

. POINT DE VUE D'EXPERT .

Hyperloop : formidable escroquerie technico-intellectuelle

François Lacôte, MP1977, ancien directeur technique Alstom Transport

HOW MUSK'S SUPERTRAIN COULD WORK

Rail gun technology
 1. Electric current flows up positive rail

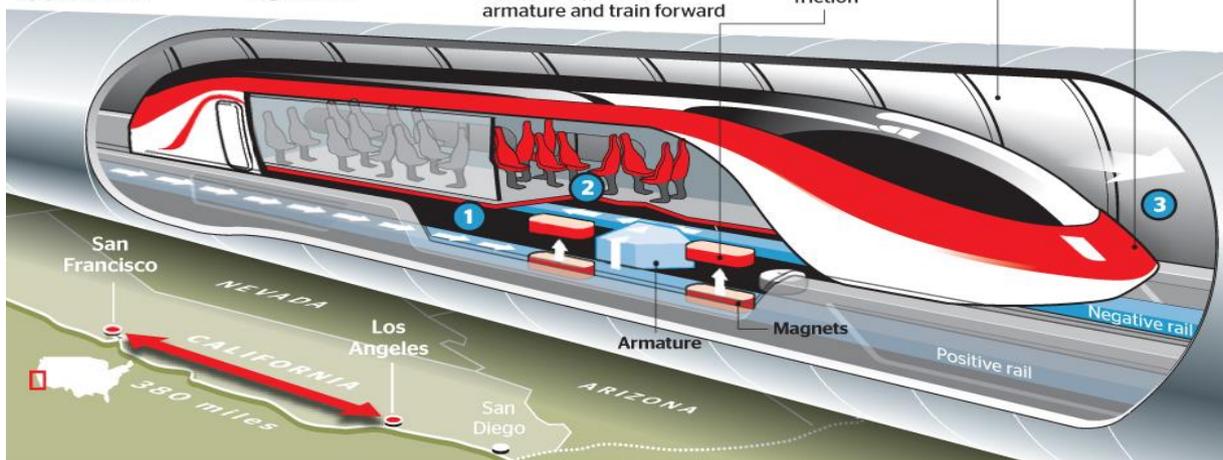
2. Current flows across armature and down negative rail

3. Magnetic force is directed towards end of rails which pushes armature and train forward

Maglev technology
 levitates the train eradicating rail friction

Reduced air pressure in tunnel cuts wind resistance

Top speed **750mph**

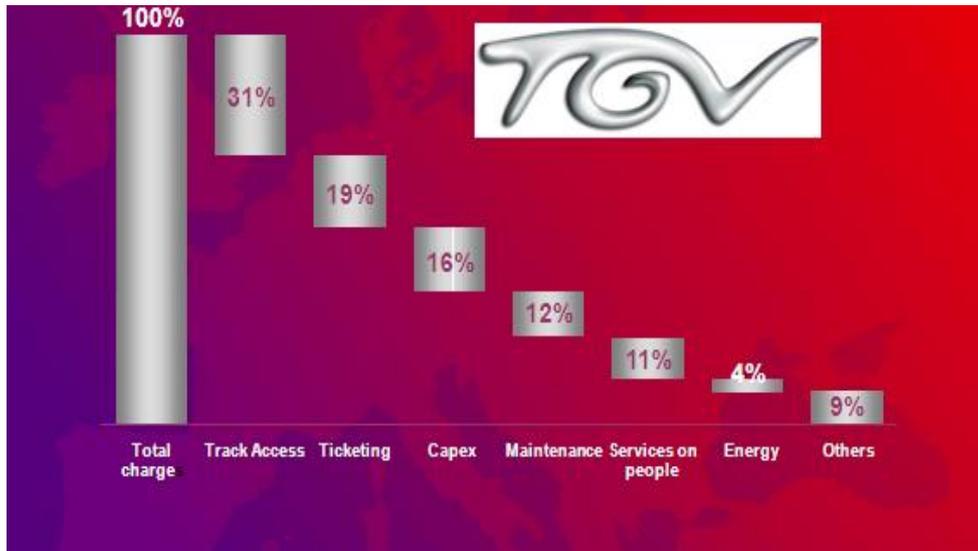


Préambule : un postulat de départ inexact

Comme d'autres projets de transport terrestre guidés réputés « innovants » (Aérotrain, Transrapid allemand ou Maglev japonais, tous datant du début des années 70), le projet Hyperloop se fonde sur la pétition de principe que le système roue-rail connaît plusieurs limites :

