 ans et de sa mise à l'arrêt. Son directeur général, Osamu Motojima, rend compte de l'état d'avancement du projet à un conseil composé de représentants de chaque partenaire.

Les agences domestiques

Une agence domestique, chargée de l'interface du pays membre d'Iter avec l'organisation internationale et de la fourniture à cette même organisation internationale des composants prévue par les négociations internationales, est établie dans chaque pays : aux Etats-Unis dans le Tennessee au sein de l'Oak Ridge National Laboratory , en Russie à Moscou au sein de l'institut Kurchatov, en Corée du Sud à Daejeon au sein du Korea Advanced Institute of Science and Technology, au Japon à Naka avec la Japan Atomic Energy Agency en Inde, à Bhat au sein de l'Institute for Plasma Research, en Europe à Barcelone avec l'entreprise commune « *Fusion for Energy* ». En Belgique, c'est IterBelgium (www.iterbelgium.be).

Statut en 2014

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 et un millier de personnes est déjà sur le site.

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>.

Le gros œuvre des bâtiments principaux a été alloué à GDF Suez pour 530 M€.

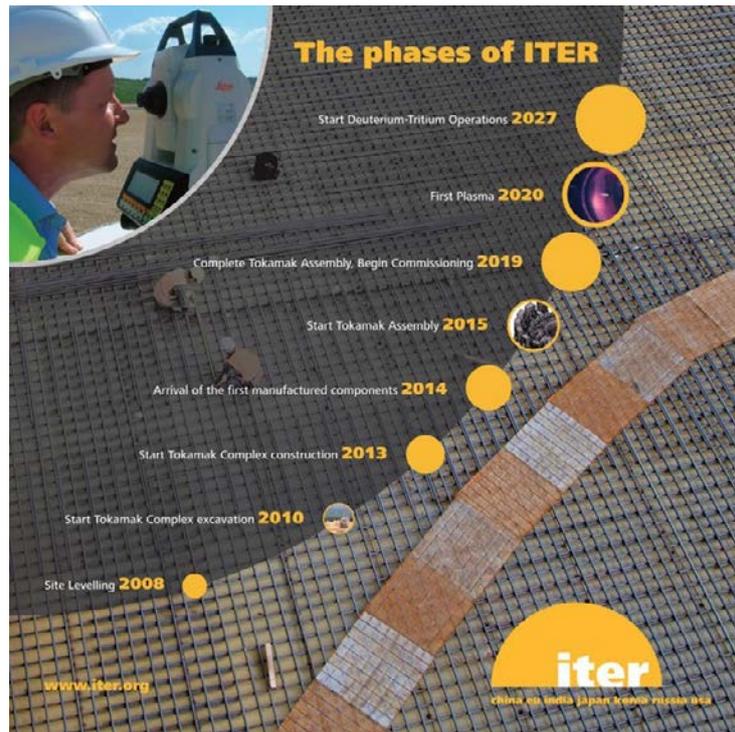
Les premiers essais de transports ont eu lieu en Septembre 2013 avec un test du super-camion monté sur 352 roues qui devra faire 230 trajets de 100km : 33 mètres de long, 9 mètres de large et 10 mètres de haut!



La mise en service du réacteur n'est pas prévue avant 2027. Le contrat de GDF porte sur l'enveloppe du réacteur et non le réacteur en lui-même. Après une phase d'études d'un an, le démarrage des travaux est programmé pour septembre 2014. Ils dureront 5 ans et mobiliseront, au plus fort de l'activité en 2016, jusqu'à 450 personnes. GDF Suez prévoit d'embaucher une centaine de personnes pour sa réalisation.

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
- 2010 Début de construction.
- 2025 ? ITER (Japon ou France) 500 MW pendant 400 secondes ($Q > 10$).
- 2030-2050 DEMO (où ?) 4 GW (plasma), 1.3 GW (sortie) en production continue ($Q = h$).



Les défis à relever pour la construction et l'évolution d'ITER sont typiques de l'Extreme Engineering' : d'énormes budgets pour faire reculer les limites des matériaux et les frontières de la connaissance que nous avons de la physique des plasmas, 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://fusionforenergy.europa.eu/>

CHAPITRE 7

La formule 1



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 2013) 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.

Le point crucial est l'interprétation du règlement technique édicté par la FIA ; la créativité des ingénieurs se niche souvent dans les « zones grises » de ce règlement : le «Double DRS», le «F-Duct», les ailerons flexibles,... en sont des exemples.

Finances

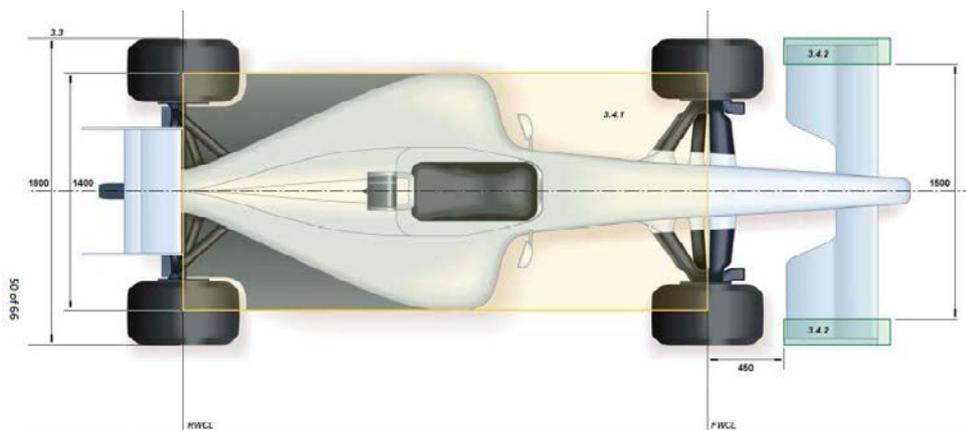
Commençons par un aperçu du budget qui fixe les limites des moyens mis en œuvre. Le budget moyen annuel d'une petite équipe est de 75 M€ répartis comme suit :

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'un 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 €
Total	900.000 €



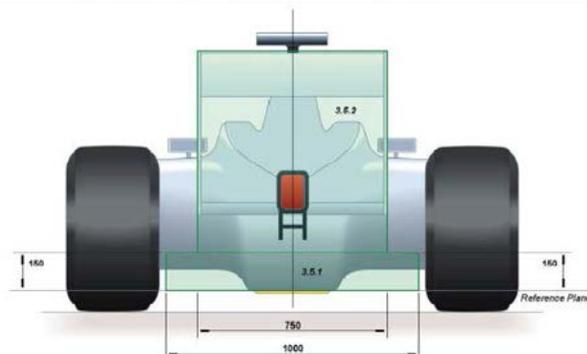
3.3 - Overall width :

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.



