



# Le ragioni del successo del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere

*The reasons for the success of freight rail transport through the Swiss Alps*

*Paolo FERRARI<sup>(\*)</sup>*

**Sommario** - Lo scambio delle merci fra l'Italia Nord Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro Settentrionale utilizza tre modi di trasporto: il trasporto stradale formato dagli itinerari che superano le Alpi attraverso i trafori del Frejus, del Monte Bianco, del Gran San Bernardo, del Gottardo e del San Bernardino; il trasporto ferroviario del Frejus; il trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere formato dalle linee del Gottardo e del Sempione. Quest'ultimo modo di trasporto è stato oggetto negli ultimi decenni di un processo di innovazione di largo respiro, che ha avuto successo nel raggiungere l'obbiettivo di invertire il trend decrescente della proporzione di merci trasportate dalla ferrovia. Attraverso uno studio della dinamica evolutiva della ripartizione del traffico merci fra i tre modi di trasporto, questo articolo ricerca la ragioni di tale successo, le quali forniscono utili indicazioni circa i criteri da adottare nei processi di innovazione nel trasporto ferroviario delle merci.

## 1. Introduzione

Il sistema ferroviario delle Alpi Svizzere, costituito dalle linee del Gottardo e del Sempione, è uno dei tre modi di trasporto utilizzati per lo scambio delle merci fra l'Italia Nord Occidentale – cioè l'area formata da Piemonte, Lombardia e Liguria – e la parte occidentale dell'Europa Centro Settentrionale – in particolare il “triangolo manifatturiero” comprendente la Ruhr, il Nord della Francia e il Belgio -, dove per modo di trasporto delle merci si intende una soluzione per trasferire merci da una origine ad una destinazione, la quale utilizza un particolare insieme di tecnologie, di strutture organizzative e di itinerari, in un determinato ambiente. Gli altri due modi di trasporto sono il modo stradale formato dagli itinerari che superano le Alpi attraverso i trafori del Frejus, del Monte Bianco, del Gran San Bernardo, del Gottardo e del San Bernardino, ed il modo di trasporto ferroviario for-

**Abstract** - Freight exchange between North-Western Italy and the Western part of Central-Northern Europe uses three transport modes: the road transport formed by the routes that cross the Alps through the tunnels of Frejus, of Mont Blanc, of Gran San Bernard, of Gotthard and of San Bernardino; the rail line of Frejus; the rail transport through the Swiss Alps, formed by the lines of Simplon and of Gotthard. The latter transport mode has undergone in the last decades a far reaching innovation process, which has succeeded in the objective to reverse the decreasing trend of the proportion of freight carried by rail. By studying the evolution dynamics of the freight traffic split between the three transport modes, this paper identifies the reasons for this success, which furnishes some useful suggestions about the criteria that should be followed in the process of innovation of freight rail transport.

## 1. Introduction

The rail transport of the Swiss Alps, formed by the Simplon and the Gotthard lines, is one of the three transport modes used for the exchange of freight between North – Western Italy – formed by Piedmont, Lombardy and Liguria – and the Western part of Central-Northern Europe – in particular the “manufacturing triangle”, formed by the Ruhr, Northern France and Belgium -, where we mean as transport mode a solution to transfer freight from an origin to a destination, which uses a particular set of technologies, of organizational structures and of itineraries, in a given environment. The other two transport modes are the road mode, composed by the routes that cross the Alps through the tunnels of Frejus, of Mont Blanc, of Gran San Bernard, of Gotthard and of San Bernardino, and the rail mode composed by the line of Frejus, which is a transport mode different from the rail transport of the Swiss Alps: it is perceived by users as an alternative to the latter and to road transport, as it is clear from the progressive shift of the proportion of traffic towards these other two transport modes shown by the experimental data.

<sup>(\*)</sup> Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale.

