

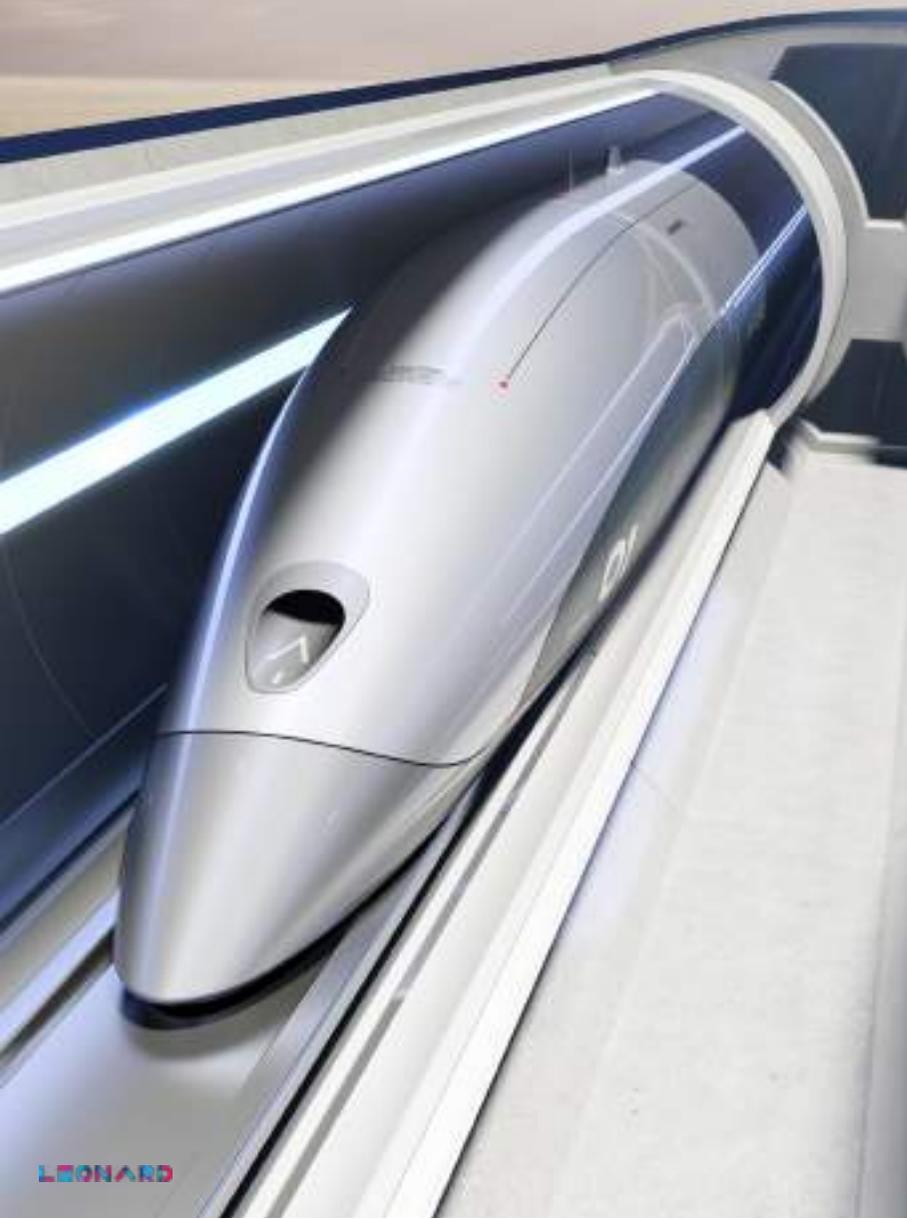


LEONARD

HYPERLOOP

Les défis du transport
terrestre hyper rapide

ensemble @ **VINCI** 



➤ AVANT PROPOS

Elon Musk a lancé en 2013 le concept **Hyperloop**, un moyen de transport terrestre à très grande vitesse par tube. Des universitaires et ingénieurs du monde entier ont emboîté le pas de l'entrepreneur et entrepris de développer leurs propres projets de transport par tube.

Le foisonnement d'efforts de R&D et d'investissements réalisés au profit de nouveaux systèmes de transport guidés hyperrapides fondés sur **Hyperloop Alpha** a conduit **Leonard, la plate-forme de prospective et d'innovation de VINCI**, à préparer cette nouvelle étude Emerging Trends, qui passe en revue et met au débat les opportunités et les défis de ce mode de transport de nouvelle génération.

Les systèmes non conventionnels à faible vitesse (MGV, navettes et métros à sustentation magnétique) ou les moins aboutis (Skyway) ont été volontairement exclus de cette étude.

Paris, juin 2021

I.	Futuriste... et déjà centenaire !	4	IV.	Relever les défis	76
	· Magnétiquement vôtre	6		· Un contexte défavorable	77
	· Avec ou sans air ?	15		· La topographie, un facteur de surcoût	81
	· Swisstrom, un Hyperloop dès 1992	20		· Indispensable maîtrise technique	86
	· Elon Musk	26		· La sécurité détermine la réglementation	96
	· Quels défis relever pour tenir sa promesse ?	29		· Pertinence économique et énergétique	101
				· Un Hyperloop pour le fret ?	108
II.	Concept Hyperloop Alpha	32	V.	Quel avenir pour Hyperloop ?	111
III.	Concrétiser Hyperloop	42			
	· Virgin Hyperloop	49			
	· TransPod	53			
	· Hyperloop Transportation Technologies (HTT)	58			
	· Hardt Hyperloop	62			
	· Zeleros	66			
	· Nevomo	72			

HYPERLOOP

UN MODE DE TRANSPORT FUTURISTE... ET DÉJÀ CENTENAIRE !

Ou comment mettre sous vide une idée
qui était déjà dans l'air depuis plus d'un siècle

➤ QU'EST-CE QUE L'HYPERLOOP ?

Les frottements s'opposent à la vitesse. Pour aller vite, il est souhaitable de réduire, voire de **supprimer les frottements**. Dans ce but, le véhicule, appelé **capsule** ou **pod**, se déplace **dans un tube où la pression de l'air a été réduite**.

À l'extrême, il est souhaitable d'y faire le vide afin d'éliminer les problèmes de compression devant le véhicule. L'idée germe depuis le XIX^e siècle, mais elle s'est jusqu'à maintenant heurtée au niveau de maturité technologique et aux investissements nécessaires.

En 2013, **Elon Musk** associe son nom à un tel système de transport et l'appelle **Hyperloop Alpha**. Il relance ainsi l'idée et annonce que le système permettra d'effectuer le trajet Los Angeles–San Francisco (550 km) en 30 minutes pour un coût prévisionnel de 5,1 milliards d'euros. Bien que créateur de SpaceX, Elon Musk a choisi de ne pas développer lui-même Hyperloop.





Hyperloop

Un mode de transport futuriste... et déjà centenaire !

MAGNÉTIQUEMENT VÔTRE

Depuis plus d'un siècle, des recherches sont menées pour réaliser un mode de transport entraîné, sans contact, par un champ magnétique.





**EN 1914, ÉMILE BACHELET CONSTRUISAIT LE DÉMONSTRATEUR
DU PREMIER « TRAIN À SUSTENTATION MAGNÉTIQUE ».
DÈS LORS, LE RÊVE DES 1 000 KM/H N'A PLUS QUITTÉ LES INGÉNIEURS.**

➤ LA SUSTENTATION MAGNÉTIQUE, ENCORE À L'ÉTAT DE CURIOSITÉ



50 ans d'expérimentation

Premiers prototypes en 1970 en Allemagne (Transrapid 01), et en 1972 au Japon (Maglev ML100).



6 lignes, 77 km au total

6 lignes à sustentation magnétique en service commercial. Toutes ne sont pas destinées à la grande vitesse.



603 km/h

En 2015, un Maglev japonais série L0 atteint 603 km/h. C'est 4,4 % plus rapide que le TGV français.



LE TRANSRAPID ALLEMAND TOMBÉ DANS L'ESCARCELLE CHINOISE

En 1979, le Transrapid 05 est le premier train à sustentation magnétique à accueillir des passagers. Son projet de ligne Berlin-Hambourg a toutefois été abandonné en raison de son **coût prohibitif**. Sa seule ligne actuellement en service est la navette entre Shanghai et l'aéroport de Pudong (30 km), où le Transrapid a atteint 501 km/h (431 km/h en service normal).

Inaugurée en 2002, cette réalisation allemande en Chine a permis à l'industrie chinoise de **s'approprier sa technologie**. Celle-ci est aujourd'hui abandonnée par Siemens et ThyssenKrupp.

L'exploitation du Transrapid en navette aéroportuaire à Shanghai est constamment déficitaire. Son taux de remplissage moyen serait d'environ 20 %. Cela s'explique en partie par le relatif manque de commodité de la ligne qui n'arrive pas en centre-ville.



➤ LE MAGLEV POUR ALLER **DEUX FOIS PLUS VITE** QUE LE FERROVIAIRE

Les Maglev japonais (JR-Maglev alias SCMaglev) emploient une technique à supraconducteurs. Les forces qui soulèvent le véhicule sont aussi celles qui le font avancer et le maintiennent centré sur sa voie. Il a été décidé en 2009 de construire une ligne Maglev entre **Tokyo et Nagoya**, distantes de 258 km, afin de les relier en 40 minutes, deux fois plus vite qu'avec le train à grande vitesse déjà en service. Cette ligne de 286 km comprend 256,6 km de tunnels et 11,3 km de viaducs. Sa réalisation est estimée à 55 milliards de dollars. Elle sera exploitée par des rames composées de 16 caisses (1 000 passagers) et son ouverture est annoncée pour 2027. À l'horizon 2045, elle pourrait être prolongée jusqu'à Osaka, à 403 km de Tokyo.



➤ EMS OU EDS ? UN CHOIX TECHNOLOGIQUE DÉCISIF

Transrapid

Le Transrapid de Shanghai utilise la **sustentation électromagnétique** (EMS). Pour soulever le train, des matériaux magnétiques passifs sont disposés sous la voie, tandis que des électroaimants sont fixés au train sous la voie et orientés vers le haut. C'est pourquoi le véhicule enveloppe les côtés de la voie. Contrairement aux systèmes électrodynamiques, celui-ci fonctionne à toute vitesse et n'a pas besoin de « train d'atterrissage » à basse vitesse, facilitant l'aménagement des voies.

JR-Maglev (SCMaglev)

Le JR-Maglev utilise la **sustentation électrodynamique** (EDS). Des aimants (permanents ou supraconducteurs) placés dans le véhicule créent à leur passage des courants induits dans des bobines insérées dans les parois de la voie. Il en résulte des champs électromagnétiques qui interagissent avec les champs magnétiques du train pour le faire léviter et avancer. L'avantage de la supraconductivité est de permettre des champs magnétiques plus forts,

et des distances train/voie plus grandes, nécessaires aux vitesses très élevées. Son inconvénient principal, outre son coût initial et en opérations (les aimants supraconducteurs doivent être refroidis à très basse température), est le risque sanitaire lié à l'exposition potentielle des passagers aux champs magnétiques. Le système n'assure pas la sustentation à faible vitesse. Des roues sont donc nécessaires à vitesse réduite.



➤ CRRIC SE LANCE DANS LA COURSE

China Railway Rolling Stock Corporation (CRRIC) est une entreprise d'État chinoise qui est devenue le plus grand constructeur mondial de matériel ferroviaire.

En 2016, elle annonçait son intention de réaliser un train à sustentation magnétique capable de dépasser 600 km/h, vitesse qui avait alors déjà été atteinte par le Maglev japonais. La maquette à l'échelle 1 du nouveau train a été présentée en 2019.

Distantes de 1 300 km, Shanghai et Pékin sont déjà reliées par une ligne ferroviaire à grande vitesse. La sustentation magnétique doit permettre de réduire le temps de parcours entre les deux villes de 4 à 2 heures.

➤ AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA SUSTENTATION MAGNÉTIQUE

- + **Vitesse** de pointe et de croisière plus élevées que celles d'un TGV
- + **Risque** de déraillement théoriquement nul
- + **Pollution sonore** réduite
- + **Coût** des voies de pleine ligne nettement plus élevé que pour une LGV
- + Problèmes de **compatibilité électromagnétique** avec d'autres appareils électroniques à proximité
- + Question des effets éventuels des **champs électromagnétiques** sur la santé des usagers
- + Incompatibilité de la sustentation magnétique avec le transport de **marchandises** lourdes
- + Consommation **énergétique** deux fois plus élevée qu'une LGV
- + **Incompatibilité** avec le réseau ferroviaire traditionnel

➤ LA SUSTENTATION MAGNÉTIQUE À L'AIR LIBRE A UN AVENIR

L'annonce d'Hyperloop est restée sans effet sur les grands projets de sustentation magnétique à l'air libre lancés avant et après cette annonce.

Résultat d'une recherche et d'essais menés depuis un demi-siècle, la sustentation magnétique à l'air libre se montre capable d'atteindre 600 km/h. Cette vitesse est déterminée par les effets aérodynamiques et est proche de la vitesse maximale possible pour un avion de ligne à basse altitude.

Entre Pékin et Shanghai, ou sur l'axe Tokyo-Nagoya-Kyoto, les lignes nouvelles à sustentation magnétique doivent diviser par deux les temps de parcours par rapport aux lignes ferroviaires à grande vitesse déjà en service.

La circulation dans un tube en dépression réduit les contraintes aérodynamiques, mais elle ajoute celles liées au vide complet ou partiel. Elles sont nombreuses et complexes. Seul le [secteur spatial](#) y est déjà habitué.





Hyperloop

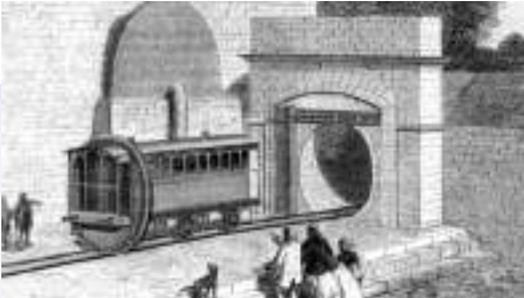
Un mode de transport futuriste... et déjà centenaire !

AVEC OU SANS AIR ?

L'air ambiant oppose, par nature, une résistance au mouvement, mais certaines technologies tentent de retourner ce phénomène à leur avantage, en s'en servant comme d'un coussin qui éliminerait les frottements en l'isolant de son système de guidage. Depuis les systèmes à dépression « vac-trains » (de « vacuum », « vide » en anglais) jusqu'à l'Aérotrain, Hyperloop Alpha intègre des idées déjà explorées.



➤ HYPERLOOP EST L'HÉRITIER DES « VACTRAINS » QUI EXPLOITENT LA DÉPRESSION DANS UN TUBE



L'idée de faire avancer un véhicule par dépression dans un tube apparaît au XIX^e siècle.



Envisagé pour relier les côtes américaines, ce projet prétendait être plus rapide que l'avion.



Les projets Hyperloop se présentent dans un tube transparent dont le coût pénaliserait le projet.



La sustentation et la propulsion de la capsule peuvent se contenter des seuls systèmes magnétiques.



Sans turbine frontale, ni vide, il serait nécessaire que la section du tube soit très supérieure à celle du véhicule.



À condition de s'approcher du vide dans le tube, les projets les plus ambitieux annoncent 4 000 km/h.



➤ **SIMPLE ET EFFICACE** **LA SUSTENTATION PAR COUSSIN D'AIR**

Testée dès 1965

L'**Aérotrain** de Jean Bertin est guidé par un rail en T inversé. Il s'en décolle à l'aide d'un coussin d'air et est propulsé par un moteur et une hélice d'avion.

430 km/h

Équipé d'un réacteur, l'Aérotrain I80 atteint 430 km/h en 1974.

