

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 117 (1991)
Heft: 8

Artikel: Quelques aspects de l'économie des grands tunnels routiers
Autor: Lombardi, Giovanni
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77604>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Quelques aspects de l'économie des grands tunnels routiers¹

Introduction

Le rôle économique éminent que jouent les réseaux routiers dans notre société ne doit certainement pas être souligné en ce lieu.

Nous voudrions toutefois présenter quelques considérations sur l'économie des tunnels de grande longueur qui se distinguent par certains aspects des autres ouvrages constituant les réseaux routiers ou autoroutiers.

PAR GIOVANNI LOMBARDI,
LOCARNO

En effet, alors que la plupart des éléments d'un tel réseau sont des ouvrages statiques – si l'on ose dire – dont on définit le coût de construction et les frais d'entretien, en vue d'assurer certaines prestations, les tunnels routiers de grande longueur s'apparentent davantage à des installations industrielles plus dynamiques. (Cela est valable certes aussi pour des entreprises ferroviaires telles que le tunnel sous la Manche.)

Nous traiterons donc l'aspect économique des tunnels, en nous référant parfois, ou même souvent, au tunnel du Saint-Gothard qui est, et restera sans doute encore longtemps, le plus long tunnel vraiment routier au monde.

Les tunnels de grande importance – et nous ne parlerons que de ceux-là – sont en fait des installations de production qui absorbent des coûts de gestion importants et consomment des quantités d'énergie considérables dans le but de produire des conditions acceptables tant du point de vue de l'éclairage que de la qualité de l'air ou de la sécurité des utilisateurs.

Le fait que les coûts de ces prestations soient indemnisés directement par chaque utilisateur au moyen d'un péage ou soient au contraire « absorbés » par la collectivité et indemnisés finalement d'une façon globale – par exemple par les consommateurs d'essence ou les contribuables – ne joue ou ne devrait jouer dans nos considérations qu'un rôle secondaire. Le but premier de l'auteur d'un projet devrait

être de *minimaliser le coût économique global* de l'opération moins pour des considérations financières que dans l'intérêt général.

Certes, cette vision des choses est parfois quelque peu théorique et optimiste en raison, en particulier, du fait que fréquemment certains frais sont supportés par une collectivité alors que d'autres avantages profitent à un collectif d'utilisateurs défini d'une façon différente, la collectivité qui finance

étant souvent l'ensemble des contribuables.

Mais faisons abstraction de ces contingences, hélas déterminantes parfois, en faveur d'une vision quelque peu idéalisée de la réalité.

Si nous nous limitons aux problèmes de la ventilation, l'installation industrielle dont nous parlions pourrait au mieux être comparée, d'un point de vue physique, à un aménagement hydroélectrique, sauf que l'eau y est remplacée par l'air et qu'il ne s'agit pas de produire le plus d'énergie, mais au contraire d'en consommer le moins possible.

Cela explique que nous ayons essayé de transposer au projet du tunnel du Saint-Gothard l'expérience acquise dans le domaine des aménagements hydroélectriques.