<sup>(\*)</sup> University of Pisa – Civil and Industrial Engineering Dpt.

mato dalla linea ferroviaria del Frejus, il quale è un modo di trasporto diverso dal trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere: esso è percepito dagli utenti come alternativo a quest'ultimo e al trasporto stradale, come risulta evidente dal progressivo trasferimento della proporzione di traffico verso questi due altri modi di trasporto, mostrato dai dati sperimentali.

Dalla Fig. 1 [20], che riporta l'andamento della ripartizione modale delle merci, in termini di tonnellate movimentate, fra strada e ferrovia in Svizzera fra il 1950 ed il 2001, si vede che agli inizi degli anni '50 del secolo scorso la proporzione di traffico ferroviario, era molto alta, superiore al 70%. Ciò era dovuto da un lato al fatto che all'epoca veniva spedito molto materiale pesante difficilmente trasportabile su strada, dall'altro alle difficili condizioni degli attraversamenti stradali delle Alpi. A partire dagli inizi degli anni '60 del secolo scorso questi attraversamenti furono notevolmente migliorati con l'apertura al traffico di vari trafori: del Monte Bianco e del Gran San Bernardo nel 1965, del San Bernardino nel 1967, del Frejus e del Gottardo nel 1980. Questi miglioramenti hanno prodotto una sostanziale diminuzione del costo del trasporto stradale, determinando il progressivo aumento della proporzione di traffico merci su strada, ed il corrispondente declino del trasporto ferroviario. Per opporsi a questo declino un piano di innovazione, tecnologica e organizzativa, di grande respiro del trasporto ferroviario attraverso le Alpi Svizzere fu intrapreso a partire dagli ultimi decenni del secolo scorso, basato fondamentalmente sulla progressiva sostituzione del trasporto a carro completo col trasporto intermodale e sull'impiego di carri a tecnologia avanzata, oltre ad un insieme di misure volte a favorire il trasferimento del traffico dalla strada alla ferrovia, da un lato mediante incentivi al trasporto ferroviario, dall'altro mediante l'imposizione, da parte della Confederazione Svizzera, di una tassa sul traffico pesante commisurata alle prestazioni [7].

Il trasporto a carro completo è il tradizionale servizio di trasporto ferroviario delle merci [11], [17], [19]. In questo servizio di trasporto i carri ferroviari vengono trasportati dalle sedi dei clienti ai più vicini centri di smistamento per formare treni diretti alle varie destinazioni, i quali possono essere eventualmente riordinati più volte nei centri di smistamento distribuiti lungo il percorso, ed alla fine i carri sono trasportati alle loro destinazioni. Le principali difficoltà con le quali il trasporto a carro completo si confronta sono il servizio di raccolta/consegna tra origine/destinazione ed il più vicino centro di smistamento, ed il riordino dei treni lungo il percorso. Ne derivano lunghi tempi di viaggio, i quali rendono difficile la competizione con il molto più veloce trasporto stradale. Per ovviare a queste difficoltà varie modifiche del servizio a carro completo sono state introdotte, ma la innovazione sostanziale è stata il trasporto intermodale, nel quale l'unità di trasporto intermodale (UTI) – container, cassa mobile, semirimorchio - ha sostituito il carro ferroviario come unità di carico.

We see from Fig. 1 [20], which shows the pattern of the proportions of freight moved by road and by railway in Switzerland between 1950 and 2001, that at the beginning of the '50s of the last century the proportion of rail traffic was rather high, greater than 70%. This result was due on the one hand to the fact that at that epoch railway carried much heavy material, which could hardly be carried by road, on the other hand to the bad conditions of the road routes across the Alps. Starting in the early '60s of the last century these routes were notably improved when several road tunnels went into operation: those of Mont Blanc and of Gran San Bernard in 1965, that of San Bernardino in 1967, those of Frejus and Gotthard in 1980. These improvements have caused a substantial decrease in the cost of road transport, giving rise to the progressive increase in the proportion of road traffic and to the corresponding decline in the rail transport. To oppose this decline a far reaching plan of technological and organizational innovation of the rail transport through the Swiss Alps was devised. It was based essentially on the progressive substitution of wagonload service with intermodal transport, and the use of wagons of advanced technology, besides a set of measures addressed to favour the shift of traffic from road to rail, on one hand through incentives to rail transport, on the other hand through the imposition of performance-based fee on heavy freight traffic by the Swiss Confederation [7].