- Une limite technique de vitesse autour de 200/250 km/h : postulat faux puisque le record de vitesse du 3 avril 2007, établi à 575 km/h lors d'une campagne d'essais étalée sur trois mois d'hiver (janvier à début avril 2007), au cours de laquelle 28 marches d'essai ont été effectuées à plus de 500 km/h avec un train composé de véhicules de quasi-série, sur une infrastructure strictement de série, sans autre opération de maintenance du train ou de l'infrastructure qu'une simple inspection (donc sans changement ni réparation d'un quelconque élément du train, de la voie ou de la caténaire), a montré que le système ferroviaire avait un potentiel technique de vitesse d'au moins 500 km/h.
- Une limite énergétique : s'il est exact que la résistance à l'avancement (donc l'énergie dépensée) dans l'air croît rapidement avec la vitesse, l'essentiel de cette résistance vient de la résistance aérodynamique (croissant comme le carré de la vitesse), la résistance au roulement du contact roue-rail, déjà très faible, ne représentant plus que quelques pourcents du total au-delà de 300 km/h (une énergie déjà inférieure à l'énergie de la seule sustentation des autres systèmes) : ainsi tous les systèmes de transport terrestre obéissent à la même loi de la résistance aérodynamique à l'air libre, les systèmes ne faisant plus appel au contact roue-rail ne bénéficiant d'aucun avantage spécifique ; le contexte est évidemment différent dans un environnement à pression réduite (avion en haute altitude ou véhicule terrestre dans tube sous vide atmosphérique). Au demeurant, la dépense énergétique reste d'un niveau tout à fait acceptable : la part de l'énergie dans le coût d'exploitation d'un TGV à 300 km/h est de l'ordre de 5% seulement, et ainsi resterait encore faible (14%) à 500 km/h. Une autre illustration de cette très faible dépense énergétique du TGV : lors de la marche du record du 3 avril 2007, nous avons

parcouru (départ arrêté, donc dépense énergétique intégrant celle nécessaire à la montée en vitesse) 100 km en 1/4 h, avec environ 200 personnes à bord du train d'essai. Le coût de la dépense en énergie électrique (facture payée au fournisseur d'électricité), ne fut que de 1 € par voyageur transporté.



Décomposition des coûts d'exploitation du TGV (source UIC)



Le record du monde de vitesse sur rail : 1 € par voyageur pour faire 100 km en 1/4 h !

- Le coût de l'infrastructure n'est que très faiblement lié à la technologie ferroviaire (quoi de meilleur marché que des cailloux - le ballast - et de la ferraille – le rail -), mais il est essentiellement lié au tracé qui doit être de plus en plus rectiligne au fur et à mesure que l'on augmente la vitesse, et donc exiger un nombre croissant d'ouvrages coûteux (viaducs et tunnels) pour inscrire ce tracé dans le relief traversé.

Un peu d'histoire : rien de neuf !

Hyperloop n'est que la reprise d'un très vieux projet.

Rappelons déjà qu'à la fin des années 60 et au début des années 70 de nombreux projets de nouveaux systèmes de transport terrestre furent imaginés, et pour certains développés à grands frais, s'appuyant sur ce même faux postulat que le système ferroviaire était limité en pertinence technique et économique du fait de l'existence du contact entre mobile et infrastructure, le contact roue-rail.

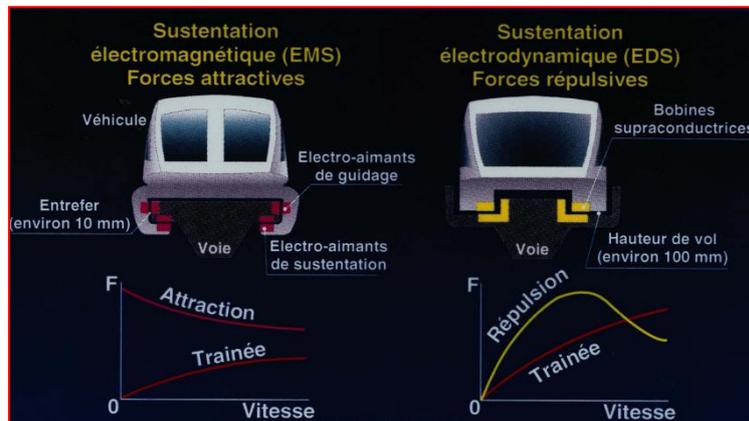
En France, l'ingénieur Jean Bertin inventa, avec l'aide financière des pouvoirs publics, l'aérotrain à sustentation et guidage par coussins d'air, et propulsion par hélice ou réacteur d'avion.

