



## **PROJETS HYPERLOOP**

**Note à venir de l'OPECST**

**QUELQUES ÉLÉMENTS D'ANALYSE DE  
L'ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES ET SON AVIS**

15 juin 2018

# **Quelques éléments d'analyse de l'Académie des technologies et son avis**

## **Préambule**

L'OPECST souhaite être éclairée sur les enjeux et les difficultés du projet de transport terrestre de personnes et de marchandises à très grande vitesse Hyperloop. L'Académie analyse ce projet en listant les questions qui se posent ainsi que les défis à relever et donne son avis sur sa faisabilité. L'Académie répond aussi aux précisions techniques demandées par l'Office.

## Introduction

Imaginé par Elon Musk, et dont les principes ont été publiés en 2013 dans le *concept paper* (livre blanc) [Hyperloop alpha](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)<sup>1</sup>, Hyperloop permettrait de transporter des personnes/marchandises à une vitesse subsonique (environ 1200km/h) dans un tube, monté sur pylones, et maintenu sous vide partiel (1 mbar). Dans ce tube, les personnes/marchandises voyageraient dans des capsules pressurisées ou « pods » (termes utilisés de façon interchangeable dans la publication), supportées par un coussin d'air et dont la propulsion serait assurée par des moteurs à induction en version linéaire placés dans les rails à l'intérieur du tube sur 1% de sa longueur totale. Il est à noter que les moteurs proposés ont été développés en version rotative pour le modèle S de la voiture électrique Tesla que sa société Tesla Motors commercialise. Ce moyen de transport, pensé initialement pour concurrencer le projet de TGV entre Los Angeles et San Francisco (distants d'environ 615 km), serait adapté à des distantes inter-ville inférieures à 1500 km. Une partie de l'énergie nécessaire au fonctionnement du système serait générée par des panneaux solaires placés sur toute la longueur du tube, à l'extérieur (voir réf.1 pour les détails techniques).

Le *design* d'Hyperloop a ceci d'intéressant qu'il est en *open source*, similaire à Linux, donc réutilisable et *upgradable* par toute entreprise ou

organisation privée et publique, expliquant d'ailleurs la multiplication des projets d'Hyperloop dans le monde. Ainsi que le souligne O. Ezratty<sup>2</sup>, Elon Musk a fait appel à une forme d'innovation rare dans le sens où la réalisation de son projet ainsi que son financement sont externalisés<sup>3</sup>. Sa bibliographie officielle confirme bien qu'il n'occupe pas de fonction particulière dans les différentes *start up* qui se sont créées pour mettre au point et industrialiser les technologies d'Hyperloop. Dans l'esprit de chacun pourtant, son nom est systématiquement associé à tous les projets en cours. C'est sa société SpaceX qui a pour objectif affiché depuis 2017 de révolutionner le transport terrestre à travers ses services Hyperloop. Elle recourt largement à l'innovation ouverte à l'échelle mondiale pour accélérer le développement de prototypes fonctionnels, avec, notamment, la création de la compétition *Hyperloop pod*. Depuis 2017, des équipes universitaires sélectionnées se défient pour *designer* et construire le meilleur « pod »<sup>4</sup>.

Une revue succincte de ces *start-up* et des financements associés est accessible via le lien suivant : <https://www.frenchweb.fr/les-projets-hyperloop-et-elon-musk/316865>) Il s'agit de Virgin Hyperloop One (USA), Hyperloop Transportation Technologies (USA), Arrivo Loop (USA), DGWHyperloop (Inde), HyperCharriot (USA), Hardt (Pays-Bas), Transpod (Canada). Ces *start-up* s'appuient sur de très nombreux partenariats dans le monde, universitaires et avec des entreprises privées, pour co-

---

<sup>1</sup> [Hyperloop alpha](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf), publication accessible via [http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha-20130812.pdf](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf)

<sup>2</sup> Olivier Ezratty est consultant et auteur. Il conseille les entreprises pour l'élaboration de leurs stratégies d'innovation, et en particulier dans le secteur des objets connectés et l'intelligence artificielle

<sup>3</sup> <https://www.frenchweb.fr/les-projets-hyperloop-et-elon-musk/316865>

<sup>4</sup> 2018 SpaceX Hyperloop Pod Competition. Rules and requirements, révision 1.0, 5 septembre 2017

développer les technologies *ad hoc*. Précisons que la SNCF aurait investi de l'ordre de 5M\$ pour un montant d'appel de capitaux de l'ordre de 80M\$ dans un projet de déploiement des technologies Hyperloop de la société Virgin Hyperloop One (autres investisseurs : Sherpa ventures, EightVC, Zhenfund, Caspian Ventures Partners, 137 Ventures, Koshla Ventures, Fast Digital, Western Technologies Investment, GE Ventures). Sa filiale SYSTRA dit avoir un contrat rémunéré pour réaliser des études, dont elle ne peut donner la teneur, car liée par un accord de non divulgation. Hyperloop Transportation Technologies a quant à elle implanté son centre européen de R&D à Toulouse. Transpod enfin installera un centre d'essai en Haute-Vienne. Les travaux de construction du centre devraient démarrer en automne 2018.

L'analyse des projets, de leur état d'avancement et de leur niveau de financement conduit son auteur, O. Ezratty, à conclure qu'ils sont encore largement à l'état du prototypage. Les budgets alloués par les villes concernées sont des budgets de pré-étude, non de réalisation.

A la lecture du *concept paper* [Hyperloop alpha](#), de nombreuses questions se posent, à la fois sur les aspects techniques, scientifiques, de sécurité, ou d'exploitation présentés et sur les aspects financiers que la publication aborde aussi.

Après avoir rappelé ce qu'est un système de transport **(1)**, l'Académie se propose d'analyser les aspects précités **(2)**, de répondre aux précisions techniques demandées par l'OPECST à l'Académie **(3)** et enfin de donner son point de vue sur les chances de succès pour qu'un tel projet se réalise **(4)**.

## 1. Système de transport

Un système de transport, c'est d'abord une infrastructure et c'est ce qui coûte le plus cher en investissement (de 50% pour les projets en site rural et peu accidenté, à 80% et plus, pour des projets en zones accidentées et à contraintes environnementales). C'est ensuite le véhicule ou le mobile puis le système d'échange entre le véhicule et ses passagers qu'il est nécessaire de gérer (le terme d'interface est réservé aux liens entre le mobile et l'infrastructure).

Un système de transport c'est aussi des coûts d'exploitation (énergie, fonctionnement, entretien et renouvellement des composants) majoritaires sur la vie du système (*life cycle cost*).