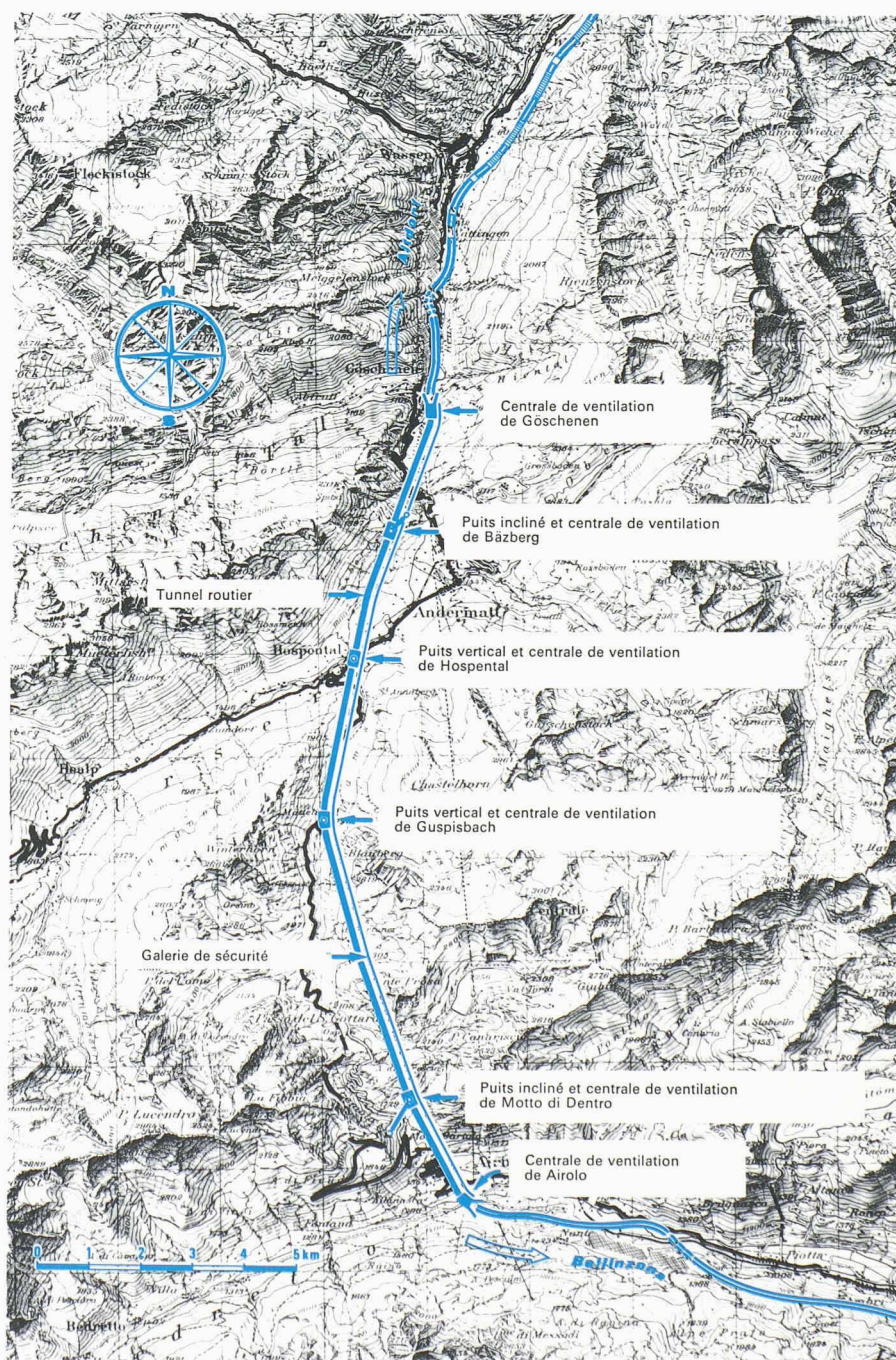


Fig. 1. – Le tunnel du Saint-Gothard. Plan.

¹ Exposé présenté à la session du Comité de direction du Programme de recherche en matière de routes et de transports routiers (RTR) de l'OCDE à Lugano, le 23 novembre 1990.

Tunnels routiers et macroéconomie

Dans la recherche d'un optimum économique, de nombreux aspects devraient être pris en considération. Tout d'abord des questions de macroéconomie, donc d'économie générale des transports, doivent être résolues. En principe ces problèmes sont étudiés dans le cadre général du réseau routier et non dans celui plus restreint et spécifique du tunnel lui-même qui n'est qu'un élément de ce réseau. Le problème est fort complexe et lié à celui plus général du transport routier et de sa justification, objet actuellement de discussions fort engagées. On ne peut certainement l'aborder ici, mais nous mentionnerons néanmoins la différence qu'il convient de faire entre économie et finance, en ce sens que tout ce qui peut se financer n'est pas de ce fait économiquement raisonnable et que, inversement, des mesures qui se justifieraient pleinement d'un point de vue économique ne peuvent souvent pas être payées.

Cela nous amène à croire que l'on s'écartera «parfois» d'une allocation optimale des ressources.

Le trafic lui-même, qui est le but et la justification d'un ouvrage et d'un tunnel en particulier, est certes difficile à appréhender d'un point de vue économique.