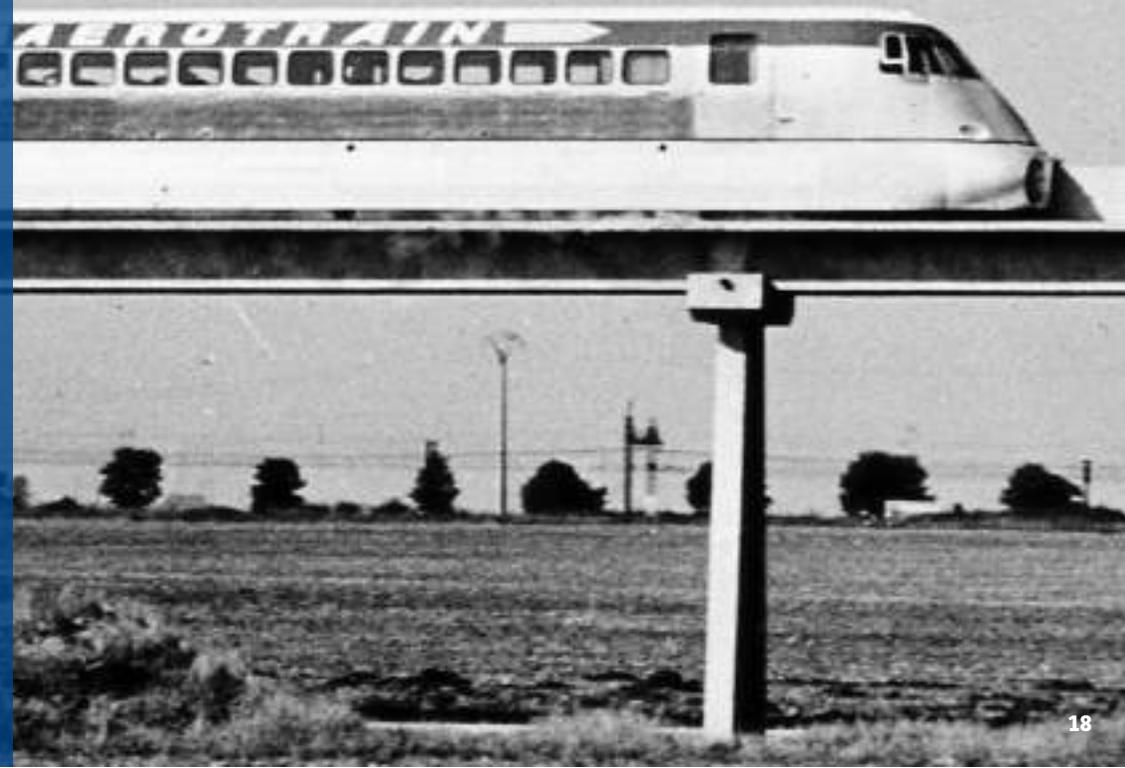
L'intérêt du coussin d'air

Le coussin d'air supprime les frottements et permet à un véhicule de **glisser** sur une surface. Cela fonctionne sur l'eau (Hovercraft, Naviplane), sur terre (Terraplane) et en transport guidé (Aérotrain).

Alternative à la sustentation magnétique

Dans un tube où le vide est « partiel », l'air résiduel permettrait, selon Elon Musk, de créer un coussin d'air sous le véhicule. Cette formule est beaucoup plus **économique** que la sustentation magnétique.

Très rapide,
mais incompatible
avec le réseau ferré,
l'Aérotrain est
abandonné en 1974
au profit du TGV
électrique après
le premier choc
pétrolier.





Né en France en 2016, le projet **Spacetrain** reprend le coussin d'air et le rail en T inversé de l'Aérotrain, auxquels il ajoute des moteurs linéaires à induction pour atteindre 540 km/h.



Hyperloop

Un mode de transport futuriste... et déjà centenaire !

SWISSMETRO, UN HYPERLOOP DÈS 1992

Proche du concept Hyperloop actuel, le projet SwissMetro a été imaginé au début des années 1990 et finalement jugé non réalisable dans un avenir prévisible.



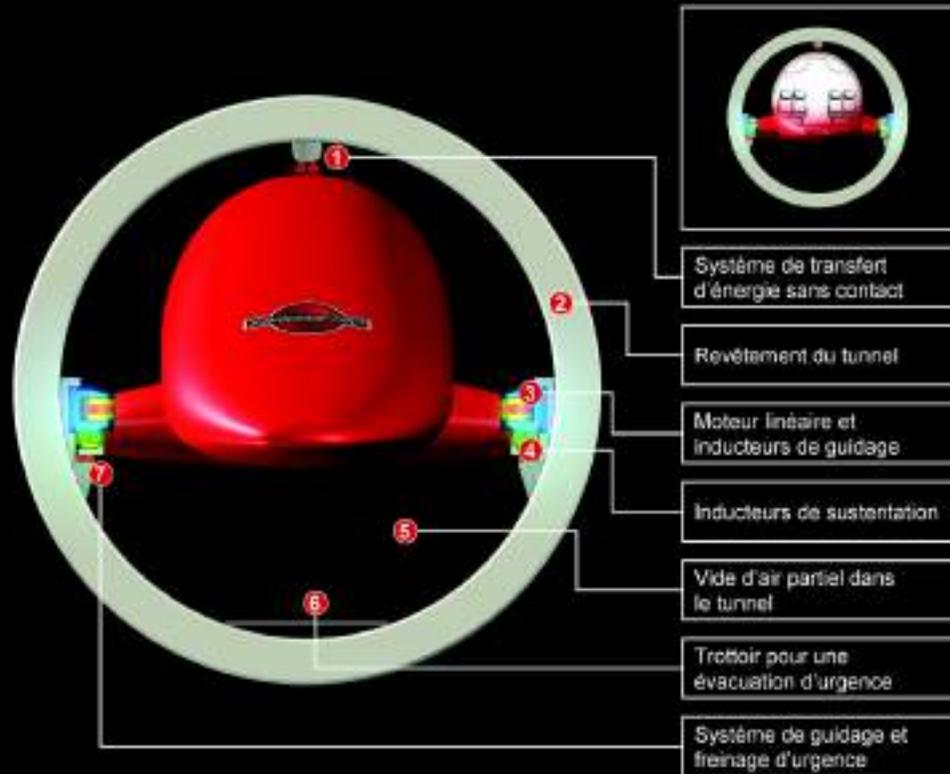


**VINGT ANS AVANT HYPERLOOP,
SES PRINCIPES ÉTAIENT ENVISAGÉS PAR SWISSMETRO**

➤ AVEC SWISSMETRO, LA SUISSE DEVIENT UN VILLAGE

Au début des années 1970, Rodolphe Nieth lance le projet **SwissMetro**. Appuyé sur le plan scientifique par l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), l'étude préliminaire est financée par la Confédération helvétique ainsi que par des entreprises privées. Elle est achevée en mars 1993. Dès 1992, la société Swissmetro SA est fondée et réunit les moyens financiers nécessaires à l'étude principale.



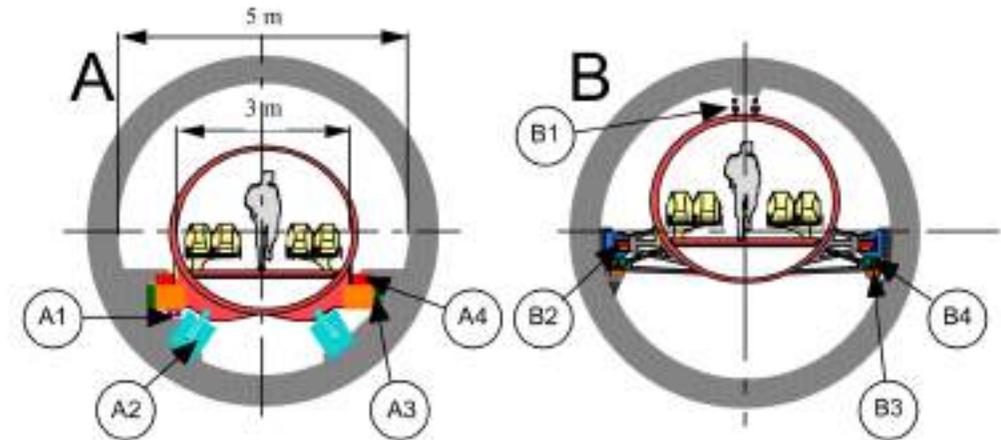


SwissMetro

20 ans d'études

➤ SWISSMETRO TECHNIQUE ET EXPLOITATION

- 500 km/h dans un tube où la pression est abaissée à celle que rencontre le Concorde à 18 000 m d'altitude.
- 600 km/h possibles selon simulation.
- Installation en **souterrain**, avec des stations placées sous les gares des réseaux ferroviaires.
- Attractivité** qui doit inciter au report modal au détriment de la voiture particulière.
- Exploitation innovante avec desserte cadencée assurant un **temps fixe de parcours interstation** (12 minutes) indépendant de la distance entre celles-ci (48 à 130 km). Cela impose une forte variation de la vitesse maximale entre ces tronçons.
- Véhicule de 80 m pesant 50 tonnes pour 208 places assises, ou bien 130 mètres, 85 tonnes et 416 places.



coupes schématisées de deux variantes du tunnel avec véhicules

Variante A (moteur dans le tunnel)		Variante B (moteur embarqué)	
A1 =	Transmission d'énergie par induction	B1 =	Transmission d'énergie par induction
A2 =	Moteurs linéaires fixés au tunnel	B2 =	Moteurs linéaires embarqués
A3 =	Inducteur de guidage	B3 =	Inducteur de guidage
A4 =	Inducteur de sustentation	B4 =	Inducteur de sustentation

SwissMetro déclaré irréalizable dans un délai prévisible

En novembre 2009, le conseil d'administration de SwissMetro SA conclut que le projet de train souterrain à sustentation magnétique n'est pas faisable dans un délai prévisible. À l'époque, Pierre Triponez, président de SwissMetro SA, déclare :

« *Nous ne serions pas loin de la réalisation de SwissMetro si un investisseur se lançait. Or, jusqu'ici, les autorités politiques ont attendu un signe du secteur économique, et réciproquement. On ne peut pas parler de mort de SwissMetro, puisque le projet n'a pas vu le jour.* » Avec la dissolution de SwissMetro SA, les droits sur le projet ont été transférés à l'EPFL qui travaille maintenant sur Hyperloop. SwissMetro n'a suscité que 11 millions de francs suisses d'investissement pour ses études, dont la moitié payée par la Confédération helvétique.

L'association Pro SwissMetro ne partage pas l'analyse du conseil d'administration et considère que le projet peut être concrétisé à moyen terme.



Hyperloop

Un mode de transport futuriste... et déjà centenaire !

ELON MUSK

L'entrepreneur devient mentor quand il s'agit d'Hyperloop.



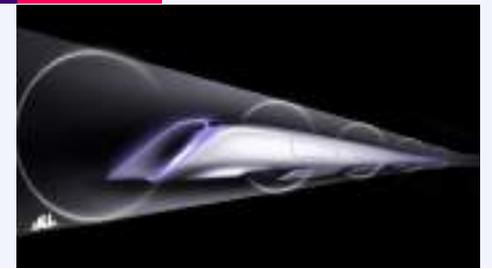
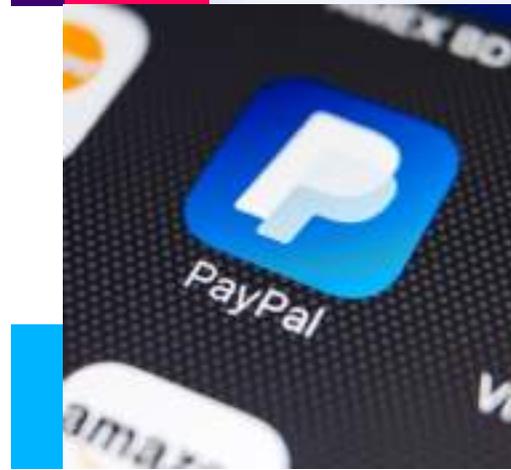
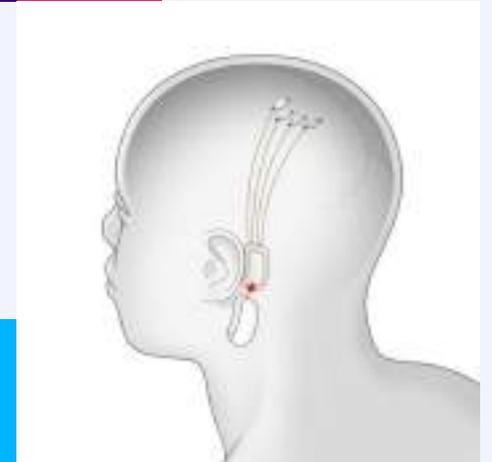
➤ ELON MUSK

Entrepreneur en série

Elon Musk est un chef d'entreprise né en 1971 en Afrique du Sud et naturalisé américain en 2002. Souvent présenté comme créateur de [Paypal](#) et de [Tesla](#), il a en réalité racheté et développé ces entreprises. En revanche, il est le créateur de [SpaceX](#) et de [Neuralink](#), entre autres entreprises aux ambitions disruptives. Elon Musk se laisse parfois aller à des propos visionnaires pour certains, irréalistes pour d'autres, comme ses tweets annonçant la création d'une colonie humaine sur Mars avec un million d'habitants d'ici 2050.

Initiateur de la dynamique Hyperloop

En août 2013, Elon Musk diffuse le *concept paper* [Hyperloop Alpha](#). Il y expose sa vision d'un transport entraîné par moteur linéaire dans un tube où une forte dépression est maintenue. L'entrepreneur organise des concours pour créer une émulation entre des entreprises volontaires pour développer Hyperloop. Pour autant, Elon Musk ne se lance pas dans la concrétisation d'Hyperloop. Malgré une étude incomplète, il a annoncé que ce système serait dix fois moins cher que la ligne ferroviaire à grande vitesse prévue entre Los Angeles et San Francisco.



Pourquoi Elon Musk n'a-t-il pas protégé Hyperloop ?

Le concept est difficile à protéger puisqu'il reprend le principe général de SwissMetro.

Pourquoi Elon Musk n'a-t-il pas investi dans Hyperloop ?

À ce jour, il semble plus sûr pour Elon Musk de se positionner sur le plan des idées que d'investir massivement dans une première ligne commerciale d'Hyperloop, au coût élevé et à la rentabilité encore incertaine.

Quelle est la stratégie Hyperloop d'Elon Musk ?

Il communique et agit en « prophète ». Si l'un des projets aboutit, Elon Musk laissera son nom dans l'histoire. Sa fortune étant faite, il laisse à d'autres les défis d'Hyperloop.



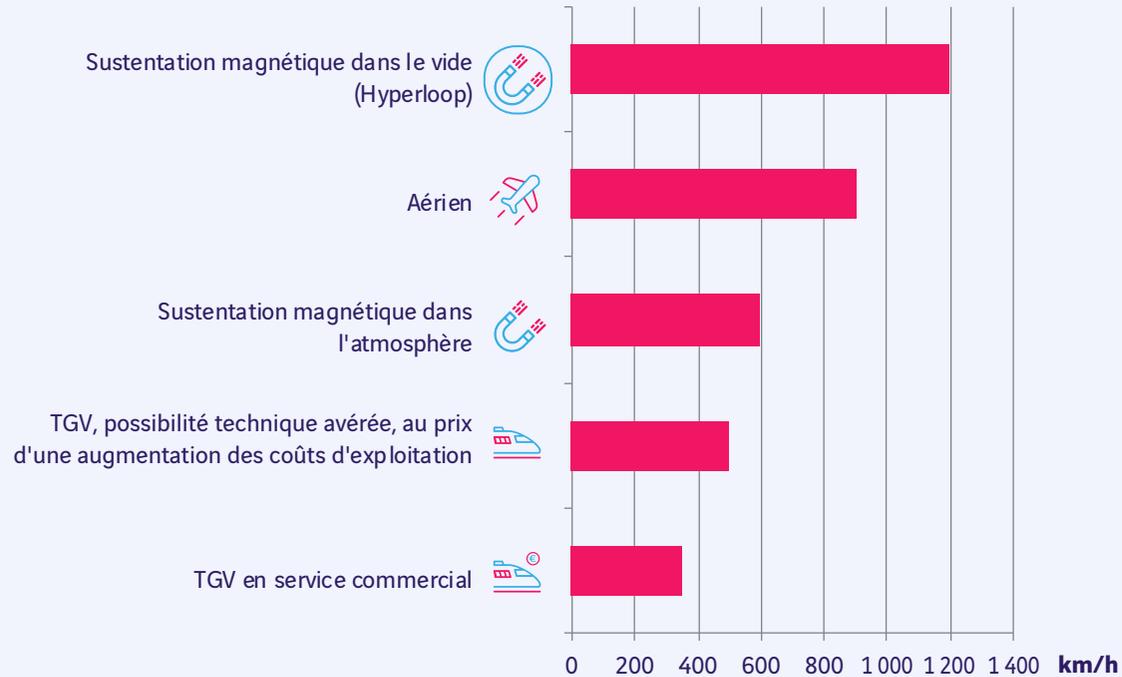
Hyperloop

Un mode de transport futuriste... et déjà centenaire !

QUELS DÉFIS RELEVER POUR TENIR SA PROMESSE ?

À défaut d'être compatible avec une infrastructure existante, Hyperloop promet la très grande vitesse, mais il reste de nombreux obstacles à surmonter.





Vitesse :
la promesse
d'Hyperloop

➤ HYPERLOOP : ATOUTS ET INCERTITUDES



Jusqu'à 1 100 km/h

Pour exploiter pleinement son potentiel, Hyperloop doit relier les centres-villes.



Transport décarboné en exploitation

En utilisant une électricité vraiment verte.



Interopérabilité

À ce jour, l'ensemble des acteurs ne travaille pas sur une technologie commune.



Coût d'infrastructure

Hypothétique, il dépendra en partie du relief à traverser.



Sécurité

Pas d'impossibilité, mais des coûts élevés pour l'assurer.



Contexte incertain

Futures crises sanitaires, tensions internationales.

HYPERLOOP

CONCEPT HYPERLOOP ALPHA

Un détonateur déclenché par Elon Musk

➤ L'INCITATION À ENTREPRENDRE D'ELON MUSK

Août 2013

Elon Musk, secondé par ses équipes de **Tesla** et de **SpaceX**, diffuse un document « concept paper »* de 57 pages.