En Allemagne, les sociétés Thyssen et Siemens développent avec le soutien financier du gouvernement, le Transrapid, train à sustentation et guidage par attraction magnétique, et propulsion par moteur linéaire synchrone (stator long).



L'aérotrain de l'ingénieur Jean Bertin

Au Japon, la compagnie Japan Rail développe le Maglev, train à sustentation et guidage magnétique par répulsion, et propulsion par moteur linéaire.



Principes des systèmes de sustentation magnétique (à gauche, système allemand ; à droite, système japonais)



Le Transrapid de Shangai et son aiguillage

Ces trois développements ont donné lieu à la construction de lignes expérimentales : 18 km dans le Loiret pour l'aérotrain (1968), 40 km environ dans l'Emmland pour le Transrapid (1984), 50 km environ dans la région de Yamanashi (presqu'entièrement sous le mont Fuji) pour le Maglev japonais (1990). Seule la ligne Yamanashi est encore opérationnelle à ce jour, et une seule réalisation est en service commercial, la ligne de Transrapid reliant l'aéroport Pudong à Shanghai (35 km) ; les autres projets de liaison Transrapid envisagés à l'origine, en particulier en Allemagne, ont été abandonnés. Ainsi, 50 ans après les premières études de systèmes de transport terrestre alternatifs au système roue-rail, une seule ligne expérimentale encore en fonctionnement, et une seule ligne de 35 km en service commercial.

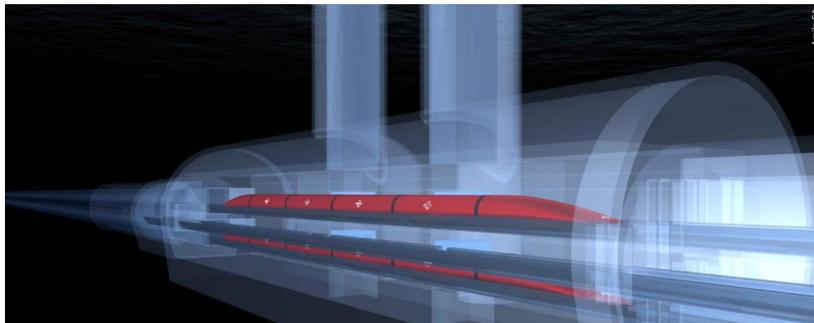


Le Maglev japonais sur la ligne expérimentale Yamanashi

Les raisons de ces échecs sont multiples, mais ce n'est pas l'objet ici de les décrire : il s'agissait simplement de rappeler que le concept de l'Hyperloop d'Elon Musk, pour la partie véhicule et sustentation/guidage, a déjà 50 ans d'existence.

Le tunnel sous vide d'air « Swiss Metro »

Quid maintenant de l'idée de faire circuler un train dans un tunnel sous vide d'air, ou plutôt sous très basse pression d'air ? Le concept, fondé sur l'idée d'une résistance à l'avancement réduite, date des années 70, et c'est il y a 26 ans (janvier 1992) que la société anonyme Swissmetro a été créée afin de développer un projet de train à sustentation magnétique circulant à très grande vitesse (500 km/h) dans un tunnel à pression d'air très réduite (1/10 de la pression atmosphérique). Ce projet qui a fait l'objet d'études approfondies et d'un financement apporté pour moitié par la confédération suisse, fut abandonné il y a environ dix ans, l'entreprise ayant considéré, au terme de ces études, que la réalisation de ce projet n'était pas envisageable....



Swiss Metro dans un tunnel à pression réduite



Le projet (abandonné) de réseau Swiss Metro

Ainsi l'ensemble des éléments qui constituent le concept « Hyperloop » se retrouve dans des développements très longs et très anciens, pour beaucoup techniquement très avancés, et qui n'ont pas abouti, à la fois pour des raisons économiques et techniques.

Hyperloop : les incohérences

La résistance aérodynamique : tout ça pour ça !

