

B O R L I N

MARCHETTI-087

The United Capital of a Unified Germany

From time to time it helps putting Gedankenexperimente into daily life to see what would happen *if*. I take the example of the unification of Germany and the mind-teasing question of the choice of the new capital. The German Parliament chose Berlin, but with such a small majority that one could say it did not choose and only the fine gears of the democratic game showed a result.

Now the choice was between Bonn and Berlin, two cities about 500 km apart. Our Gedankenexperiment consists in constructing a CAM (Constant Acceleration Maglev) between the two cities. The train should run in a pipe with reduced air pressure simulating the atmosphere at 40 or 50 km height, the natural habitat of an hypersonic plane. With pipe and tunnel as straight as a laser beam, the limitations are not on speed but more on the *acceleration* the passenger may be ready to take.

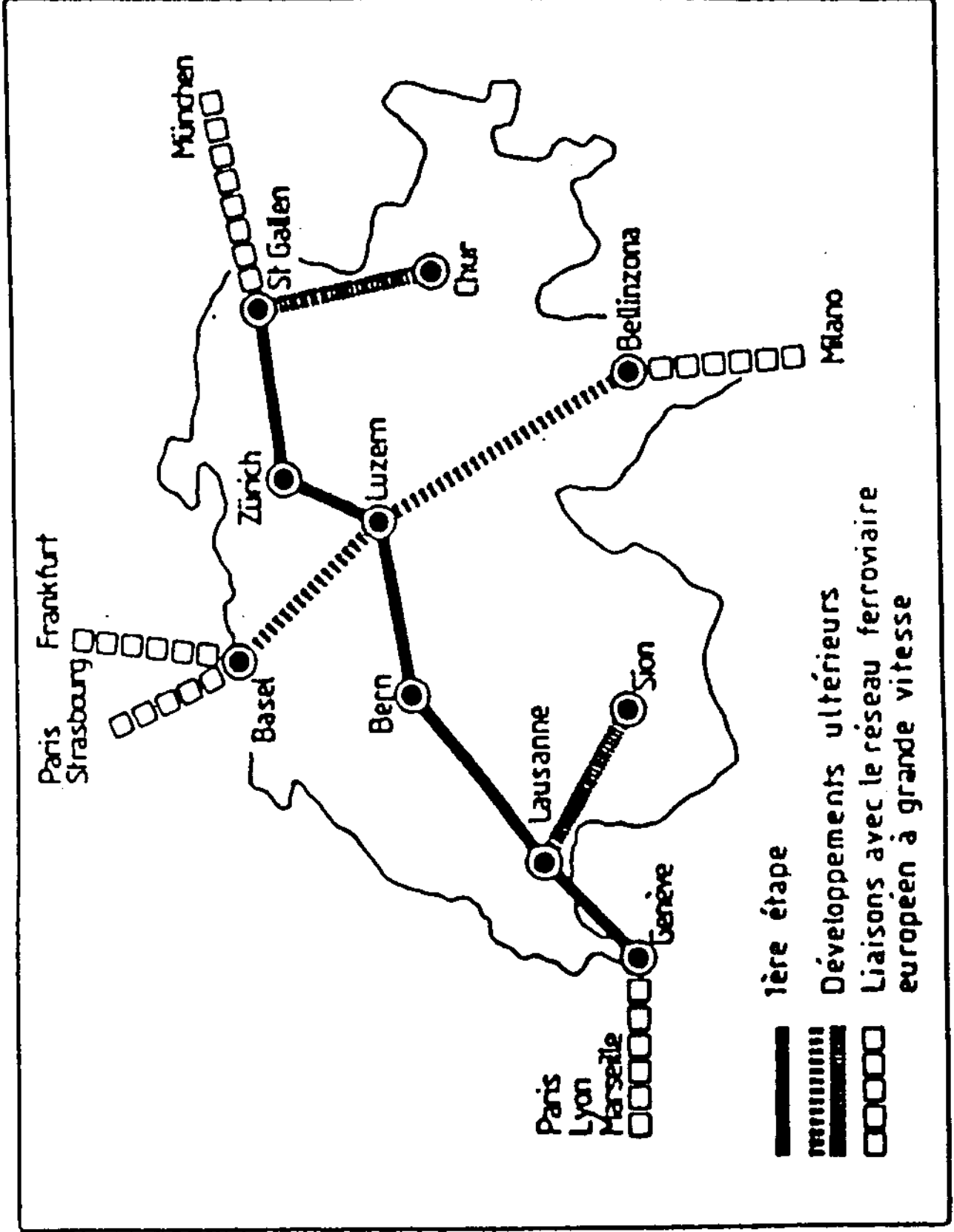
The idea of a Maglev in a depressurized tunnel has recently been elaborated in much detail by a team of the Lausanne Federal Engineering University (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne) in collaboration with the Swiss industry. The objective is to create fast links (\approx 10-minute transit time) between the larger Swiss cities. Because the distances are here relatively short, trains considered are speed-limited ($<$ 500 km/h). Analyzing the fine behavior of people traveling, we find that (working day) commuting time tends to cluster around 50 minutes door to door.

