



Verkehr und Umwelt

Wechselwirkungen Schweiz – Europa

Nationales Forschungsprogramm 41

Transport et Environnement

Interactions Suisse – Europe

Programme national de recherche 41

Transport and Environment

Interactions Switzerland – Europe

National Research Programme 41

Rapport F6 (Résumé)

W. Ernst

J. Geisel

H. Graf

C. Leuenberger

D. Schöbi

Bilan énergétique et écologique d'un Eurometro

Le programme national de recherche "transport et environnement - interactions Suisse - Europe" (PNR 41) contribuera à formuler des actions originales et spécifiques à la Suisse, aptes à préserver la compétitivité internationale et la dynamique économique et culturelle du pays, grâce à un système de transport efficace, rationnel et respectueux de l'environnement naturel et construit.

Le programme est exécuté par le Fonds national suisse de la recherche scientifique sur mandat du Conseil fédéral. Il a été lancé en 1996 et durera probablement jusqu'à l'an 2000.

Direction de Programme

Felix Walter

c/o ECOPLAN, Thunstrasse 22, 3005 Bern Tel: +41 - 31 - 356 61 61 Fax: +41 - 31 - 356 61 60

E-Mail walter@ecoplan.ch Internet: <http://www.snf.ch/nfp41>

Impressum

Autoren: ERNST Walter (w.ernst@bluewin.ch), GEISEL Jens, GRAF Hanspeter, LEUENBERGER Christian, SCHÖBI Daniel

Titel: Energie- und Umweltbilanz einer Eurometro

Reihe: Berichte des NFP 41 „Verkehr und Umwelt“, Bericht F6

Ort, Jahr: Bern, 2000

Herausgeber: Programmleitung NFP 41 (Nationales Forschungsprogramm „Verkehr und Umwelt, Wechselwirkungen Schweiz-Europa“)

Bezug: BBL/EDMZ, CH-3003 Bern; Fax +41 - 31 - 325 50 58; www.admin.ch/edmoz
Bestellnummer: 801.680.d

R - 1 Objectif et problèmes

„La mise en œuvre d'une politique des transports globale, durable, cohérente et orientée vers l'avenir ... doit pouvoir s'appuyer sur des bases de décision solides. C'est ici qu'intervient le chercheur, appelé à fournir de nouveaux éléments pour étayer ces bases. “

Conseiller fédéral Moritz Leuenberger dans le portrait du PNR41

Ce rapport de recherche tente d'appréhender une question, qui à ce jour, à l'intérieur d'une politique intégrée et durable des transports, n'a été généralement que partiellement développée: le **trafic à grande vitesse**.

Il vise aussi à fournir des premières bases de décision pour savoir si dans le secteur du trafic à grande vitesse une nouvelle technologie novatrice pourrait devenir une alternative technique pertinente sur le plan écologique et énergétique au trafic à grande distance, en particulier au trafic aérien en forte hausse.

R - 1.1 Un Eurometro, une nécessité?

L'Europe se rapproche sans cesse, politiquement et économiquement. Cette évolution se caractérise par des éléments importants: infrastructures performantes de communication, de transport et de mobilité. – Mais comment perfectionner ces techniques pour qu'elles restent acceptables sur le plan écologique, social et macro-économique, dans une politique à long terme?

La forte croissance du secteur de la mobilité et des transports a conduit à une augmentation critique de la pollution de l'environnement, ces deux dernières décennies aussi dans le trafic aérien en particulier.

Le vol, surtout sur les courtes distances, est en général énergivore et très bruyant. Selon les résultats de récentes recherches [IPCC 1999], en haute altitude, les rejets polluants des avions engendrent en outre probablement un effet de serre largement au-dessus de la moyenne.

Depuis deux décennies environ, des scientifiques et ingénieurs de l'EPF Lausanne, soutenus par des spécialistes d'autres instituts de recherche et de l'économie, s'engagent dans le développement d'un système nouveau et propre à grande vitesse. Cette technologie est basée sur un système de transport à sustentation et guidage magnétique, à propulsion par moteur linéaire, et circule dans des tunnels sous vide partiel. Sous le label *Swissmetro* resp. *Eurometro* cette technologie pourrait dans un temps prévisible atteindre des vitesses de 300 à 500 km/h et ce largement sans immissions sonores ni gazeuses directes ni influence néfaste sur les sites et les agglomérations. Cette plage de vitesse se situe dans la partie basse des vitesses du trafic aérien à petite distance.

Un „Eurometro“ pourrait ainsi, dans le cadre d'une politique des transports axée sur le long terme et la durabilité prendre le relais du trafic aérien à petite distance en général énergivore et très bruyant, dans une large mesure sur les trajets très fréquentés tout en réduisant fortement l'impact environnemental. Au sens de la durabilité, des améliorations seraient également possibles dans les secteurs énergie, bruit et paysage comparé aux autres moyens de transport longue distance (trains à grande vitesse comme TGV/ICE et Transrapid ainsi que le trafic routier). Il est prévu de l'aménager successivement et de l'intégrer au mieux dans le réseau trafic à grande vitesse existant et planifié et de relier ainsi les grands centres économiques (par exemple le long des axes Rome-Londres ou Madrid-Vienne). Ce réseau pourrait aussi intégrer la Suisse dans un réseau trafic à grande vitesse transeuropéen malgré des conditions topographiques difficiles

Mais abordons d'abord la question de savoir si, en tout état de cause, le trafic à grande vitesse et le trafic aérien inter-européen sont un aspect pertinent pour une politique durable des transports, et s'il vaut ainsi la peine d'étudier le potentiel énergétique d'un Eurometro au profit de l'environnement?

R - 1.2 Trafic aérien - un nouveau défi dans le cadre d'une politique durable des transports?

Ces dernières années et décennies, une politique durable des transports incluant ainsi la **protection du climat** est devenue un des thèmes majeurs de la politique nationale et internationale. Au vu des interactions internationales le **trafic aérien** international a été **exclu** des engagements de réduction figurant dans le protocole de Kyoto comme dans la loi sur le CO₂. Pourtant, des constructeurs d'avions et compagnies aériennes ont fait des efforts couronnés de succès pour améliorer l'efficacité écologique. Malgré ces efforts, le débit de carburant d'avions (kérosène), qui est à peu près la **consommation de carburant du trafic aérien** en Suisse, a progressé de près de 40% entre 1989 et 1999; Depuis 1980 elle a même pratiquement doublé. La consommation de kérosène a ainsi atteint en 1999 une part **d'un quart environ de la consommation suisse totale de carburant**.

Poussée par des facteurs comme la libéralisation du trafic aérien, la **globalisation** de l'économie et la **mobilité liée aux loisirs**, la demande de **trafic aérien** pourrait encore augmenter fortement. Les pronostics de milieux économiques importants, d'Airbus Industrie par exemple, misent pour la prochaine décennie sur des **taux de croissance annuelle d'environ 5 pour-cent**. Compte tenu d'autres actions augmentant l'efficacité, la **consommation de carburant** basée sur le pronostic d'Airbus pourrait **croître d'environ 3 à 4 pour-cent par an**. Mais même cette augmentation du rendement résultant d'efforts ciblés n'empêcheraient pas les **émissions de CO₂ dues au trafic aérien** de **doubler à nouveau en environ 20 ans**.