Pour ce qui est du tunnel et de l'axe routier du Saint-Gothard, on pourrait distinguer les principaux facteurs qui déterminent le trafic comme suit :

- la différence de ce que nous pouvons appeler le potentiel climatique du nord et du sud de la Suisse d'une part, et du nord et du sud de l'Europe d'autre part, est la cause d'un intense trafic touristique qui suit ses propres lois ;
- la différence de potentiel économique qui s'est traditionnellement établie entre le sud et le nord des Alpes, en raison d'une barrière naturelle qui n'a été franchie par le réseau autoroutier que voici à peine dix ans, est à l'origine d'un certain trafic de marchandises entre le canton du Tessin et le reste de la Suisse - trafic soustrait d'ailleurs en partie au rail ;
- un facteur plus important, déterminant même - qui n'avait pas été pris en considération voici vingt-cinq ans, au moment de la conception de l'ouvrage, et qui ne pouvait certes pas l'être non plus à cette époque - est l'évolution économique générale de l'Europe qui a pris un essor considérable non prévu ni prévisible ;
- en outre, comme nous le savons bien, les barrières douanières, monétaires et fiscales entre les pays qui nous entourent tombent successivement et des régions sont mises

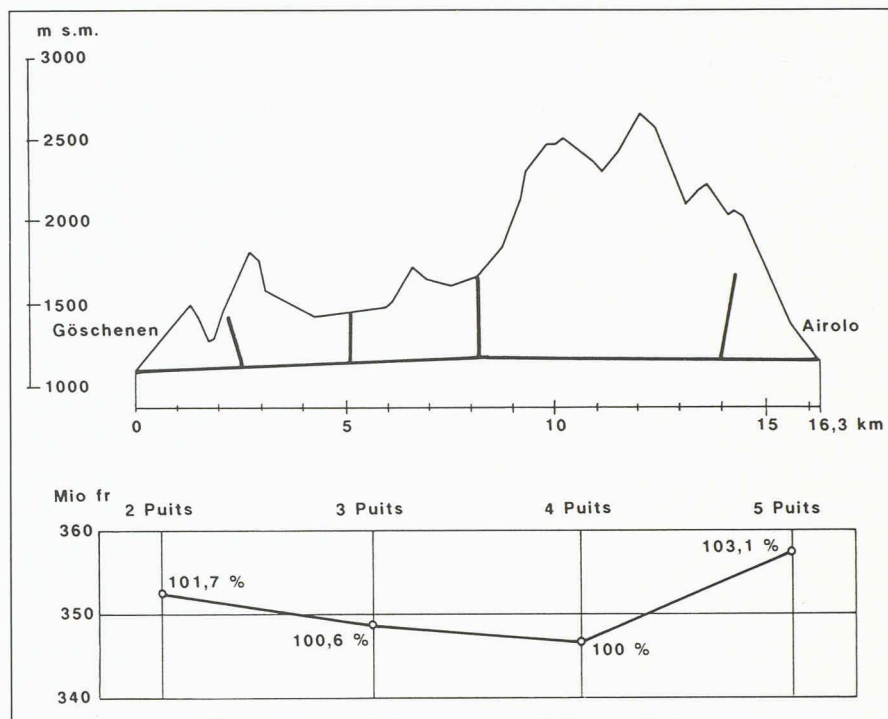


Fig. 2. - Exemple de variable discrète. En haut: profil longitudinal du tunnel du Saint-Gothard et solution retenue avec quatre puits. En bas: coût de comparaison (prix de 1968) en fonction du nombre de puits.

en contact direct, tandis que leur potentiel économique est encore fort inégal ;

- à tout cela s'ajoute ce trafic apparemment désordonné, que l'on pourrait qualifier de type brownien, qui se superpose, comme pour chaque axe routier, aux courants principaux.

En réalité, l'Europe économique se fait avant que les économies des divers pays n'aient atteint une certaine homogénéité. Il s'ensuit que les différences de salaires, de disponibilités de capitaux, de dispositions légales sur le travail et l'environnement, les conditions sociales et culturelles différentes aussi, génèrent des volumes considérables de transport, car certaines opérations industrielles peuvent se faire plus facilement ou plus économiquement dans des lieux distants de 1000 ou de 2000 kilomètres que sur place.

Il est hors de doute, de surcroît, que des considérations plus générales comme le coût des carburants, les péages, les taxes sur les véhicules, bien d'autres charges fiscales ou subventions, et enfin certaines dispositions légales ont une influence positive ou négative sur le volume de trafic lourd en forte croissance qui s'observe le long de l'autoroute du Saint-Gothard. Toutefois nous ne parlerons pas du problème fort actuel de la répartition de ce trafic entre la route et le rail, car cela mènerait trop loin.

Microéconomie des tunnels routiers

Tout cela étant bien connu et pouvant être considéré comme une donnée liminaire du problème, il convient d'examiner maintenant quelques aspects de la microéconomie des tunnels routiers.