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.

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

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.

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 2013 (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 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 (4.2 G) et combinées (5 G) extrêmement élevées. On a observé des freinages à 5,5G sur le circuit de Suzuka en 2012.

L'architecture du moteur (2013)

La réglementation 2009-2013 impose des moteurs V8 d'une cylindrée de 2400 cm³. Les meilleurs V8 peuvent atteindre les 780 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. Avec ce régime très restrictif (décrit ci-dessous), les améliorations possibles sont très limitées. Les coûts de recherche se sont déplacés vers d'autres départements comme l'aérodynamique ou les systèmes KERS de récupération d'énergie qui sont autorisés depuis 2009. En quatre ans (2008-2012), l'évolution des huiles synthétiques et de leur gestion durant la course ont triplé la durée de vie des moteurs et des boîtes de vitesse !

- Le moteur doit être un 4 temps, V8 de 2,4 litres, avec un angle de 90°.
- La vitesse de rotation du vilebrequin ne doit pas excéder 18 000 tours par minute.
- Le moteur doit être atmosphérique. Le turbo est interdit.
- Le moteur doit faire un poids minimum de 95 kg.
- Le moteur doit compter deux soupapes d'admission et deux soupapes d'échappement par cylindre.
- L'alésage du cylindre circulaire ne doit pas excéder 98,0 millimètres.
- Les systèmes d'admission ou d'échappement à géométrie variable sont interdits, tout comme les levées de soupapes variables et commandes de soupapes variables.
- A l'exception des pompes à essence électriques, les pièces auxiliaires au moteur doivent être actionnées mécaniquement directement à partir du moteur avec une vitesse relative au vilebrequin.
- Un seul injecteur de carburant est autorisé par cylindre. Il doit injecter directement dans le côté ou le sommet de l'orifice d'entrée.
- La seule façon dont le pilote peut contrôler le couple du moteur se fait par l'intermédiaire d'une unique pédale d'accélérateur.
- La cartographie de la pédale d'accélérateur au sein du boîtier électronique standard (ECU) doit correspondre au type de pneus adaptés à la voiture : une cartographie pour les pneus lisses et une cartographie pour les pneus pluie ou intermédiaires sont autorisées.
- Une réglementation spécifique s'applique aux matériaux du moteur dès lors qu'ils sont plus coûteux que les matériaux utilisés sur l'ensemble de la voiture. D'une manière générale, les technologies traditionnelles sont obligatoires et aucun matériau "exotique" n'est autorisé.
- Les moteurs sont scellés et identifiés par la FIA (8 par saison par voiture). Leur mise en place dans la monoplace est déclarée et leur utilisation est suivie par le personnel technique de la FIA. Un moteur est considéré comme utilisé une fois que le transpondeur de la voiture indique que celle-ci a quitté la voie des stands.
- Entre les Grands Prix, les sorties d'échappements sont scellées afin de ne pas permettre au moteur d'être démarré (ou passé au banc).
- Selon la réglementation introduite en 2007, seuls des moteurs homologués peuvent être utilisés en F1. La base de cette homologation repose sur les spécificités des moteurs utilisés lors du Grand Prix du Japon 2006.
- Aucun changement fondamental n'a été fait à ces spécificités et aucune modification n'est permise sans le consentement de la FIA, après consultation de tous les motoristes.
- Les modifications permettant un gain de performance ne sont pas permises. Les changements tolérés concernent l'implantation du moteur dans les monoplaces, la fiabilité ou la facilité d'entretien.

Porte ouverte à la créativité en 2014

En 2014, la créativité sera de nouveau de mise avec l'imposition de moteurs 6 cylindres 1600 cc turbo. Les restrictions viendront plus de la quantité d'essence embarquée, limitée à 100 Kg par course.

Quelques chiffres (2012)

- Accélération:
 - 0 à 100 km/h: 1.9 secondes
 - 0 à 200 km/h: 3.9 secondes (1.4 g)
 - 0 à 300 km/h: 8.4 secondes
- Décélération
 - typiquement 4g (5g si plus de 300 Km/h) dont 1g du au freinage aérodynamique.
- 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
- 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
- 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 M³/heure.
- Régime de ralenti : 4.000 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 Ferrari 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 2012, tous les constructeurs suivent l'approche "Renault", qui tente de souffler les gaz à la sur-

face supérieure de la coque, mais en les faisant 'coller' à sa surface (effet 'Coanda') pour donner plus d'appui au diffuseur et à l'aileron arrière. Ceci oblige de modifier la cartographie moteur (dans les limites autorisés par le règlement) pour continuer à souffler des gaz sans produire de puissance lorsque l'accélérateur est fermé, sous peine de perdre de l'adhérence au freinage. Red Bull-Renault est le constructeur qui se débrouille le mieux dans ce domaine depuis 2010.