Les études sur le trafic aérien montrent encore que dans ce scénario de croissance **l'effet total d'économie visé par la loi sur le CO₂** dans les secteurs industrie, ménages et autres modes de transport serait pratiquement **compensé par les émissions supplémentaires du trafic aérien**. Selon une estimation d'experts du IPCC et de la commission de l'UE [UE 2000] on admet que les **potentiels technologiques et opérationnels** aujourd'hui **prévisibles du trafic aérien n'empêcheraient pas** une nouvelle hausse de la consommation de carburant donc des émissions de gaz à effet de serre. Au niveau du bruit et de la qualité de l'air, il faut aussi s'attendre à des charges supplémentaires pour le moins au niveau local, tout particulièrement des aéroports.

Les systèmes ferroviaires à grande vitesse modernes (TGV et ICE) ont déjà assumé un **rôle important d'alternative efficace au trafic aérien à petite distance** pour les durées de déplacement jusqu'à environ 3 heures, soit des distances de 300 à 500 km. Mais le potentiel de report modal ou de transfert intermodal à l'intérieur de l'Europe par une extension du réseau trafic à grande vitesse est limité. Dans une étude COST pour l'an 2015, il n'est estimé qu'à 15 à 20%. Le report modal vers des systèmes trafic à grande vitesse peut en outre créer des problèmes supplémentaires de protection contre le bruit et de protection des sites.

Une autre voie politique est imaginable : atteindre la réduction des émissions sonores et de gaz affectant le climat par le biais d'une réduction suffisante de la demande ou des prestations par des interventions légales dans le trafic à grande vitesse. Cette démarche ne serait guère praticable au vu du contexte politique et économique actuel. Aussi semble-t-il **nécessaire** et important **d'examiner et d'évaluer à fond des pistes de nouvelles solutions novatrices**.

R - 2 Problèmes et analyses actuelles

R - 2.1 Eurometro plus efficace que les vols à petite distance?

Dans le cadre de cette étude, il convient d'examiner de plus près surtout les **questions** suivantes:

- La technologie Swissmetro permet-elle à l'échelon européen de réaliser un système à grande vitesse (Eurometro)? Comment Eurometro peut-il être intégré dans les systèmes européens de trafic à grande vitesse, pour que *sur le plan énergétique et écologique il soit supérieur* aux trains à grande vitesse d'aujourd'hui et au *trafic aérien*?
- Quelles sont les *valeurs importantes qui influent* sur la consommation d'énergie et de ressources ainsi que sur les émissions d'importance dans l'environnement?

Les questions initiales ont été formulées sur la base de l'état des connaissances lors du dépôt du projet présent au printemps 1998. Le gain d'acquis pendant le projet de recherche a entraîné des déplacements en partie sensibles des priorités. Les examens se concentrent désormais sur les aspects importants liés

à l'efficacité énergétique et écologique d'un Eurometro. Un problème particulier s'est présenté dans le cadre de l'estimation planifiée approfondie de la demande et des différentes variantes de réseau.

R - 2.2 Qu'a-t-il été examiné à ce jour?

La présente étude et ses résultats sont une étape de plus d'un processus de recherche itérative au développement d'une technologie nouvelle pour le transport à grande vitesse. À partir des bases existantes de l'étude principale de Swissmetro et de la demande de concession de Swissmetro SA, on a effectué à la HTA Burgdorf dans une première phase du projet diverses études sur l'efficacité énergétique et environnementale. Le „bilan énergétique Eurometro“ [TROTSMANN ET AL. 1998] développe un modèle énergétique pour un système Eurometro à l'exemple de deux tronçons sur la base du „bilan écologique Swissmetro“ de MINGOT ET AL. [1997] ainsi que des travaux à l'EPF Lausanne, en particulier de RUDOLF [1997]. Le „Bilan écologique Eurometro. Comparaison Eurometro – avion de petite distance“ de LEUENBERGER ET AL. [1998] a établi sur la base du „bilan écologique Swissmetro“ et du „bilan énergétique Eurometro“ les inventaires écologiques de différentes variantes d'exploitation, que l'on a comparées par plusieurs méthodes d'évaluation.

Dans une deuxième phase du projet on a entrepris à la HTA Burgdorf une étude sur une possible „alimentation en énergie de l'Eurometro“ [KRÄUPL ET AL. 1999] et le modèle du „bilan énergétique Eurometro“ dans le cadre d'une **analyse de sensibilité**. A partir de ces examens et des bases citées on a élaboré à la HTA Biel/Bienne **une matrice de pertinence sur les facteurs de durabilité écologique** du système Eurometro [GEISEL 1999]

Lors de séances de travail, une partie des données de base et certaines hypothèses ont été remises en question tant par les investigateurs eux-mêmes ainsi que par les experts. Aussi, dans la dernière phase du projet, a-t-on recalculé avec l'aide de l'EPF Lausanne la consommation d'énergie d'exploitation d'un système Eurometro sur la base de l'état du savoir. Ces nouvelles données reposent sur des simulations dont un certain nombre de paramètres sont au mieux des connaissances actuelles. Un nouveau banc d'essai aérodynamique „HISTAR“ va permettre d'accroître notablement la qualité des paramètres pour le calcul de l'énergie d'exploitation. Malgré l'aide de l'EPF Lausanne on n'a pu accéder à des bases de calcul prouvables pour établir le bilan énergétique et écologique d'autres systèmes trafic à grande vitesse actuels. Et l'on ne disposait non plus de nouvelles données sur le bilan écologique Swissmetro actualisé et remanié de l'EPF Zurich.

On a tenté de recalculer la demande définie en premier lieu sur la demande par de nouvelles approches pour un réseau Eurometro. Mais par manque de temps, on n'a pas pu vérifier les résultats des premiers calculs à l'aide d'autres nouvelles données de base et d'approches modélisées toujours indisponibles. En outre, le réseau redéfini et examiné sur cette base ne coïncide que sous réserve avec le réseau utilisé pour les précédents examens. Aussi les données relatives à la demande représentent qu'un ordre de grandeur qu'il faut affiner par de futurs développements.

Du fait de ces incertitudes et des contraintes imposées par le temps et le personnel, on a renoncé en accord avec la direction du projet PRN41 à établir un bilan écologique actualisé, surtout qu'au vu de la qualité momentanée des données on ne pouvait s'attendre à une consolidation sensible des résultats par rapport au bilan écologique de MINGOT ET AL. [1997] et LEUENBERGER ET AL. [1998]. On a par contre calculé des valeurs actualisées pour la consommation d'énergie et l'effet de serre pour l'actuel tronçon examiné Rome-Francfort avec les dernières données prouvées pour deux variantes aux extrémités basse et haute de l'intervalle de demande attendu dans les examens précédents et nouveaux. Elles montrent qu'en dépit des incertitudes indiquées et des données de base en partie modifiées **les ordres de grandeur** présenté **et les tendances** des gains d'efficacité énergétique et écologique **à ce jour devraient rester valide**.