Il semble bien que le concept du système Hyperloop repose sur un objectif primordial : réduire la résistance à l'avancement, essentiellement aérodynamique (mais pas uniquement) à la vitesse envisagée. On peut à ce stade faire les deux constatations suivantes :

- A 320 km/h de vitesse commerciale, la part de l'énergie dans le coût d'exploitation du TGV n'est que de 5% ; il est donc tout à fait possible d'envisager une vitesse d'exploitation sensiblement supérieure (par exemple 400 km/h), soit un facteur 1,6 d'augmentation du coût de l'énergie (donc maintenant 6,5% du coût d'exploitation), sans faire exploser le bilan économique du TGV en termes d'énergie consommée.
- Le gain de temps apporté par une augmentation de vitesse décroît avec la vitesse (c'est bien triste, mais c'est comme cela). Ainsi, pour un trajet de 600 km, une augmentation de vitesse commerciale de 100 km/h fait gagner 1 heure en passant de 200 à 300 km/h (trajet alors effectué en 2h seulement), fait gagner encore 1/2 h en passant de 300 à 400 km/h (trajet en 1h30), mais seulement 18 mn de 400 à 500 km/h, 12 mn de 500 à 600 km/h, etc., et plus que 6 mn en passant de 800 à 900 km/h (vitesse envisagée pour Hyperloop), alors qu'un certain nombre de paramètres dimensionnant le système croissent comme le carré, le cube, voire plus, de la vitesse.
- Le débit de la ligne Hyperloop est catastrophique : à décélération identique (par exemple celle du TGV en freinage d'urgence), la distance d'arrêt croît comme le carré de la vitesse. L'espacement de sécurité entre trains doit évidemment prendre en compte cette distance de freinage en urgence : pour un TGV à 300 km/h il faut un minimum de 3,3 km ; avec une décélération identique (on n'ose imaginer des voyageurs contraints à l'immobilisme, sanglés sur leurs sièges, pendant toute la durée du voyage), cette distance de sécurité devient 10 km pour un véhicule circulant à 900 km/h. On peut imaginer (ce qui ne s'est pourtant encore jamais fait en ferroviaire) de réduire cet espacement en tenant compte de la vitesse du véhicule qui vous précède et ainsi de sa distance de freinage, mais à une valeur qui devrait rester de l'ordre de 7 km pour des raisons de sécurité assez évidentes. Ainsi, là où les systèmes ferroviaires à grande vitesse actuels permettent un espacement de 3 minutes, soit un débit théorique de 20 trains à l'heure, on ne devrait pouvoir faire mieux (même avec l'hypothèse ci-dessus de « chaînage » des circulations) qu'un espacement de 6 minutes en Hyperloop, soit un débit théorique de 10 navettes à l'heure. Facteur très largement aggravant, la capacité unitaire des véhicules est très différente : une rame TGV Duplex en unité multiple emmène 1000 voyageurs, alors qu'une navette Hyperloop est limitée à moins de 100 voyageurs, soit 10 fois moins de capacité. Ainsi le débit théorique du système Hyperloop (1000 passagers par heure) est 20 fois inférieur au débit théorique du système TGV (20 000 passagers par heure) ! Un bilan économique catastrophique, même avec un coût d'infrastructure proche de celui du système TGV, alors qu'il lui est très supérieur !

Hyperloop : les impasses techniques

Sécurité du système

- Comment est réalisée la sécurité du freinage ? Bien évidemment, le freinage de service est électromagnétique, mais un tel freinage n'est pas considéré comme suffisamment sûr dans tous les systèmes de transport terrestre (dont le transport ferroviaire). Ainsi les systèmes japonais et allemand de sustentation magnétique prévoient un « atterrissage » du train sur la voie et comptent sur le frottement train/voie pour le freinage. Quelle solution non électrique pour un véhicule Hyperloop lancé à 900 km/h ?
- Quelle disposition technique est envisageable pour le secours des voyageurs dans un tunnel de plusieurs centaines de kilomètres vide d'air, en cas d'incident comme par exemple une panne d'alimentation électrique, de signalisation, de motorisation ou tout autre évènement conduisant à l'immobilisation prolongée de la navette ? Faut-il imaginer un réseau d'air comprimé avec une multitude de portes étanches régulièrement réparties tout au long du tunnel pour permettre une réalimentation en air d'une section incidentée et occupée par une navette ?
- Plus généralement, quiconque se souvient des exigences de la CIG (Commission Inter-Gouvernementale de sécurité) pour le tunnel sous la Manche ne peut que frémir à l'évocation de l'ensemble des dispositions qu'exigerait une autorité publique de sécurité pour une exploitation commerciale avec voyageurs !