Il y décrit un système de transport qui associe tube sous faible pression, motorisation par moteur linéaire et sustentation par coussin d'air, éventuellement remplacée par la sustentation magnétique.

Cette description est modérément détaillée, voire totalement elliptique sur certains points, mais elle se risque à annoncer des coûts d'établissement précis. Elon Musk la compare à **Linux**. Il l'apporte en « open source » à la communauté pour que chacun la développe.

* Le document de 2013 est disponible en ligne :
https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf

Tous les projets suscités par le document d'origine s'éloignent plus ou moins de la description originelle, mais ils reprennent tous le nom créé par Elon Musk : **Hyperloop**.

Aucun projet Hyperloop n'est financé ou géré par Elon Musk, mais aucun créateur de projet Hyperloop, aussi avancé soit-il, n'égale Elon Musk en notoriété. Bien que celui-ci se contente d'entretenir l'émulation entre les entrepreneurs lancés dans l'aventure, son nom est immanquablement associé à Hyperloop.

Tel qu'il est décrit par le document de 2013, le système est appelé **Hyperloop Alpha**. Sans détour, Elon Musk le place en concurrent économique et rapide à la ligne ferroviaire à grande vitesse prévue entre Los Angeles et San Francisco.

➤ IL EST TROP CHER DE FAIRE LE VIDE

La même pression qu'à 45 000 mètres d'altitude

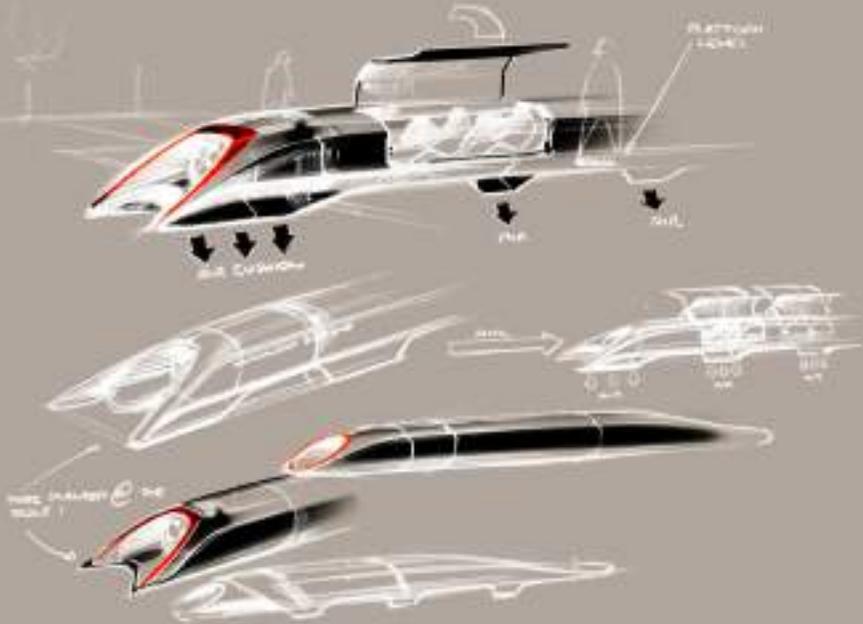
Un vide parfait étant difficile à créer et à entretenir dans un tube long de plusieurs centaines de kilomètres, Hyperloop Alpha opte pour une **très basse pression** plutôt que pour le vide. Réduite à 100 pascals, la pression dans les tubes est mille fois inférieure à la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer. Cela réduit d'autant la traînée aérodynamique.

Exploiter l'air résiduel

Quitte à garder de l'air dans le tube, Hyperloop Alpha l'exploite sous la forme d'un **coussin d'air** qui limite les frottements. À faible vitesse, il est créé par de l'air comprimé embarqué, et généré en régime de croisière par l'évacuation sous le véhicule de l'air soufflé par une turbine frontale.

Autrement, c'est plus cher

La **sustentation magnétique** est une alternative au coussin d'air imaginé pour Hyperloop Alpha, avec un fort impact sur les coûts.



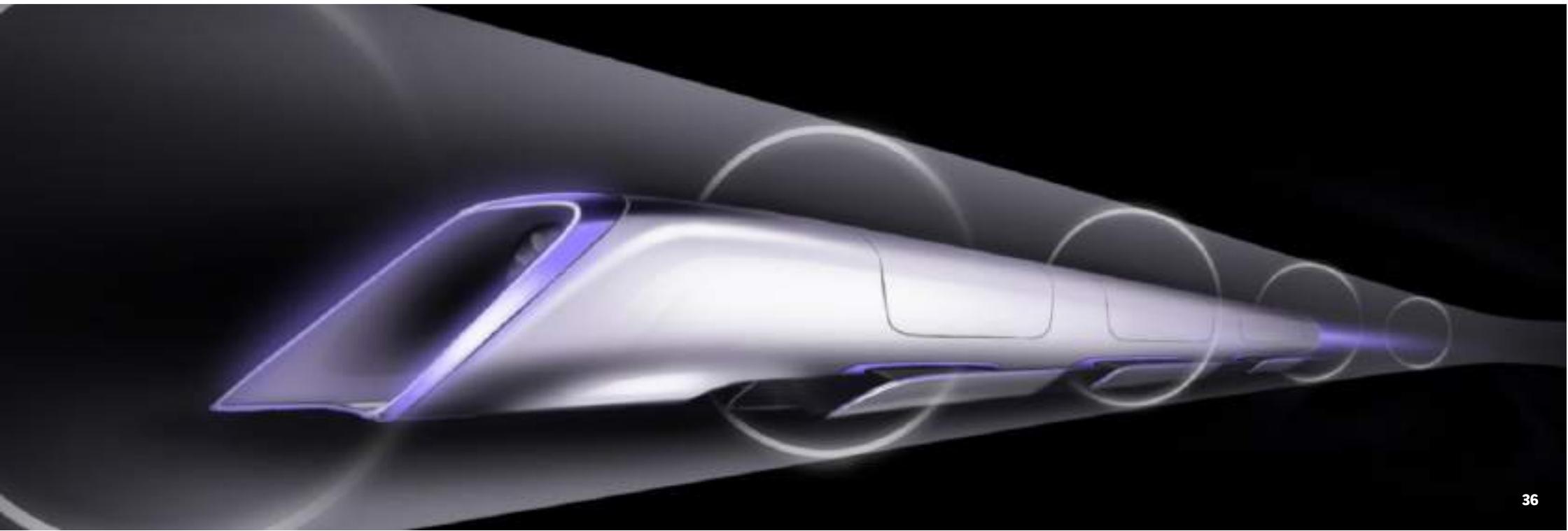
**DEUX TUBES PARALLÈLES, UN PAR SENS,
POSÉS SUR DES PYLÔNES ESPACÉS DE 30 MÈTRES
ET COUVERTS DE PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES.**

Hyperloop Alpha ventile la limite de Kantrowitz

Lors du déplacement rapide d'un véhicule dans un tube, la présence d'air, même sous basse pression, oblige à conserver un espace entre ce véhicule et les parois du tube selon un rapport déterminé par la limite de Kantrowitz.

Pour la repousser, Hyperloop Alpha équipe sa capsule d'une turbine à l'avant du véhicule.

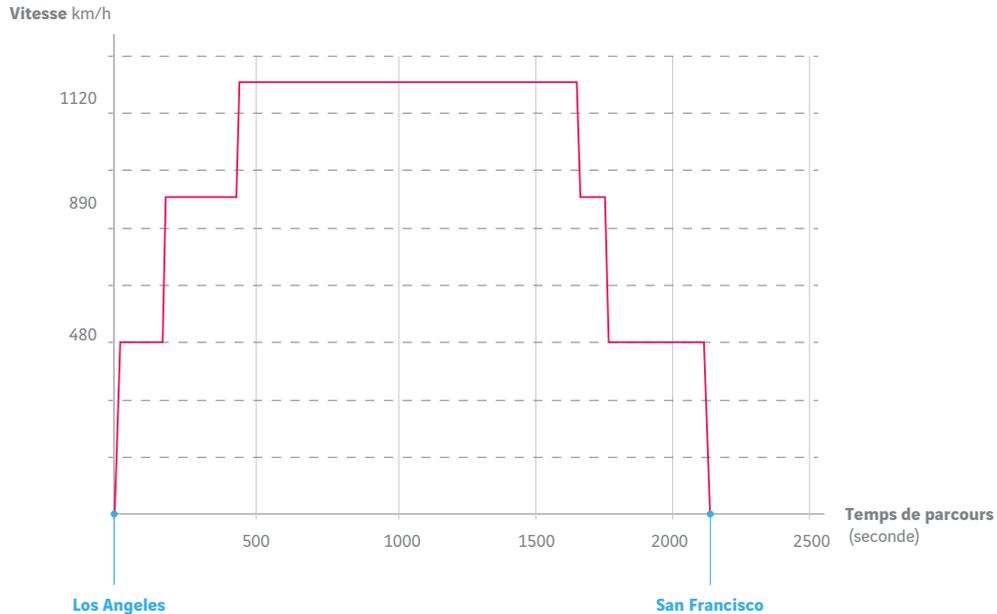
Rejetant l'air vers l'arrière en le faisant passer sous la capsule, cette turbine fonctionne au moyen d'une batterie embarquée. Redondée, elle assure 45 minutes de fonctionnement et est remplacée lors des arrêts en stations.





HYPERLOOP ALPHA EST CONÇU POUR DES DISTANCES JUSQU'À 1 500 KM.

ENTRE PERFORMANCES ET RÉDUCTION DES COÛTS



1 g d'accélération longitudinale

Placés tous les 100 km, les **moteurs linéaires** d'Hyperloop Alpha ne sont installés que sur 1 % de la longueur totale des tubes. Ils assurent l'accélération, puis la décélération.

Départ toutes les 2 minutes

Avec 30 départs par heure, des capsules de 28 places offrent un débit de 840 passagers par heure et par sens.

28 passagers par capsule

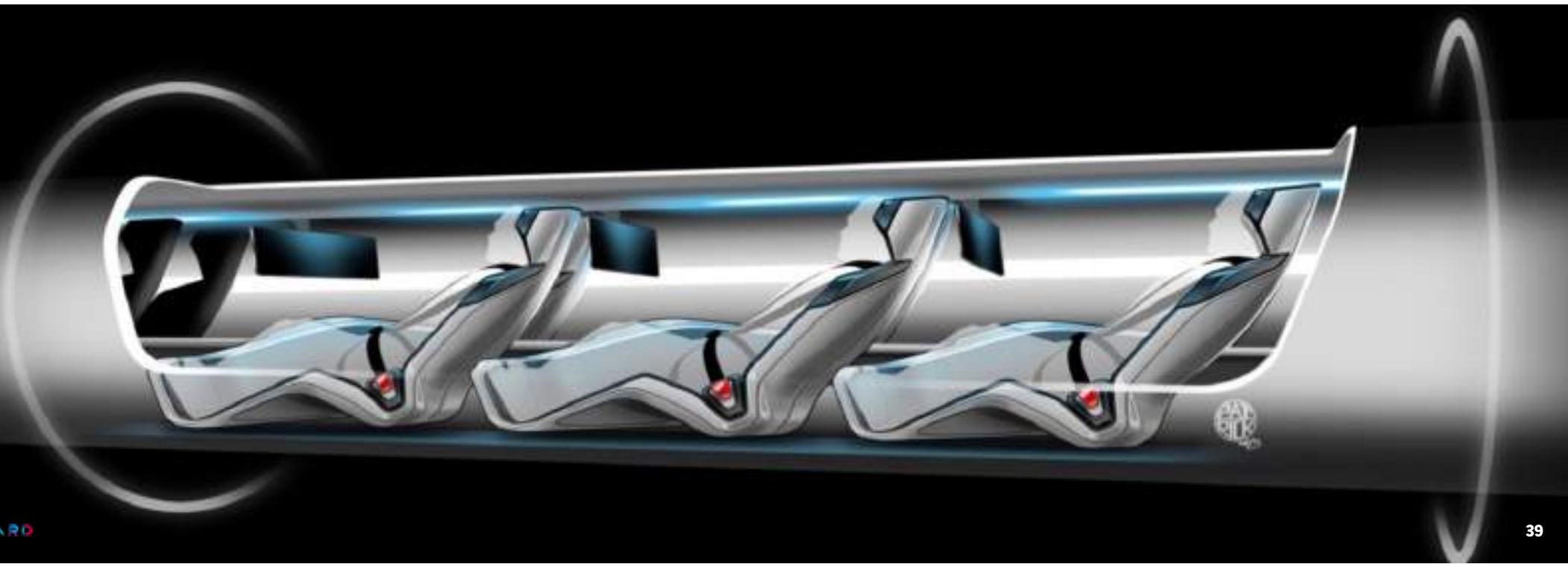
Chaque capsule Hyperloop Alpha est large de 1,35 m avec une surface frontale de 1,4 m². Des capsules adaptées au transport de voitures augmenteraient les coûts d'établissement de 25 %.

Mach 0,91

Hyperloop Alpha prévoit une vitesse maximale de 1 120 km/h, située dans le haut subsonique.

➤ L'ACCÉLÉRATION FAIT PARTIE DE L'EXPÉRIENCE HYPERLOOP ALPHA

En tolérant 0,5 g d'accélération latérale, Hyperloop Alpha fixe un **rayon minimal** pour ses courbes selon la vitesse pratiquée. Il atteint 3,67 km à 480 km/h, 12,6 km à 890 km/h et 23,5 km à 1 120 km/h.



➤ HYPERLOOP ALPHA LAISSE DES QUESTIONS EN SUSPENS

- + Contrôle du **mouvement gyroscopique** des capsules
- + **Alignement** du rotor du moteur linéaire sur le stator solidaire de l'infrastructure lorsqu'ils se rencontrent tous les 100 km
- + Conception des stations et des **sas** entre zones de vide partiel et zones à l'air libre
- + Conception des **aiguillages**
- + **Maintenance** des infrastructures et des capsules
- + **Secours** en cas de capsule immobilisée dans le tube avec feu ou dégagement de fumée depuis sa batterie embarquée
- + Evaluation du coût et de l'intérêt de la **sustentation magnétique**
- + Réalisation de prototypes à échelle réduite pour évaluation des **problèmes physiques**
- + Intérêt réel du système par rapport aux offres ferroviaires et aériennes existantes si les stations se trouvent **hors des centres urbains** et doivent être rejointes à la périphérie, à la manière des aéroports

HYPERLOOP

ELON MUSK A INSTALLÉ LE NOM **HYPERLOOP.
IL A ÉTÉ ADOPTÉ PAR UNE FAMILLE DE PROJETS,
Y COMPRIS DANS LE MONDE UNIVERSITAIRE.**

HYPERLOOP

CONCRÉTISER HYPERLOOP

Start-up ou universitaires,
tout le monde s'y met

QUI FERA LE PREMIER HYPERLOOP ?



➤ SIX ENTREPRISES EN TÊTE DE PELOTON

Trois entreprises sur six sont européennes

Parmi les six sociétés qui développent les principaux projets Hyperloop, trois sont européennes : [Hardt Hyperloop](#) (Pays-Bas), [Nevomo](#) (Pologne) et [Zeleros](#) (Espagne).

Deux implantations en France

[Hyperloop Transportation Technologies](#) (HTT) a un centre de R&D et une piste d'essai de 330 m près de Toulouse. [TransPod](#) a des bureaux à Limoges et prévoit la construction, à proximité, d'une piste d'essai de 3 km à l'échelle 1:2.