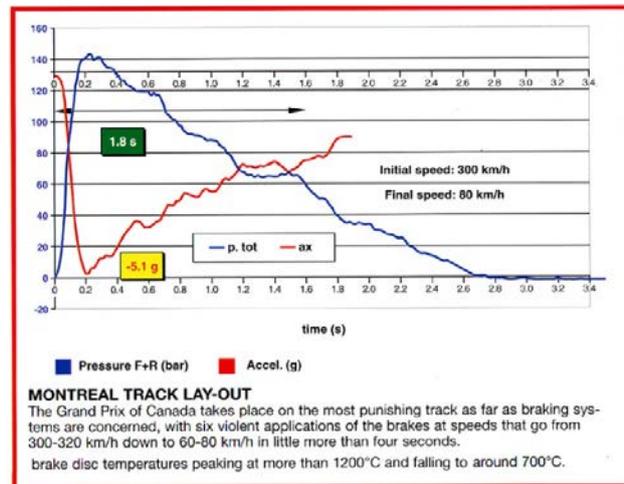
C'est en fait l'accord aérodynamique des tubulures d'échappement au régime optimal qui impose l'ordre d'allumage des cylindres et donc la géométrie du vilebrequin, ce paramètre prenant de plus en plus le pas sur les considérations de vibrations et de résistance en torsion du vilebrequin.

Freins

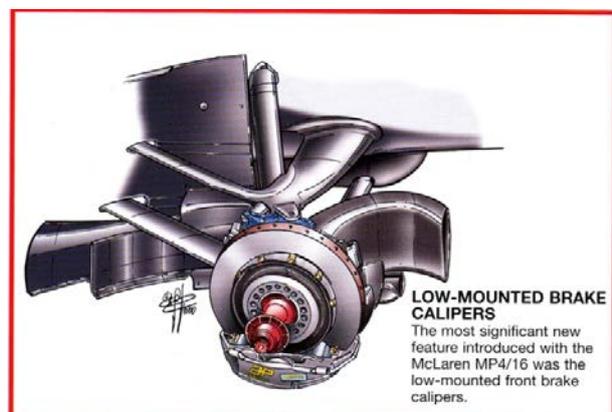
Le règlement oblige à situer les freins dans les roues. Pour diminuer les masses non suspendues, pour abaisser le centre de gravité et pour respecter les contraintes de place et de refroidissement, de véritables prouesses sont nécessaires (comme le positionnement inférieur des pinces de freins à six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

Les disques et plaquettes sont en carbone-carbone³, 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.

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 six étriers des McLaren, Ferrari et certains autres).



³ 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).

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.

Personnel et Logistique



Transport de l'usine au site d'un circuit hors Europe

Le fret maritime contient tout l'équipement immuable au long de l'année : les composants de l'hospitalité, les générateurs et les consommables. Généralement, tout ce qui est lourd."

Le fret aérien suit un programme encore plus serré :

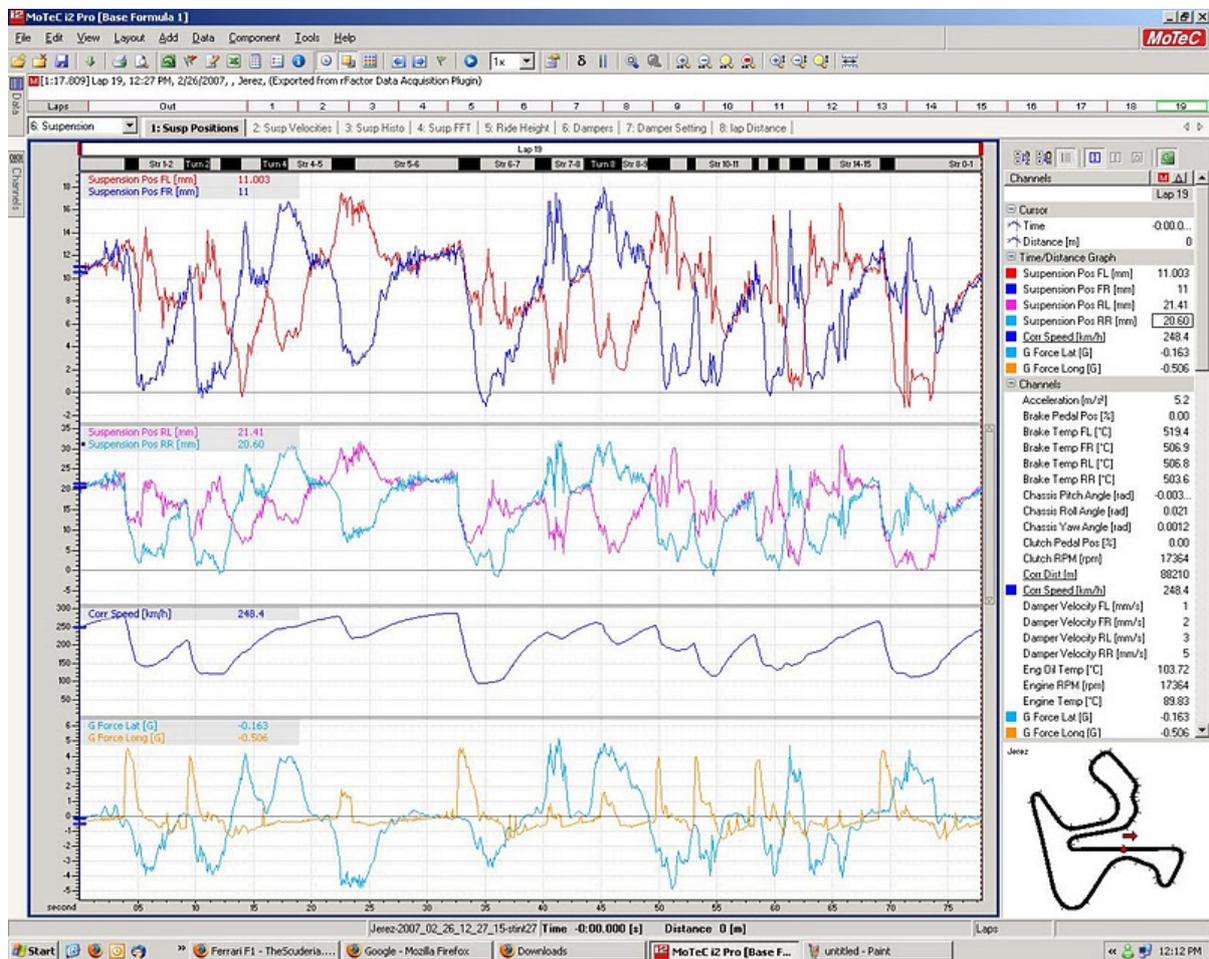
Le bagage le plus importante est, bien entendu, les voitures ! Les deux doivent être prêtes à embarquer à 20 h le jeudi de la semaine précédant celle d'un Grand Prix hors Europe. Une équipe type utilise 3 remorques avec plateaux roulants pour prendre 10 palettes, ainsi qu'un gros chargement. Ceci inclut les pièces de rechange et de l'outillage, pour atteindre un total d'environ 30 tonnes.