Il va de soi que comme toute étude de microéconomie industrielle, celle-ci ne peut se faire que dans le cadre d'une macroéconomie préexistante, dont les conditions sont données par la politique des transports.

Bien souvent, en outre, le tracé du tunnel est imposé par des choix faits sur la base de considérations topographiques ou géologiques. Il s'ensuit que toute optimisation n'est pensable que dans le cadre d'un référentiel bien défini. De nombreux éléments sont donnés a priori, même s'ils sont discutables. En outre, un certain nombre de conditions limites doivent être respectées, telles les dispositions légales sur les véhicules ou la circulation, tels certains objectifs de la politique des transports, telles encore de nombreuses prescriptions relatives par exemple à la qualité de l'air, à la sécurité d'exploitation et du trafic, aux installations électriques et ainsi de suite.

Malgré toutes ces contraintes, une marge de manœuvre assez vaste dans le choix des éléments d'un projet de tunnel est encore laissée à l'ingénieur.

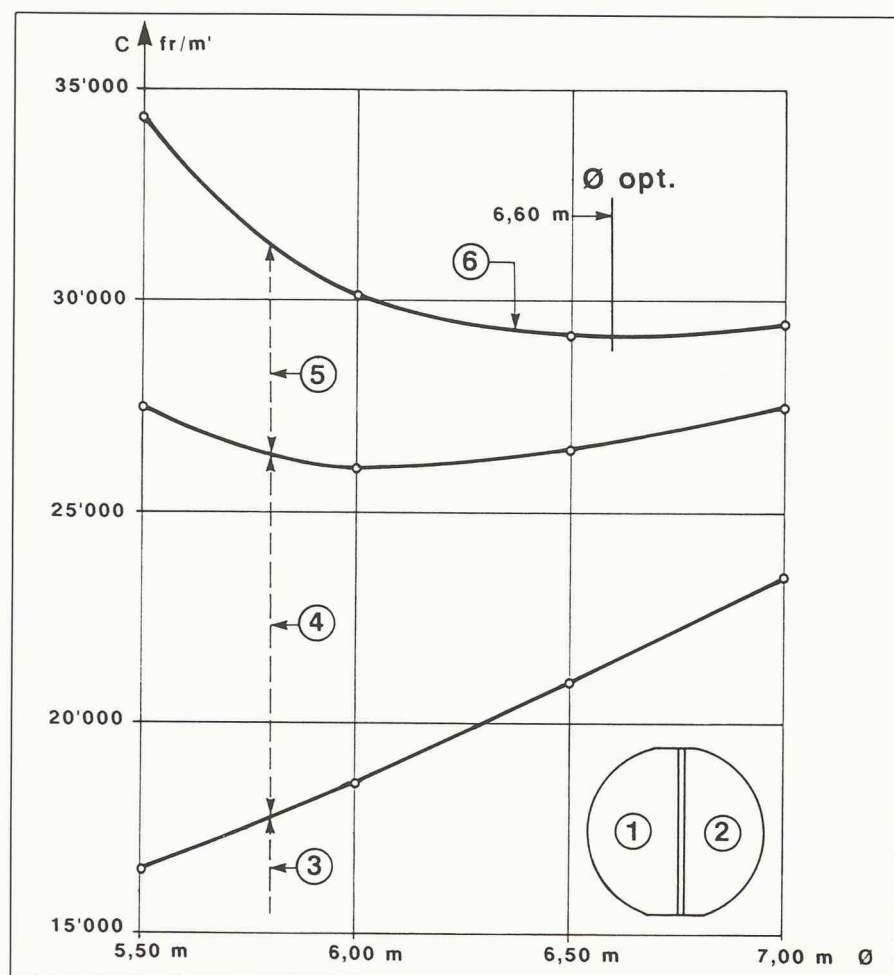


Fig. 3. – Exemple de variable continue. Recherche du diamètre optimal d'un puits de ventilation pour un débit d'air maximal total de 1148 m³/s.

C = coût au mètre (prix de 1968)

Ø = diamètre

① = air frais

② = air vicié

③ = coût de construction par mètre

④ = coût équivalent de l'équipement électromécanique correspondant

⑤ = coût capitalisé de l'énergie consommée par mètre de puits

⑥ = coût total de comparaison déterminant

Pour l'essentiel, il s'agit de définir une pondération optimale entre les coûts de construction et d'investissement d'une part et les coûts consécutifs d'exploitation d'autre part. Il va de soi que cela mène à un projet différent de celui auquel on arriverait si l'on envisageait uniquement de minimiser les coûts de construction.