### 1.1 Les systèmes actuels commerciaux de transport à grande vitesse

Il s'agit des avions et des chemins de fer dont le Train à Grande Vitesse (TGV).

Le TGV est un investissement structurant pour les régions et les villes traversées car l'économie s'organise différemment puisque les temps de parcours pour se rendre d'un point à l'autre sont plus courts. L'équivalent du TGV en termes de facteur structurant, ce sont les avions aux USA.

### ○ Efficacité énergétique

Sur les distances inférieures à 2000 km, les chemins de fer (systèmes roue-rail) sont les modes de transport les plus efficaces d'un point de vue énergétique, entre 5 et 8 fois plus que le transport aérien <sup>5</sup>.

Pour mémoire,

- le TGV est compatible avec les infrastructures existantes et permet une irrigation fine des territoires sans rupture de charge
- le système aérien est un système point à point avec de nombreuses ruptures de charge

### ○ Exploitation, coûts

L'intensité d'exploitation du réseau la plus élevée est atteinte avec les TGV. Les différents types de **TGV** transportent **20 000** personnes / h /sens sur les lignes européennes, chinoises et coréennes avec 1 TGV toutes les 3 min, et jusqu'à près de **50 000** personnes pour les Shinkansen qui ont des trains de 16 voitures longues et larges à 2 niveaux avec 2mn30 entre rames, entre Tokyo et Kyoto. **En avion**, sur la ligne Paris-Toulouse, la plus fréquentée d'Europe, il y a **260** passagers / h / sens sans que ce soit la limite de capacité du système<sup>6</sup>.

En prenant en compte l'impact du transport sur la biosphère, le climat et les ressources (pas uniquement fossiles) sur le coût du transport (prix du billet), il serait probable que le train l'emporterait plus souvent sur les trajets de moins de 4h (quasi-monopole à 2 heures, majoritaire à 3 heures de temps de parcours et devient minoritaire à 4 heures par rapport à l'avion).

### ○ Cas particulier des TGV

Le réseau mondial du TGV est concentré géographiquement (200 villes desservies en France). La Chine totalise aujourd'hui 60% de ce réseau et prévoit d'ailleurs de le doubler d'ici à 2025. En Europe, la France possède le 2<sup>ème</sup> plus long réseau à grande vitesse d'Europe après celui de l'Espagne<sup>7</sup>. Le niveau d'utilisation par individu est le plus élevé (3 à 4 fois plus que le réseau espagnol en passagers.km). Chaque habitant en France, Allemagne et Suisse parcourt en TGV plus de 1000 km / an.

Aujourd'hui cependant, malgré la densité d'exploitation la plus élevée parmi les différents modes de transport commerciaux, deux lignes seulement de TGV sont rentables : Paris-Lyon (1<sup>ère</sup> mise en service en France, en 1981) et Tokyo-Osaka (1<sup>ère</sup> au monde). Elles ont été amorties au bout de 30 ans d'exploitation.

---

<sup>5</sup> <https://youtu.be/912P2mlQeE>, présentation de Virginie RAISSON-VICTOR, présidente de LEPAC, lors du dernier forum des 100 à l'Université de Lausanne **Comment transporter 8 milliards d'humains en 2038 ?**, 24 mai 2018

<sup>6</sup> Chiffres 2014

<sup>7</sup> L'observatoire des transports et de la mobilité. **Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs**, 2015-2016

## 1.2 Les systèmes de transport terrestre à grande vitesse en développement dans le monde et ceux abandonnés

La concentration de la population mondiale dans les villes, et le besoin conséquent de communication entre ces mégapoles futures, rendra probablement nécessaire le développement de systèmes de transport rapides et à fort débit, respectueux de l'environnement et donc de l'énergie consommée lors de leur exploitation, mais aussi limitant leur impact lors de leur construction.

Ce besoin, qui paraît incontournable, a incité de nombreuses équipes dans le monde à développer des projets divers depuis les années 1970. On peut citer en France, l'aérotrain Bertin, la génération TVG, de la turbine à la traction électrique, en Allemagne et au Japon, le Transrapid et le MAGLEV, à sustentation magnétique et moteur linéaire, tous au sol et à l'air libre. Compte tenu de la résistance aérodynamique, ils trouvent leur limite économique à une vitesse voisine de 400 km/h, ou moins, selon le coût de l'énergie (leur consommation par unité de temps varie comme la puissance cubique de la vitesse : 1 à 100 km/h et 64 à 400 km/h).

L'idée de faire circuler les trains ou mobiles dans des tubes ou tunnels sous vide partiel a été développée afin de réduire la résistance aérodynamique, donc la consommation d'énergie et de pouvoir augmenter la vitesse.

Nos exemples se focalisent sur le mode de transport qui se rapproche quelque peu des projets d'Hyperloop, à savoir le MAGLEV au Japon (projet

en développement), pour certains éléments et SWISSMETRO en Suisse pour le vide partiel (projet abandonné).

### 1.2.1 MAGLEV

Ce système à sustentation magnétique, qui a été développé dans les années 1970/80 par Siemens et Thyssen en Allemagne (Transrapid) et par JR Central, le RTRI<sup>8</sup> et les grands industriels au Japon (MAGLEV), ne connaît à l'heure actuelle, aucune application commerciale qui fonctionne de façon fiable dans le monde.

#### MAGLEV à Shanghai en Chine

C'est la 1<sup>ère</sup> et seule ligne à usage commercial du monde, qui relie la station Longyang road sur la ligne 2 du métro de Shanghai à l'aéroport international de Pudong. La technologie de sustentation avait été développée et commercialisée par les sociétés allemandes Siemens et Krupp. Le site officiel dédié à l'utilisation de cette ligne indique par ailleurs des vitesses de service comprises entre 300 et 430 km/h selon les créneaux horaires.

Cette ligne à sustentation magnétique de démonstration opérationnelle rencontre de nombreux problèmes de fiabilité et donc de disponibilité, ainsi que de consommation d'énergie. Mais ceci est probablement dû au fait que ce démonstrateur ne présente plus d'intérêt, la Chine ayant opté pour l'autre solution.

---

<sup>8</sup> Railway Technical Research Institute

## Prototype MAGLEV (MLX01) au Japon

Une 1<sup>ère</sup> portion prototype de la ligne a été créée pour servir de piste d'essai. Le prototype (MLX01) circule actuellement et depuis plus de 20 ans dans la province de Yamanashi pour essais.