Transition mobile/station

- Comment passera-t-on d'un environnement vide d'air à une station à la pression atmosphérique ? Il paraît évident qu'un sas sera nécessaire, avec des portes mobiles venant occluser le tunnel, créer un espace clos que l'on viendra ensuite progressivement réalimenter en air pour l'amener à l'équilibre de la pression atmosphérique. Quel dispositif technique, et combien de temps perdu dans cette opération, si l'on se rappelle par exemple, dans le calcul précédemment développé, que le passage de 800 km/h à 900 km/h, sur un trajet de 600 km, ne fait gagner que 6 mn ?

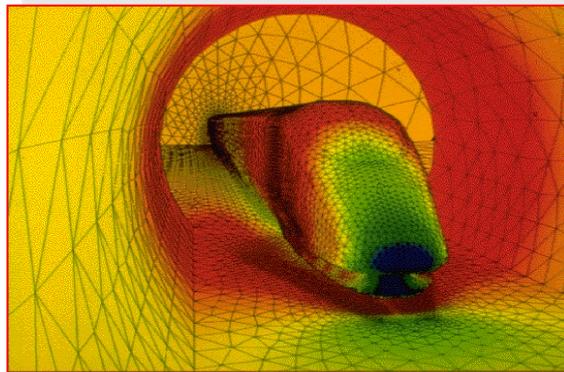
Géométrie de la voie

La très grande vitesse envisagée (900 km/h) implique un tracé quasi-rectiligne de la voie, aussi bien en plan qu'en altimétrie. Ainsi, par exemple, le discours expliquant que la capacité du mobile à grimper des pentes importantes (ce qui est exact) permet de mieux s'inscrire dans le relief traversé est une véritable imposture : en effet, outre la rectitude du tracé en plan (rayon de 50 km pour obtenir le même niveau de confort qu'en TGV et ses courbes de 6 km) , il faut insister sur l'importance des rayons de courbure du profil en long (en creux comme en bosse) : de l'ordre de 25 km en TGV pour 300 km/h ils devront être de l'ordre de 200 km pour 900 km/h ! Tout cela montre bien que le tracé aboutira nécessairement à une succession de viaducs et tunnels dans tout relief à peine tourmenté (autre que le Grand Lac Salé des Etats Unis). L'aptitude en rampe n'a ici aucune utilité.

Pression d'air dans le tunnel

Refroidissement des organes et résistance à l'avancement, un compromis impossible ! Indépendamment des problèmes techniques déjà considérables pour réaliser une enceinte continue étanche de plusieurs centaines de kilomètres sous pression d'air réduite, soumise aux fluctuations thermiques et souvent sismiques (au moins pour la partie aérienne du tube), il convient de trouver un compromis pratiquement impossible entre deux objectifs contradictoires :

- réduire au maximum la pression d'air dans le tunnel pour diminuer la résistance aérodynamique et les effets d'ondes de pression (pistonement) en tunnel, pour garder un diamètre « raisonnable » du tunnel par rapport au diamètre des navettes,



Modélisation des ondes de pression en tunnel illustrant le phénomène de pistonement

- conserver un minimum de pression d'air pour le refroidissement des organes de traction, d'énergie auxiliaire, assurer le renouvellement d'air de la climatisation pour les voyageurs, et rester dans un scénario raisonnable pour la réalimentation en air du tunnel (ou du moins de la section concernée après fermeture des cloisons étanches) en cas d'incident conduisant à une immobilisation de navette.

Dans les études du projet Swissmetro, les ingénieurs de l'Ecole Polytechnique de Lausanne avaient ainsi préconisé de maintenir une pression d'air déjà très basse, de l'ordre du dixième de la pression atmosphérique, ce qui conduisait pourtant, avec un rapport de blocage de 0,46 (rapport des sections entre navette et tunnel), à une résistance à l'avancement équivalente à celle obtenue à l'air libre en l'absence de tunnel, et ce pour une vitesse de l'ordre de 400 km/h seulement.

Conclusion : pourquoi faire compliqué quand on peut faire si simple ?