Télémetrie

La télémetrie représente la face la plus visible de la révolution que l'électronique a apporté au sport automobile. Un simple boîtier (l'ECU⁴) 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



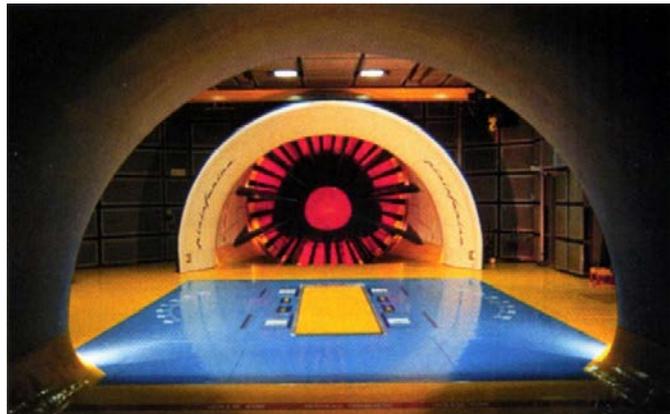
Les données sont enregistrées sur des cartes mémoire compact-flash. Certaines données plus vitales sont transmises en temps réel vers le stand, tandis que le gros des mesures est transféré lors du passage de la voiture (un 'burst' de 3 à 5 mégaoc-

⁴ 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.

tets 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.

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* »

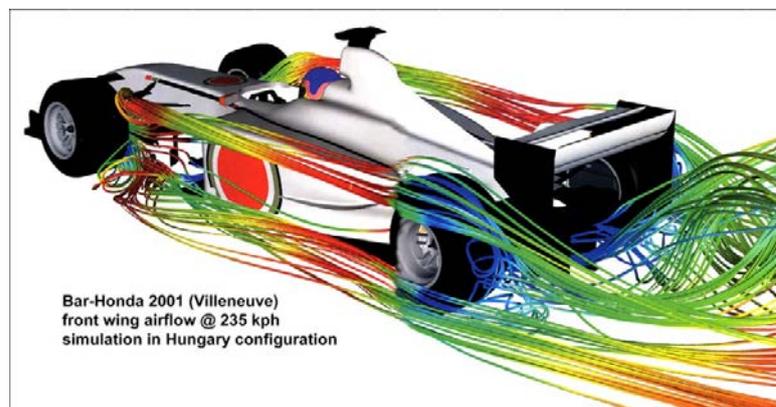


Pininfarina's tunnel in Italy – with moving belt for ground effect simulation

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



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

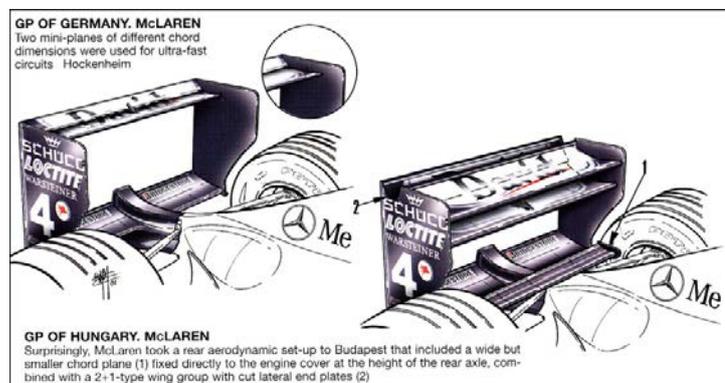
d'appui vertical, usuellement entre 2.5 et 3.0) ceci au détriment du Cx (coefficient de traînée) qui est proche de 1.0, ce que l'on peut comparer au Cx d'une voiture de tourisme actuelle (<0.35).

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 simulation, confirmé par des tests en soufflerie et par des 'runs' en ligne droite.

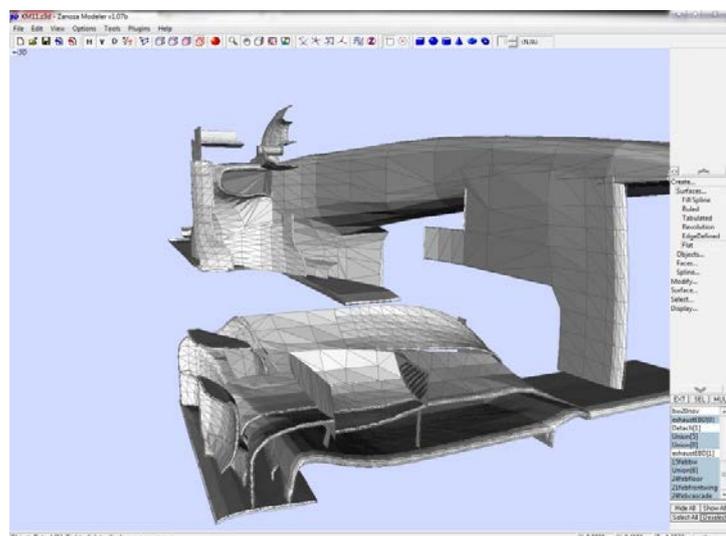
Bien entendu, si le règlement n'était pas si contraignant, les formes des F1 seraient très différentes. Les roues non carénées par exemple représentent une énorme pénalité. Le jeu des ingénieurs consiste donc à minimiser le problème en orientant des flux d'air judicieux en direction des zones où toute 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.