Des électroaimants sont placés au centre de la voie pour assurer la sustentation magnétique du prototype, uniquement lorsque sa vitesse a atteint 110km/h (il est sur roue au-dessous de cette vitesse). Cela est dû au fait que les aimants qui assurent la sustentation ne sont pas alimentés en électricité : c'est le déplacement du train (et donc des aimants de ses boggies) qui induit le champ magnétique dans les bobines au sol qui va faire s'élever le train. Les roues équipées de pneus sont rétractables comme pour un avion. Elles sont doublées d'un disque d'aluminium qui prend le relais en cas de crevaison. Le freinage normal se fait par les aimants, mais en cas d'urgence, les trois solutions suivantes ont été envisagées lors des essais avec le prototype :

- freins aérodynamiques (panneaux verticaux qui se lèvent)
- puis freins à disque de carbone sur les roues rétractables, utilisés à basse et moyenne vitesse
- sabots situés sous le train qui freinent le train par contact direct avec la piste de béton, utilisé en cas de panne du freinage à disque.

Il n'y a pas d'information sur le maintien de ces caractéristiques dans la version commerciale L0 actuellement développée. Le L0 appartient à JR Central : les articles le présentant sont moins détaillés que les rapports sur le MLX01 qui datent de l'époque où le RTRI était encore impliqué dans le développement.

La mise en service de la version commerciale L0 pour relier dans un 1<sup>er</sup> temps Tokyo et Nagoya (soit 286 km) est maintenant annoncée pour 2027. Elle était annoncée à l'origine, avant 2000.

Par ailleurs, le coût annoncé du projet est de 61.5 milliards €, soit 221 millions € /km (pour mémoire 80% en tunnel), à comparer avec 5 à 20 millions € /km dans le cas du TGV.

### 1.2.2 SWISSMETRO en Suisse

Swissmetro était un projet de train à sustentation électromagnétique souterrain pour la Suisse, développé par l'EPFL, et piloté par l'Etat Fédéral. Il a été abandonné en 2009 pour des questions de coût. Il devait relier Lausanne et Genève, puis les aéroports de Bâle et Zurich dans un double tunnel maintenu sous un vide de 100 mbar (Hyperloop prévoit 1 mbar). La vitesse d'exploitation prévue était de 600 km/h. Cette vitesse d'exploitation permettait de revenir à un système roue/rail dans le cas prévisible où la solution à sustentation magnétique n'aurait pu être mise au point.

## 2 Les questions qui se posent : les défis à relever

### 2.1 Infrastructure

#### Dissipation de l'énergie cinétique du véhicule en cas de freinage d'urgence

Selon les données Hyperloop, une capsule déplaçant des passagers ou transportant des marchandises a une masse respectivement de 15t et 26t.

De plus, la capsule devrait subir une accélération/décélération de 1g (9.8 m/s<sup>2</sup>). Enfin, en ce qui concerne les données d'exploitation annoncées, il pourrait y avoir jusqu'à 1 capsule toutes les 30s.

Lors d'un freinage d'urgence pour raison de sécurité, il faudra évacuer l'énergie cinétique de chaque véhicule. Dans la configuration annoncée, ceci représente une distance de **10,2 km** entre deux véhicules consécutifs à 340 m/s.

**L'énergie cinétique du véhicule à dissiper est importante** (cf. encart 1). **Cette énergie permet**, dans le cas d'une capsule avec passagers, de **faire bouillir 2 tonnes d'eau**.

La sustentation et la propulsion magnétique génèrent des niveaux d'échauffement qu'il est difficile de dissiper dans un environnement basse pression.

Remarque : lors de phase de freinage normal, il est possible de récupérer cette énergie dans des batteries (*regenerative braking*), si les rendements de la chaîne électrique traction sont de haut niveau, car toute perte se transforme en chaleur difficile à dissiper.

En retenant une décélération égale à l'accélération, cette énergie est à dissiper en 35 secondes, et avec une distance de 10.2 km entre véhicules (avec un « pod » toutes les 30s), tous doivent freiner de la même façon. Il faut évacuer ou **absorber 250 MWh sur** une longueur de ligne de **5000 m**, en 35 secondes.

Le coût d'un tel dispositif n'est pas négligeable.

Encart 1 - Energies cinétiques de différents moyens de transport et puissances correspondantes
<b>Hyperloop</b> : 900 millions de joules (250kWh, soit 207 000 kcal) et 1600 millions de joules (≈ 440kWh) respectivement pour une capsule avec passagers et de fret
<b>Voiture</b> (1500 kg lancée à 130 km/h, soit 36m/s) : ≈ 1 million de joules (≈ 0.3KWh)
<b>TGV</b> à pleine vitesse (90m/s) : 2350 millions de joules (650kWh)

### 2.1.1 Tracé

#### Quelques considérations de tracé adaptées au cas du projet Hyperloop

##### En transversal

En ferroviaire, l'accélération transversale non compensée est limitée aux alentours de 1.4 à 1.5 m/s<sup>2</sup>. Cette limitation est une limitation de confort (pour des personnes qui peuvent être amenées à circuler dans des couloirs, avec « un café à la main »).

Il est possible d'augmenter cette limitation dans le cadre d'un transport avec des personnes « sanglées à leur fauteuil », comme dans le projet d'Hyperloop.

Avec des valeurs de 1.5 m/s<sup>2</sup>, le rayon minimal à 1000 km/h serait de plus de 50.000 m ! (NB : on ne fait pas la distinction en ferroviaire entre un alignement et une courbe de 25.000 m de rayon et plus).

En appliquant une inclinaison du module, on peut cependant abaisser la valeur du rayon minimal jusqu'à 6.800 m par exemple pour une inclinaison à 45°. Cependant, dans ce cas, il faut s'interroger sur les situations d'arrêt



et la sensation de gravité résultante par les passagers ainsi qu'à pleine vitesse, l'effort de sustentation, sera alors multipliée par 1.4, ce qui nécessite un surdimensionnement de la surface des coussins d'air.

En transversal, la variation d'accélération (jerk) est aussi une donnée importante pour le confort. En ferroviaire on limite cette valeur à  $0.5 \text{ m/s}^2$ .

### En vertical

La courbe de raccordement conditionne le confort des passagers (effet montagnes russes). Elle dimensionne aussi la puissance de sustentation puisqu'elle fait varier l'effort de gravité, en plus lorsque l'on passe en point bas et en moins lorsque l'on passe en point haut.

Les seules informations dont nous disposons sont que le plan de construction de la ligne d'essai de Yamanashi (la piste actuelle qui sera intégrée à la ligne Tokyo - Nagoya) prévoyait parmi les conditions nécessaires la mise en place d'un rayon de courbe de raccordement de 30 000 m pour la grande vitesse.