R - 3 Acquis essentiels et conclusions

R - 3.1 Comparaison avec le trafic aérien et les systèmes TRAFIC À GRANDE VITESSE

Dans la figure R – 1 ci-dessous on compare un Eurometro et le trafic aérien sur un tronçon pilote admis Francfort–Rome pour deux variantes de demande basées sur les analyses et acquis présentés ci-dessous.

Le graphique montre que le bilan énergétique du **système à grande vitesse optimisé sur le plan énergétique et écologique** basé sur la technologie Swissmetro devrait permettre d'**augmenter l'efficacité d'un facteur 5 à 10 comparé au trafic aérien** d'aujourd'hui. Cela vaut en particulier en comparaison de l'effet de serre dessiné accru d'un facteur 2. (Selon [IPCC 1999, p. 8,9] il faut selon les autres acquis en climatologie considérer un effet accru d'un facteur jusqu'à 4.)

Même en cas d'une augmentation sensible de l'efficacité du trafic aérien (hypothèse dans la figure: réduction de la consommation moyenne de carburant d'avions plus performants de l'an 2050 de 50% par rapport à aujourd'hui [IPCC 1999, p. 224]) ou d'une augmentation possible de la demande d'énergie d'un Eurometro due aux incertitudes mentionnées, il serait possible d'atteindre de notables gains d'efficacité.

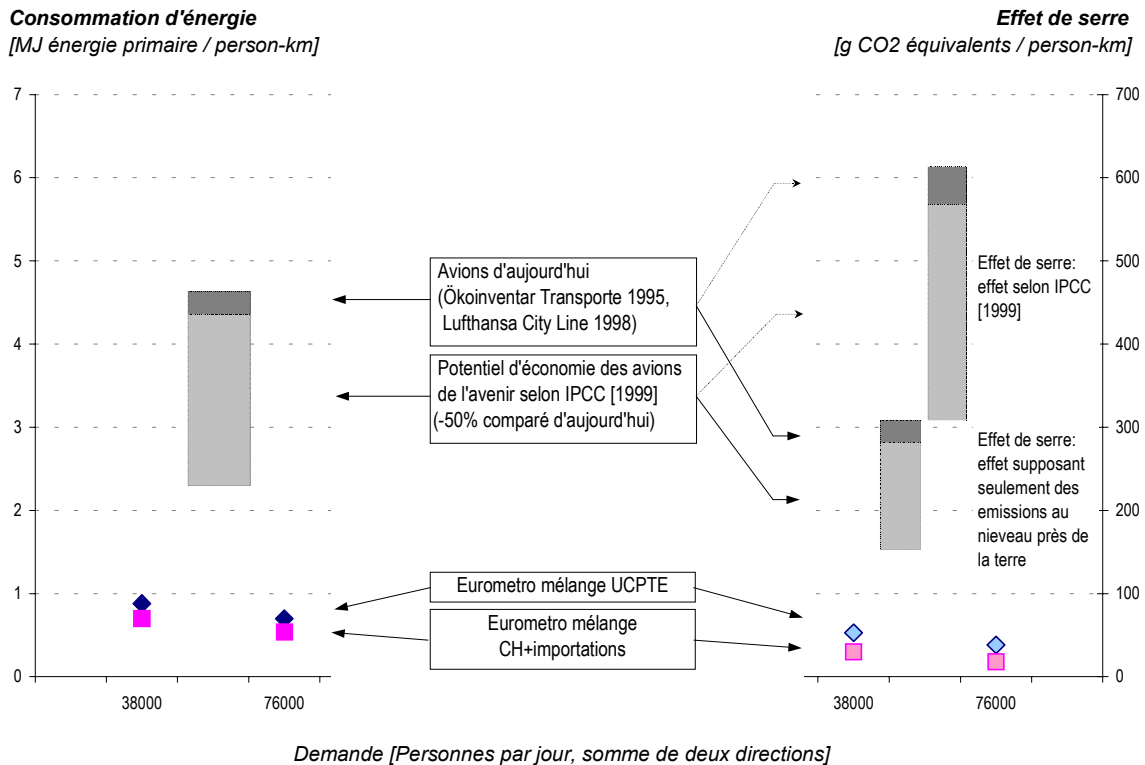


Fig. R - 1 Comparaison de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ resp. l'effet de serre potentiel d'un système Eurometro dans la plage attendue pour deux valeurs de demande comparé au trafic aérien à petite distance, PROPRE CALCUL: ENERGIE GRISE: [LEUENBERGER ET AL. 1998], ENERGIE D'EXPLOITATION: CASSAT ET AL. [2000] ET LEUENBERGER [ANNEXE B], autres sources: INFRAS [1995], LUFTHANSA [1999].

La figure R - 2 ci-dessous montre que, outre la demande, c'est aussi **le mode de production d'énergie** soit la production d'électricité qui sera **décisif** pour le gain effectif d'efficacité énergétique et écologique comparé au trafic aérien. Il est basé sur les hypothèses calculées suivantes:

	Eurometro 76000 passagers/jour	Eurometro 38000 passagers/ jour
Energie d'exploitation électrique [MJ/v-km]	0,185	0,21
Energie primaire grise pour la construction [MJ/v-km]	0,12	0,24
grammes CO₂-équivalents par v-km	=0,12*90,6 + x*0,185	=0,24*90,6 + x*0,21
Mélange UCPTÉ en 1995	38,2	52,8
Mélange CH et importations en 1995	18,2	30,0
Turbine combinée à gaz en 2020	30,9	44,4
Force hydraulique CH en 2020	11,1	22,0

Tab. R - 1 Emissions de CO₂-équivalents d'un système Eurometro pour deux valeurs de demande et production d'électricité par différents types de centrales; Coefficients d'émission „x“ cf. tableau ci-dessous; propre calcul: ENERGIE GRISE: [LEUENBERGER ET AL. 1998], ENERGIE D'EXPLOITATION ÉLECTRIQUE: CASSAT ET AL. [2000] ET LEUENBERGER [ANNEXE B] et PROPRE CALCUL: selon: MINGOT ET AL. [1997], PSI [2000]

Le calcul des *émissions de CO₂-équivalents* dans le tableau ci-dessus est basé sur les coefficients d'émission „x“ suivants:

Energie	Gramme CO ₂ -équiv. par MJ énergie
Energie primaire grise pour la construction	90,6
Electricité mélange UCPTÉ en 1995 [MINGOT ET AL. 1997]	148
Electricité mélange CH et importations en 1995[MINGOT ET AL. 1997]	39,5
Electricité turbine combinée à gaz en 2020 [PSI 2000]	108,1
Electricité force hydraulique CH en 2020 [PSI 2000]	1,1

Tab. R - 2 Coefficients d'émission de différents «mélanges» de production d'électricité, selon: PROPRE CALCUL, [MINGOT ET AL. 1997], [PSI 2000]