450 M€

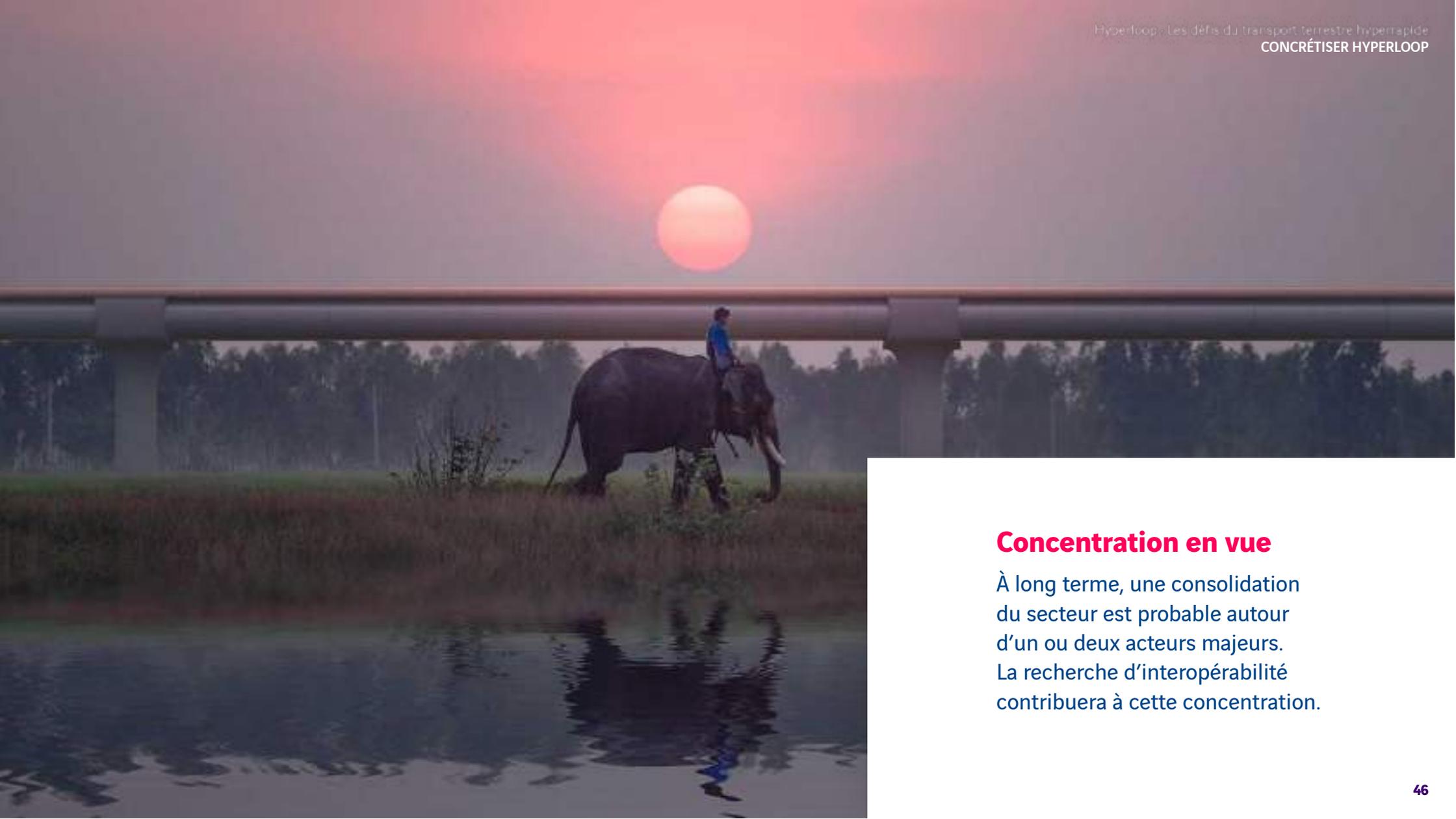


Depuis 2013, le secteur a levé plus de 450 millions d'euros de financement. La majorité de ces fonds vient du secteur privé.

Les acteurs les plus pertinents à ce jour semblent être [Virgin Hyperloop One](#) (VHO), [TransPod](#), [Hyperloop Transportation Technologies](#) (HTT) et [Hardt](#). Ces quatre entreprises sont celles qui ont levé le plus de fonds.

➤ INVESTISSEMENTS ET RÉALISATIONS HYPERLOOP

	Maisons mères et bureau	Piste d'essai	Discussions commerciales	Effectifs	Financement (euros)
	USA (Californie), Dubai, Londres	Las Vegas : 500 m, échelle 1:1	USA, Royaume-Uni, Canada, Inde, Mexique	290	340 M
	Canada, Limoges, Paris	Limoges : 3 km, échelle 1:2 Début de la construction : 2020/2021 Edmonton : 10 km, échelle 1:1	Canada, France, Arabie saoudite, États-Unis, Australie	20	46 M
	USA (Californie), Barcelone, Dubai, São Paulo, Toulouse	Toulouse : 330 m Abou Dabi : 5 km (prévue en 2021)	USA, Émirats arabes unis, Espagne, France, Brésil, Chine, Corée du Sud, Inde, Indonésie, République tchèque, Slovaquie, Ukraine	50 employés 500 contributeurs & consultants	30 M
	Pays-Bas	Province de Groningen : 3 km (prévue pour 2022)	Europe, Corée du Sud, Émirats arabes unis, Japon, Turquie	26	15 M
	Espagne	Espagne : 2-3 km (prévue en 2020/2021 non réalisée à fin avril 2021)	Espagne	23	7 M
	Pologne, Berlin	48 m, échelle 1:5 Taille réelle prévue mi-2021	Pologne	33	5 M



Concentration en vue

À long terme, une consolidation du secteur est probable autour d'un ou deux acteurs majeurs. La recherche d'interopérabilité contribuera à cette concentration.

➤ TECHNOLOGIES DES PROJETS HYPERLOOP

	Niveau de maturité technologique (TRL)	Lévitation Basse vitesse / Haute vitesse	Propulsion	Énergie et alimentaiton	Infrastructure
	6/9	Lévitation électromagnétique Rail inférieur à faible vitesse	Moteur linéaire électromagnétique	Électricité	Tube à basse pression (100 Pa)
	5/9	Suspension (attraction) électromagnétique Rail inférieur et supérieur	Moteur linéaire électromagnétique	Électricité Arc à plasma pour la grande vitesse et sabot à basse vitesse	Tube à basse pression (100 Pa) Aciers conducteurs
	6/9	Lévitation magnétique passive pour la haute vitesse et roue pour la basse vitesse	Moteur linéaire électromagnétique	Électricité Énergie récupérée au freinage	Tube à basse pression (100 Pa) Diamètre : 13 ft (± 4 m) Hauteur du pylône : 20 ft (± 6 m) Piste conductrice
	6/9	Suspension électromagnétique Rail supérieur Pas de roues à faible vitesse	Moteur linéaire électromagnétique	Électricité Énergie récupérée au freinage	Jonctions dans le réseau qui fonctionnent comme les rampes d'accès et de sortie d'un réseau routier
	3/9	Technologie de lévitation passive Rail inférieur	Propulsion par air comprimé	Électricité Alimentation par batterie pour la propulsion	Diamètre du tube : 4 m Pression > à 100 Pa (d'après Zeleros)
	3/9	Lévitation magnétique sur LGV existante : Magrail Rail inférieur	Moteur linéaire électromagnétique	Électricité	Rails déjà existants pour la première phase Système de vide « hyperrail » pour la deuxième phase Hyperloop pour la dernière phase

➤ **UNIVERSITÉS ET START-UP PARTICIPENT AUSSI
À LA DYNAMIQUE HYPERLOOP**





Hyperloop

Concrétiser Hyperloop

VIRGIN HYPERLOOP (EX-HYPERLOOP ONE)

Virgin Hyperloop est actuellement
l'acteur le plus avancé dans le développement de l'Hyperloop.



➤ VIRGIN HYPERLOOP A ÉTÉ LE PREMIER À EMBARQUER DES PASSAGERS

Tests en vraie grandeur

Virgin Hyperloop a construit une piste d'essai à taille réelle pour tester et valider les sous-systèmes : propulsion, lévitation, système électronique de puissance et freinage.

Premiers passagers

Le démonstrateur Virgin est à ce jour le seul qui ait transporté des personnes (membres de l'équipe). Cette première a eu lieu le 8 octobre 2020, sur 500 m et en atteignant 172 km/h. Il y a encore beaucoup de travail à accomplir pour passer de ce démonstrateur à la mise en service commercial d'une ligne complète apte à plus de 1 000 km/h.

Une capacité à attirer les financements

Sur 443 M€ levés par le secteur, Virgin Hyperloop a capté 340 M€, soit plus des trois quarts de l'ensemble des investissements au profit des systèmes Hyperloop.





CES DEUX PERSONNES FURENT LES PREMIÈRES À VOYAGER EN HYPERLOOP

➤ **PASSAGERS D'ABORD, FRET ENSUITE, POUR VIRGIN HYPERLOOP**

Virgin Hyperloop envisage la construction d'une nouvelle piste expérimentale de 11 km. L'objectif commercial semble donner la priorité aux passagers, mais le potentiel du fret n'est pas négligé. Le modèle économique pourrait consister en des ventes de licences ou en une [commercialisation directe](#) du service à usagers finaux.





Hyperloop

Concrétiser Hyperloop

TRANSPOD

Cette entreprise canadienne prévoit de construire un prototype près de Limoges, puis une ligne pleinement opérationnelle en Alberta, au Canada.





Particularités techniques

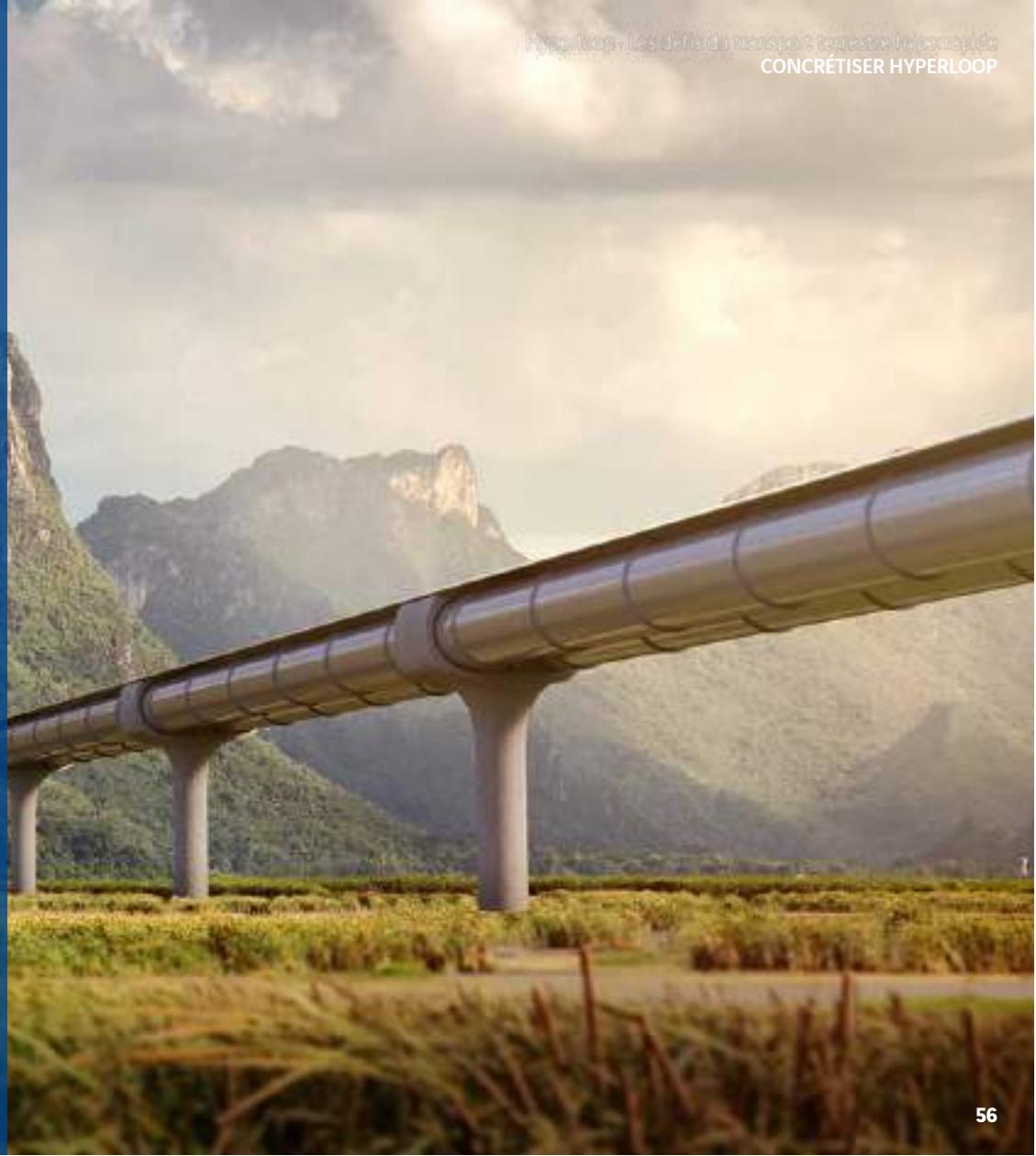
TransPod

Le mode de transmission de l'énergie est un sabot à faible vitesse et un arc à plasma à haute vitesse.

Le véhicule est équipé d'une combinaison roues/moteur électrique pour les phases d'accélération et de décélération et utilise des moteurs linéaires en allure de croisière.

**CHAQUE CAPSULE TRANSPOD POURRAIT TRANSPORTER
JUSQU'À 100 PASSAGERS OU 10 À 15 TONNES DE FRET.**

**TransPod estime
le coût de construction
d'une ligne à 27 M€/km**



Modèle économique en deux temps

À court terme, TransPod souhaite **licencier sa technologie**, vendre ses véhicules et intervenir comme actionnaire minoritaire de corridors équipés de la technologie TransPod.

À long terme, TransPod pourrait également réaliser **l'entretien et la maintenance** de l'ensemble du système.





Hyperloop

Concrétiser Hyperloop

HYPERLOOP TT

Cette entreprise américaine a installé son centre de R&D à Toulouse.



Le tube à échelle réelle est prêt

Hyperloop Transportation Technologies (HTT) réalise des tests avec des capsules à échelle réduite et se concentre sur le système de gestion de pression dans le tube. Les capsules accueilleront entre 28 et 50 personnes et le système serait capable de transporter **160 000 passagers par jour.**



➤ APRÈS TOULOUSE, UNE PISTE D'ESSAI EST ENVISAGÉE À ABOU DABI

Brevet Inductrak

Hyperloop Transportation Technologies (HTT) a opté pour la **lévitation électromagnétique passive**. Elle est issue du brevet Inductrak, développé dans les années 1990.

Vente de licences

Le modèle économique est fondé sur une offre de licences destinées aux opérateurs de transport et aux constructeurs de matériel roulant.

Piste d'essai

Pour un budget de 138 M€, une piste d'essai de 5 km est envisagée à Abou Dabi.



Brésil, Chine, Corée
du Sud, Émirats arabes
unis, France, Inde,
Indonésie, Slovaquie,
Tchéquie, Ukraine, USA...

**Hyperloop TT envisage
déjà d'implanter
ses lignes dans
une dizaine de pays**





Hyperloop

Concrétiser Hyperloop

HARDT HYPERLOOP

La start-up néerlandaise Hardt Hyperloop était à l'origine un **projet d'étudiants**.



➤ LES FONDATEURS D'HARDT HYPERLOOP ONT REMPORTÉ LE CONCOURS ORGANISÉ PAR SPACE X EN 2017

Hardt Hyperloop a accéléré son développement en levant 15 millions d'euros de fonds publics et privés. L'entreprise est leader du groupe de travail sur les standards européens dédiés à l'Hyperloop et a l'intention de construire un centre européen d'essai Hyperloop aux Pays-Bas. Des tests à basse vitesse ont été réalisés pour la lévitation, la propulsion, le changement de voie et l'environnement de vide.



LE FRET D'ABORD POUR HARDT

En premier lieu, Hardt Hyperloop prévoit de transporter du fret. La première route, appelée la « **route des fleurs** » relierait Amsterdam à Rotterdam. Les capsules circuleraient dans des tubes de 1,10 m de diamètre à une vitesse de croisière de 150 km/h et avec une capacité de 1,125 t. Avec une fréquence de 15 capsules par minute et par sens, la capacité de transport atteint 1012,5 t/h, c'est-à-dire la charge utile de **40 semi-remorques**.

Le transport de passagers est envisagé par la suite. La capacité d'une capsule serait de 60 personnes à une vitesse moyenne de 700 km/h. Le système pourrait ainsi transporter jusqu'à **20 000 passagers par heure** et par sens.