Les limitations sont basées sur des valeurs de confort déterminées à bord d'un avion.

On limite cette accélération verticale à  $0.3 \text{ m/s}^2$  (et jusqu'à  $0.55 \text{ m/s}^2$  dans le cas d'une bosse).

**Pour 1000 km/h, en prenant un maximum de  $0.55 \text{ m/s}^2$ , on obtient un rayon minimal de 140.000 m !** Et dans ce cas, il n'y a pas de moyen de réduire ces valeurs.

Dans tous les cas, il faut aussi se poser la question des caractéristiques des transitions entre les éléments (courbe/alignement ou courbe/courbe) :

- en tracé ferroviaire on tend à faire varier les accélérations linéairement dans ces éléments
- leur longueur doit permettre de ne pas ressentir de variations cycliques trop rapprochées qui peuvent engendrer des effets physiologiques mais aussi mécaniques.

### En longitudinal

Dans ce cas précis, ce sont les limites technologiques d'adhérence (rail/roue) qui limitent la valeur en ferroviaire. La Spécification Technique d'Interopérabilité, règlement européen pour les lignes ferroviaires européennes, préconise  $2.5 \text{ m/s}^2$ , mais il semble que technologiquement il soit difficile d'aller au-delà de  $2.2 \text{ m/s}^2$ .

Dans le cadre d'Hyperloop, ce sont certainement les considérations énergétiques (dissipations d'énergie) qui seront prépondérantes, et celles d'acceptabilité par les passagers :

- une accélération de 1g est intolérable par des passagers en position allongée ou semi allongée (cf. 2.4)
- il sera difficile de demander aux passagers de rester sanglés pendant la durée du voyage

Ces éléments amènent à conclure que la ligne Hyperloop entre Los Angeles et San Francisco ne pourra suivre le tracé de l'autoroute, même lorsqu'il est droit, qu'il lui faudra tunnels et viaducs et que, par conséquent, son coût sera très élevé.

## Métrologie : un mur à franchir

La planéité du support de guidage détermine l'importance de l'entrefer pour une sustentation magnétique ou de l'écartement entre le support et les injecteurs pour le coussin d'air.

Dans les deux cas, plus l'écartement est grand, plus il nécessite d'énergie, un champ magnétique ou une pression d'air élevés.

Par ailleurs, ces défauts de planéité, même repris par l'entrefer qui joue le rôle de suspension primaire du véhicule, créent des efforts importants, générateurs de vibrations, de fatigue des matériaux et de confort des passagers.

Par comparaison avec les planétés requises pour les rails de voies à grande vitesse, puisque la vitesse est multipliée par 3 ou 4, la planéité requise sera multipliée par 10 ou 15. Il nous paraît donc probable que la précision nécessaire sera de l'ordre du 1/10 mm, car elle est de l'ordre de 1 mm pour les voies ferrées à grande vitesse.

Enfin, les exploitants des lignes à grande vitesse en France, Allemagne, Japon et Chine ont constaté que le coût de maintenance des infrastructures évolue de façon au moins parabolique avec la vitesse, et que le maintien d'une géométrie rigoureuse est nécessaire pour éviter une dérive de ces coûts. De plus, il a pu être constaté que les phénomènes de fatigue en particulier qui sont un des éléments générateurs de ces coûts se développent de la même façon dans un système à sustentation magnétique que dans un système roue rail, car les efforts sont repris par l'infrastructure de la même façon.

## 2.1.2 Tube

Les capsules se déplaceraient sur un coussin d'air positionné sous elles pour réduire les frottements et seraient propulsées par un champ magnétique créé par des moteurs à induction linéaires placés le long du tube. Les accélérations permises seraient de l'ordre de 1g. La vitesse de pointe serait inférieure à 1 Mach avec un écoulement fluide de l'air basse pression autour de la capsule. La limite de vitesse en tube annoncée dans le document alpha nous paraît excessive, car la vitesse du son décroît avec la pression, et qu'il est impératif de ne pas créer de phénomènes soniques dans le tunnel, le risque étant de concentrer de grandes énergies en des points singuliers, avec des effets aux conséquences graves sur les « pods » et les passagers.

### Gestion du vide & coût associé

Le vide dans le tube serait de 1mbar. L'énergie nécessaire pour assurer le maintien du tube à cette pression est importante. Un tube adiabatique de 1 km de long et de 2.2m de diamètre initialement à 1bar nécessite une énergie de 380 MJ, soit 105 kWh et environ 65 MWh pour Los Angeles – San Francisco. Il n'est rien dit sur les extrémités de lignes et les zones d'échange des voyageurs qui peuvent consommer beaucoup d'énergie selon l'architecture et le mode d'exploitation retenu.

Par ailleurs, pour raison de sécurité, en cas d'incident nécessitant l'évacuation des passagers, ce vide sera à reconstituer à chaque remise en service. Le temps nécessaire à une telle opération risque de neutraliser l'exploitation, pendant une durée qui s'ajoutera au temps d'intervention.

## Impact du vide sur l'équipement

L'ensemble de l'équipement dans le tube est dans des conditions critiques. Nous sommes dans des sauts technologiques quand on passe le point d'ébullition de l'eau. Le tube doit être étanchéifié, mais pas au béton, car ce matériau deviendrait sec et risquerait alors de s'effriter. Qu'en est-il des projets de lignes en tunnel ? Faudra-t-il les doubler en tubes métalliques ? Le vieillissement des matériaux sous de telles conditions sera-t-il maîtrisé ?

## Stabilité dimensionnelle du tube

Les conditions climatiques auront un impact sur la stabilité dimensionnelle du tube. En cas de fortes chaleurs, comment gérer la dilatation du tube en acier pour assurer le vide ? (en Californie par exemple, il est question de 50 m de dilatation). Les rails des lignes GV sont en acier à très faible coefficient de dilatation. Par ailleurs, les efforts latéraux générés par la dilatation sont repris par un « armement » très robuste du ballast des voies LGV. Ceci est incompatible avec la description des liens pylones / tubes dans le document alpha, il y a alors incompatibilité entre le blocage de la dilatation et la résistance aux tremblements de terre.

### 2.1.3 Pylones

Le document alpha montre des pylônes légers qui ne supportent que le poids des tubes. Chaque pylône devra être dimensionné pour supporter le poids de la capsule la plus lourde. De plus, les effets de vent, surtout si des capteurs solaires sont déployés, sont considérables. Ils se cumulent aux efforts latéraux générés dans les courbes.