Recherche d'une solution optimale pour le tunnel du Saint-Gothard

Après que de nombreuses et longues études préliminaires eurent été menées à bien, la mise au point du projet du Saint-Gothard a eu lieu voilà presque vingt-cinq ans déjà, dans le cadre d'un concours de projets entre quatre bureaux d'études spécialisés. Le souci de notre bureau à ce moment-là a été non de réduire les coûts de construction à leur minimum, mais bien de minimiser les coûts totaux d'exploitation en tenant compte évidemment

des coûts du capital engagé, même si dans le cadre financier des routes nationales suisses on ignore encore ce facteur.

Tout d'abord, un nombre élevé de variables discrètes ont été explorées. Parmi elles, la plus importante était sans doute le nombre des puits de ventilation et leur position le long de l'axe du tunnel. L'étude a nettement indiqué qu'une subdivision du tracé en tronçons de longueurs différentes et, partant, des distances variables entre les puits, était celle qui pouvait tirer le plus grand parti possible des conditions topographiques et géologiques. Finalement nous avons été amenés à choisir quatre puits de ventilation dont deux verticaux et deux inclinés avec des distances plus grandes sur le tronçon sud, là où la couverture est plus importante que sur le tronçon nord où cette couverture est plus faible. Cette disposition a conduit à choisir des sections transversales du tunnel plus grandes au sud qu'au nord.

Il est à notre avis évident que pour des ouvrages de cette longueur on ne saurait se laisser guider par des normes rigides relatives au profil transversal du tunnel.

Une fois le schéma de ventilation ainsi défini, on a recherché les sections optimales des conduits d'air tant le long du tunnel que dans les puits de ventilation eux-mêmes. Indirectement on déterminait ainsi les vitesses maximales de l'air frais et de l'air vicié.

Pour cela, il fallait tenir compte non seulement des frais de construction des conduits qui augmentent avec la section, des coûts capitalisés de l'énergie nécessaire pour la ventilation qui, eux, augmentaient évidemment à peu près avec le carré des vitesses, mais aussi de l'investissement supplémentaire requis par l'équipement électromécanique, à savoir les ventilateurs, les moteurs, les transformateurs et les câbles de puissance. Toute augmentation de la vitesse de l'air entraîne en effet non seulement des pertes d'énergie supplémentaires, mais requiert également des puissances de ventilation installées plus grandes et, partant, des frais d'entretien augmentant en proportion.

En outre, lors de ces calculs, il faut tenir compte du fait qu'en regard du coût d'investissement, le taux des frais annuels des équipements électromécaniques est plus élevé que celui des ouvrages de génie civil, en raison de leur durée de vie plus courte et de frais d'entretien, remplacement et surveillance relativement plus importants.

Sur ce point on notera une différence importante entre aménagement hydro-électrique et tunnel routier. Dans le premier cas, la puissance installée est donnée par la chute disponible, de laquelle on retranche éventuellement une partie des pertes de charge. Dans notre cas, au contraire, la puissance à installer dépend directement et proportionnellement des pertes de charge de l'air pulsé et aspiré.

Afin de mener à bien l'étude avec les moyens de calcul disponibles – encore assez limités à cette époque – on définit pour chaque élément du système aérodynamique (gaines de ventilation ou puits d'aération) un coût dit «de comparaison» qui incluait le coût d'investissement lui-même, le coût de l'énergie consommée convenablement capitalisé, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation de l'équipement électromécanique supplémentaire induits par l'élément considéré –, cet investissement différentiel dans l'équipement étant de ce fait pondéré par un facteur approprié nettement supérieur à l'unité. Il a ainsi été possible de définir les sections que nous considérons alors comme optimales pour chaque élément du système et qui, à leur tour, fournissent la

valeur de la vitesse maximale optimale de l'air.

Il ne suffit évidemment pas de disposer de sections optimales pour les divers éléments, encore faut-il les combiner le mieux possible, ce qui ne peut se faire pratiquement que grâce à un procédé itératif assez complexe.

Nous avons de bonnes raisons de croire que c'était la première fois qu'une étude de ce genre était menée d'une façon aussi globale et systématique pour un ouvrage de ce type.

Le résultat de l'opération put être estimé favorable à l'époque, et les dispositions prises semblent se justifier puisque, aujourd'hui encore, le tunnel fonctionne dans des conditions fort satisfaisantes malgré les changements qui sont intervenus depuis dans le référentiel mentionné.