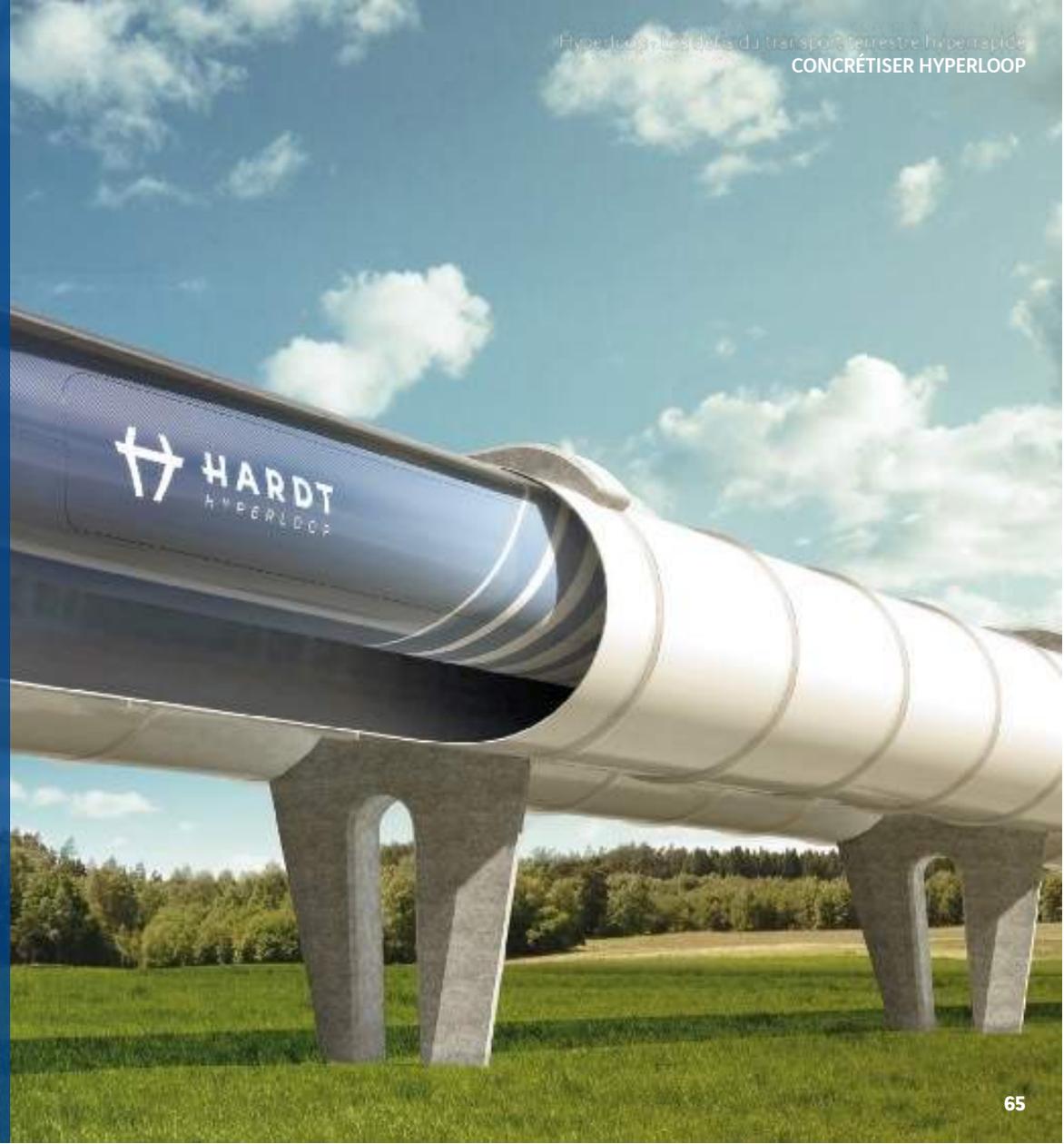
Hardt Hyperloop annonce que son véhicule devrait consommer 38 Wh par passager et par kilomètre à 700 km/h et à 60 % de charge. Le coût de construction de leur solution est estimé à **30 M€/km**, véhicules compris.

Le modèle économique envisagé est fondé sur une offre comprenant des licences de leur technologie et des services de maintenance de leur système. Elle s'adresse aux opérateurs de transport.

Hardt Hyperloop a lancé une étude de faisabilité en partenariat avec l'aéroport d'Amsterdam-Schiphol. Celle-ci consiste à implanter un système Hyperloop dans l'aéroport afin de renforcer sa position de **hub aérien européen**. Il en résulte un projet de réseau long de 2 200 km avec 18 stations réparties dans cinq pays différents (Allemagne, Belgique, France, Pays-Bas et Royaume-Uni).

L'Hyperloop remplacerait ainsi une partie de l'offre aérienne court-courrier et transporterait 12 millions de passagers en 2050. Hardt Hyperloop estime que son système atteindra sa phase d'exploitation en **2028**.

**Le système Hardt
comprend des aimants
permanents qui
évitent de recourir
à des roues à basse
vitesse.
Son infrastructure
permet des
changements de voies.**





Hyperloop

Concrétiser Hyperloop

ZELEROS

En 2016, cette start-up espagnole participe au concours Hyperloop de SpaceX et remporte le prix « **Top Design Concept** » et « **Propulsion / Compression Subsystem Technical Excellence** ». La même année, Altran entre à son capital.





Zeleros ne cherche pas à s'approcher du vide complet

Avec 50 hPa environ, la pression dans les tubes de Zeleros est supérieure à celles annoncées par les concurrents. Elle correspond à celle rencontrée par un avion volant à 20 000 mètres d'altitude.

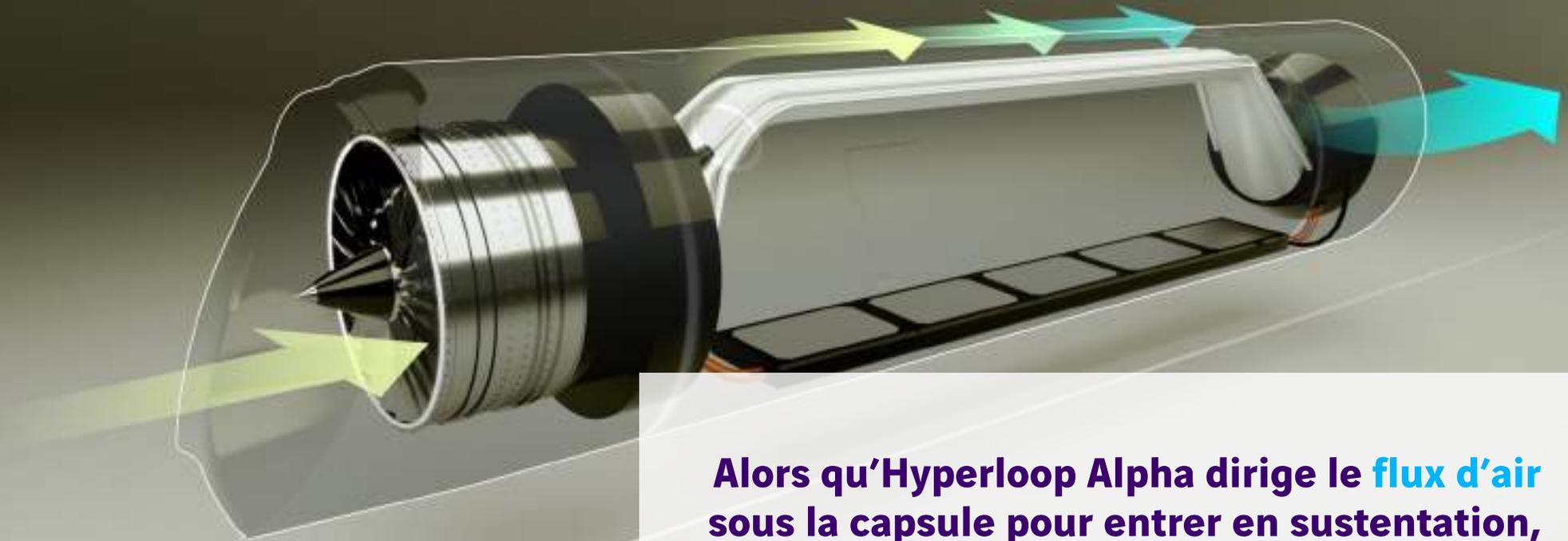
Cette approche, auparavant retenue par SwissMetro, a pour avantages des coûts d'entretien, de maintenance et d'exploitation inférieurs.

**Dans le tube Zeleros,
un rail inférieur guide
et fait rouler le véhicule
en cas d'urgence.**





**LA CAPSULE ZELEROS EST PROPULSÉE PAR UN MOTEUR LINÉAIRE
POUR L'ACCÉLÉRATION ET PAR UNE TURBINE EN VITESSE DE CROISIÈRE.**



Alors qu'Hyperloop Alpha dirige le flux d'air sous la capsule pour entrer en sustentation, Zeleros le fait passer au-dessus de celle-ci.

➤ ZELEROS COMMENCERA PAR LE FRET

L'équipe de Zeleros a réalisé des tests et travaille sur :

- l'optimisation des sous-systèmes,
- le développement de la propulsion et de la **lévitation**,
- la conception des véhicules,
- le dépôt de brevets.

Après la construction d'un prototype à l'échelle 1:3, Zeleros envisage une **première ligne de fret** dès 2023, ce qui ne semble pas réaliste.

Selon Zeleros, l'investissement CAPEX de leur solution s'élèverait à **20 M€/km** et leur véhicule transporterait une cinquantaine de passagers.

Le modèle économique repose sur la vente de leur technologie sous formes de **licences** auprès des futurs opérateurs de transport.





Hyperloop

Concrétiser Hyperloop

NEVOMO (EX-HYPER POLAND)

Cette jeune entreprise polonaise s'appuie sur une évolution du ferroviaire traditionnel pour créer l'Hyperloop en trois étapes.



DEUX ÉTAPES INTERMÉDIAIRES AVANT D'ATTEINDRE L'HYPERLOOP AVEC NEVOMO (EX-HYPER POLAND)



Magrail, hybride ferroviaire

Des navettes électromagnétiques et des trains classiques **partagent les mêmes** lignes. Magrail vise 415 km/h sur lignes à grande vitesse. La signalisation ferroviaire reste à valider.



Hyperrail

Évolution du Magrail, Hyperrail circule dans des **tubes basse pression** placés au-dessus des voies afin d'atteindre 1 000 km/h.



Hyperloop

Ce stade nécessite des technologies dédiées et la construction de **nouvelles infrastructures**.

Un Magrail miniature fonctionne

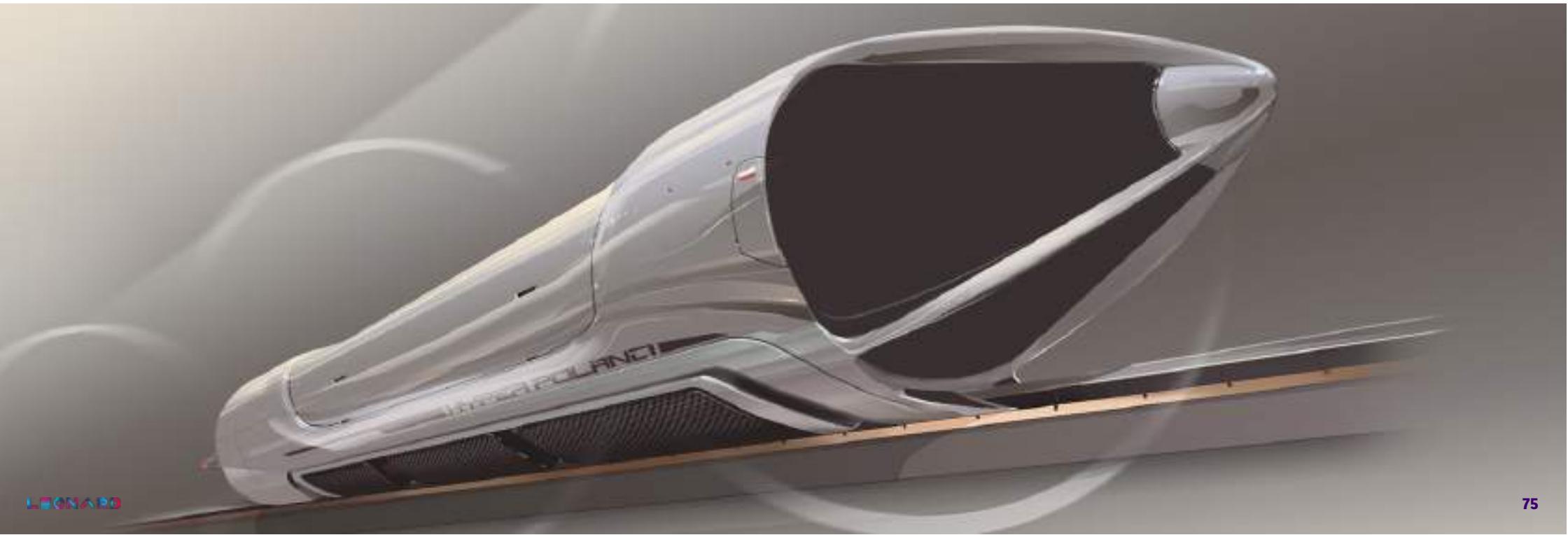
Nevomo a réalisé des tests du Magrail à l'échelle 1:5 sur une piste de 48 mètres. Sa **lévitation passive**, son entraînement linéaire, ses éléments de communication et d'acquisition de données, ainsi que sa mécanique, ont été testés avec succès.

Nevomo estime qu'un prototype grandeur nature de Magrail sera développé courant 2021. La certification du système est envisagée entre 2022 et 2023. **Aucune feuille de route** n'est encore prévue pour les étapes suivantes (Hyperrail, Hyperloop).

➤ NEVOMO : OBJECTIF RACHAT

Le modèle économique envisagé est fondé sur des [licences](#) à vendre aux constructeurs ferroviaires.

À terme, Nevomo souhaite se faire acquérir par une entreprise d'[envergure mondiale](#) du secteur ferroviaire.



HYPERLOOP

RELEVER LES DEFIS

Une question de moyens



Hyperloop

Relever les défis

UN CONTEXTE DÉFAVORABLE DEPUIS MARS 2020

La crise sanitaire entraîne une baisse historique du transport de voyageurs.



➤ CHIFFRES DU TRANSPORT 2020, COMPARÉS À CEUX DE 2019

-42 %

Trafic ferroviaire français
grandes lignes (TGV, Intercités).

Source : SNCF

-66 %

Passagers transportés
par les compagnies aériennes
à l'échelle mondiale.

-75,6 %

Passagers transportés par les
compagnies aériennes en trafic
international à l'échelle mondiale.

-48,8 %

Passagers transportés par les
compagnies aériennes en liaisons
intérieures à l'échelle mondiale.

-92,8 %

Trafic aérien au pic de la crise,
le 12 avril 2020.

485 Md \$

Pertes du secteur aérien.
370 Md \$ pour les compagnies,
115 Md \$ pour les aéroports.

Source : IATA



**L'EXISTENCE D'UNE DEMANDE AUTANT QUE SA PÉRENNITÉ
DOIVENT ÊTRE ASSURÉES AFIN DE MOTIVER LES INVESTISSEURS PRIVÉS**



Hyperloop

Relever les défis

LA TOPOGRAPHIE, FACTEUR DE SURCÔÛT DE LA TRÈS GRANDE VITESSE

Le coût du foncier dans les centres urbains et celui des ouvrages d'art nécessaires au franchissement des obstacles naturels ont une forte influence sur le coût d'établissement.

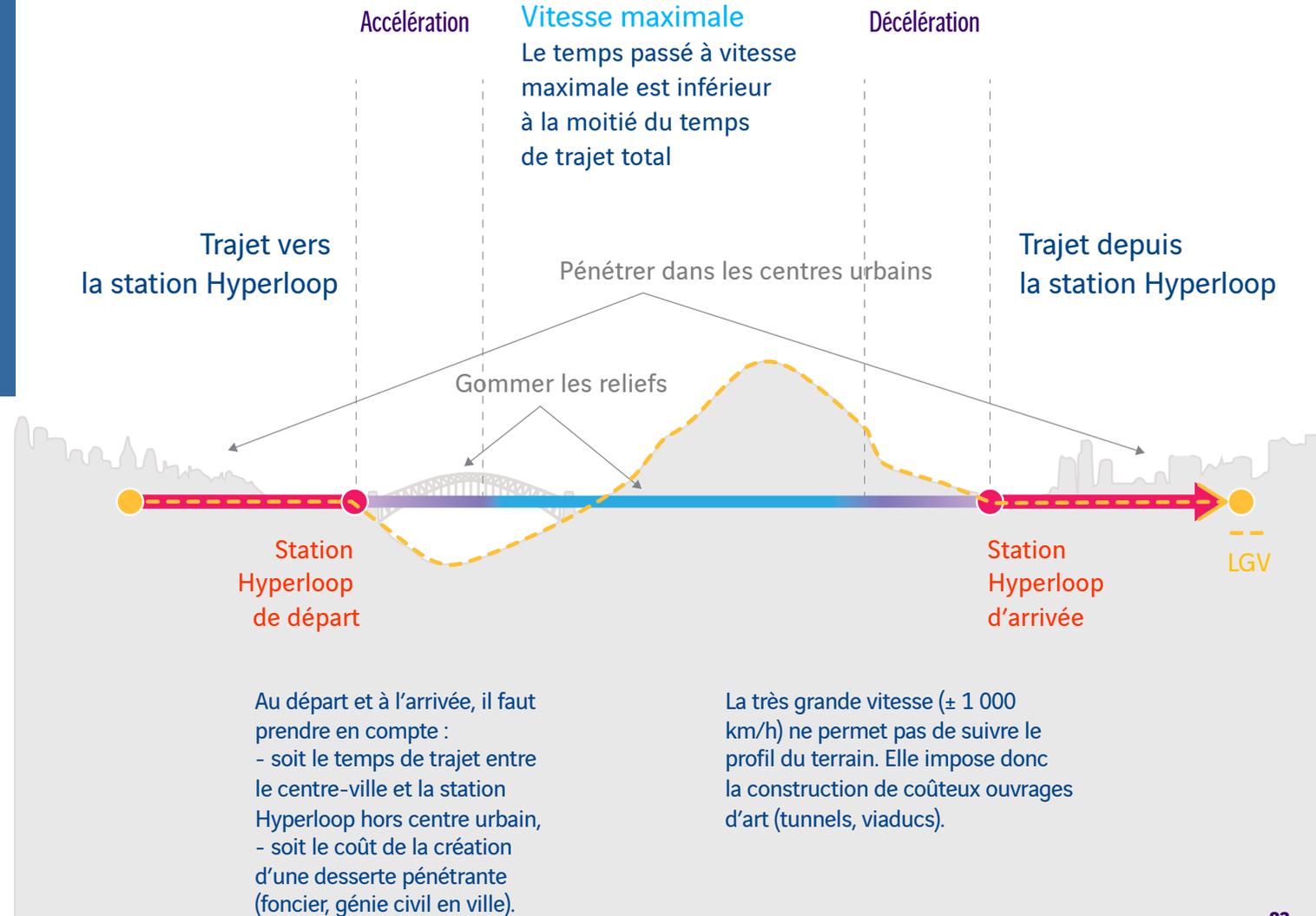


**ATTEINDRE LE CŒUR DES VILLES
AUGMENTE SIGNIFICATIVEMENT LES COÛTS**



Faire pénétrer Hyperloop au cœur de villes a un coût. S'il n'y accède pas, les positions des aéroports ou des rocade TGV autour des villes donnent une idée des emplacements possibles pour ses stations

Le TGV pénètre en centre-ville en se servant d'une infrastructure existante, en surface, non spécifique et partagée. Une ligne Hyperloop peut accéder au centre-ville par voie souterraine, mais à un coût important et l'amortissement ne pourrait pas être assuré par son utilisation pour un Mass Transit d'intérêt régional.