De plus, les efforts verticaux doivent être augmentés des accélérations verticales lors des variations de rampes.

Enfin, pour éviter le surdimensionnement du système de sustentation et l'inconfort des passagers, leur hauteur variable en fonction du relief du sol pourra atteindre des valeurs nécessitant la construction de viaducs pour supporter les tubes.

La solution par tunnel résout cela mais à un coût très élevé.

## 2.2 Véhicule/capsule

### Puissance embarquée

On est plutôt dans de petits véhicules (une trentaine de passagers ; 15t) avec une puissance embarquée énorme de 50 MW, soit 3kW/kg (contre 60W/kg dans le cas de Swissmetro). Par conséquent, la masse embarquée pour générer une telle puissance est obligatoirement élevée, ce qui alourdit la masse du « pod ».

### Assemblage des aimants permanents

Leur utilisation est nécessaire pour réaliser « le rotor » du moteur linéaire, le stator étant la voie et ses spires alimentées.

Les forces générées sont difficilement maîtrisables lors de l'assemblage des aimants permanents, ceci a été résolu pour les moteurs à aimants permanents, et une *start-up* italienne, IronLev, *spin-off* de l'université de Trévise semble avoir mis au point une nouvelle génération d'aimants

permanents qui permettraient d'améliorer le ratio « champ magnétique/masse des aimants ».

Si une sustentation magnétique est utilisée, les champs magnétiques nécessaires sont très élevés. Se posent alors la question de la puissance de ces aimants et celle de la compatibilité avec la santé des passagers (cf. paragraphe à propos de l'impact des champs magnétiques sur la santé).

## 2.3 Management des circulations et de la sécurité

### 2.3.1 Management des circulations

#### Exploitation

Selon les données Hyperloop, il y aurait 28 passagers par capsule toutes les deux minutes, soit une densité horaire de 840 voire 1120 (40 capsules aux heures de pointe) à 3360 (28 passagers par capsule toutes les 30 secondes). Il est précisé également qu'en période de pointe (40 capsules), 6 d'entre elles seraient aux extrémités du trajet pour l'embarquement/débarquement des passagers, en approximativement 5 min.

Ceci pose plusieurs questions :

- D'une part celle de la gestion des extrémités dont la description reste vague, mais qui dimensionnera pourtant l'exploitation du système. Comment gérer à de telles fréquences le flux de passagers (gestion du service) et les flottes de capsules ?

- D'autre part, comment réguler la distance inter-capsules ? (gestion de l'espacement entre capsules et de la commande en sécurité de la capsule)

### 2.3.2 Management de la sécurité

#### Maîtrise de l'environnement pour une utilisation grand public

Il n'y a pour le moment pas de maîtrise d'un tel environnement stratosphérique (équivalent à 50% de la pression sur la planète Mars) pour une utilisation grand public. On peut penser que l'intérêt d'E. Musk pour un tel projet est guidé par le lancement de la mobilité dans l'espace et l'éducation du grand public à ce type d'environnement.

#### Quelle approche pour démontrer la sécurité ?

La démonstration de la sécurité logicielle peut se faire selon une méthode de preuve formelle, tel que dans le cas des lignes automatiques de la RATP ou probabiliste tel que pour les réseaux de chemin de fer européens. Les deux approches fonctionnent. Le choix de l'approche structurera l'approche système, tant en matière de sécurité qu'en management dudit système.

#### Champs magnétiques en présence : quel impact sur la santé ?

La valeur probable du champ magnétique sera de 1 à 2 Tesla. Il est à noter que la législation limite à 5 Gauss (10 fois le champ terrestre) soit  $5 \cdot 10^{-4}$  Tesla le champ magnétique pour les porteurs de *pace-makers*. Ils ne bénéficieront donc pas *a priori* de ce transport.

### Quelles questions à résoudre en cas de perte de propulsion ?

- Compte-tenu du vide partiel dans le tube, comment les passagers seront-ils évacués ?
- Il est possible de recourir à un véhicule de secours (à définir néanmoins) pour tracter la capsule. Cette option était réaliste pour Swissmetro car le tronçon faisait 40 km. Pour un tronçon annoncé d'environ 600 km, si la capsule est en perte de propulsion au milieu du tronçon, le véhicule de secours devra être capable de faire 300 km et de revenir. L'intervention prendra du temps car, outre la mise sous pression atmosphérique du tunnel, le véhicule de secours (de petite taille compte-tenu du diamètre annoncé du tunnel) sera soumis à une résistance à l'avancement importante (effet piston), ce qui limitera nécessairement sa vitesse à environ 80 km/h
- Le maintien de la qualité de l'air pour les passagers (au-delà de l'autonomie annoncée)

### Quelle sécurité en mode normal et en mode semi-dégradé ?

La propulsion serait assurée par des moteurs à induction en version linéaire placés dans les rails à l'intérieur du tube sur 1% de sa longueur totale (cf. introduction). Cette configuration complexifie la gestion des moteurs linéaires, d'autant plus que les moteurs sont asynchrones au niveau des extrémités du tronçon. La vitesse doit être régulée en permanence, ce qui implique normalement des moteurs sur toute la ligne. Compte-tenu des vitesses annoncées, si une 1<sup>ère</sup> capsule a sa vitesse réduite pour une raison

donnée, comment gérer la vitesse de la capsule qui suit à la vitesse théorique ? Comment gérer aussi les vitesses aux extrémités en mode normal ?

De plus, la présence du moteur linéaire sur 1% de la longueur interdit toute remise en service après un arrêt intempestif ou de sécurité.

La sécurité de l'infrastructure (tubes sous vide) dans de grands espaces est à valider, attentats..., une re-pressurisation rapide du tunnel serait une cause mortelle pour tous les passagers dans le tunnel (échauffement des cabines freinées par la pression de l'air dans le tunnel).

Il faut noter que les sujets relatifs à la maîtrise des actes de malveillance et leurs conséquences potentielles devront faire partie de l'analyse des risques, comme pour tous transports terrestres.

## 2.4 Confort des passagers

### Quel sera le niveau de bruit dans l'habitacle et les solutions anti-bruit ?

Les systèmes de sustentation par coussin d'air ont été abandonnés en raison entre autres, du bruit généré (aérotrain et aéroglisseurs).

Dans le système décrit, les ondes générées par les mini-obstacles (joints, irrégularités...) ajouteront leurs effets au bruit généré par la sustentation par coussin d'air. La capsule étant légère, la pression acoustique sera importante et nécessitera une isolation phonique qui augmentera alors la masse, le diamètre du tunnel... donc le coût.