If we could reduce transit time between Bonn and Berlin to less than, say, 20 minutes, then the two cities will behave like one, people working and living on any preferred side. To achieve that we have to have really fast trains, speed is not the real problem from a technical and personal point of view. We perceive acceleration, but not speed. In this context the best we can imagine to shorten transit time is to have a train operating at constant acceleration, pushing half way and braking the other half. The point is what acceleration is acceptable.

Very fast (and expensive) cars may have 0.5 G acceleration from start, and people driving them seem to enjoy that thoroughly. We can take then 0.5 G (5 m/sec^2) as a value acceptable by common mortals. Applying this *acceleration to a train moving between Bonn and Berlin*, half the way pushing and the other half braking, the *journey length* between the two cities would be about *ten minutes*.

Such travel time makes of the two cities one, just as two quarters of the same city, *completely eliminating the need of a choice*. Just not to humiliate too much the smaller city, one could rebaptize the *Kombinat BORLIN*, which would make the capital of Germany still recognizable even in the old atlases.

To get a reliable idea about the costs of such an infrastructure, basically concentrated into the boring of a few hundred kilometers tunnel across the German northern mountains one should make at least a feasibility study as the Swiss have done. Transferring Swiss figures to the German case, the system would cost about 25 billion DM for a three-tunnel system over 500 km. A very reasonable sum if we compare it with the figures given in the press for the transfer of the capital, hinting at an



Réseau Swissmetro envisagé

order of magnitude larger. Most of the cost, about 90%, is concentrated in the boring of the tunnels. If the miners who now bore tunnels to extract coal at taxpayers' expenses were put to that task, presumably the *marginal cost* of that operation would be even more limited. Certainly inferior in any to the costs of transplanting a whole city into another not really ready to absorb it.

So the final result of this Gedankenexperiment is that *Berlin gets the monumental part of government activity*. In city terms it is the "center". Run of the mill activities could be at either places. People can choose to live where they like, except perhaps the Chancellor who has to live in a monumental context, or the ministers on duty. Moving to one side or the other takes the same meaning as moving between different quarters of the same city.

The time necessary to construct the structure could be ten years. Maglevs are already constructed by German industry. They are capable of $700 \div 800$ km/hr top speed. Upgrading to a CAM of the characteristics indicated above would require a complete rethinking of the navigational system, and the adoption of the Japanese levitation system. The number of transits per day at equilibrium (to be reached perhaps in a dozen years) can be estimated by analogy with cities recomposed by a new fast connection (a bridge in place of ferries). At equilibrium the *transits* will be in a range of *one million per day* (one way). This will ensure a fast amortization or very popular fares.

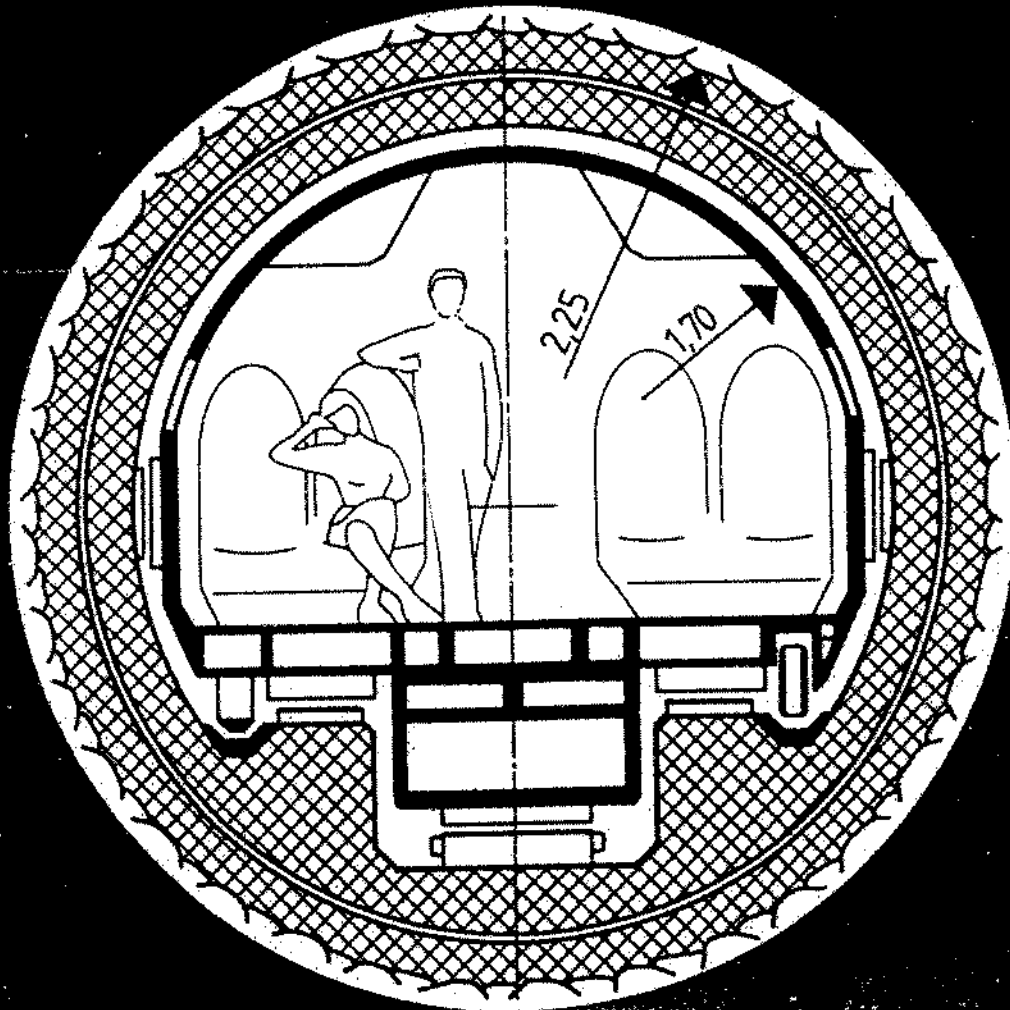
As a bonus the German industry having done that would put Germany in pole position for constructing superfast ground transport worldwide.