Exemples d'optimisation aéro

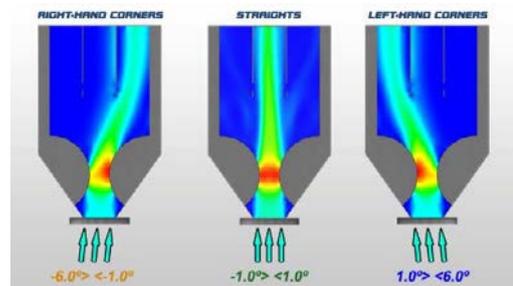
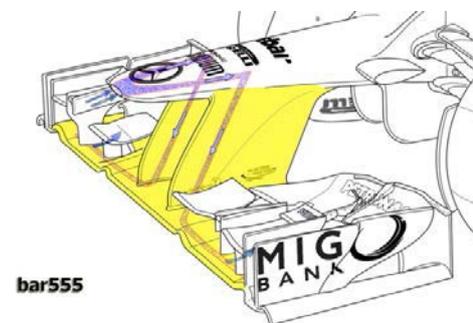
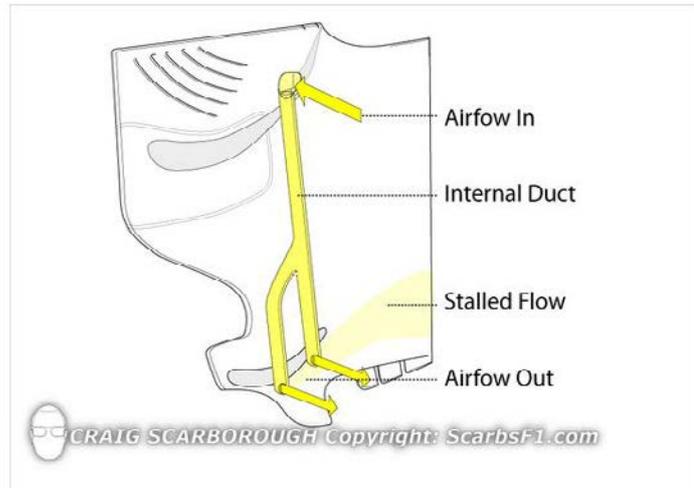
Le « double DRS » de Red Bull : une astuce intégrée à l'aileron arrière : quand l'aileron supérieur mobile découvre un orifice dans le panneau de flanc, la pression à l'arrière de l'aileron supérieur chasse un flux d'air par un conduit jusqu'à la face inférieure de l'aileron inférieur, réduisant sa portance et donc sa traînée, ce qui accélère la voiture dans les conditions de faible appui et haute vitesse.

Le « W-Duct » de Mercedes : un guide fluide non linéaire capte l'air dans le nez de la voiture et le redirige vers les côtés gauche ou droit de l'aileron avant en fonction de l'angle de la voiture par rapport à l'air. Résultat net : un meilleur appui de la roue intérieure en virages. Voir les images à droite pour un schéma de fonctionnement.

Ceci n'est pas considéré comme un « appendice aérodynamique mobile » (interdit par le règlement) car aucune pièce en mouvement par rapport au châssis n'intervient dans le procédé.

Conclusion

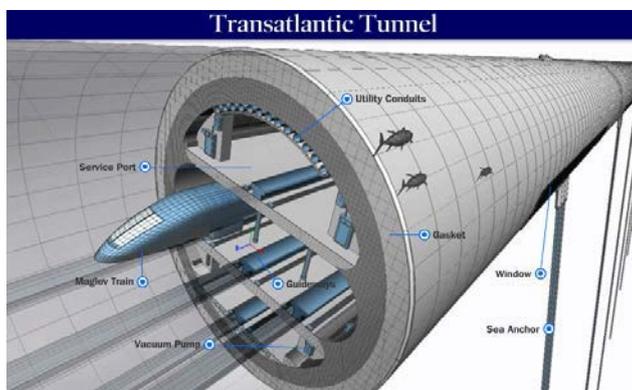
Les innombrables compromis et leur évolution au fil du temps que nous n'avons fait qu'évoquer ci-dessus démontrent l'inventivité des ingénieurs sur un problème après tout très simple à définir : concevoir l'engin le plus rapide du monde respectant un règlement d'une cinquantaine de pages. Bien sûr, le 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....



CHAPITRE 8

Le tunnel transatlantique

Avec ce projet, nous frôlons les limites du possible, et entrons dans le domaine 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'a pas empêché pas plusieurs bureaux d'études de se pencher 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 (+/- 0.2g) 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

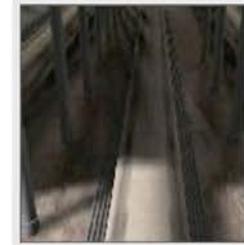
Les défis sont liés à la taille du projet. Les technologies de base sont connues mais la logistique sera le problème



Pompe à vide



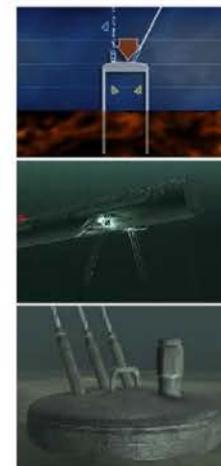
Tunnel de service supérieur



Voie de guidage des trains maglev.

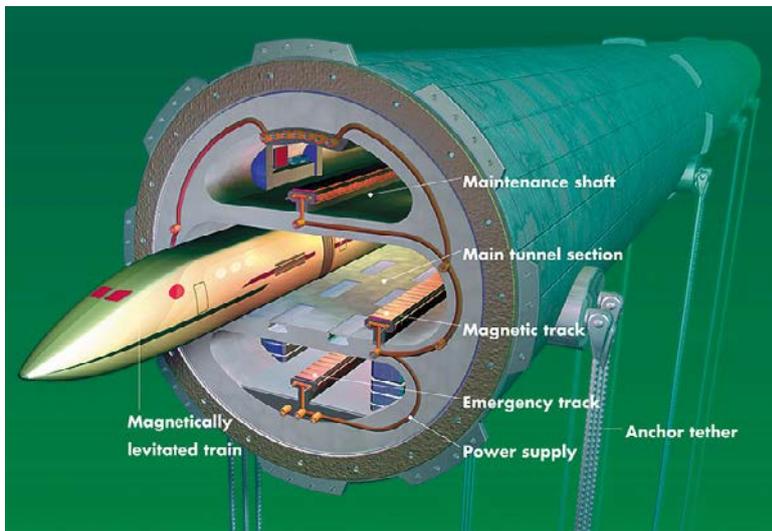


Le joint entre 2 des 54.000 sections du tunnel



Un des 100.000 points d'ancrage et ses câbles

principal. Les 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.