Wagonload is the traditional service of freight rail transport [11], [17], [19]. Individual wagons are taken from the customer premises to their nearest point of assembly to form trains directed to various destinations, possibly marshalled many times along the routes at marshalling yards, and finally sent to their destinations. The main difficulties the wagonload service faces are the collection/delivery rail service between origin/destination and the nearest marshalling hub, and the marshalling along the route. They re-

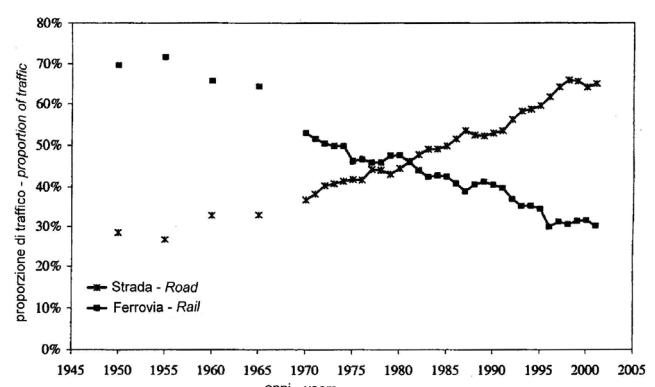


Fig. 1 – Evoluzione delle proporzioni di tonnellate di merci movimentate sulle reti stradali e ferroviarie della Svizzera tra il 1950 e il 2001 [20].

Fig. 1 – Evolution of the proportions of tons of freight moved on the road and rail networks of Switzerland between 1950 and 2001 [20].

Nel trasporto intermodale le UTI sono trasportate a mezzo di veicoli stradali dai luoghi di origine ai terminali intermodali, dove esse sono trasferite su treni di vario tipo [18] – treni blocco, shuttle, lineari - diretti ai terminali di destinazione, dai quali sono trasportate a mezzo di veicoli stradali ai luoghi di consegna. In taluni casi le UTI non vengono trasportate direttamente dal terminale di origine a quello di destinazione, ma utilizzano in successione due treni shuttle: in questo caso vengono trasferite da uno shuttle all'altro nei terminali che svolgono anche la funzione detta “gateway” [6], [18]. Per il trasferimento delle UTI dai veicoli stradali ai treni, e dai treni ai veicoli stradali, nei terminali intermodali viene utilizzata una varietà di attrezzature di diversa capacità, in dipendenza del volume di traffico da spostare [3], [21]. Queste attrezzature eseguono il trasferimento delle UTI da e verso i treni in tempi nettamente inferiori a quelli richiesti per trasferire i carri ferroviari da un treno all'altro nei centri di smistamento.

Il trasporto intermodale attraverso le Alpi Svizzere ha avuto inizio negli anni '60 del secolo scorso ad opera della HUPAC [14] e anche di altri operatori privati. Ma i passi decisivi sono stati quelli della entrata in esercizio dei terminali di Busto Arsizio, Novara e Gallarate nel 1992, 1995 e 2005 rispettivamente, collegati con partenze programmate ai grandi terminali di Colonia, Duisburg, Ludwigshafen, Rotterdam, Anversa nel Nord Europa. Un contributo essenziale è dovuto alle modifiche nella organizzazione del trasporto ferroviario, basata sull'uso crescente di treni shuttle fra coppie di terminali.

Come conseguenza di queste importanti innovazioni il declino del traffico ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere si è arrestato a circa la metà degli anni '90 del secolo scorso, quando la proporzione di tonnellate movimentate si era ridotta al 30%. Da questo momento in poi la proporzione di traffico merci ha ripreso a crescere, raggiungendo il 42% nel 2014.