C. Marchetti – IIASA, 1991.

Swissmetro

Express sous vide

SWISSMETRO



Transport interrégional à grande vitesse - Le projet SWISSMETRO

R. NIETH, Ingénieur civil EPF, Lausanne, W. BENOIT, F. DESCOEUDRES, M. JUFER, F.-L. PERRET,
Professeurs à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

1 VITESSE ET TRANSPORTS

Pour l'Européen de la fin du 20^e siècle, l'accélération de l'Histoire est une notion évidente, souvent associée au progrès technologique. Mais l'histoire de l'accélération serait plus éclairante en matière de transports, car la recherche de la vitesse est une constante de l'innovation dans ce domaine.

La vitesse répond à la fois à la volonté naturelle de mobilité de l'homme et aux exigences de notre type de société en termes d'attractivité du service offert à l'utilisateur, de limitation des coûts de production ou d'augmentation de capacité des systèmes de transport en réponse à l'explosion démographique.

L'élévation de la vitesse est toutefois fort contraignante sur les plans de la technique, des investissements, de la sécurité, de l'énergie, de l'aménagement du territoire et de l'environnement, d'autant plus que l'attractivité de chaque nouveau réseau de transport en accroît rapidement la charge, les risques et les nuisances. Les conséquences en sont lourdes et parfois paradoxales, par exemple :

- la grande vitesse est centralisatrice, elle favorise la croissance et l'attraction des grandes villes au détriment des petites, par souci de rentabilité des investissements et tendances à espacer les points d'arrêt ou de jonction.
- la grande vitesse est génératrice d'une concentration de trafic sur les lignes prioritaires et donc de congestion terminale ; s'il n'y a pas de saut technologique provoquant un gain considérable sur le temps de parcours, la distribution locale des déplacements risque d'en annuler le bénéfice.
- la grande vitesse est inéquitable pour les populations riveraines, par les nuisances qu'elle peut entraîner en termes de coupure régionale, de bruit ou de pollution si l'on ne trouve pas de compensation adéquate.

Malgré tout, le besoin de mobilité et de liberté de mouvement reste si fort qu'on ne peut imaginer une politique des transports contraire à ce qui s'est concrétisé depuis plus d'un siècle. L'avenir ne saura se passer de la technique pour trouver des solutions nouvelles à des transports toujours plus rapides, sûres et réellement compatibles avec la protection de l'environnement et la sauvegarde du patrimoine bâti. Il est évident qu'une diversification de l'utilisation de l'espace s'imposera selon les distances à parcourir et que l'espace souterrain offre le potentiel le plus prometteur pour les transports urbains et interurbains.

2 TENDANCES EUROPEENNES

Après la réalisation des réseaux de chemins de fer classiques, le rail a cédé la première place aux techniques routières et aéronautiques. Depuis quelques années, la saturation des réseaux autoroutiers et aériens de l'espace européen a revalorisé le chemin de fer et la technologie ferroviaire a considérablement progressé.

"Le développement d'un réseau à grande vitesse apparaît comme un grand projet mobilisateur et fédérateur pour l'Europe"

selon les termes du fascicule des 14 pays regroupant les 12 réseaux de la Communauté européenne et ceux de l'Autriche et de la Suisse.

Si pour les 20 ou 30 années à venir une politique des transports accordant la priorité aux transports publics locaux et régionaux d'une part, interurbains et interrégionaux d'autre part paraît inéluctable, il faudra encore assurer la complémentarité entre le rail et la route, dans une conception européenne garantissant la cohérence mais tenant compte aussi des particularités des nations concernées.

C'est bien pourquoi un petit pays montagneux comme la Suisse s'est engagé à développer son réseau ferroviaire en réalisant le projet Rail 2000 - qui ne peut toutefois pas satisfaire aux exigences de rapidité du TGV faute de place disponible - puis deux nouvelles lignes ferroviaires à travers les Alpes, tout en achevant son réseau autoroutier, avec la ferme intention de promouvoir le trafic combiné rail-route ou ferroutage, seule alternative actuelle à des couloirs de transit routier inacceptables pour la population.

Mais il reste que dans sa technologie actuelle, le chemin de fer rapide présente des limites environnementales de moins en moins négligeables. Et c'est aujourd'hui qu'il faut préparer l'avenir des transports à moyen et long terme.