L'implantation: On choisira un trajet qui minimise les portions sous-marines.



Un exemple de proposition d'implantation.



Ancrage de câble par cloche de succion.



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

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.



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.

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 M³ à maintenir sous vide.
- 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.halfbakery.com/idea/Trans-Oceanic_20Tunnel

Projets similaires: les tunnels flottants

www.msft.no tunnel flottant norvégien.

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

Le Hyperloop de Elon Musk

Elon Musk, un milliardaire visionnaire (encore in qui possède sa propre compagnie spatiale) est le fondateur de eBay et de SpaceX. Il envisage un tunnel avec capsules maglev de 80 cm de diamètre: Los Angeles - San Francisco en 35 minutes avec un vitesse de pointe de 1220 Km/h.

L'astuce est ici de pomper l'air devant le véhicule et de le chasser à l'arrière, limitant la résistance aérodynamique et assurant la propulsion en même temps, du moins en phase de déplacement à vitesse constante.

Propulsion et suspension pourraient être tous deux des hybrides air-magnétique, l'alimentation externe des champs magnétiques ne sera nécessaire que pour l'accélération, la phase la plus vorace en énergie. En déplacement à vitesse constante, compenser la résistance de l'air se fera par des batteries internes rechargeables alimentant un compresseur.

Seul 1% de la piste nécessitera un moteur linéaire.

Voir l'étude complète sur le site de SpaceX : www.spacex.com/hyperloop

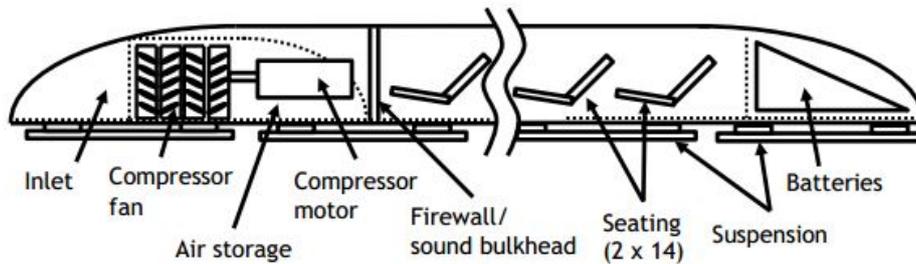


Figure 4. Hyperloop passenger capsule subsystem notional locations (not to scale).

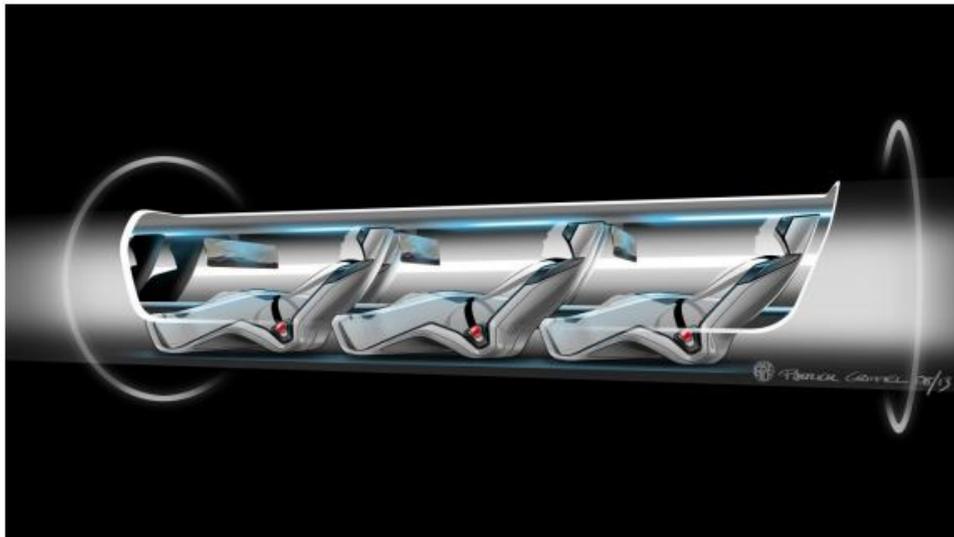


Figure 9. Hyperloop passenger capsule version cutaway with passengers onboard.

Le tunnel de base du Saint-Gothard : le chantier du siècle

C'est un chantier titanesque qui s'est presque achevé le 15 Octobre 2010, après dix-sept ans de travaux. Les TGV franchiront le Gothard en 2017, une fois les parachèvements finis.

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 (Suisse). Plus long que le tunnel sous la Manche, le double tunnel de base du Saint-Gothard mesure 57 kilomètres! le Gothard sera plus long que deux autres tunnels de base 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 (d'où le nom de tunnel "de base"). 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.