## Quel sera l'impact d'une accélération de 1g sur les passagers ? Quelle acceptabilité ?

Les passagers d'un avion ne subissent jamais une telle accélération. En cas de freinage d'urgence, les passagers du métro de la ligne 1 à Paris subissent une accélération de 0.25g, ce qui est acceptable. Dans la configuration d'Hyperloop, les passagers sont en position semi-inclinée, ce qui est pire qu'en étant assis au niveau du ressenti. Il vaut mieux avoir l'accélération de face. Le passager pourrait perdre connaissance. L'attache des passagers par les sangles n'y changera rien.

## 3 Les précisions techniques demandées par l'OPECST à l'Académie des technologies

Existe-il une seule technologie, ou bien des technologies différenciées (suivant les projets de SpaceX, Transpod, et les quelques autres qui se développent dans le monde) avec quels avantages/inconvénients respectifs ?

Accessoirement l'OPECST se pose la question de la dénomination de cette/ces technologies : « hyperloop » est le mot inventé par Elon Musk en 2012 (une capsule [pod en anglais] dans un double tube à plus de 1 000 km/h), il figure dans la dénomination commerciale de deux sociétés, « Hyperloop One » et « Hyperloop Transportation Technology » ; peut-on utiliser « train à sustentation magnétique » (maglev en anglais) comme dénomination commune ? La technologie à coussin d'air (cf. l'« aérotrain » dont on voit encore les rails près d'Orléans) est-elle totalement abandonnée ?

## Réponses

Le document alpha ne parle que de sustentation par coussin d'air et de moteur linéaire pour la propulsion des véhicules.

Le moteur linéaire permet de se libérer de l'adhérence, qu'elle soit roue/rail, donc faible ou pneu, piste dont l'adhérence est bien meilleure, mais dont la capacité de charge et de vitesse sont limitées. Un exemple d'utilisation du moteur linéaire peut être observé sur le métro de Vancouver où cette solution, très coûteuse, a été adoptée par GEC ALSTHOM compte tenu des fortes déclivités à franchir. Compte tenu de son coût, cette solution n'est que très peu utilisée.

La sustentation magnétique a été développée dans les années 1980/90 par Siemens et Thyssen pour le Transrapid, et par le pool japonais pour le MAGLEV. Aucun de ces développements n'a donné lieu à des réalisations commerciales satisfaisantes. A l'origine, le MAGLEV comprenait une voie munie de spires alimentées, et des véhicules dotés d'un générateur de champ magnétique. Pour réduire la masse des conducteurs de cuivre nécessaires à la création du champ magnétique nécessaire, la solution de la supraconductivité a été retenue, ce qui conduisait à embarquer à bord des spires dans l'hélium liquide, et ces structures étaient isolées de la température extérieure par une circulation d'azote liquide.

L'aérotrain n'a pas connu de suites à notre connaissance, compte tenu de la difficulté de la pénétration en ville et même en zone urbanisée, son infrastructure n'est pas compatible avec les autres modes de transport d'une part, et d'autre part, le bruit généré tant par le propulseur que par

la sustentation par coussin d'air étaient totalement insupportables par les riverains, dans un rayon de plusieurs centaines de mètres.

La solution décrite dans le document alpha présente la caractéristique de conserver le handicap du niveau de bruit émis par les coussins d'air, dont l'effet ne sera plus transmis dans l'environnement, mais qui sera confiné dans le tunnel, avec quelles conséquences pour les passagers ?, et celui du moteur linéaire qui génère un coût d'infrastructure très élevé. Nous avons vu par ailleurs, qu'il est nécessaire de déployer ce dispositif tout au long du parcours.

On peut s'interroger sur la puissance à installer sur tout le parcours : une solution qui réduirait quelque peu le surcoût serait d'installer des spires sur 20% de la ligne pour la propulsion, par petits tronçons, et sur les 80% restant des spires pour la régulation.

## 4 Le point de vue de l'Académie sur les chances de succès d'un tel projet

### Le projet et ses technologies

Il y a des facteurs de succès tels que l'impact sur l'environnement et la faible consommation d'énergie promise si la circulation sous vide poussé est validée ainsi que la vitesse. Restent la difficulté d'accès aux centres-villes ou centres d'échange modal, les aspects sécurité et les contraintes d'exploitation, ainsi que l'intérêt du public pour un mode de transport qui s'apparente plus à un manège à sensations fortes.

Des variantes se dessinent qui paraissent avoir quelques chances de se réaliser dans un futur à moyen terme :

- en considérant des vitesses de propulsion moindres (600-700 km/h) sous un vide moins poussé (100 mbar au lieu des 1 mbar dans le projet) et un système roue - rail. Cela ne résout cependant pas la gestion des extrémités (que Swissmetro n'avait pas résolue : aiguillages, vaste volume sous vide pour accepter plusieurs trains ou navettes...)
- en développant dans ce cadre les deux variantes de sustentation des capsules : 1/ la sustentation magnétique, que les japonais de JR Central semblent maintenant maîtriser, après plus de 30 années de développement mais certaines sources indiquent que l'infrastructure dont la construction devrait débuter cette année reste compatible avec un retour à une solution roue/rail et 2/ la roue qui a déjà atteint en essais ces niveaux de vitesse (roue/rail ou pneumatique).

Certaines des difficultés évoquées seront peut-être levées grâce à des avancées technologiques qui émergeront des programmes de recherche en cours sur Hyperloop. Par exemple, les matériaux en développement relèveront probablement les défis posés (ex. béton spécial développé par la *start-up* Boring company, à base de composite plastique, qui serait utilisable à 10 mbar).

On peut cependant se poser la question de l'intérêt de faire circuler ces véhicules dans le vide. Nous avons évoqué précédemment une variante du projet qui consisterait à diminuer la vitesse de propulsion des véhicules.

Or des vitesses à peine inférieures ont déjà été atteintes sur rail, sur de courtes distances, certes, car le tracé devait présenter les caractéristiques géométriques nécessaires à ces vitesses. L'intérêt réside-t-il dans une plus faible consommation d'énergie ? Peut-être ! Cela reste à chiffrer, mais c'est au prix d'une complication considérable de l'exploitation, d'un problème majeur de sécurité et d'une difficile pénétration dans les centres-villes. On touche là, au problème majeur d'Hyperloop : en passant d'un système à 600-700 km/h à l'air libre à un système à 1000 km/h dans le vide, on complexifie de façon importante l'infrastructure et l'exploitation (avec les conséquences financières correspondantes) ... pour gagner peu de temps en réalité porte à porte (cf. encart 2).