3 LA SUISSE ET SES PARTICULARITES

Les européens réagissent avec mauvaise humeur lorsque la Suisse prétend être un cas particulier. Sans doute n'ont-ils pas tort lorsqu'il s'agit du contexte historique, culturel et politique, chaque nation pouvant alors revendiquer avec au moins autant de raison ses particularités.

Il y a pourtant une réalité géographique indéniable, et c'est elle qu'il faut considérer dans la politique des transports : les trois caractéristiques principales en sont l'exiguïté du territoire, son relief très accidenté et la forte densité de population sur ses basses régions développées.

La surface de la Suisse ne dépasse guère 41'000 km², dont 60 % sont occupées par les Alpes, 30 % par le Plateau et 10 % par le Jura.

Entre deux chaînes de montagnes le Plateau suisse, qu'il vaut mieux appeler Moyen-Pays, car il n'est ni plat ni horizontal mais vallonné et incliné du pied des Alpes vers celui du Jura, regroupe plus des deux tiers de la population (4.6 millions sur 6.7 au total) sur moins d'un tiers du territoire avec une densité démographique d'environ 400 habitants au km².

En considérant cette région comme une grande métropole, dont elle a la population, étirée sur environ 300 km, avec des centres-villes (Genève, Lausanne, Berne, Lucerne, Zurich, St-Gall) distants chacun de 40 à 80 km, entrecoupés de zones vallonnées habitées, cultivées et exploitées par toutes sortes d'activités, le problème du développement d'un nouveau réseau de transports à superposer à ceux très denses existants se pose en termes de contraintes claires et multiples. La solution exige une ligne de forte capacité, à grande vitesse et quasi indépendante de la surface déjà trop encombrée : l'idée d'un super-métro s'impose d'elle-même.

Cette ligne d'orientation est-ouest implique tout aussi logiquement un complément de réseau à tendance nord-sud, franchissant les barrières jurassienne et alpine, pour relier Bâle à l'entrée de la plaine d'Alsace au Tessin par Lucerne ou Zurich (Fig. 1), avec des possibilités de liaison au réseau ferroviaire européen à grande vitesse, voire des développements ultérieurs.

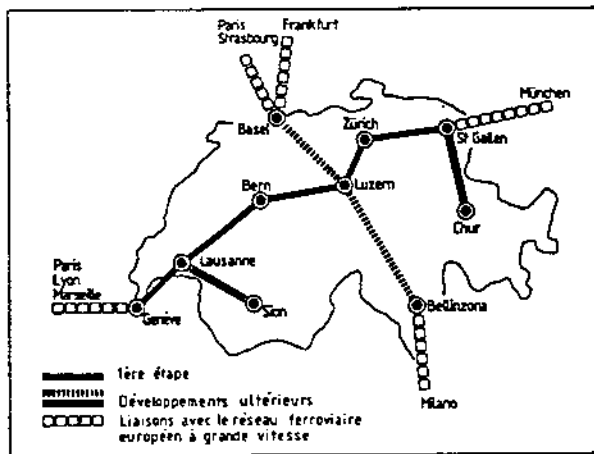


Fig. 1 Réseau Swissmetro envisagé : une double transversale, des prolongements possibles et des liaisons au réseau ferroviaire rapide européen.

4 LE PROJET SWISSMETRO

La recherche d'un nouveau moyen de transport, complémentaire à ceux existants - dont les améliorations en cours permettront "simplement" de consolider les liaisons interurbaines et la pénétration dans les zones à plus faible densité - a été abordée dès la fin des années 70. Le système devait impérativement satisfaire aux exigences de la politique concernant la protection de l'environnement, l'indépendance énergétique, la mobilité géographique et le marché du travail. En performance de transports il fallait viser la vitesse, la sécurité et la rentabilité économique.

Le projet Swissmetro est fondé, en conséquence, sur l'application de quatre technologies complémentaires :

- une infrastructure entièrement souterraine, sous la forme principale de deux tunnels forcés de petit diamètre, inférieur à 5 m, avec des stations connectées aux réseaux des transports publics existants.
- un vide d'air partiel maintenu dans les tunnels pour économiser l'énergie de propulsion des véhicules pressurisés, inspirés d'une cellule d'avion.
- un système de propulsion par moteurs électriques linéaires solidaires des tunnels eux-mêmes.
- un système de sustentation et de guidage magnétique autorisant des vitesses de circulation maximales de l'ordre de 400 à 500 km/h entre les centres urbains reliés par le réseau souterrain.

L'idée a été développée pour le transport-voyageurs, mais sans écarter l'application au transport des marchandises. Considérée au départ comme relevant de la science-fiction puis de l'utopie, elle a tout de même progressé dans l'opinion publique comme dans les milieux techniques et politiques. A partir d'une préétude effectuée à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne montrant que le projet était maîtrisable, l'intérêt du département fédéral des transports, des communications et de l'énergie s'est traduit par un mandat d'étude de faisabilité complété par la participation active de certains groupes industriels. Notre ministre des transports, M. le conseiller fédéral Adolphe Ogi a lui-même présenté le projet Swissmetro en 1989 à la Conférence européenne des ministres des transports et confirmé l'intention de poursuivre les études dans un cadre qui pourrait s'élargir à un Eurometro (Journée Alp Transit du 21 juin 1990, Transports 90 à Munich).