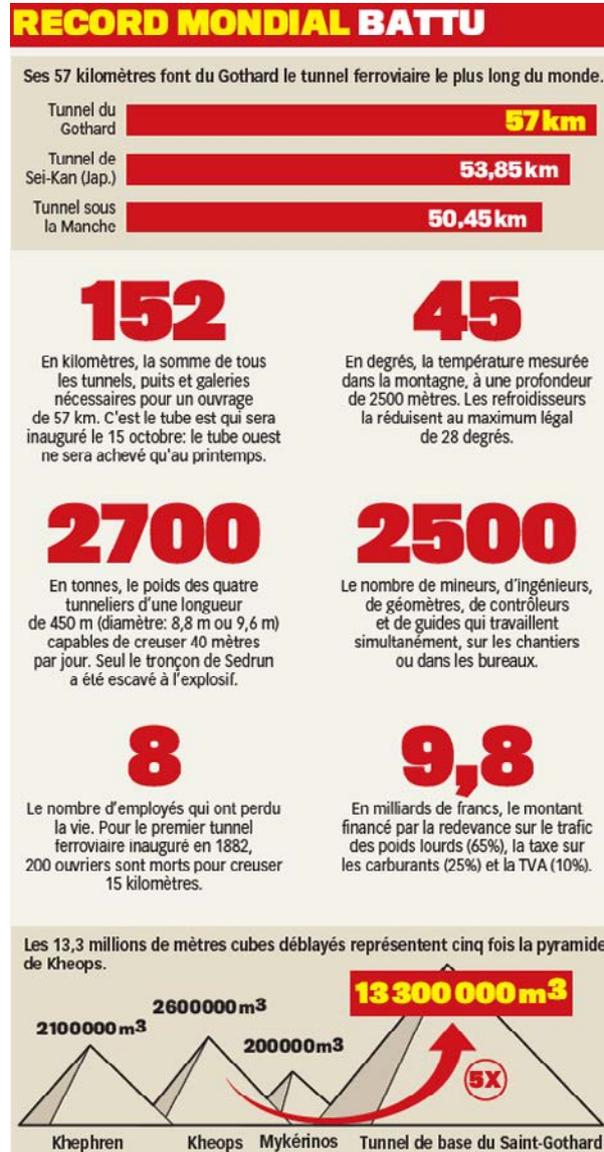
Des trains, il en passera 300 par jour. Cette nouvelle liaison ne favorisera pas seulement le transbordement des marchandises de la route vers le rail, avec 400 millions de tonnes de marchandises par an: elle permettra aux voyageurs de franchir le Gothard chaque jour pour se rendre au travail, ce qui 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 et Sedrun, à 2500 mètres sous terre. Elle marque une étape décisive de ce projet herculéen, entre le portail nord d'Erstfeld et l'entrée sud de Bodio. 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.

La jonction des voies: 31/10/2014

Le 31 octobre 2014, les derniers mètres de voie ont été officiellement réalisés et la pose de la «traverse d'or» a été dûment fêtée. Une exploitation pilote doit avoir lieu avant fin 2014.



CHAPITRE 9

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

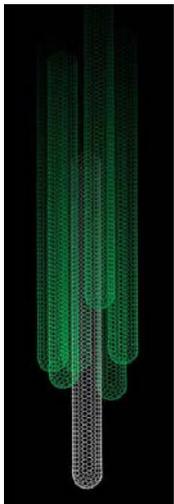
L'idée d'un ascenseur spatial existe depuis 1895, date à laquelle Konstantin Tsiolkovski (le précurseur des fusées à carburant liquide) a fait les premières estimations. Les calculs ont rapidement montré que même le meilleur acier est incapable de supporter son propre poids sur de telles hauteurs. Cependant, l'avènement des nanotubes de carbone, ce nouveau matériau du 21^{ème} 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' d'Arthur Clarke en 1978, met en scène le concept de façon réaliste.

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 NASA⁵ et divers laboratoires gouvernementaux américains⁶ et quelques privés⁷ 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.



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

⁶ Par exemple, le Marshall Space Flight Center

⁷ ISR, créé et dirigé par Bradley Edwards.

Structure de nanotubes de carbone

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/cm². Les calculs montrent que sous une gravité de 1g, la longueur de câble en acier de section constante capable de s'auto-soutenir 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/cm² 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/cm²).

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

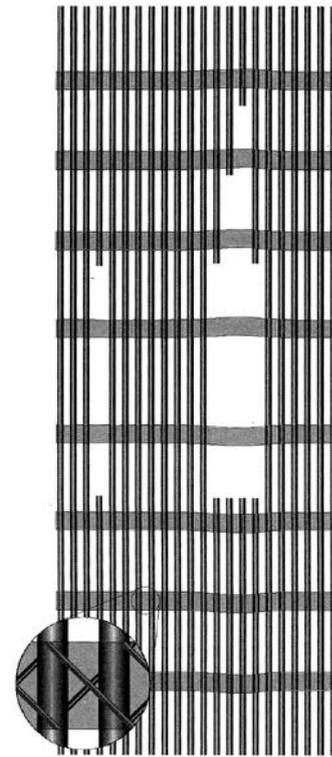
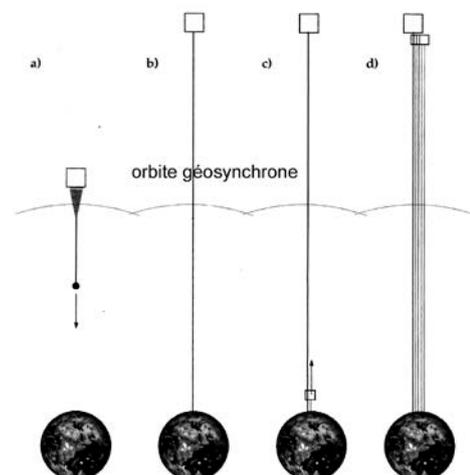
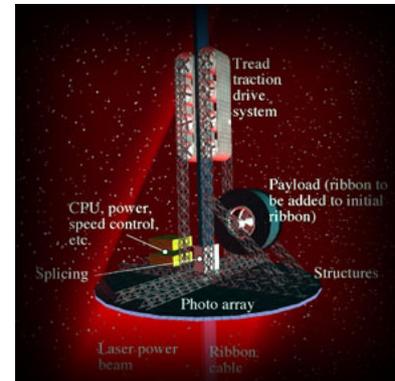


Figure 2.3: Proposed ribbon design. Fiber with carbon nanotube reinforced tape sandwich interconnects are shown (inset). Damaged areas with fibers which have slid are shown.