Pour être honnête il faut cependant reconnaître que les effets des divers changements se sont en partie compensés. Ainsi, à la très forte augmentation du volume de trafic répond une diminution également très sensible des émissions polluantes et particulièrement du contenu de monoxyde de carbone dans les gaz d'échappement. Mais, si satisfaisante que soit du point de vue intellectuel la recherche de l'optimum économique de l'ouvrage, il faut bien se rendre compte que l'on peut tout au plus espérer s'en approcher mais jamais l'atteindre avec précision et surtout pas de façon définitive. On peut mentionner un grand nombre de facteurs parmi ceux qui rendent difficile l'optimisation économique du projet :

- l'ouvrage doit être exploité pendant de nombreuses années; or le volume de trafic prévisible pendant cette période ne l'est que d'une façon pour le moins approximative;
- les taux d'intérêts admis au départ de l'opération d'optimisation sont susceptibles de varier fortement au cours de la période d'exploitation, ce qui fait que les charges du capital investi, même si elles n'apparaissent pas explicitement dans le bilan d'exploitation, sont sujettes à caution;
- la durée de vie réelle des équipements électromécaniques et donc les taux d'amortissement ainsi que les frais d'entretien ne peuvent être évalués avec toute la précision désirable;
- il n'est pas possible d'estimer a priori quelles seront d'une part l'évolution technique des véhicules et d'autre part les prescriptions légales en vigueur durant les décennies à venir en ce qui concerne par exemple la qualité de l'air;
- il en va de même des futures exigences des utilisateurs;

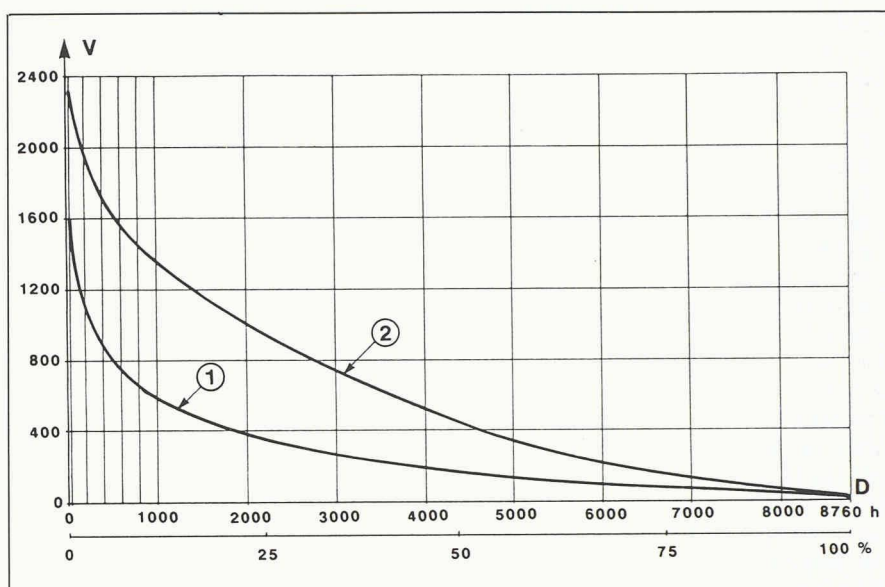


Fig. 4. - Exemple de conditions changées. Courbes des débits de trafic classés.

V = nombre de véhicules par heure

D = durée de l'année

① = prévisions 1968: environ 2 millions de véhicules

② = trafic 1989: environ 5,6 millions de véhicules

- d'autres facteurs encore, telles les lois sur le travail, par exemple en ce qui concerne la qualité de l'air, les prescriptions de sécurité, et bien d'autres, sont susceptibles de modifications au cours de la vie de l'ouvrage;

- les coûts de l'énergie et les frais de remplacement des équipements électromécaniques ainsi que ceux de leur entretien sont susceptibles de fortes variations - mais il en est de même pour les frais d'entretien des ouvrages de génie civil;