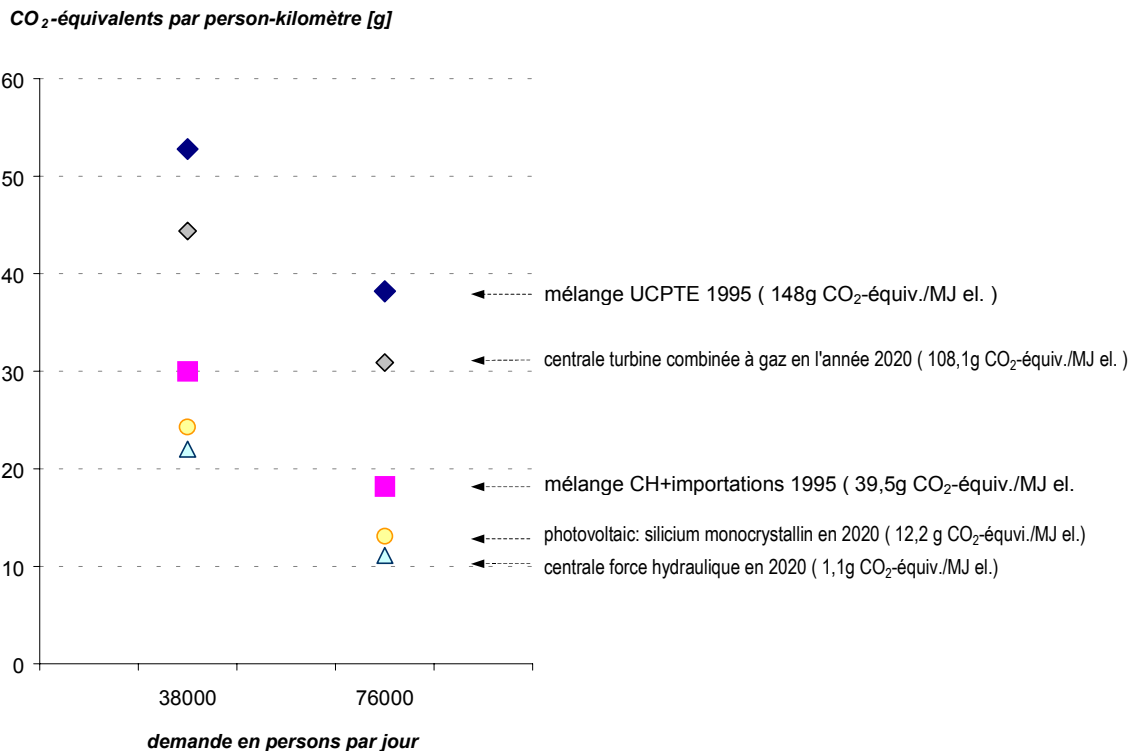


Fig. R - 2 Emissions de CO₂-équivalents d'un système Eurometro pour deux valeurs de demande et production d'électricité par différents types de centrales, PROPRE CALCUL: ENERGIE GRISE: [LEUENBERGER ET AL. 1998], ENERGIE D'EXPLOITATION ÉLECTRIQUE: CASSAT ET AL. [2000] ET LEUENBERGER [ANNEXE B]; PSI [2000]

Vu que le déplacement d'un Eurometro sous vide partiel (diminution des traînées) est un avantage énergétique important, la possibilité de fourniture directe d'électricité de production écologique est un autre avantage technique décisif d'un Eurometro resp. de tous les systèmes ferroviaires électrifiés. Dans le chapitre R - 3.2.4, on explique en détail qu'au vu de la très faible demande d'énergie électrique d'exploitation d'env. 0,2 MJ/v-km (voyageur-kilomètre) seulement on devrait pouvoir acheter dans un marché européen libéralisé de l'électricité de production aussi "verte" que possible.

S'agissant du trafic aérien, il semble selon IPCC [1999, S.10] "que pour plusieurs décennies il n'y ait pas d'alternative réaliste aux carburants à base de kérosène pour avions commerciaux". Même en utilisant des carburants à base d'énergies renouvelables, le rendement total resterait en outre à un niveau nettement plus bas. D'autre part, le carburant embarqué à bord prend une part notable du poids au décollage des avions.

Dans le cadre d'efforts de recherche futurs, ces résultats seront sans cesse mieux étayés en raison d'acquis nouveaux. Différents facteurs d'incertitude liés au calcul de la demande d'énergie pour la propulsion des véhicules devraient pouvoir être réduits dans un temps prévisible, par exemple, par le nouveau banc d'essai „HISTAR“ qui doit fournir en 2001 les premières données visant la validation et l'amélioration des simulations actuelles.

Vu le manque de données de base prouvées, la **comparaison aux systèmes TRAFIC À GRANDE VITESSE classiques** n'a pu être effectuée **que de façon fragmentaire**. Dans le „bilan de mobilité pour personnes et marchandises“ aussi [DEUTSCHE BAHN 1999, p. 29] on remarque sur ce problème: „Un bilan scientifiquement prouvé des atteintes à l'environnement causées en Allemagne par les voies de trafic n'est pas disponible à ce jour“. Mais on peut cependant en raison des examens effectués à ce jour mettre en évidence qu'en termes d'**énergie d'exploitation un gain d'efficacité d'un facteur d'environ deux** et plus devrait être possible comparé aux systèmes trafic à grande vitesse classiques.

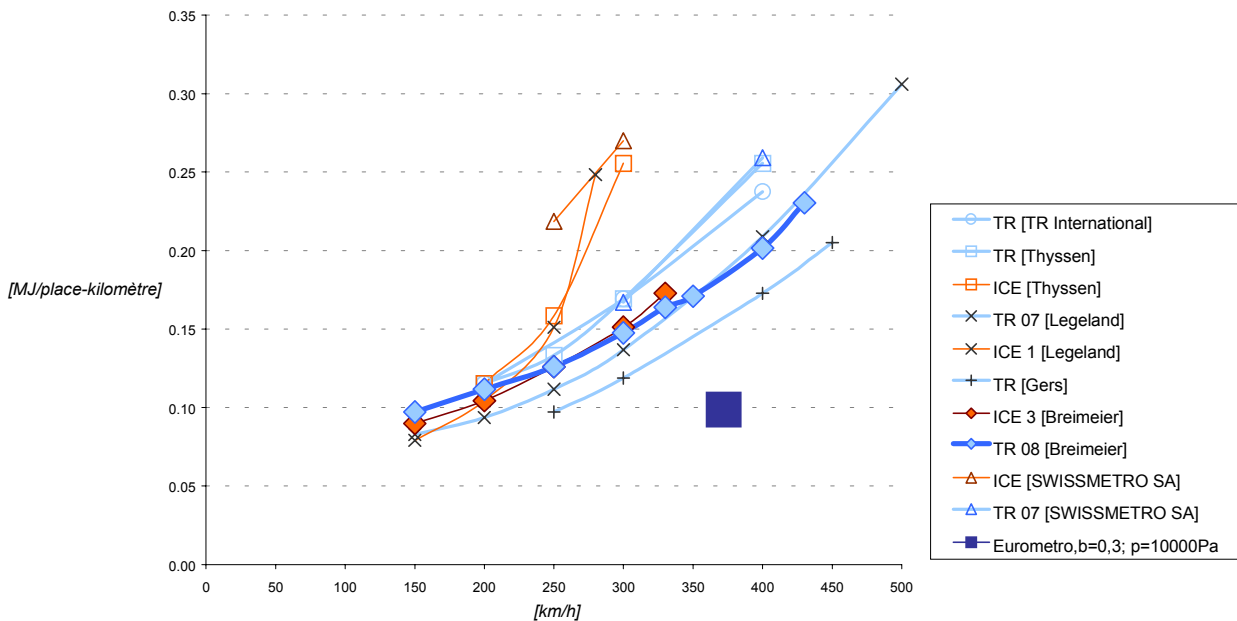


Fig. R - 3 Consommation secondaire d'énergie (d'exploitation électrique) de différents moyens de transport à grande vitesse en MJ par place-kilomètre, c'est à dire d'une utilisation normalisée de 100%, en fonction de la vitesse, selon: TRANSRAPID INTERNATIONAL [2000] THYSSEN [2000], LEGELAND [1998], GERS [1997, S. 9], BREIMEIER [1998], CASSAT ET AL. [2000] ET LEUENBERGER [ANNEXE B]