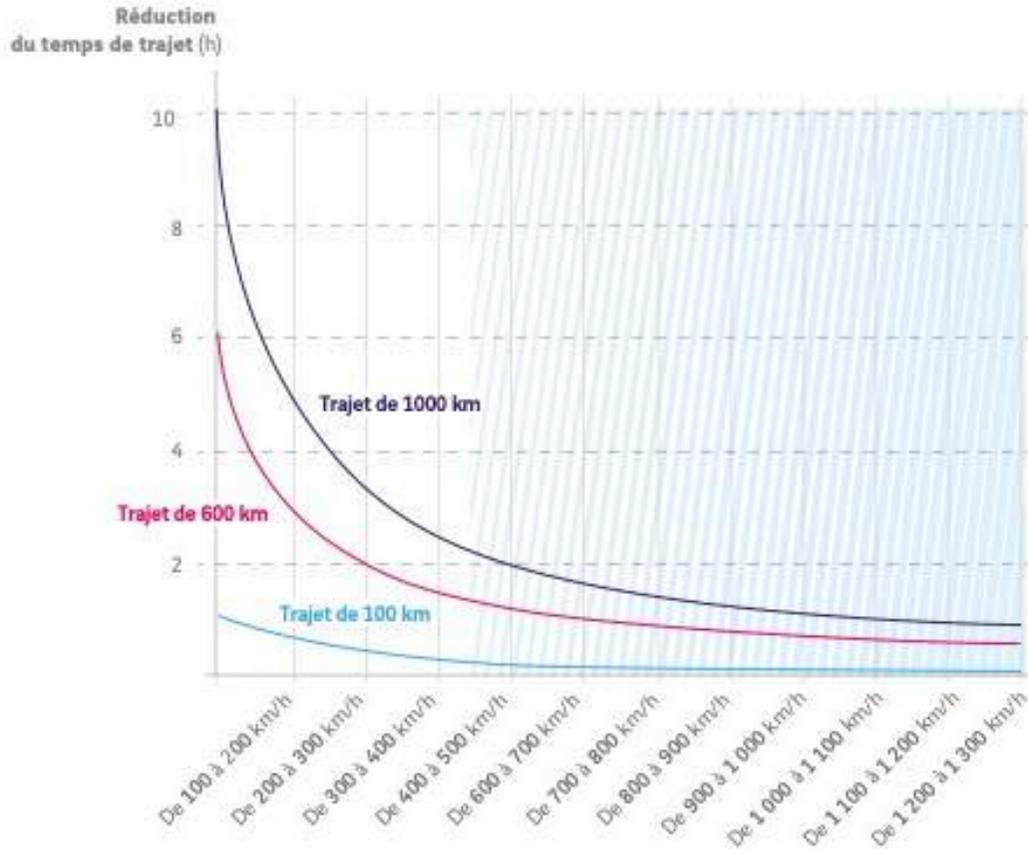


AUGMENTER LA VITESSE OBLIGE À AUGMENTER LE RAYON DES COURBES

L'accélération transversale étant égale au carré de la vitesse linéaire divisé par le rayon de courbure (ou au carré de la vitesse angulaire multiplié par le rayon de courbure), l'augmentation de la vitesse implique une adaptation du tracé des lignes en conséquence.

Ces contraintes s'additionnent à celles posées par la topographie des terrains à traverser, qui peuvent nécessiter d'avoir recours à des ouvrages d'art (tunnels, viaducs) pour traverser les obstacles qui se dressent sur le trajet.





**PLUS ON VA VITE,
MOINS UN
GAIN DE 100 KM/H
EST SENSIBLE
SUR LE TEMPS
DE PARCOURS**

Quand on circule à 100 km/h, accélérer de 100 km/h divise par deux le temps de trajet. En revanche, gagner 100 km/h quand on circule déjà à 1 000 km/h apporte qu'un gain de temps marginal. C'est pourquoi une vitesse de 300, voire 350 km/h, est compromise entre coûts et temps de parcours tenu pour le transport ferroviaire à grande vitesse dans l'espace européen.



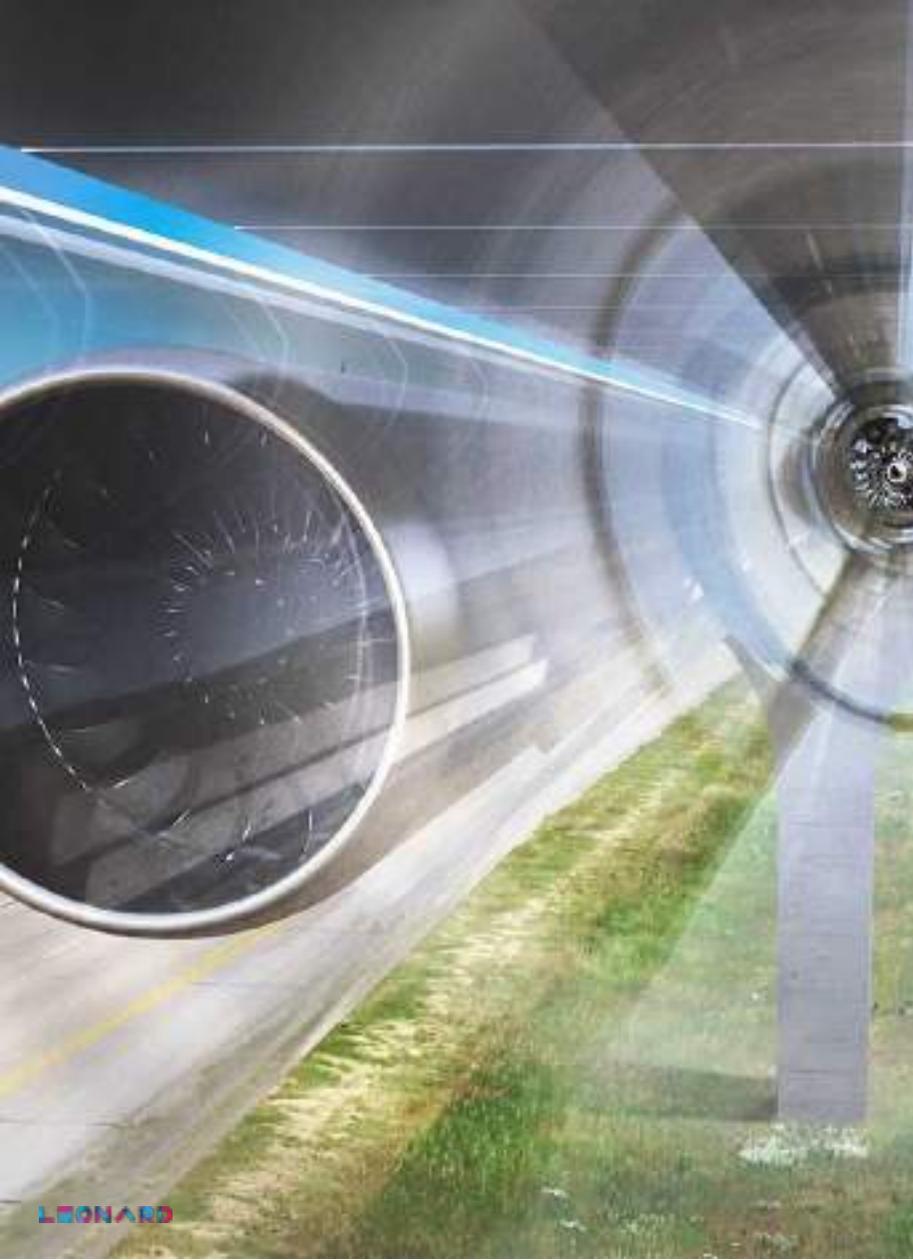
Hyperloop

Relever les défis

INDISPENSABLE MAÎTRISE TECHNIQUE

De la gestion du « vide partiel » à l'interopérabilité fondée sur des standards partagés en passant par la conception des aiguillages, les défis techniques ne manquent pas.





REPOUSSER LA LIMITE DE KANTROWITZ

À l'approche d'une capsule, l'air encore présent dans le tube doit s'écouler depuis la section courante du tube jusqu'à l'arrière du véhicule en passant par l'espace réduit situé entre les parois internes du tube et la capsule. Ce **rétrécissement** provoque une accélération de la vitesse du flux, selon le principe de conservation du débit volumique de la mécanique des fluides. En raison de la vitesse très élevée de la capsule, la vitesse d'écoulement du flux peut s'approcher de la vitesse du son par endroits, créant des ondes de choc locales entre les parois du tube et le véhicule. On observe alors une saturation locale du flux qui en limite la vitesse, entraînant une accumulation d'air devant la capsule, accumulation qui peut limiter sa vitesse maximum. Il existerait deux solutions pour résoudre ce problème :

- ➊ **Augmenter le diamètre** du tube afin d'agrandir la zone de contournement pour l'air autour du véhicule. Cela repousserait la vitesse critique à laquelle le flux sature. L'inconvénient de cette solution est l'augmentation du coût de l'infrastructure.
- ➋ **Installer une turbine** à l'avant de la capsule afin de repousser l'air vers l'arrière. Cette solution a été envisagée par certains acteurs du secteur Hyperloop.

➤ CONTRÔLER LA PRESSION

Apprivoiser une idée séduisante

Le concept Hyperloop est fondé sur la circulation de capsules dans des tubes où la pression de l'air a été réduite afin de **réduire la friction** avec l'air. Ceci facilite des déplacements à hyper grande vitesse avec une consommation d'énergie réduite, en théorie. Bien que séduisante, l'idée nécessite, pour être appliquée, de relever des défis techniques :

- Garantir l'**étanchéité** des tubes dans le temps tout en permettant l'évacuation de la chaleur (climatisation des pods, énergie générée lors du freinage, frottement de l'air entre la capsule et la paroi, etc.).
- Permettre de fréquentes pressurisations et dépressurisations nécessaires à la **maintenance** du système, ainsi qu'en cas d'évacuation des passagers.
- Conserver une certaine pression d'air afin de **refroidir** les organes de traction et d'assurer le renouvellement de l'air de la climatisation pour le confort des passagers.



Ces pompes à vide sont celles du tube d'essai Hyperloop TT installé à Toulouse. Leur fonctionnement entraîne l'une des principales dépenses d'énergie du système.

➤ COMMENT MANŒVRER LES AIGUILLAGES AU RYTHME DE LA CIRCULATION DES CAPSULES ?

À ce jour, seul [Hardt Hyperloop](#) a mis au point et breveté un système de changement de voie. Ce système n'a été testé qu'à faible vitesse et à échelle réduite. Or la vitesse de manœuvre de l'aiguillage est un facteur limitant du débit des lignes. Les acteurs de l'Hyperloop nous promettent un départ des capsules toutes les 30 secondes au maximum des capacités du système. Avec une telle fréquence, comment assurer le contrôle, la commande, le verrouillage et la [sécurisation](#) du système d'aiguillage ?





Indispensable contrôle géométrique périodique face au risque sismique

Maintenir l'alignement nécessaire à la grande vitesse ainsi que l'étanchéité des tubes oblige à adapter l'isolation sismique des structures Hyperloop aériennes au risque local. Celle-ci peut provoquer des surcoûts significatifs de construction. Après un séisme, il est indispensable d'inspecter la géométrie afin de s'assurer qu'aucun déplacement permanent des fondations ne perturbe le système. Dans le cas des Hyperloop souterrains, des déformations peuvent apparaître après un mouvement du terrain. Les contrôles géométriques périodiques sont donc nécessaires.

➤ Y A-T-IL UN PILOTE DANS LE POD ?

Hyperloop est un mode de transport automatisé à hyper grande vitesse. Il nécessite des systèmes de **détection** et de communication à la fois **robustes** et extrêmement rapides dans un environnement **très contraint** (sous terre, hyper rapide, sous vide d'air, dans un tube, etc.). En cas de desserte cadencée avec de courts intervalles entre des capsules lancées à grande vitesse, il est indispensable de détecter les incidents loin devant la position d'une capsule, mais aussi d'agir avec un délai de réaction **incompatible avec un contrôle humain**.



➤ MAÎTRISER LE FREINAGE D'URGENCE

🔴 Imaginons un Hyperloop lancé à 700 km/h, avec un intervalle de 11 secondes entre chaque départ de capsule afin d'approcher un débit de 20 000 personnes par heure et par sens au moyen de capsules offrant 60 places. Dans ce cas, la distance entre deux capsules est de 2 100 m.

🔴 En admettant que le freinage d'urgence soit limité à 1 g, la distance de freinage à 700 km/h serait d'environ 1 900 m. Dans l'hypothèse où un humain déclencherait ce freinage, il faudrait ajouter la distance parcourue pendant son temps de réaction (1 s), soit environ 200 m. La distance d'arrêt serait donc dans ce cas de 2 100 m.

🔴 Pour qu'un humain puisse déclencher un freinage d'urgence, il devra être informé d'un incident se situant à au moins 2 100 m devant la capsule.

🔴 Chaque seconde écoulée précédant la réaction du conducteur allonge la distance d'arrêt de 200 m.

🔴 Avec la fréquence de départ retenue ici et deux capsules séparées de 2 100 m, la capsule suiveuse a entre 1 et 11 s pour réagir à un incident impliquant la capsule de tête :

- › Dans le cas où la capsule de tête rencontrerait un incident qui l'arrête immédiatement (collision avec obstacle fixe, collision à une bretelle d'aiguillage, etc.), la capsule suiveuse aura exactement l'espace suffisant pour s'arrêter, à condition que le freinage soit initié dans la seconde qui suit la survenue de l'incident.
- › Si la capsule de tête rencontre une situation nécessitant un freinage d'urgence à 1 g, la capsule suivante aura 4,2 km pour s'arrêter (2,1 km d'interdistance et 2,1 km de distance d'arrêt de la capsule de tête). Dans ce cas, le freinage de la seconde capsule devrait être déclenché dans les 10 s suivant le début du freinage de la première capsule.

➤ UN RISQUE SANITAIRE NON ÉVALUÉ

Avant la mise en service de systèmes de lévitation ou de propulsion électromagnétiques, il est nécessaire d'étudier non seulement leur **compatibilité électromagnétique** avec d'autres appareils électroniques placés à proximité (*ElectroMagnetic Compatibility*), mais aussi les risques sanitaires éventuellement provoqués par l'exposition des personnes aux champs magnétiques (*ElectroMagnetic Exposure*).

Ce risque concerne les passagers à bord des trains ou à proximité de ces derniers, mais aussi des riverains ou du personnel des entreprises qui exploitent ou entretiennent le système de transport.





L'interopérabilité des systèmes est-elle possible ?

Les nombreuses particularités de chaque système Hyperloop ne sont pas de nature à favoriser l'interopérabilité entre les systèmes concurrents ou avec d'autres systèmes de transport guidé. Seuls les Hyperloop européens ont évoqué la nécessité d'être interopérables. L'interopérabilité imposerait des spécifications techniques **communes**, donc des enjeux forts de standardisation pour les sociétés d'Hyperloop.

➤ LES EUROPÉENS TENTENT DE STANDARDISER L'HYPERLOOP

À propos de la standardisation, le comité **JTC 20** (*Joint Technical Committee*) a été créé en février 2020. Il est piloté par le *European Committee for standardisation* (CEN) et le *European Committee for Electrotechnical Standardization* (CENELEC). Cette initiative a été menée par plusieurs entreprises Hyperloop européennes et canadiennes. Parmi elles se trouvent Hardt Hyperloop, Nevomo (Hyper Poland), TransPod et Zeleros.