Les particularités techniques de Swissmetro peuvent être brièvement décrites telles qu'elles ont été prises en compte au stade de démarrage du mandat d'étude en cours.

4.1 Infrastructures

La préétude des infrastructures a porté sur le tracé Genève-St-Gall, situé à une profondeur moyenne de l'ordre d'une quarantaine de mètres dans le substratum molassique du Plateau suisse. Les tunnels avec les aménagements souterrains et les liaisons à la surface, stations urbaines et puits intermédiaires pour l'exécution et l'exploitation, représentent plus du trois quarts de l'investissement du projet. L'importance en est donc déterminante, des études multi-critères portant sur le choix du tracé et des variantes des systèmes devront permettre une optimisation de l'ensemble construction-exploitation.

Les conditions géologiques sont relativement bien connues, régulières et favorables au creusement par tunnelier. L'expérience de galeries forcées en molasse à des diamètres comparables à ceux du projet, entre 4.50 m et 5.00 m, concerne de nombreux ouvrages tels que les accélérateurs souterrains du CERN, les galeries pilotes de tunnels autoroutiers et des galeries hydrauliques. Il ne s'agit pas d'aventure technologique mais d'organisation rationnelle de la mise en œuvre de techniques éprouvées. Hors du rocher, le franchissement de quelques sillons morainiques ou alluviaux sera réalisé par des chantiers particuliers au tunnelier à front confiné ou par traitement préalable du terrain.

Etant donné le petit diamètre du tunnel Swissmetro, comparativement aux tunnels ferroviaires et routiers ordinaires, le volume des déblais n'est pas exceptionnel. A titre d'exemple, le double tunnel entre Genève et St-Gall représenterait une excavation de 10 mio de m³ alors que l'ensemble des tunnels des routes nationales suisses totalisera 20 mio de m³, une fois le réseau achevé.

Le profil-type des tunnels (fig. 2) prévoit un soutènement en voussoirs préfabriqués posés probablement à l'abri d'un bouclier associé à un tunnelier classique. L'étanchéité doit répondre à des exigences particulières du fait de la mise sous vide partiel de l'ouvrage ; il est possible que l'étanchéité intercalaire habituelle soit remplacée par une membrane intérieure, métallique ou non, évitant le dégazage du béton de revêtement.

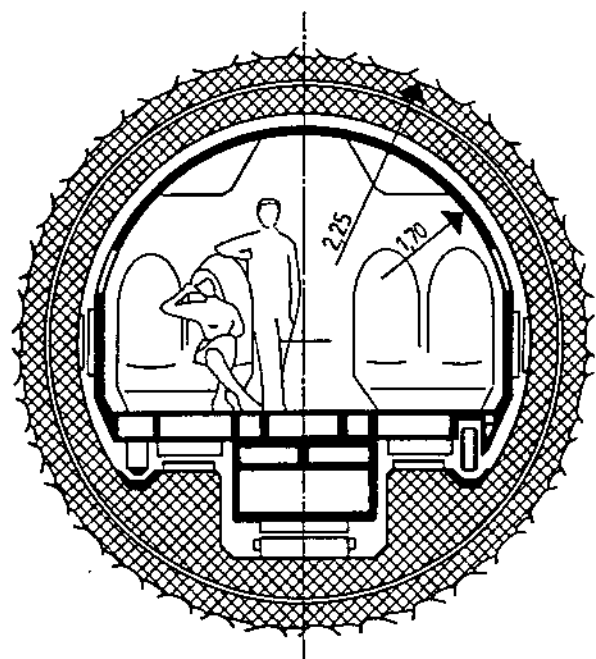


Fig. 2 Profil du tunnel et du véhicule Swissmetro.

Pour la construction, des puits d'accès seront réalisés tous les 15 km environ lorsque les conditions topographiques ne se prêtent pas à l'ouverture de fenêtres latérales. Ces ouvrages pourront être aménagés pour les systèmes nécessaires à l'exploitation.

La présence de deux tunnels parallèles permettra de fonctionner soit en un seul tube de trafic alterné avec utilisation du deuxième tube en galerie de service et d'entretien, soit en trafic double à sens unique aux heures de forte demande de capacité.

4.2 Vide d'air

Le transport sous vide présente l'avantage d'économiser une part prépondérante de l'énergie de propulsion et il n'y a guère d'autre solution pour atteindre de très grandes vitesses dans un tunnel de gabarit limité à celui du véhicule, dont l'effet de piston devient rapidement prohibitif.

La pression d'air serait réduite à une dizaine de Torr, ce qui correspond à l'état de l'atmosphère à environ 15'000 m d'altitude où volent les avions. La réalisation et l'entretien du vide sont envisagés au moyen de pompes déjà commercialisées. Leur nombre et leur puissance dépend notamment du temps que l'on veut consacrer à l'opération initiale de mise sous vide. Quant à l'entretien du vide, il sera fonction des pertes aux sas d'accès et de la perméabilité à l'air des parois.