**Encart 2 - Les temps de parcours réels comparés entre différents modes de transport de porte à porte**

**Roue - rail ou sustentation magnétique**

- Temps d'accès de l'origine du voyage à la station de départ et inversement : 1/2h x 2
- Temps de passage en gare : 10 min x 2
- Temps de trajet pour 1000 km roue/rail ou sustentation magnétique, en surface à 400 km/h : 2h40

**Hyperloop**

- Temps de passage en gare : 10 min x 2
- Trajet à destination : 1h x 2, les temps de trajet origine/gare et gare / destination étant plus élevés pour le système qui ne peut pénétrer en centre-ville
- Temps de trajet pour 1000 km : 1h10

soit **roue/rail : 4h et Hyperloop : 3h30**

Le projet semble d'ailleurs s'orienter vers non plus des tubes posés sur des pylônes, dont nous avons vu les difficultés (rayons de courbure et de raccordement, dilatation, géométrie...), mais vers deux tunnels. D'autres difficultés apparaîtront alors, en particulier de sécurité, liée aux possibilités d'accès pour les secours dans un tunnel de dimensions réduites (Eurotunnel a opté pour la réalisation d'un troisième tunnel de service), mais aussi causées par les volumes de déblais (1), ce qui fera exploser les coûts. C'est l'approche qu'a pourtant choisi aujourd'hui E. Musk de construire un réseau de transport de personnes sous-terrain à grande vitesse, grâce à sa *start-up* Boring company, spécialisée dans la construction de tunnels. Des véhicules électriques dont le châssis, modifié, a été développé par sa société Tesla pour le SUV modèle X, transporteront 8 à 16 passagers à grande vitesse (200-240 km/h). Ce mode de transport est appelé *Loop*. L'utilisation du vide, de la sustentation par air sont donc abandonnés, ainsi que la très grande vitesse. Les tunnels construits pour ce système de transport Loop pourraient d'ailleurs, selon la *start-up* bénéficier au système Hyperloop. Elle a obtenu des permis d'excavation à New-York et à Washington pour relier les deux villes. Cela réglerait néanmoins la facilité d'accès aux centres-villes, un des facteurs de succès évoqués précédemment.

(1) Il faut cependant noter que creuser deux tunnels, voire trois pour des raisons de sécurité sur de telles distances génère des volumes de déblais considérables. Une des contraintes des tracés de Lignes ferroviaires à Grande Vitesse est de réutiliser pour la construction de la ligne les déblais.



Un tube de 3 mètres de diamètre sur la distance de Los Angeles à San Francisco représente environ 7 millions de m<sup>3</sup> foisonnés à évacuer, soit pour trois tubes, les 2/3 du trafic total annuel du port du Havre en matière de tonnage transporté.

## L'évolution constatée vers des projets à court terme

Il apparaît que les grands projets *high tech* ont peu de chance de voir le jour dans le contexte mondial actuel. Pour déboucher sur des innovations réellement mises sur le marché, l'effort considérable de recherche et de développement technologique doit être relayé par des investissements d'industrialisation et de production de l'ordre de 4 à 5 fois plus importants. Or, depuis la fin des années 90, l'investissement global n'a cessé de baisser dans les pays développés (de 25% du PIB en moyenne à 20% pour les pays développés), avec une rechute qui a suivi la crise de Lehman Brothers. Depuis, il y a une légère reprise, à un niveau qui reste toutefois très faible. Cela signifie qu'il y a bien un flux d'innovations, issus de la R&D, mais que ce sont surtout celles qui sont peu coûteuses à mettre en œuvre qui passent le cap du déploiement industriel. Ce contexte explique en partie le développement de très puissantes entreprises à spécialisation<sup>9</sup>.

## La sécurité

De plus, tout nouveau mode de transport nécessite une certification, obtenue après en avoir fait la démonstration sécuritaire. Ce processus est

très long et peut durer une dizaine d'années. Dans ces conditions, on peut penser que l'organisme de certification sera plutôt américain. La *start-up* canadienne Transpod l'a bien compris et semble prendre le problème de façon plus structurée et moins médiatique, puisqu'elle travaille sur la définition d'un cahier des charges de sécurité nécessaire à une certification avec les autorités canadiennes. Ceci définira les règles d'exploitation, et donc les technologies les plus appropriées.

## Les limites

Enfin, il y a des points de blocage qui demeurent infranchissables. Citons la capacité des passagers à supporter une accélération de 1g, les courbes de raccordement des pentes...

Il y a aussi la problématique de la mobilité des personnes à mobilité réduite. Les personnes les plus âgées représentent la part de la population qui augmente le plus en Europe, au Japon et en Chine. Leurs demandes en matière de transport portent sur une meilleure ergonomie, sur davantage d'accessibilité, de sécurité et de flexibilité. Des projets tels que Hyperloop, basés sur la performance, l'automatisation, la vitesse pourront-ils y répondre ? (réf. 5). Toutes les normes liées aux personnes à mobilité réduite, aux questions des feux et des fumées ...conduisent à augmenter significativement le coût des projets et à modifier leur *design* initial.

---

<sup>9</sup> [Les nouvelles stratégies d'innovation 2018-2020](#) ; vision prospective 2030, Club de Paris des directeurs de l'innovation, Marc GIGET, 2018

## Le contexte économique et la concurrence

Les liaisons inter-villes qui peuvent relever d'une liaison rapide au sol sont d'un nombre limité dans le monde : distance permettant un temps de parcours inférieur à 2 heures, pour concurrencer l'aérien (expériences mesurées sur la Grande Vitesse Ferroviaire), population importante dans chacune des zones desservies (plusieurs millions d'habitants) pour permettre un trafic dense nécessaire pour rentabiliser les coûts d'investissement, et un relief qui permette de limiter ces coûts d'infrastructure.

Bon nombre de ces liaisons sont déjà équipées et exploitées, avec des niveaux de rentabilité faibles, et ce en Europe, au Japon et en Chine.

Un système sous vide et en tunnel, dont le coût d'infrastructure sera très élevé (toute évaluation ne prenant pas en compte les aspects sécurité est grossièrement fautive), aura un nombre de corridors d'implantation limité, d'autant que la réalisation d'un tel système ne peut être envisagée qu'à moyen terme, les modes concurrents se déploieront pendant cette période.

## L'open source

Ce qualificatif ne semble pas pouvoir être employé dans ce cas. Nous n'avons pas pu accéder à une information précise car les contrats signés comprennent une clause de confidentialité qui empêche le signataire de communiquer à des tiers toutes informations contenues et développées dans le cadre du contrat.