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 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 :

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

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 mm²). 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

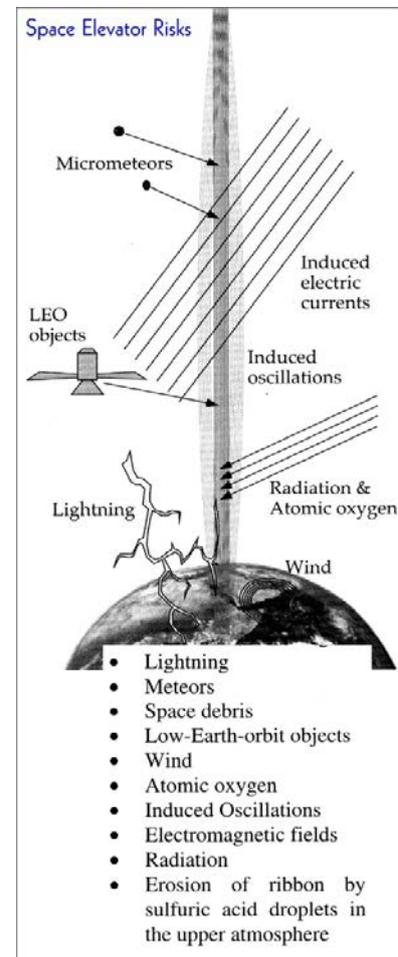
Les décharges électriques d'un orage seront irrémédiablement attirées par le câble qui sera approximativement au même potentiel électrique que le sol. La solution la plus évidente est donc d'éviter totalement les orages. Heureusement, la zone de la terre la moins affectée par les orages est justement 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 cher⁸.

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'altitude⁹, 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 situés 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 :

⁸ 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.

⁹ 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
TOTAL	~\$6B	~\$2.3B	~\$1.4B	~\$0.8B

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 5×10 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 orbital¹⁰, 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.

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

Parallèlement, les recherches sur les nanotubes de carbone progressent à pas de géants. En Belgique, la société Nanocyl¹¹ fabrique des fibres de nanotubes. En France, près de Montpellier, on trouve la société Nanoledge¹² 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.

Références

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.

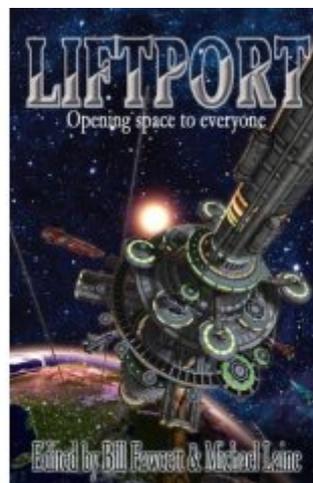
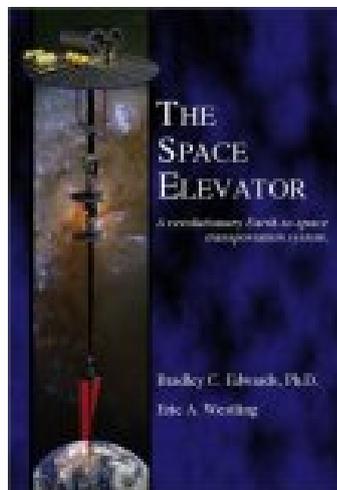
<http://www.spaceward.org/elevator2010-pb> les compétitions de chercheurs universitaires.

<http://www.spaceward.org/elevator-howClose> le résumé des défis en une seul 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



¹¹ Nanocyl : <http://www.nanocyl.com>

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

Table des Matières

Introduction	2
Chapitre 1	3
D'immenses gisements.....	3
La machine	5
Les déplacements	5
Les incidents.....	6
La restauration du site	6
Les aspects financiers et légaux	7
Caractéristiques techniques	7
Quelques images	8
Chapitre 2	12
Les gratte-ciels	12
Les plus hautes structures du monde.....	13
Les 11 Immeubles les plus hauts du monde.....	13
Etude de cas : Les tours Petronas	14
Chapitre 3	18
<i>Les ponts suspendus</i>	18
Le (probablement pas) prochain grand pont suspendu.....	24
L'autre (peut-être) prochain grand pont suspendu.....	25
Quel est le plus long pont du monde?	26
Les ponts suspendus peuvent être dangereux s'ils sont mal conçus.....	28
Les grands dômes	29
Chapitre 4	30
La Cavitation	30
La Supercavitation.....	31
Le contrôle de trajectoire.....	32
La propulsion.....	33
Les engins de surface	33
Les munitions à supercavitation	34
Les applications futures.....	35
Chapitre 5	37
Pourquoi ?	37
Le Site	38
La Technique.....	40
Les principes de design	41
Références	42
CHAPITRE 6	43
Principe de fonctionnement.....	43
Collaboration internationale.....	47
Historique de la fusion	49
Références	49
CHAPITRE 7	50
Finances.....	50
Les forces en jeu et le centre de gravité	52
L'architecture du moteur (2013).....	52
L'intérieur d'un V10 BMW 2008.....	55
Echappement	55
Freins.....	56
Personnel et Logistique	57

Transport de l'usine au site d'un circuit hors Europe.....	57
Téléométrie.....	58
Aérodynamique	59
Exemples d'optimisation aéro	61
Conclusion.....	61
CHAPITRE 8	62
Le concept	Erreur ! Signet non défini.
Les défis	Erreur ! Signet non défini.
Quelques chiffres.....	Erreur ! Signet non défini.
Rentabilité	Erreur ! Signet non défini.
Références	Erreur ! Signet non défini.
L'Hyperloop de Elon Musk.....	Erreur ! Signet non défini.
Voir l'étude complète sur le site de SpaceX : www.spacex.com/hyperloop	Erreur !
Signet non défini.	
Le tunnel du Saint-Gothard : le chantier du siècle	Erreur ! Signet non défini.
CHAPITRE 9	68
Le concept	68
Les défis	69
Les risques.....	70
Point de vue économique	72
Où en est-on ?.....	75
Références	76

Contact : Benoit MICHEL, benoit@michel.com