Etant donné les options prises dans la préétude, on pourrait, lors de la mise en service, réaliser le vide nécessaire en une semaine au moyen de deux pompes de 9 kW espacées tous les 5 km dans chaque tunnel. Une seule pompe suffirait ensuite à l'entretien du vide, la seconde restant en place comme pompe de réserve. L'alimentation serait assurée par le réseau 50 Hz/380V.

4.3 Propulsion

Des véhicules propulsés par moteurs linéaires et maintenus au-dessus de leur support par une force magnétique sont déjà réalisés en Allemagne et au Japon.

Si techniquement ces véhicules sont quasiment prêts à circuler comme moyen de transport à des vitesses de l'ordre de 500 km/h, il ne connaîtront probablement pas un développement important étant donné qu'ils nécessitent une consommation d'énergie très élevée et une occupation au sol non négligeable. Avec le vide partiel prévu dans le projet Swissmetro, le problème énergétique peut être résolu et, bien que les principes de base de la propulsion et de la lévitation soient les mêmes, les applications sont notablement différentes.

Contrairement à la conception habituelle qui veut que les moteurs soient portés par le véhicule, le système Swissmetro serait propulsé par des moteurs linéaires fixés au tunnel, les induits étant quant à eux liés aux véhicules. La disposition des moteurs et leur puissance dépendent de facteurs économiques et relatifs au confort des voyageurs. Si l'on veut par exemple accélérer et obtenir une vitesse élevée sur une courte distance, il faudrait des moteurs puissants, donc coûteux et impliquant un investissement important pour la distribution d'énergie (fig. 3). En outre, l'accélération pourrait être ressentie désagréablement par l'usager. Il y a donc un optimum à trouver. Il est évident que la vitesse dépendra de cette optimisation et que plus la distance entre deux arrêts sera grande plus la vitesse pourra être élevée.

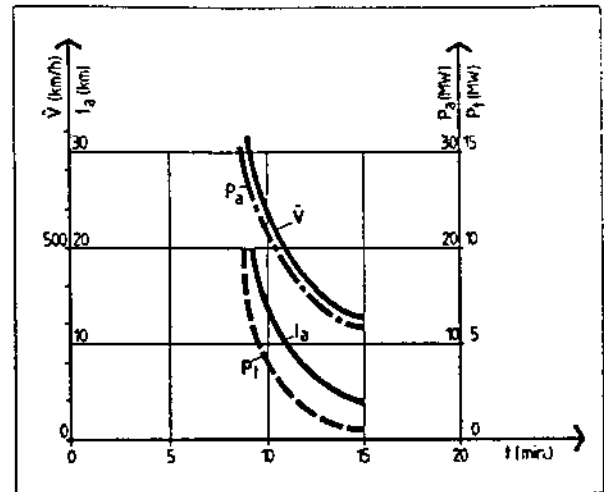


Fig. 3 Analyse de la sensibilité des paramètres de propulsion, sur un tronçon type de 70 km :

- \hat{V} : vitesse maximale, constante en palier
- l_a : longueur du trajet d'accélération/freinage
- P_a : puissance moyenne d'accélération ($a = 1 \text{ m/s}^2$)
- P_f : puissance moyenne sur le tronçon
- t : temps de parcours

La préétude a montré que pour les distances qui séparent les grands centres urbains de la Suisse, des vitesses maximales de l'ordre de 400 à 500 km/h sont réalisables, la consommation d'énergie par voyageur étant 8 fois plus faible que celle nécessaire au transport à 250 km/h par TGV (fig. 4). Afin d'améliorer notablement cette performance, on peut envisager aujourd'hui, de façon réaliste, la récupération de l'énergie au freinage. Il n'en a pas été tenu compte lors de la préétude.

Un bilan énergétique associant les consommations nécessaires à la construction du réseau et à l'exploitation reste à faire, mais il devrait se situer favorablement par rapport aux autres moyens de transport. Quant à la technologie du transport par moteurs linéaires elle est réalisée à plus petite échelle dans le transport de sacs postaux en centres de tri ou dans des fabriques de verre dans les chaînes de production.

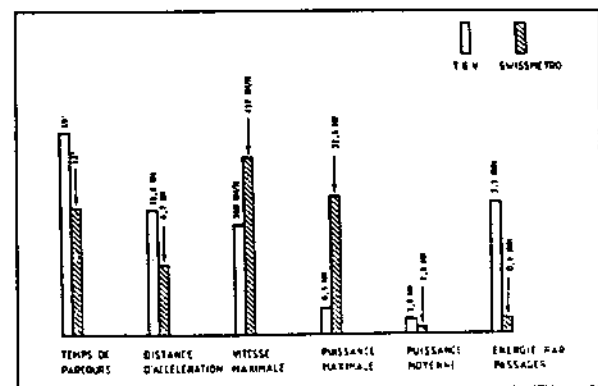


Fig. 4 Comparaison des performances TGV - Swissmetro pour un tronçon type de 70 km.

4.4 Sustentation

Seule la sustentation magnétique permet d'assurer un guidage économique à des vitesses supérieures à 300 km/h. De plus, elle supprime toute usure, ce qui entraîne des économies importantes sur les coûts d'entretien et de renouvellement du matériel. Le bruit est en outre totalement éliminé.