L'objectif de ce comité est de créer des normes, des spécifications communes, des systèmes interopérables, mais aussi des objectifs de sécurité partagés pour les systèmes Hyperloop. L'un des buts est la réduction des coûts et des temps nécessaires au développement et à la mise en service. Il est vraisemblable que l'entreprise qui sera la plus avancée dans son développement d'Hyperloop pourra imposer ses techniques et procédés comme standards aux autres acteurs.





Hyperloop

Relever les défis

LA SÉCURITÉ DÉTERMINE LA RÉGLEMENTATION

Il existe déjà une réglementation européenne à propos de la sécurité ferroviaire et dans les tunnels. L'exploitation commerciale d'Hyperloop ne saurait s'accompagner de textes réglementaires moins exigeants.





CEINTURE POUR CAS D'URGENCE

Deux à trois fois plus rapides que les trains à grande vitesse, Hyperloop interroge sur les besoins de protection de ses passagers vis-à-vis des mouvements de la capsule.

Mode nominal

Les accélérations et décélérations des capsules en service normal devraient être celles pratiquées dans un train à grande vitesse pour des raisons d'acceptabilité par les usagers les plus vulnérables. Cela les limite à 0,1 g voire 0,2 g en décélération. Dans ces conditions, aucun moyen de retenue n'est nécessaire. Une ceinture automobile se bloque à 0,3 g.

Freinage d'urgence

L'exploitation optimale d'un Hyperloop se fonde sur des intervalles réduits entre des capsules circulant à grande vitesse. La plupart des projets Hyperloop mentionnent la possibilité d'un freinage d'urgence avec une décélération de l'ordre de 1 g. Elle exige une ceinture « trois points » avec blocage, voire des limiteurs d'effort passifs et un dispositif actif de mise en tension (prétensionneur) en cas de choc, notamment aux points de signalisation et aiguillages.

➤ L'HYPERLOOP INTRODUIT LES ZONES DE TURBULENCES AU SOL

Dans le contexte Hyperloop, il est nécessaire d'étudier les risques de turbulences dans le tube, notamment les turbulences de **sillage** provoquées par la capsule qui précède. Elles pourraient justifier la retenue des passagers par des ceintures. La possibilité de mouvements latéraux ou de roulis lors de la lévitation ou de la suspension des capsules doit être considérée. Il en est de même lors des transitions entre le roulement sur roues et la lévitation ou suspension.





➤ IMPOSSIBLE DE **SORTIR** DE LA CAPSULE SANS RISQUES EXTRÊMES

En cas d'évacuation des passagers, des sorties de secours sont prévues par les concepteurs le long des lignes. Des véhicules de secours seront également disponibles pour transporter les passagers ainsi que pour tracter les capsules en panne. La mise en œuvre de ces moyens peut nécessiter un tube « de service » comparable à celui du tunnel sous la Manche.

➤ VERS UNE RÉGLEMENTATION ADAPTÉE À LA NOUVEAUTÉ HYPERLOOP

Les étapes de **certification et d'homologation** sont déterminantes dans le cadre de la mise en service commerciale de tout système de transport. L'Hyperloop étant un nouveau moyen de transport à la croisée du ferroviaire à grande vitesse et de l'aérien, le législateur devra à la fois s'appuyer sur des bases réglementaires existantes et créer de **nouveaux textes** adaptés aux contraintes spécifiques d'Hyperloop.

Au niveau européen, la création de la réglementation adaptée pourrait nécessiter **cinq à dix ans**. Les instances réglementaires européennes et américaines sont déjà à pied d'œuvre. La Commission européenne a prévu de lancer les travaux à partir du premier semestre 2021.

L'étude sera menée avec des groupes d'experts ainsi que par les entreprises qui développent l'Hyperloop. Les États-Unis, quant à eux, se sont prononcés en juillet 2020 en faveur de la création de législations destinées à l'Hyperloop. Leur Conseil des technologies de transport non traditionnelles et émergentes (NETT) a la mission de publier des directives réglementaires pour l'Hyperloop au cours des six prochains mois.

Ces avancées illustrent l'intérêt croissant de ces deux marchés pour l'Hyperloop.



Hyperloop

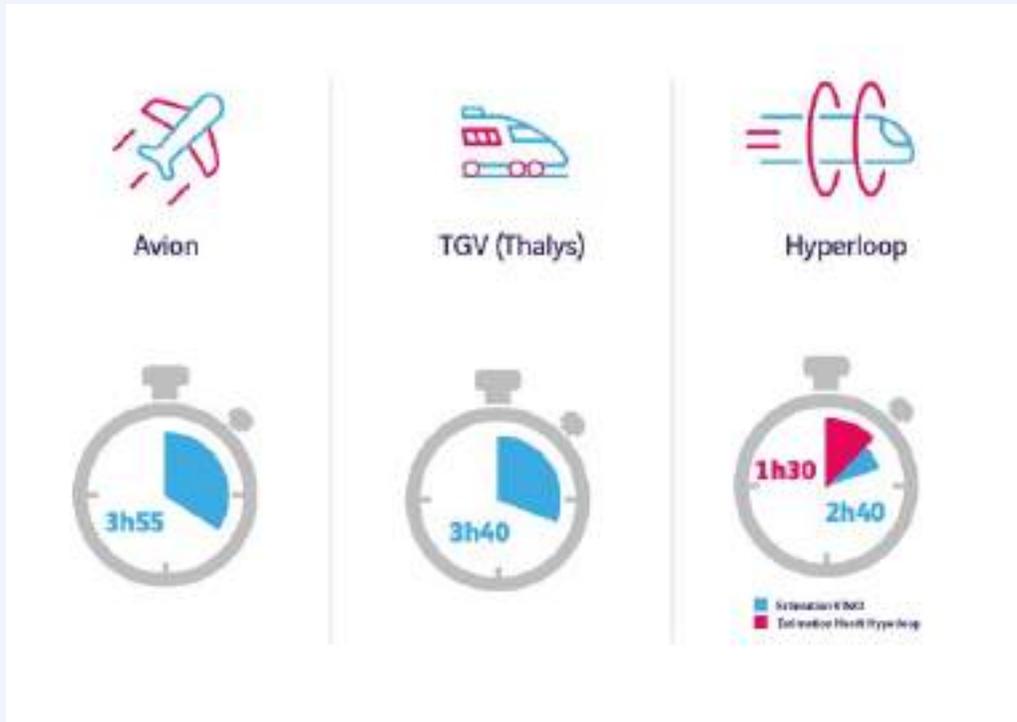
Relever les défis

PERTINENCE ÉCONOMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE

Des coûts et une consommation d'énergie finalement élevés.



➤ GAGNER DU TEMPS AVEC HYPERLOOP



Paris-Amsterdam : temps de trajet comparés. Source : Hardt Hyperloop

Hardt Hyperloop a fondé sa comparaison entre Hyperloop, TGV et aérien sur le trajet [Paris-Amsterdam](#). Le tableau ci-contre présente le temps total de trajet entre Paris (Gare du Nord) et Amsterdam (Gare centrale) y compris les temps d'attente, d'enregistrement et de contrôle de sécurité.

Hardt Hyperloop annonce un temps de trajet de 1 h 30 porte à porte. Celui-ci passe à 2 h 40 en ajoutant 0 h 40 pour les trajets en transport en commun vers des stations excentrées comme le sont les aéroports, et 0 h 30 pour le traitement des passagers en stations.

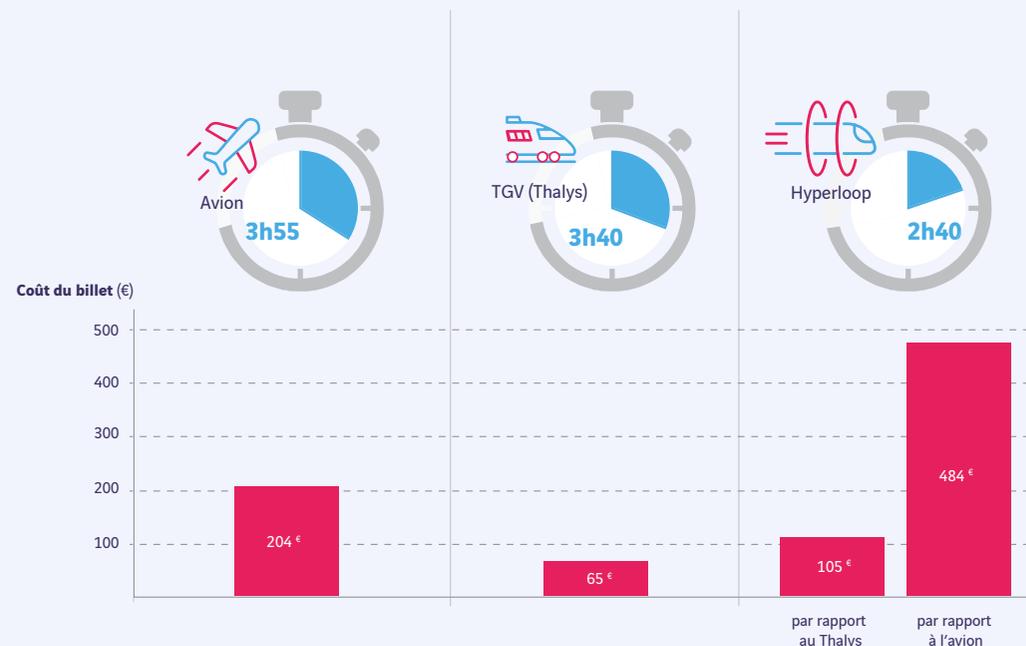
Selon cette estimation et sur ce trajet, l'Hyperloop serait [plus rapide que l'avion](#) et le train à grande vitesse.

LA TARIFICATION PEUT-ELLE VALORISER LE GAIN DE TEMPS ?

Peu d'éléments de tarification ont été communiqués à ce jour par les sociétés du secteur Hyperloop. Hardt Hyperloop évoque un tarif de 71 € pour un aller simple Amsterdam-Berlin. Le trajet Paris-Amsterdam étant comparable en distance, appliquons-lui le même tarif.

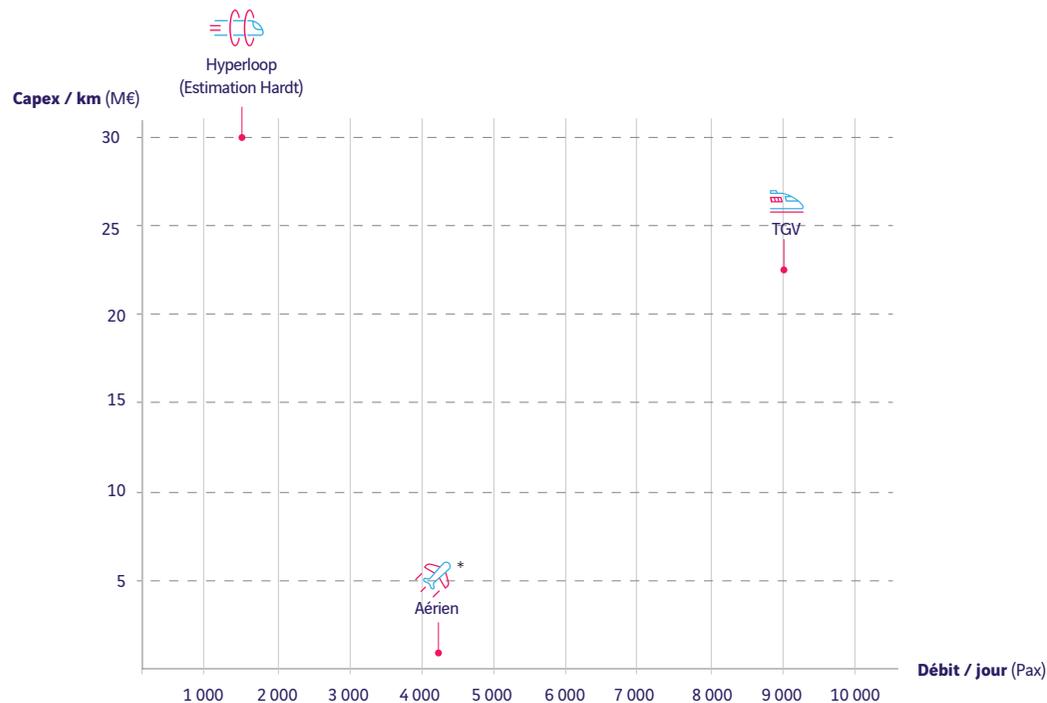
Le tarif Hardt Hyperloop sur Paris-Amsterdam est proche de celui du Thalys et nettement inférieur à celui de l'aérien. Il ne semble donc pas valoriser le gain de temps apporté par le service Hyperloop.

En intégrant cette valorisation, les clients du Thalys seraient **prêts à payer 105 €** pour un billet Hyperloop, et ceux de l'aérien, 484 €. Selon cette analyse, le prix d'un billet vendu aux clients de l'Hyperloop pourrait donc être nettement supérieur à celui annoncé par Hardt Hyperloop, à ce jour.



Source : Leonard (pour les estimations de coûts) / Commissariat général à la stratégie et à la prospective (pour la valorisation du temps)

PERTINENCE DES INVESTISSEMENTS POUR L' OFFRE DE MOBILITÉ PROPOSÉE



* Hors plateformes aéroportuaires

TGV, aérien, Hyperloop : dépenses d'investissement par kilomètre

Le tableau ci-contre établit la relation entre le débit proposé par un mode de transport et les investissements qu'il nécessite.

Selon les estimations de Hardt Hyperloop, 1 700 personnes circuleront sur la ligne Paris-Amsterdam en 2050. C'est nettement inférieur au trafic actuel de l'avion et de Thalys hors circonstances exceptionnelles.

Hardt Hyperloop estime ses dépenses d'investissement (CAPEX) à 30 M€/km, ce qui est supérieur au TGV (22 M€/km en dehors des zones urbaines) et à l'aérien (1,2 M€/km).

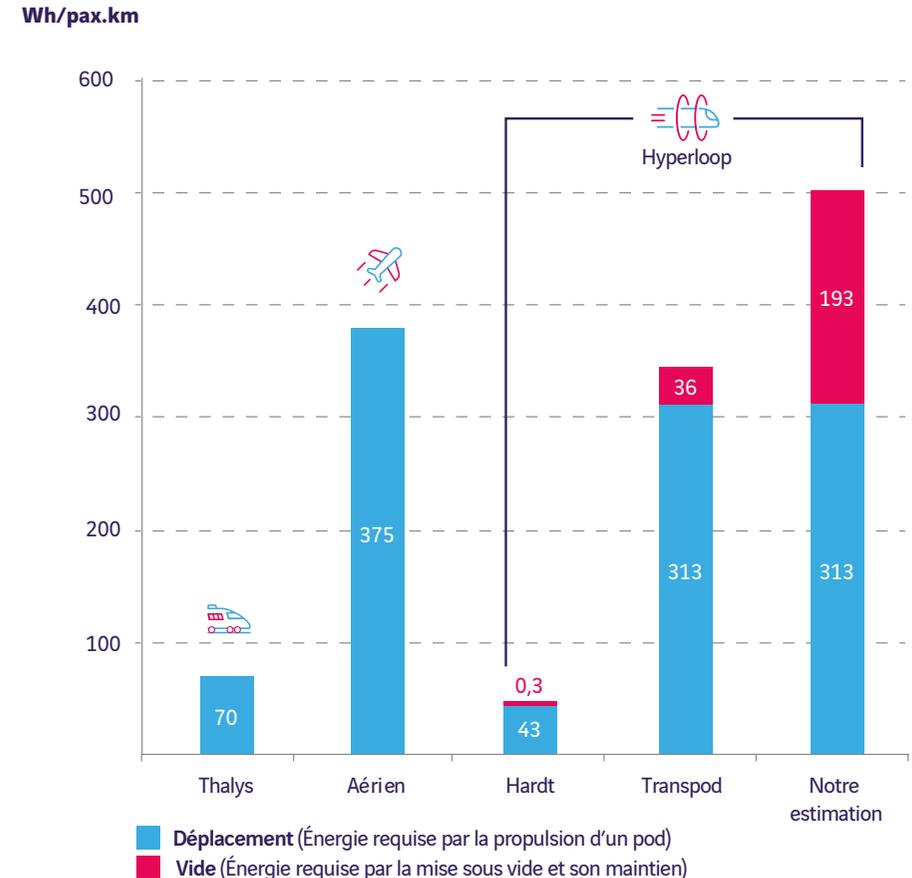
LE VIDE PÈSE LOURD SUR LE BILAN ÉNERGÉTIQUE

Fondé sur les données Hardt Hyperloop et TransPod, ce tableau compare les consommations d'énergie par passager et par kilomètre, mais ces données semblent peu réalistes. L'Hyperloop serait en fait plus énergivore que le TGV/Thalys ($\times 7,2$) et que l'aérien ($\times 1,34$).

Fondée sur les caractéristiques de TransPod, cette estimation considère un trajet de 400 km où 26 000 passagers seraient transportés au rythme de 85 capsules par heure avec 36 passagers par capsule et 17 h de fonctionnement.