Concernant la dépense indirecte d'énergie grise, il s'avère que dans les sites à topographie difficile ou très peuplés les chemins de fer à grande vitesse modernes comptent outre des tunnels beaucoup d'ouvrages d'art coûteux en énergie et ressources. Du fait du vide partiel du système Eurometro et compte tenu d'une vitesse de l'ordre de 400 km/h le **volume à percer pour un tronçon tunnelier se réduirait à peu près d'un facteur 3 à 4**. A difficulté topographique et densité démographique croissantes du terrain, l'énergie grise aussi bien que le coût de la construction et des autres frais d'un système trafic à grande vitesse devrait s'approcher de ceux d'un Eurometro. Des informations détaillées sont contenues dans R - 3.2.5

R - 3.2 Facteurs affectant le plus le bilan énergétique et écologique

Ci-dessous sont regroupés les principaux acquis issus des études actuelles, en particulier de l'analyse des facteurs affectant l'analyse de sensibilité du bilan énergétique et écologique.

R - 3.2.1 Demande, variantes d'aménagement et de réseau

Les études dans ce secteur se sont révélées très coûteuses de temps et complexes. Ils ont montré qu'au sens de la recherche appliquée dans l'espace européen et le trafic à grande vitesse il n'existe guère de données prouvées et de calculs modélisés utilisables. En outre, s'agissant des simulations modélisées disponibles à l'échelon européen, la demande pour un nouveau mode de transport n'est pas reproductible. Dans la phase finale on a pu engager un nouvel assistant de projet, qui, dans le cadre d'une dissertation sur le trafic à grande vitesse à l'UT Vienne (prof. Knoflacher) a lancé des examens approfondis basés sur les bases existantes en partie contradictoires. Ces études doivent notamment fournir des bases prouvées sur la **demande actuelle**, la **demande potentielle** future incluant les impacts sur les différentes **variantes d'aménagement et de réseau**.

Les travaux entrepris dans la phase finale ont permis de collecter des acquis importants pour les futures études au niveau des données prouvées et de l'utilisation de diverses approches modélisées. Malgré le concours d'experts du trafic oeuvrant dans le cadre du projet PRN41, les travaux exécutés à ce jour n'ont conduit qu'à des évaluations et tendances. Il s'agit de les valider par de meilleures données sur les flux de trafic réels. Les résultats actuels issus de premiers **calculs modélisés très simplifiés** présentent par exemple des valeurs de demande notablement plus faibles que celles qui ont été obtenues sur la base d'examens approfondis dans le cadre du projet PNR41 F1 "Estimation de la demande pour Swissmetro" [Abay, 1999].

Les éclaircissements et examens actuels (état fin juillet 2000) ont montré que

- Les données prouvées disponibles aujourd'hui sur le trafic transfrontalier en Europe sont très hétérogènes. Une méthodologie uniforme de la collecte des données (normalisation) à l'échelon européen ou global n'existe pas.
- Les pronostics en matière de croissance du trafic, de développements des frais de déplacement et de transferts intermodaux entre les différents modes de transport ainsi que le trafic induit, extrapolés jusqu'en l'an 2020, sont entachés de grandes incertitudes.
- Outre les aspects techniques importants comme l'aménagement du réseau, l'intégration dans le réseau existant, la vitesse commerciale et le confort, des facteurs aussi non techniques comme le développement économique, les décisions politiques (concernant la protection du climat et contre le bruit) et la prise en compte des „coûts dits externes“ revêtiront une grande importance.
- Il résulte de l'évaluation plutôt pessimiste de la demande que les valeurs moyennes pourraient au moins atteindre la limite basse de l'évaluation de la demande admise dans le bilan énergétique.

R - 3.2.2 Vitesse

La vitesse commerciale moyenne, selon différents examens réalisés dans le cadre de l'étude COST 318 sera un **facteur décisif concernant la „portée du transfert intermodal“** d'un Eurometro. La „portée du transfert intermodal“, c'est la distance maximale à laquelle le voyageur est prêt à quitter l'avion pour un nouveau système à grande vitesse.

Mais les vitesses de pointe et commerciale sont à la fois des facteurs fixant **la consommation d'énergie d'exploitation** et la **puissance de propulsion nécessaire** du système et aussi, en raison de l'influence sur la durée de parcours, la demande d'énergie pour la sustentation et le guidage des véhicules.

En outre, la demande d'énergie de propulsion est liée à la vitesse par des facteurs comme la section libre du tunnel (diamètre), le nombre de liaisons transversales, la surface du tunnel et des véhicules ou la forme de ces derniers.

Cela vaut aussi pour la demande d'énergie pour la sustentation et le guidage, qui est proportionnelle à la durée de service des véhicules. Cette dernière est aussi influencée, hors la vitesse, par la distance entre les stations et la durée d'arrêt dans les stations.

Comme cela a été représenté au début, il existe dans ces secteurs actuellement encore différentes incertitudes que l'on ne peut examiner et déterminer pour la demande d'énergie de propulsion que par les essais programmés HISTAR.

R - 3.2.3 Diamètre du tunnel

Le diamètre du tunnel a une influence directe et indirecte considérable sur le bilan énergétique et écologique: des diamètres de tunnel plus grands augmentent **la demande d'énergie grise** et de ressources, mais ils réduisent **le facteur de blocage β** causant ainsi une résistance plus faible de l'air devant les véhicules, donc ainsi une **demande d'énergie** de propulsion plus faible.

Pour le tronçon pilote Rome-Francfort d'Eurometro, l'analyse de sensibilité a montré que la demande cumulée d'énergie pour la construction et l'exploitation du système a son minimum dans le plus grand diamètre de tunnel analysé. Les raisons essentielles à cela sont:

- Les changements du facteur de blocage β entrent (selon les actuels calculs modélisés) avec la puissance trois dans la demande d'énergie de propulsion pour un véhicule Eurometro ou Swissmetro,
- Par contre, l'énergie consommée pour la construction du tunnel change pour les diamètres plus grands ou plus petits dans une manière notablement moins pentue. Répartie sur la durée de vie, sa contribution à la demande d'énergie annuelle est nettement plus faible que la demande d'énergie pour l'exploitation du tronçon de l'Eurometro. Le coût global, aussi, pour un système prévoyant des

diamètres de tunnel plus grands devrait se situer compte tenu des coûts externes dans le même ordre de grandeur, voire être éventuellement plus bas.

R - 3.2.4 Production de l'énergie d'exploitation électrique

Les travaux actuels montrent que le mode de production de l'énergie d'exploitation d'un SWISSMETRO/ Eurometro influe fortement sur le bilan écologique et l'impact environnemental par la construction et l'exploitation de ces moyens de transport.