Questo articolo si propone di dimostrare che al successo di queste innovazioni hanno contribuito in modo sostanziale tre fattori:

- a) l'epoca in cui il processo di innovazione ha avuto inizio, a metà circa degli anni '80 del secolo scorso, quando la proporzione di traffico ferroviario, in termini di tonnellate movimentate, era ancora abbastanza alta, poco al disopra del 40%, come si vede nella Fig. 1;
- b) le condizioni generali dell'economia, che hanno dato luogo ad un elevato tasso di crescita della domanda complessiva di trasporto delle merci;
- c) la fedeltà degli utenti verso il trasporto ferroviario attraverso le Alpi Svizzere, manifestatasi con la resistenza a trasferirsi al più economico trasporto stradale.

Per dare questa dimostrazione è necessaria una riflessione approfondita sulle funzioni di costo del trasporto delle merci, all'interno di un modello dinamico di ripartizione modale, che è l'oggetto del prossimo paragrafo.

sult in extended transit times, making difficult the competition with the fast road transport. To reduce these difficulties many changes in the wagonload service have been introduced, but the substantial innovation in freight rail transport has been the intermodal transport, in which the Intermodal Transport Unit (ITU) – container, swap body, semi-trailer – has replaced the individual wagon as traffic unit.

In the intermodal transport the ITUs are taken by road vehicles from the origin points to the intermodal terminals, where they are transferred to trains of various types [18] – block trains, shuttle trains, linear trains – directed to the destination terminals, from which the ITUs are taken by road vehicles to their final destinations. In some cases the ITUs are not carried directly from the origin terminal to that of destination, but they use in succession two shuttle trains: in these cases they are transferred from a shuttle to another in terminals that perform the so-called “gateway” function [6], [18]. To tranship the ITUs from road vehicles to trains, and from trains to road vehicles, a variety of equipments of different capacities is used, depending on the traffic volume to tranship [3], [21]. These equipments perform the transhipments of the ITUs from and to the trains in times largely lower than those required to transfer a wagon from a train to another in the marshalling yards.

Intermodal services through the Swiss Alps were initiated in the '60s of the last century by the HUPAC Company [14] and other private Companies. The decisive steps in this innovation have been those of the entry into service of the terminals of Busto Arsizio, Novara and Gallarate in 1992, 1995 and 2005 respectively, connected through scheduled departures with the great terminals of Cologne, Duisburg, Ludwigshafen, Rotterdam, Antwerp in Northern Europe. An essential contribution is due to the changes in rail transport organization, based on the increasing use of shuttle trains between pairs of terminals.

As a consequence of these important innovations the decline of the freight rail transport through the Swiss Alps come to a halt in about the mid-'90s of the last century, when the proportion of freight moved by rail was reduced to 30%. From this point forward the proportion of rail traffic returned to grow, reaching 42% in 2014.

This paper intends to prove that three factors contributed in an essential way to the success of these innovations:

- a) the time when the innovation process began, in the mid-'80s of the last century, when the proportion of tons moved by trains was still rather high, a little greater than 40%, as shown in Fig. 1;
- b) the general conditions of economy, which gave rise to a high growth rate of overall freight transport demand;
- c) the user loyalty to the rail transport through the Swiss Alps, revealed by the resistance to shift to the less costly road transport.