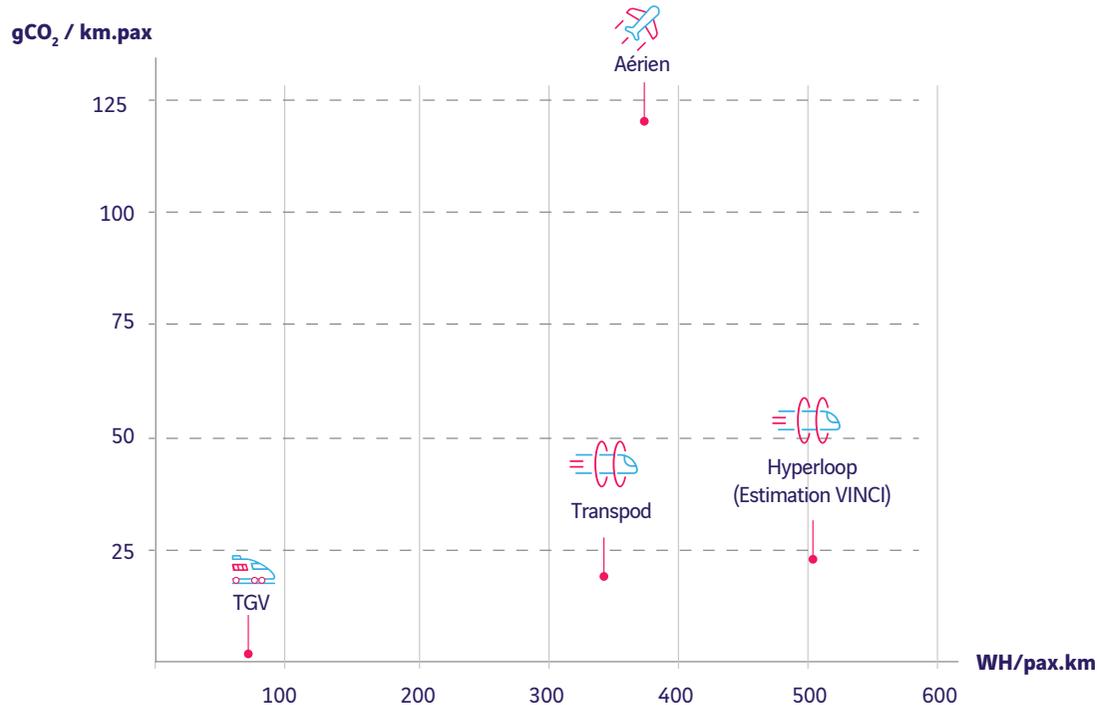
La mise sous vide complète d'un tube de 4 mètres de diamètre et de 1 000 mètres de long en 1 heure nécessite 3 MW. Si elle fonctionne 2 h/j, on obtient une consommation de 230 Wh/pax.km. Pour la propulsion, la puissance d'une capsule est donnée pour 3 MW. En considérant un trajet d'1h30 pour 400 km, la consommation atteint 313 Wh/pax.km.

TransPod et Hardt sous-estiment le besoin énergétique de l'infrastructure. Les coûts d'exploitation (OPEX) de l'Hyperloop seront très sensibles à l'évolution des coûts de l'énergie.



Source : Leonard, sur la base de spécifications techniques fournies par les différents projets Hyperloop

UN BILAN CO₂ QUI DÉPEND DU MODE DE PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ



TGV, aérien, Hyperloop : émissions de CO₂ par kilomètre

Le bilan CO₂ de l'Hyperloop est favorable comparé à celui de l'aérien, mais ce point est à relativiser. Actuellement, le mix énergétique français avec son **électricité massivement décarbonée** favorise l'Hyperloop. Quant au secteur aérien, son bilan CO₂ global pourrait évoluer à son avantage en cas de recours à un biokérosène ou au dihydrogène.

Le bilan n'est pas complet, car les émissions associées à la construction des infrastructures n'ont pas été prises en compte. Elles sont difficiles à estimer à ce stade.



RAPIDE À L'ÉCHELLE EUROPÉENNE, MAIS AU PRIX D'UN LOURD INVESTISSEMENT INITIAL

En se fondant sur les données communiquées par les entreprises Hyperloop :

- Hyperloop serait **plus rapide porte à porte** que les transports à grande vitesse disponibles aujourd'hui.
- L'Hyperloop a des besoins en **investissements** (Capex) très importants et son débit passager sera inférieur à celui de ses concurrents.
- Les estimations actuelles des acteurs du secteur sur la **tarification** ne prennent pas en compte la valorisation du temps gagné.
- La **consommation énergétique** et les **émissions de CO₂** de l'Hyperloop restent à ce jour à quantifier, pour évaluer la pertinence de ce mode de transport par rapport aux LGV classiques et à l'aérien sur des trajets similaires.



Hyperloop

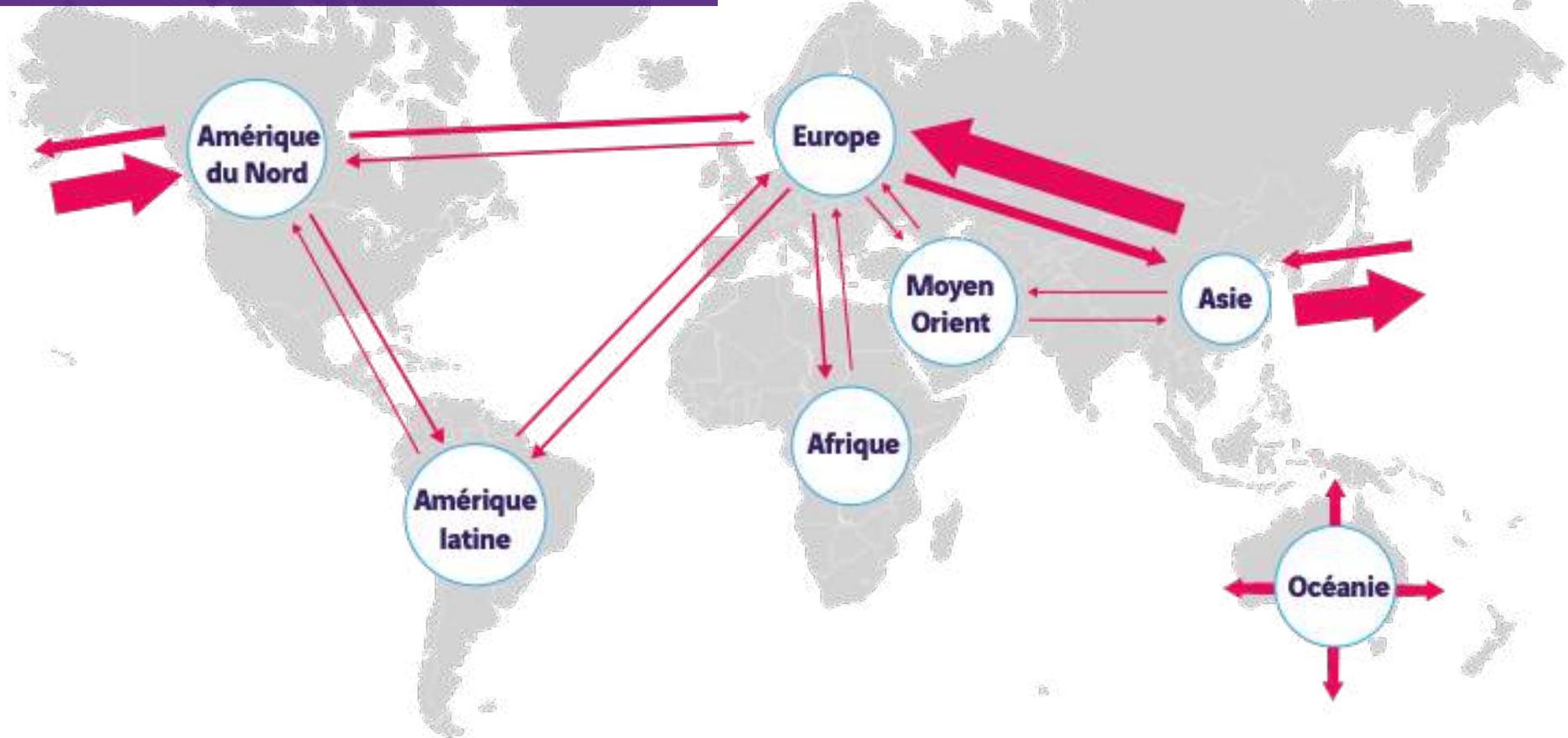
Relever les défis

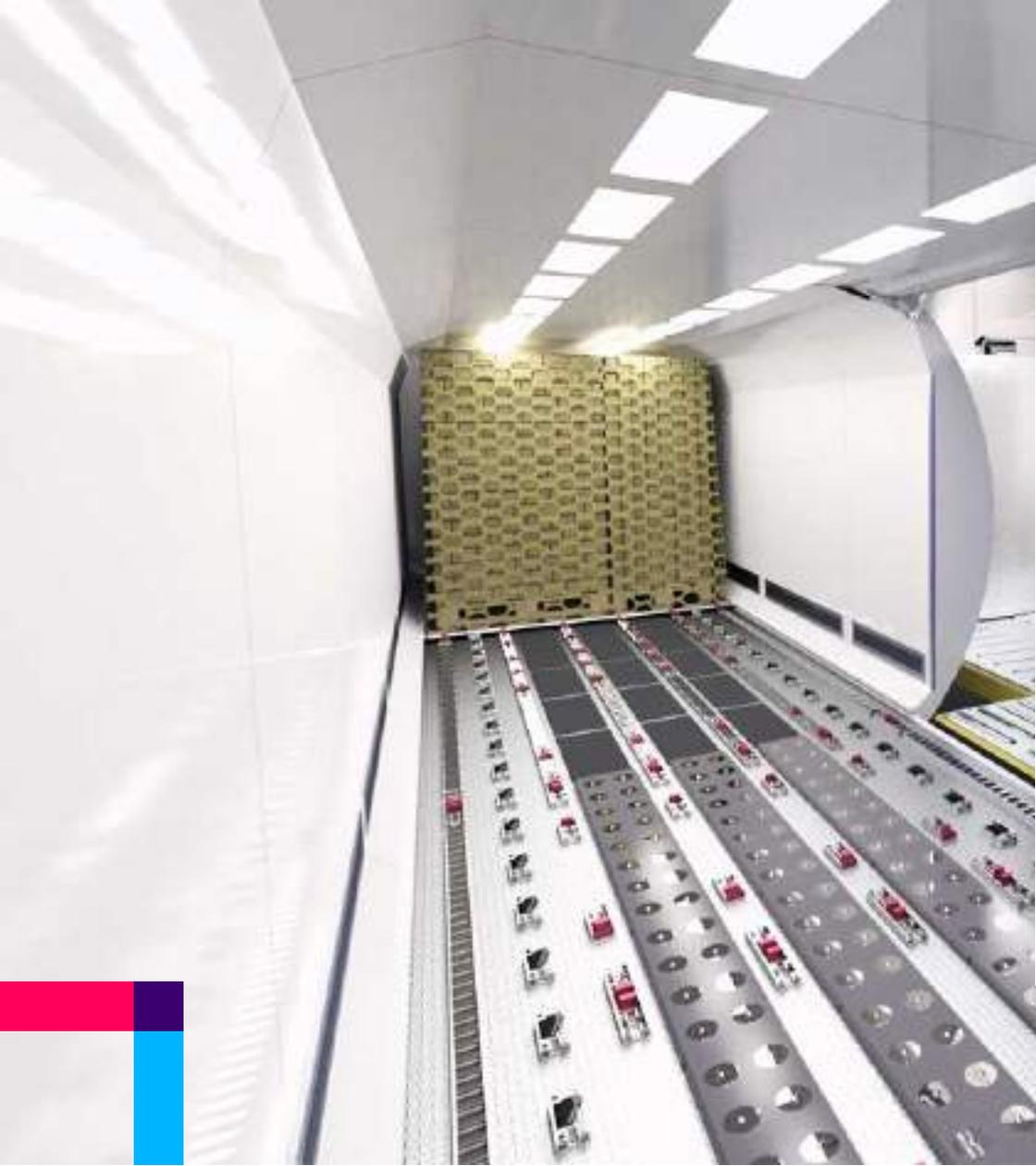
HYPERLOOP POUR LE FRET ?

Le flux de fret express est un moyen d'exploiter l'infrastructure aux heures creuses de la demande voyageurs.



PRINCIPAUX FLUX DU FRET AÉRIEN





Une alternative au fret aérien ?

Pour les expressistes et les messagers, Hyperloop complète ou remplace le fret aérien à condition de créer l'organisation de groupage en amont, puis d'éclatement des flux en aval.

Où sont les voitures ?

Évoqué par Elon Musk pour Hyperloop Alpha, le transport de voitures par Hyperloop n'a été intégré à aucun des principaux projets en cours.

HYPERLOOP

QUEL AVENIR POUR HYPERLOOP ?

Peut-il dépasser le stade de projet ?

➤ MATURITÉ TECHNIQUE À VENIR ET RENTABILITÉ HYPOTHÉTIQUE

Encore au stade de la R&D

L'Hyperloop est un concept avec un niveau de maturité technologique au maximum de 6 sur 9. Les principaux acteurs proposent des solutions différentes et de nombreux verrous techniques restent à lever.

Tenir sans fonds publics ?

La viabilité économique s'appuyant seulement sur des investissements privés n'est pas démontrée à ce stade. Un soutien économique public comparable à ceux dont profitent le ferroviaire ou l'aérien semble nécessaire pour donner une chance à la filière Hyperloop. La pertinence énergétique et environnementale n'est pas non plus démontrée à ce stade.



Opérations et maintenance

Actuellement, les entreprises se concentrent principalement sur le développement technique et sur les levées de fonds pour soutenir leurs activités. L'aspect « Opérations et Maintenance » (O&M) n'a pas encore été abordé et l'ordonnancement des capsules aux stations (départ toutes les 30 secondes), la gestion des usagers ou l'ajustement de l'exploitation à la demande sont encore à définir.



Complémentaire de l'existant

Hyperloop pourrait être envisagé en complément d'offres existantes, avec une capacité inférieure et des prix supérieurs à ceux des TGV et de l'aérien tels que nous les connaissons à ce jour. Il s'agirait d'une offre premium sur des axes à forte demande « business ». En complément, le transport de marchandises présente un intérêt.

➤ OÙ CONSTRUIRE HYPERLOOP ?

Contraintes et opportunités

Le succès commercial de l'Hyperloop dépendra :

- des contraintes de tracé des infrastructures,
- du niveau d'équipement en LGV d'un territoire,
- de l'utilisation d'infrastructures existantes,
- des expropriations et de l'usage du foncier public,
- des contraintes sismiques,
- de l'acceptabilité par les territoires traversés mais non desservis,
- de la disponibilité de financements publics et privés.

Un potentiel concentré sur les territoires sans LGV

Le potentiel de l'Hyperloop semble prometteur sur des territoires nécessitant des connexions intercités fréquentes (intérêts business notamment). Il s'agit notamment de la Chine de l'Est, des Émirats arabes unis, des États-Unis et du Canada. En Europe, ce moyen de transport n'exprimerait son potentiel qu'à l'échelle continentale.

Qui construira Hyperloop ?

Après une compétition fondatrice du secteur, il ne restera finalement **qu'un ou deux acteurs majeurs** sur ce marché. Cela s'explique à la fois par des **besoins de R&D** très capitalistiques et par la difficulté de réaliser une **interopérabilité** entre plusieurs systèmes à terme.

Les acteurs travaillant sur le développement de l'Hyperloop, devront faire face à la concurrence des acteurs du ferroviaire à grande vitesse et de l'aérien.



DÉPLOIEMENT COMMERCIAL : HORIZON 2030 ?

Rédaction :

VINCI – Leonard / Agence Les Récréateurs

Mise en page et illustration :

Agence Les Récréateurs

Crédits photos :

Carnegie Mellon (p. 43, 94, 98)

CRRC (p. 12, 16)

Deutsche Bahn (p. 9)

L'illustration (domaine public – p. 7)

Hardt Hyperloop (p. 63, 65, 89, 116)

Hyperloop Pod Competition (p. 16, 95, 117)

Hyperloop TT (p. 2, 4, 42, 59, 60, 61, 76, 79, 82, 84, 88, 111, 113)

Japan National Railway (JNR – p. 8)

Japan Railway (p. 8, 10, 14)

Neuralink (p. 27)

Paypal (p. 27)

Nevomo (p. 73, 74, 75, 93)

Scientific American (p. 16)

Société de l'Aérotrain (p. 17, 18)

SpaceTrain / Groupe Jacques Vaucanson (p. 19)

SpaceX (p. 27, 28, 32, 34, 35, 36, 37, 39)

SwissMetro / EPFL (p. 21, 22, 23, 24, 25)

Tesla (p. 27, 32, 34, 35, 36, 37, 39)

ThyssenKrupp (p. 8)

Transpod (p. 1, 46, 54, 55, 56, 57, 87, 90, 91, 97, 99, 107, 110, 112, 114, 115)

Virgin Hyperloop (p. 50, 51, 52)

Zeleros (p. 5, 67, 68, 69, 70, 71)