Ils montrent qu'en **utilisant des énergies propres**, de provenance hydraulique par exemple, les charges polluantes comparées à la moyenne européenne diminuent notablement dans presque toutes les catégories d'effets.

Pour l'achat d'énergie électrique produite de manière propre pour le système Eurometro, on peut à notre avis imaginer généralement deux variantes:

1. La société d'exploitation d'Eurometro achète sur le marché libre de l'électricité de manière ciblée l'énergie de production respectant les ressources et l'environnement. Les quantités nécessaires à cet effet doivent être disponibles sur le marché européen, un système Eurometro n'ayant besoin lors d'une extension qu'une part en pour mille de la consommation européenne d'énergie.
2. La société d'exploitation d'Eurometro, outre des systèmes à sustentation magnétique, construit elle-même des installations de production d'énergie électrique respectueuses des ressources et de l'environnement.

Outre les effets positifs directs sur l'efficacité énergétique et écologique du système Eurometro, les deux variantes en auraient aussi sur la mélange des centrales d'électricité du marché européen.

R - 3.2.5 Tracé aérien ou souterrain

Pour une comparaison détaillée de la consommation d'énergie et de ressources d'un système Eurometro avec des trains à grande vitesse modernes, des données prouvables manquent à ce jour, surtout dans le secteur de la consommation indirecte d'énergie grise. Les examens montrent que les systèmes ferroviaires classiques à sustentation magnétique comme le Transrapid allemand ou le MAGLEV japonais, pour un niveau de vitesse recherché de plus de 400 km/h, présenteraient probablement des pentes maximales de quelque 40‰, comme c'est le cas aujourd'hui des tronçons actuellement en construction ou en service des chemins de fer. Lors de la construction du tracé d'une ligne à grande vitesse à sustentation magnétique, **les terrassements** nécessaires, la construction des ponts et tunnels atteindraient ainsi **une ampleur comparable** à celle des nouvelles lignes pour les systèmes ferroviaires modernes comme **le TGV ou ICE**. Cela vaut aussi pour les tronçons en régions à topographie exigeante comme pour celles très peuplées. Cela est confirmé par un tronçon expérimental de la technologie MAGLEV au Japon, qui traverse une région très peuplée et au relief très accidenté et qui s'étire en majeure partie dans des tunnels.

En comparaison des sections intérieures des tronçons transport à grande vitesse en tunnels actuels, un **système Eurometro** présente pour les vitesses de marche prévues de l'ordre de 400 km/h des **surfaces de section des tunnels notablement plus petites** que les systèmes trafic à grande vitesse sans vide partiel. **Les quantités de déblai** pour un système Eurometro par unité de longueur seraient donc à peu près **entre un quart et un tiers** seulement de la quantité **pour les tunnels** nécessaires d'un système **transport à grande vitesse tracé aérien**. Si la part des tunnels d'une ligne trafic à grande vitesse ou Transrapid est dans une bande supérieure à 30%, la dépense pour les ouvrages d'un système Eurometro devrait se situer dans le même ordre de grandeur d'un système trafic à grande vitesse. Cela vaudrait avant tout dans le cas où le système trafic à grande vitesse exige sur de longs tronçons d'autres ouvrages d'art comme des ponts et remblais.

R - 3.2.6 Poids des véhicules

Outre les paramètres aérodynamiques, le poids (la masse) des véhicules influe sur la demande d'énergie en particulier sur la puissance absorbée d'un système Eurometro: Les grandeurs suivantes augmentent proportionnellement avec la masse des véhicules:

- L'énergie cinétique des véhicules. Lors du freinage avant les stations, elle ne peut qu'en partie être réinjectée dans le réseau.
- L'énergie pour la sustentation et le guidage du véhicule.
- L'énergie et la puissance requise pour accélérer le véhicule.

Le poids à vide du véhicule de 150kg admis par SWISSMETRO SA par place assise semble dans la vue actuelle plutôt optimiste, car dans les systèmes actuels de trains à grande vitesse à sustentation magnétique d'Allemagne et du Japon ce poids à vide est de 3 à 4 fois plus grand. En comparant par contre les hypothèses de SWISSMETRO SA avec les poids à vide des avions modernes par place assise, ceux-ci ne sont avec 225 à 300 kg plus que 1,5 à 2 fois supérieurs à la valeur visée de 150 kg.

Mais il semble pertinent d'éclaircir si un système Eurometro ne doit pas disposer d'un confort standard bien plus élevé au vu des durées de déplacement nettement plus longues comparées à la Swissmetro, par exemple avec restaurant et compartiments de travail. De telles adaptations relèveraient le poids à vide moyen des places assises.

Il conviendrait en outre d'examiner des possibilités de réduire la demande d'énergie pour le guidage et la sustentation, qui est entre autres directement proportionnelle au poids. Selon les simulations actuelles pratiquées à l'EPF Lausanne sur la résistance de l'air devant les véhicules d'un Eurometro, la part de la **demande d'énergie pour le guidage et la sustentation est à peu près la même**, voire supérieure à la **demande pour la propulsion** des véhicules. Une approche visant la réduction de cette demande pourrait résider dans l'utilisation d'aimants permanents qui réduiraient la part des électro-aimants pour la sustentation et le guidage.

R - 3.2.7 Vide partiel

Selon des sources actuelles [SWISSMETRO, 1997-C3, p. 10], la résistance de l'air devant les véhicules de SWISSMETRO/Eurometro est directement proportionnelle au niveau de pression dans les tunnels. Les calculs d'énergie de CASSAT [1997] sont basés sur une valeur de 10'000 Pa. Une réduction au niveau visé de la demande de concession de 8'000 Pa faire baisser la résistance et l'énergie motrice nécessaire pour la surmonter dans les mêmes proportions d'env. 20%.

L'hypothèse d'un niveau de pression de 5'000 Pa retenue par TROTTMANN ET AL. [1998] en raison de considérations énergétiques n'est cependant pas admissible selon l'état actuel des techniques de sécurité et d'analyse vu que la protection des passagers implique de respecter un niveau de pression d'au moins 8'000 Pa. Pour atteindre ce niveau ou un niveau encore plus bas et par cela réduire encore la demande d'énergie, il faudrait éventuellement examiner de nouveaux concepts de sécurité. Il pourrait s'agir d'intégrer des effets négatifs comme l'éventuel renforcement de la construction des véhicules et une consommation d'énergie plus élevée des pompes à vide.

R - 3.2.8 Longueur des véhicules

Les premiers examens de RUDOLF [1997] sur l'influence de la longueur des véhicules sur la résistance de l'air ont montré une augmentation proportionnelle légèrement inférieure de la consommation d'énergie avec la longueur des véhicules. Pour le système Eurometro on a donc choisi des rames plus longues pour réduire la demande d'énergie spécifique par place assise ou passager.

Les nouveaux résultats issus de simulations de l'EPF Lausanne sur un modèle actuel au début de 2000 montrent cependant un lien plutôt linéaire entre la longueur des véhicules et la traînée aérodynamique. Ces résultats montrent à nouveau l'importance des essais aérodynamiques sur le banc HISTAR pour consolider et valider des valeurs de référence aérodynamiques comme aussi le dimensionnement technique optimal d'un système Eurometro.