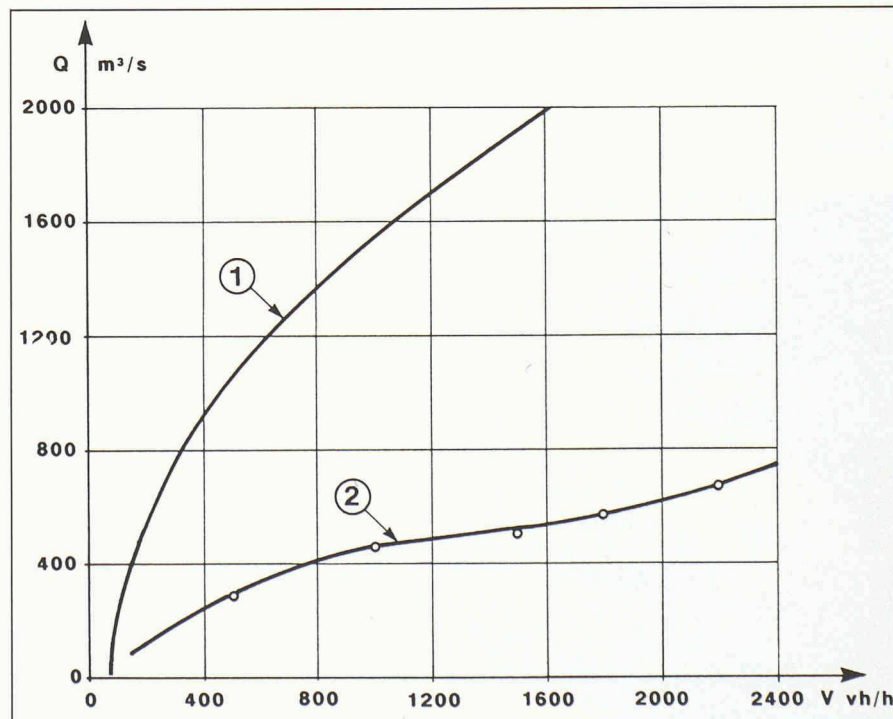


Fig. 5. - Exemple des conséquences de conditions changées. Débit d'air frais requis en fonction de l'intensité du trafic (Saint-Gothard)

V = véhicules par heure

Q = débit total d'air frais pour la ventilation

① = prévisions 1968

② = consignes d'exploitation 1990

- enfin, une grande question est de savoir dans quelle proportion il faudrait réévaluer au fur et à mesure le capital investi pour compenser la perte de pouvoir d'achat de l'unité monétaire; en d'autres termes, s'il faut tabler sur les prix réels ou sur des prix nominaux, historiques;
- et tout cela sans même parler de toutes sortes de surprises qui se font jour au cours des années d'exploitation.

Il est hors de doute que dans le cas du Saint-Gothard, tous ces facteurs et d'autres encore ont varié dans de très fortes proportions depuis qu'ont été menées les études mentionnées ici. Heureusement, l'optimum économique de chaque élément est défini dans une plage assez large par une courbe fort plate, ce qui fait que lorsqu'on s'y trouve, l'erreur que l'on peut commettre en faisant varier telle ou telle dimension de l'ouvrage n'a qu'une

influence fort limitée sur le résultat global.

Il pourrait néanmoins être intéressant, d'un point de vue théorique général, de réexaminer aujourd'hui le projet du tunnel du Saint-Gothard pour voir si dans les conditions actuelles, c'est-à-dire avec les coûts de construction et d'équipement en vigueur, le trafic actuellement prévisible pour ces prochaines décennies, les taux d'intérêts, d'amortissement, d'entretien ou de remplacement que l'on peut extrapoler sur la base de l'expérience vécue, une étude d'optimisation amènerait à nouveau au même projet qu'il y a vingt-cinq ans. Sans doute la puissance de ventilation installée pourrait-elle être quelque peu réduite.

Mais nous nous arrêtons ici, car nous nous en voudrions de donner l'impression d'être en train de chercher quelque occupation supplémentaire.

Bibliographie

LOMBARDI, G.: « Aus der Projektierung des Gotthard-Strassentunnels », *Schweiz. Bauztg.*, 90 (13 juillet 1972) 28, pp. 669-676.

HENKE, A.: « Comportement de la ventilation du tunnel du Saint-Gothard », communication présentée au Séminaire de l'OCDE sur la gestion des tunnels routiers, Lugano, 26-29 novembre 1990.