La préétude a mis en évidence deux solutions pour cette sustentation : par répulsion ou par attraction. Dans la technologie à répulsion, la sustentation est réalisée par l'interaction entre des bobinages excités à courant électrique continu sans réglage, fixés au véhicule, et une bande de métal conductrice (aluminium) fixée au sol. L'alimentation électrique peut être assurée par des batteries ou par le recours à des bobines supraconductrices. Le véhicule "décolle" lorsque la vitesse s'accroît. Il "atterrit" lorsqu'elle descend au-dessous d'une certaine limite.

La technologie par attraction combine l'interaction d'électro-aimants réglés, également alimentés en courant continu, mais interagissant avec des rails métalliques placés au-dessus des aimants.

Le choix de l'une ou de l'autre technologie dépendra du bilan énergétique (effet de traînée minimum) et de la fiabilité.

Une panne du système de propulsion n'affectera pas la sustentation, la source d'alimentation étant différente. Dans un tel cas le véhicule sera freiné mécaniquement par frottement et il atterrira normalement. La probabilité que les aimants du système de sustentation soient défectueux d'un seul coup est très faible. Toutefois, si cela devait arriver, le véhicule tomberait de quelques centimètres sur son support. Muni de patins, il serait freiné et guidé.

Les progrès récents dans le domaine des matériaux supraconducteurs ne peuvent qu'influencer favorablement les possibilités technologiques en matière de propulsion et de sustentation.

4.5 Véhicule et stations

Le véhicule Swissmetro présentera des analogies avec une cellule d'avion. Un diamètre de 3.4 m est prévu et sa longueur pourrait être de 200 m. L'intérieur pressurisé et confortable aurait alors une contenance de 800 places assises. Aux arrêts, des sas et portillons automatiques permettront l'entrée et la sortie des voyageurs (fig. 5). Le véhicule sera équipé d'installations de sécurité qui ne seront utilisées qu'exceptionnellement ; il s'agit de patins pour les freinages et guidages, de roues et d'un moteur autonome pour lui permettre de rejoindre soit la station suivante soit une sortie de secours. Ces dernières sont combinées avec les stations de pompage et d'évacuation d'air disposées tous les 5 km.

Les conditions de transport étant similaires dans les tunnels Swissmetro à celles que l'on trouve à 15'000 m d'altitude, d'une part, et les techniques de construction des cellules d'avion étant parfaitement maîtrisées, d'autre part, la mise au point du véhicule devrait en être facilitée.

Les stations souterraines (fig. 6) doivent être reliées au réseau des transports publics existants par des systèmes mécaniques rapides. L'implantation dépend évidemment des conditions particulières à chaque centre urbain : sous gares centrales si l'accessibilité et le parcage sont satisfaisants, sous stations décentralisées ou en périphérie dans le cas contraire ; des réaménagements seront de toute façon nécessaires.

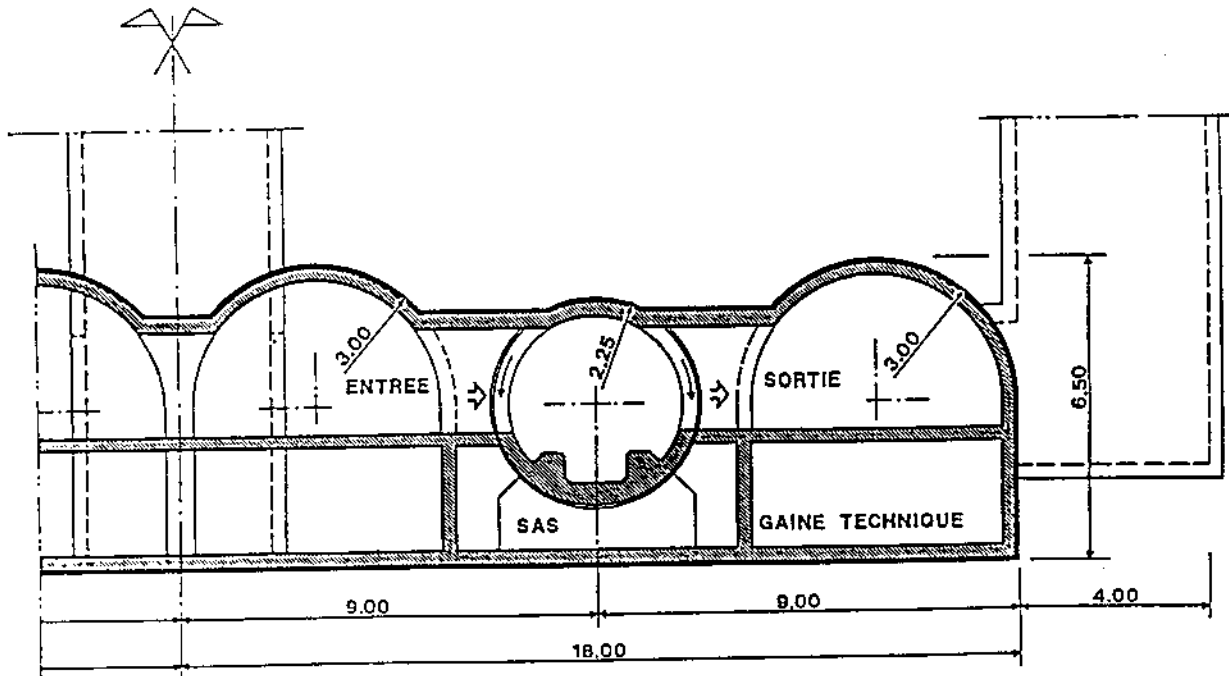


Fig 5 Coupe schématique d'une station Swissmetro avec sas et portillon automatique d'entrée et de sortie.