R - 3.2.9 Exploitation de l'infrastructure

Selon les bilans énergétiques et écologiques calculés à ce jour, l'exploitation de l'infrastructure constitue environ un quart de la demande d'énergie annuelle totale.

Pour un système Eurometro on pourra probablement s'attendre à des valeurs inférieures par rapport au tronçon pilote de SWISSMETRO.

- Les distances entre stations sont de deux à trois fois plus longues que sur le tronçon pilote de SWISSMETRO, la part de consommation d'énergie d'exploitation des stations par kilomètre parcouru est donc plus faible.
- La distance moyenne de transport des passagers d'Eurometro est aussi nettement plus grande, vu que les passagers accompliront en majorité plus d'un parcours partiel entre deux stations. Malgré le nombre de passagers nettement plus important, les courses d'ascenseurs par station qui, selon MINGOT ET AL. [1997, P. 77] constituent tout juste 80% de la demande d'énergie d'exploitation de l'infrastructure, se situent dans le même ordre de grandeur, vu qu'aux arrêts intermédiaires seul un changement partiel de passagers a lieu.
- Sur le tronçon pilote de Swissmetro a lieu un renouvellement complet des passagers à chaque halte ainsi qu'une rotation du véhicule dans le deuxième tube du tunnel. Pour le système Eurometro, cela n'est le cas qu'aux terminus.

Vu qu'à l'état actuel de la planification on manque de données plus précises sur la distance de transport des passagers ou le taux de report modal par station, on n'a pas pu à ce jour définir ces facteurs plus précisément. En refaisant le calcul du bilan énergétique il faudrait donc définir des variantes claires de réseau et d'exploitation incluant le nombre adéquat de stations. Il s'agit là aussi de vérifier les valeurs de dépense d'énergie de l'infrastructure, vu que l'on trouve dans la littérature des données divergeant en partie notablement sur la consommation d'énergie pour la construction et l'exploitation de l'infrastructure.

R - 3.2.10 Géologie

La construction d'un réseau Eurometro implique de bâtir des tunnels dans des régions à prédominance de roches solides, par exemple la molasse, et aussi de roches meubles, par exemple dans la vallée de la Limmat et de l'Aar, mais aussi dans la plaine du Pô ou le fossé du cours supérieur du Rhin entre Bâle et Francfort.

Les évaluations de MINGOT ET AL. [1997] de l'énergie pour le percement dans différentes formations rocheuses montrent que la demande d'énergie pour le creusement dans les roches meubles augmente certes d'env. 60% comparé à celui des roches de molasse solide, mais que la demande d'énergie totale pour la construction des tunnels n'augmente que d'env. 6%. La part de construction tunnelière n'est selon [MINGOT ET AL. 1997, p. 63,91; TROTTMAN ET AL. 1998, P. 46ca.] que d'env. 10% (Swissmetro) et 13% (Eurometro) de l'énergie totale consommée. Si donc le tracé ne traversait que des roches meubles, la demande totale d'énergie d'un système Eurometro ne croîtrait que d'un à deux pour-cent.

Cela indique une sensibilité relativement faible de la nature des roches à creuser sur la consommation totale d'énergie. Il faudrait cependant faire des examens plus précis et plus vastes de la consommation d'énergie et de ressources pour la construction de tunnels, en utilisant différentes techniques et des roches en cause. Il faudrait surtout aussi chercher et évaluer de nouvelles solutions alternatives potentielles, consommant peu et avantageuses.

R - 3.2.11 Valorisation des déblais

Selon les examens pratiqués à ce jour, le transport et la mise en décharge des déblais de creusement des tunnels ne jouent qu'un rôle négligeable sur la consommation totale d'énergie. Mais il est important de les «valoriser» au lieu de les «éliminer». Les premiers éclaircissements relatifs aux possibilités de valorisation de roches de molasse suisse montrent qu'en particulier la valorisation des déblais dans l'industrie cimentière et dans la fabrication de béton permettrait de substituer des matières premières naturelles et d'économiser des sites de mise en décharge.

R - 3.2.12 Revêtement de tunnel

Le bilan écologique SWISSMETRO de MINGOT ET AL. [1997, P.44/45 ET 65SS] contient des données sur la nature et la quantité de matériaux visant la sauvegarde, l'étanchéité et le revêtement intérieur des voûtes de tunnel. Déjà dans ce travail, la discussion porte sur les premières possibilités de varier le choix des matériaux aptes au revêtement de tunnel. D'autres possibilités visant à réduire la demande d'énergie et de ressources ainsi que les charges polluantes pourraient s'ouvrir en utilisant des types de béton nouveaux ainsi que des agrégats et matières à béton armé (éléments d'armature en matières synthétiques renforcées par fibre de carbone, par exemple).

R - 4 Conclusions et perspective

R - 4.1 Acquis

La présente étude a apporté les acquis essentiels ou nouveaux suivants:

- ❑ La demande d'énergie, génératrice d'émissions de gaz à effet de serre affectant le climat, des systèmes de transport à grande vitesse va revêtir une portée accrue à l'avenir. L'optimisation de la consommation d'énergie et de la production y liée va revêtir de même une importance croissante.
- ❑ La consommation d'énergie primaire et le potentiel de réchauffage global d'un Eurometro, qui est un système de transport à grande vitesse sous vide partiel avec système de propulsion magnétique sera nettement plus faible par voyageur-kilomètre que les autres systèmes de transport dans une plage de distance de l'ordre de 300 à 1000 km.
- ❑ L'exploitation d'un Eurometro étant majoritairement électrique, le mode (la technologie) de production d'électricité est un facteur déterminant l'efficacité environnementale et climatique. On accordera donc à l'optimisation plus poussée de l'ensemble du système l'attention qu'elle mérite.
- ❑ La consommation d'énergie, l'impact potentiel sur le climat et les incidences sur l'environnement résultant de la construction du tunnel et des autres infrastructures, sont également importants. Les émissions de gaz à effet de serre issus de la construction de l'infrastructure peuvent par exemple atteindre un ordre de grandeur similaire au fonctionnement d'une durée admise d'une centaine d'années. On accordera donc un regain d'attention aux nouvelles études relatives aux techniques de construction et au mode de production et de fourniture d'électricité pour les opérations de construction.
- ❑ La part spécifique investie d'énergie grise et les effets indirects sur l'environnement par voyageur-kilomètre dépendent fortement de la demande et de son évolution sur la durée d'utilisation planifiée. Des examens supplémentaires sur la question de la demande de tels systèmes de transport doivent donc constituer un axe majeur de travaux de recherche futurs à ce sujet.
- ❑ Outre le taux de croissance générale du trafic, la détermination de la demande doit tenir compte d'autres facteurs importants comme les transferts intermodaux d'autres systèmes à grande vitesse et de transport plus lents (route, trafic ferroviaire classique), le transport induit, ainsi que les effets potentiels sur l'organisation du territoire.
- ❑ L'évolution de la demande de systèmes de transport à grande vitesse est tributaire du rôle important que jouent les frais de transport, les vitesses commerciales, l'intégration dans le réseau existant et les durées de voyage liées au «porte à porte», le niveau de confort et d'autres facteurs comme le développement de l'organisation du territoire et les tendances sociales.
- ❑ Outre l'internalisation des coûts externes dans le secteur du transport, il faudra examiner d'autres mesures incitatives d'accompagnement pour réaliser le transfert modal désiré vers un système de transport nouveau efficace sur le plan énergétique et plus respectueux de l'environnement, et réduire le transport induit à un niveau écologique acceptable.
- ❑ L'influence sur la durabilité d'un système à grande vitesse qu'exercent les aspects économiques et financiers liés à la construction et l'exploitation d'un Eurometro est également importante. Les études pratiquées à cet effet jusqu'ici n'en sont qu'à leur début, elles doivent de ce fait constituer des priorités des futures recherches.