Adresse de l'auteur :

Giovanni Lombardi, Dr h.c.
Via A. Ciseri 3
6601 Locarno

Industrie et technique

ICE et Transrapid : les supertrains allemands de demain et d'après-demain

Dès 1991, les chemins de fer fédéraux allemands, Deutsche Bundesbahn (DB), se proposent de compléter leur système Intercity (IC) - depuis 1979, il relie une bonne cinquantaine de grandes villes de République fédérale d'Allemagne à la cadence d'à peu près un train toutes les heures - par des trains à grande vitesse très rapides et spécialement confortables, dont la mise en service se fera progressivement. Les premiers à circuler sur le réseau ferroviaire allemand seront les quarante et

un InterCity-Express (ICE) qui, avec une douzaine de voitures voyageurs chacun, assureront la liaison sur les lignes Hambourg-Würzburg-Munich et Hambourg-Francfort-Munich via Stuttgart.

L'ICE qui, à l'époque de ses essais, avait battu le record du monde de vitesse sur rail - 406 km/h - fait appel à une technique de traction d'un grand avenir : les moteurs à courant triphasé. Il dispose d'une combinaison de freins spéciaux dont le fonctionnement exact

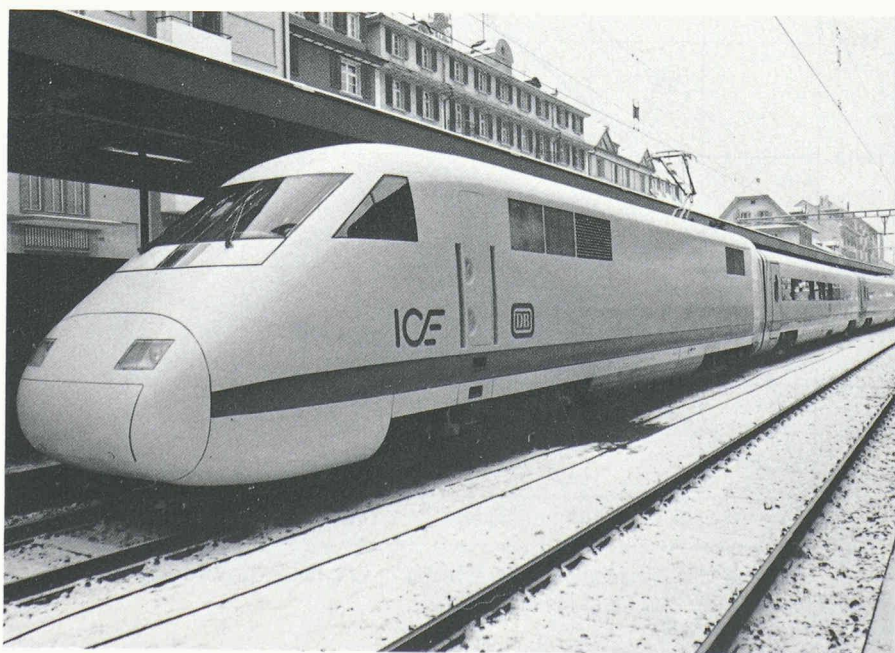
et parfaitement synchronisé est commandé par une électronique à processeurs spécialement mise au point précisément pour cet ICE. Equipés de climatiseurs, ces compositions, qui sont de véritables « jets sur roues » extrêmement aérodynamiques, peuvent accueillir jusqu'à 600 passagers dans des conditions remarquablement confortables puisque, avec leur largeur de 3,02 m, ils leur offrent 20 cm d'espace en plus que dans le gabarit usuel.

L'ICE offre à ses passagers le téléphone, un restaurail luxueusement aménagé, mais aussi un « bistro », tout cela sous un vistadôme qui crée à l'intérieur de la voiture une lumière très agréable, une visibilité exceptionnelle et une aération parfaite.

Cette recherche du confort se justifie notamment par la configuration des lignes nouvelles, où le voyageur n'aura que rarement l'occasion d'admirer le paysage. Sur les 100 km de la ligne Mannheim-Karlsruhe, par exemple, seuls 31 km offrent une telle vue, le reste se situant en tranchée ou en tunnel !

L'un des slogans publicitaires de la Deutsche Bundesbahn dit : « Deux fois plus rapide que la voiture, moitié autant que l'avion ». Grâce à l'ICE, le trajet entre Hambourg et Munich sera réduit de plus d'une heure et demie. Un certain nombre de « grands noms » de l'industrie allemande ont participé à la mise au point des nouveaux ICE, parmi lesquels on trouve AEG, Krauss-Maffei, MBB (Messerschmitt-Boelkow-Blohm) et Thyssen AG.

Or Thyssen AG précisément a pour sa part présenté un système de transport



Le train allemand de demain : l'ICE qui va prochainement entrer en service sur les liaisons Intercity. (Photo IAS.)