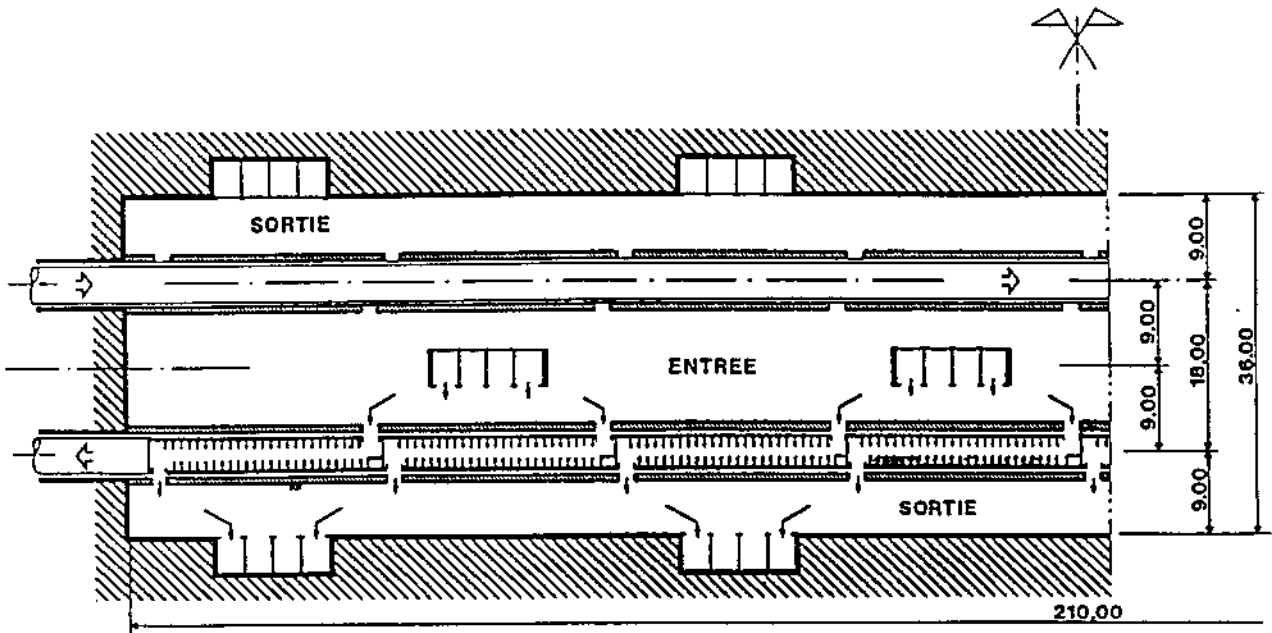


Fig. 6 Plan de station-type avec quais d'accès.

4.6 Exploitation

Le temps de parcours entre les stations peut être maintenu constant - 12 min - en adaptant la vitesse à la longueur des tronçons ; les arrêts seraient de 3 min. Aux heures de pointe, en circulation unidirectionnelle dans chaque tube, la fréquence de quatre convois par heure est facile à assurer, voir huit si nécessaire.

L'insertion du Swissmetro dans le système des transports européens implique un changement de mode aux extrémités du réseau ; cet inconvénient est très relatif s'il se réalise dans les conditions de transbordement du type TGV-RER ou train-métro de façon générale. Cela d'autant plus que les gains de temps de trajet en Suisse seraient énormes : Genève-Zurich en 57 min au lieu des 175 min par le train actuel, soit un facteur 3, par exemple.

4.7 Coûts et délais de réalisation

Les premières études ont montré que les investissements d'infrastructures sont comparables à ceux de nouveaux tracés d'autoroutes ou de chemins de fer, à supposer que ceux-ci puissent encore être envisagés dans les conditions helvétiques à venir.

La réalisation d'une première étape de 70 km peut être envisagée en 15 ans moyennant un investissement de l'ordre de 2,5 milliards de francs suisses, dans les conditions géologiques relativement favorables du Plateau suisse.

5. CONCLUSIONS

Le projet SWISSMETRO répond à un ensemble de contraintes de moins en moins contournables en matière de conservation du patrimoine, de protection de l'environnement, de sécurité et d'économies d'énergie. Il présente suffisamment de qualités en vitesse et en capacité pour qu'on puisse l'envisager comme le transport public de la prochaine génération. Dans un pays qui fut une nation de pionniers et d'entrepreneurs, un grand projet touchant de nombreux secteurs économiques mérite analyse et développement si l'on réalise que l'utopie technologique d'hier pourrait bien devenir la vérité de demain.