R - 4.2 Perspective: Contribution à la durabilité dans les transports par une nouvelle technologie?

Comme cela a été mis en évidence au début, le potentiel des mesures établies au niveau technique et politique dans le secteur du trafic à grande vitesse ne saurait seul suffire à atteindre les objectifs de protection de l'environnement et du climat. Il semble donc **nécessaire de procéder à des études et une évaluation fondée sur des nouvelles solutions.**

Cette étude veut apporter une contribution constructive en analysant une approche potentielle et nouvelle: le principe d'un «système Eurometro» en tant qu'**alternative possible au trafic aérien à petite distance** et autres moyens de transport couvrant une distance de jusqu'à 1000 km. Grâce au tracé entièrement souterrain et une technologie énergétique efficace, ce système devrait permettre comparé aux moyens utilisés actuellement un gain tangible dans les secteurs de la consommation d'énergie et aussi dans la protection du climat, des sites et contre le bruit.

L'**aménagement successif** d'un réseau Eurometro entre les principales agglomérations européennes pourrait devenir ainsi une sorte de „backbone“ d'un système de transport à grande vitesse efficace au niveau énergétique et environnemental et par cela prometteur à long terme en Europe. Avec lui on disposerait dans un temps prévisible d'un système technologique de pointe égalant pratiquement les vitesses et durées de déplacement du trafic aérien. Avec son **efficacité, sécurité et fiabilité élevées** dans les distances de déplacement jusqu'à quelque 1000 km, il apporterait des progrès sensibles au niveau de l'**écologie et de l'efficacité** et permettrait quand même des **durées de déplacement courtes.** Il **comblerait** ainsi un „vide technologique“ entre le **trafic ferroviaire** national et international classique, dont la vitesse et le tracé sont entravés par divers facteurs et le **trafic aérien inter-européen et intercontinental.**

Bibliographie

- Abay, G. [1999]: F1 Nachfrageabschätzung für Swissmetro. in: Berichte des NFP41 «Verkehr und Umwelt», Bericht F1. EDMZ Nr. 801.607.d. Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- Breimeier R. [1998]: in: Eisenbahn-Revue, Heft 10/1998
- Cassat A. [1997]: Demande de Concession: Electromécanique, Section 17, Bilan Énergétique, Rapport Niveau 3 – Bilan énergétique combiné. EPFL 1.0078/1.4000/b. EPF Lausanne, DE-LEME-A.Cassat, V_3. EPF Lausanne. (Confidentiel)
- Cassat A. und Bourquin V. [2000]: Aerodynamic drag force. Excel-Tabelle mit ergänzenden Simulationen zu Cassat [2000b]. EPF Lausanne, EPFL-DGM-IMHEF. Mai 2000.
- Deutsche Bahn [1999]: Mobilitäts-Bilanz für Personen und Güter. Die Verkehrssysteme Deutschlands im Vergleich. Broschüre und CD-ROM. Stand September 1999, Version 1.1. Deutsche Bahn AG Berlin.
- EU-Commission [2000a]: Communication on civil aviation and the environment. Supplement to transport europe – February 2000. European Information Service, Bureau de dépôt Bruxelles X.
- EU-Commission [2000b]: Taxation of aircraft fuel. Supplement to transport europe – March 2000. European Information Service, Bureau de dépôt Bruxelles X.
- Geisel J. [1999]: Ökologische Nachhaltigkeitsfaktoren von Hochgeschwindigkeitsverkehrssystemen am Beispiel der Eurometro. Diplomarbeit Nachdiplomstudium Umwelt, HTA Biel/Bienne. Berner Fachhochschule, HTA Biel/Bienne.
- Gers V., Hübner H., Peter O. und Stiller H. [1997]: Zur Ressourcenproduktivität von spurgeführten Hochgeschwindigkeitsverkehrssystemen: Ein Vergleich von ICE und Transrapid (Kurzfassung). Wuppertal Papers Nr. 75. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. D-Wuppertal.
- IPCC [1999]: Aviation and the global atmosphere. Cambridge University Press. UK-Cambridge. Summary for policy makers: www.ipcc.ch
- Kräupl S. und Leuenberger C. [1999]: Energieversorgung für die Eurometro. Diplomarbeit im Nachdiplomstudium Energietechnik, HTA Burgdorf. Berner Fachhochschule, HTA Burgdorf.
- Legeland C. [1998]: www.physik.uni-bielefeld.de/~clegelan/transrapid/energie.html
- Leuenberger C., Mombelli T. und Savodelli P. [1998]: Ökobilanz – Vergleich Eurometro-Kurzstreckenflugzeug. Semesterarbeit Nachdiplomstudium Energietechnik, HTA Burgdorf. Berner Fachhochschule, HTA Burgdorf.
- Leuenberger [Anhang B]: in: Ernst W. et al. [2000]: ENERGIE- UND UMWELTBILANZ EINER EUROMETRO. BERICHT F6 DES NFP 41. EIDGENÖSSISCHE DRUCK- UND MATERIALZENTRALE. BERN.
- Lufthansa [1999]: Umweltbericht Balance 1998/99. Hrsg.: Deutsche Lufthansa AG. Frankfurt am Main.
- Infras [1995]: Ökoinventar Transporte. SPP Umwelt Projekt 5. Infras. Zürich.
- Mingot S. und Baumgartner T. [1997]: Ökobilanz SWISSMETRO – LCA für ökologische Optimierung & Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln mit Vertiefung Untertagebau. Institut für Energietechnik, Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt, ETH-Zentrum UNL. ESU-Reihe Nr. 3/97. ETH Zürich.
- PSI (Paul Scherrer Institut) [2000]: Gabe Project: www.psi.ch/gabe. LCA-based Inventories
- Rudolf A. [1997]: Aerodynamic reference values for the Swissmetro system. EPF Lausanne. EPFL 1.0087/1.6210/b. Confidentiel.
- SWISSMETRO [1997-C1 bis C10]: Demande de Concession Tronçon Pilote Genève-Lausanne: Cahiers 1 bis 10. SWISSMETRO SA, Genève. (Confidentiel)
- Thyssen [2000]: www.maglev.com
- Transrapid International [2000]: www.transrapid-international.de/htmls/umentxt.html
- Trottmann B., Kronenberg S. und Balmer M. [1998]: Energiebilanz Eurometro – Energetische Untersuchung und Energiebilanzierung. Diplomarbeit Nachdiplomstudium Energietechnik, Ingenieurschule Burgdorf. Ingenieurschule Burgdorf.