Il apparaît cependant que la propriété intellectuelle (P.I.) serait transférée à la ou aux sociétés d'E. Musk, qui pourra en disposer librement. Ceci est à

vérifier. On lit aussi sur ce thème que les *start-up* déposent actuellement les brevets en leur nom pour fonder leur activité économique future.

Dans certains cas, le signataire a pu se réserver cette P.I., bien qu'une licence gratuite et totale soit accordée.

## Conclusion

C'est un projet de recherche très intéressant pour les universitaires, mais les recherches et le concours organisé par SpaceX en juillet 2018 portent actuellement sur la partie courante du système (« pod » dans une section de tunnel) et n'adressent que la partie la plus facile à traiter.

Il s'agirait de cibler les efforts de R&D sur une technologie qui, bien que développée pour Hyperloop, sera applicable dans un autre domaine d'activité pour le faire évoluer. E. Musk a peut-être développé cette stratégie afin d'obtenir gratuitement des technologies applicables aux voyages sur Mars). Il est également possible que cette stratégie soit destinée à être un leurre technologique.

On constate que les grands projets *high tech* ont peu de chance de voir le jour. Leur dimension internationale rend difficile leur lancement. Ils sont très coûteux et leur aboutissement incertain. Les programmes moins coûteux, dont les résultats peuvent être industrialisés rapidement (TRL élevés) sont privilégiés à l'heure actuelle.

Il nous paraît peu probable de voir une application à court/moyen terme, compte tenu de tous les défis technologiques à traiter simultanément et conjointement (l'un échoue et tout le projet échoue). L'exemple du

MAGLEV Japonais montre que la mise au point d'un nouveau système de transport nécessite de nombreuses années.

Il est impossible de faire une étude économique et prospective représentative de projets concrets (sur un corridor) car les coûts réels ne pourront être estimés qu'après des études de sécurité sérieuses, et la certitude que des solutions fiables seront apportées aux verrous technologiques recensés. Cependant, des études estimatives faites à partir de coûts connus pour ce type d'infrastructure par le LAET<sup>10</sup> montrent que les prix de billets annoncés dans le document alpha sont notoirement sous évalués.

Compte tenu de la multiplication des initiatives dans le domaine du transport sous vide, il s'agirait de choisir le groupe qui offre les meilleures chances d'aboutir par une approche structurée et systémique, qui n'accapare pas les développements technologiques de pointe à son seul profit, et qui crée une véritable communauté, ce qui n'est pas nécessairement celui qui communique le plus.

La documentation disponible évacue soigneusement les coûts de conception et de certification du système Hyperloop. Toute entreprise qui voudrait aller au bout de la conception de son système devra mobiliser des sommes très importantes qui pèseront sur les investissements préalables en particulier dans la phase d'innovation.

Les risques technologiques sont élevés, car de nombreuses avancées sont nécessaires, avancées qui ne pourront être faites simultanément en

quelques années ; système complexe, dont le coût sera très élevé et la fiabilité faible ; service offert ne correspondant que très partiellement au besoin, réduction de temps de parcours faible, capacité de transport très limitée face à ses concurrents déjà en exploitation et qui équipent déjà les liaisons les plus rentables. Ce projet cumule les handicaps. Nous encourageons à ne pas suivre ni investir dans des études de faisabilité.

Reste à savoir si de nouvelles solutions technologiques qui pourraient voir le jour dans ce foisonnement d'idées et cette émulation de jeunes talents, pourront être utiles dans d'autres domaines. Ce sera très probablement le cas. Les exemples de l'aérotrain de Bertin et du Transrapid illustrent bien ces propos, car ils ont incité la SNCF à se lancer dans l'aventure TGV.

Un suivi dans cette perspective paraît donc souhaitable.

L'accord du 14 juin dernier pour réaliser le Chicago express Loop illustre bien nos réserves, car l'abandon du vide, des coussins d'air et de la très grande vitesse permet de proposer un projet réalisable à moyen terme. Ceci n'est donc pas une première réalisation prototype d'Hyperloop.

---

<sup>10</sup> Laboratoire d'Aménagement et d'Economie des Transports, Lyon

## Liste des experts externes consultés

Mario PAOLONE, professeur au Laboratoire “Distributed Electrical System Laboratory, **EPFL**. Equipe sélectionnée pour participer à *Hyperloop Pods* en juillet 2018

Michele MOSSI, CEO de la société **GESTE**, *spin-off* de **SWISSMETRO**

Marc GRANGER, Chief Strategy Officer et Bruno MARGUET, Head of Siemens Alstom Project, **ALSTOM TRANSPORT**

Florent LAROCHE, Maître de Conférence à l'Université Lyon 2, et rattaché au **LAET** (Laboratoire d'Aménagement et d'Economie des Transports), Lyon

Emmanuel LAURANS, Chef de la Division Interaction Véhicule/Voie, **SNCF RÉSEAU**, DIRECTION INGÉNIERIE & PROJETS, DÉPARTEMENT Lignes Voie Environnement (LVE)

Stéphane TARTEAUT, Directeur Transport, **JITEX Paris**, société française de conseil et d'assistance opérationnelle et Hugues CHATAING, consultant chez **JITEX Tokyo**

## Membres de l'Académie des technologies consultés

Marc GIGET, Président fondateur du **CLUB DE PARIS DES DIRECTEURS DE L'INNOVATION**

Gérard GRUNBLATT, ancien responsable des activités supraconductivité, **ALSTOM**

Denis LE BIHAN, Directeur de **NEUROSPIN** CEA/DSV/I2BM

Michel LAROCHE, ancien directeur général adjoint Recherche et Technologie, **SAFRAN**

Alain POUYAT, Président **DIGINOTECH**

Jean-Claude RAOUL, ancien conseiller technique de la **FÉDÉRATION DES INDUSTRIES FERROVIAIRES**, ancien membre du Conseil d'administration de **SWISSMETRO** et ancien directeur de l'AEIF, qui est devenue l'Agence européenne du ferroviaire

Yves RAMETTE, Président de l'IRT **RAILENIUM**, conseiller du président **SNCF RESEAU**

Erich SPITZ, Conseiller **THALES**

Bernard TARDIEU, Président d'honneur **COYNE et BELLIER**

Jean-Paul TEYSSANDIER, ancien directeur de **VINCI CONCESSIONS**

Alain THAUVETTE, Directeur régional **TER SNCF Auvergne-Rhône-Alpes**

**Comité des travaux et Bureau**