To give this proof, a thorough discussion on the cost functions of freight transport is necessary, inside a dynam-

## 2. Un modello dinamico di ripartizione modale del trasporto delle merci

Consideriamo due territori fra i quali vi è scambio di merci trasportate da un certo numero di modi di trasporto. I punti di origine e destinazione (O/D) delle merci sono dispersi in ciascun territorio intorno al rispettivo centroide, per cui altrettanto disperse sono le distanze di spedizione fra le varie coppie O/D. Uno spedizioniere, che spedisce regolarmente merci fra questi due territori, cerca di utilizzare il modo di trasporto che egli giudica essere il migliore. Il suo comportamento nasce dalla valutazione dei vari attributi dei modi di trasporto – esborso monetario, tempo di viaggio, affidabilità, sicurezza [4], [5], [9], [10], [16] – e dal suo atteggiamento psicologico riguardante, per esempio, l'immagine che egli ha del modo di trasporto e la visione della sua futura evoluzione. Supponiamo, come in [12] e [13], che per fare la sua scelta lo spedizioniere attribuisca a ciascuna tonnellata di merce trasportata da ciascun modo un numero, che è tanto più elevato quanto meno preferibile è il modo di trasporto. Se estraiamo in modo casuale una tonnellata di merce dall'insieme delle tonnellate spedite in un dato intervallo di tempo dai vari spedizionieri tra i due territori, il numero attribuito a ciascuna tonnellata per ciascun modo varia con la distanza di spedizione, l'atteggiamento di ciascun spedizioniere circa la sicurezza, la flessibilità e l'affidabilità del modo, e con il tipo di merce. Poiché:

- a) le distanze di spedizione sono diverse per le varie coppie di punti origine e destinazione, dispersi nei due territori intorno ai rispettivi centroidi;
- b) gli atteggiamenti degli spedizionieri sono distribuiti in modo aleatorio nella popolazione degli spedizionieri;
- c) il tipo di merce varia in modo casuale per ogni tonnellata estratta dall'insieme delle tonnellate, si ha che il numero attribuito a ciascuna tonnellata per ciascun modo di trasporto è una variabile aleatoria.

Denominiamo *costo del trasporto* la media di questa variabile aleatoria per ciascun modo. Il suo valore varia con il flusso di merci fra i due territori nell'unità di tempo: denominiamo *funzione di costo* relativa ad un modo di trasporto la relazione fra il costo del trasporto di questo modo e il flusso di merci – misurato in termini di tonnellate movimentate - che lo utilizza nell'unità di tempo. Ogni funzione di costo è relativa ad un dato intervallo temporale in cui la legge di evoluzione nel tempo delle caratteristiche infrastrutturali, tecnologiche ed organizzative del modo di trasporto resta costante. Se ad un certo punto la legge varia, perché per esempio entra in esercizio una nuova infrastruttura, o viene dato inizio ad un processo di innovazione tecnologica e/o organizzativa del modo di trasporto, la funzione di costo cambia.

La funzione di costo di un modo di trasporto assume due forme sostanzialmente diverse secondo che le caratteristiche del modo di trasporto restano costanti al variare del flusso di merci che lo utilizza, ovvero esse variano

ic model of modal split, which is the subject of the next Section.

## 2. A dynamic model of modal split for freight transport

*Consider two territories between which there is exchange of freight carried by a number of transport modes. The origin and destination (O/D) points of freight are dispersed in each territory about the respective centroid, so that the shipping distances between the various O/D pairs are as much dispersed. A carrier, who sends regularly goods between the two territories, tends to use the transport mode that he deems to be the best. His behaviour stems from the evaluation of the attributes of the mode - monetary expense, travel time, flexibility, reliability, safety [4], [5], [9], [10], [16] – and from relevant psychological attitudes concerning e.g. the image he has of each transport mode and the vision of its future evolution. We suppose, as in [12] and [13], that to make his choice, the carrier assigns to each ton of goods carried by each mode a number: the higher it is, the less preferable the mode is. If we draw randomly a ton of goods from the set of tons sent in a given time period between the two territories, the number attributed to this ton for each mode varies with the shipping distance, the attitude of the carrier towards the safety, the reliability and the flexibility of the mode, and the type of freight. Since:*

- a) *the shipping distances are different for the various O/D points, dispersed in the two territories;*
- b) *the carrier attitudes are randomly distributed in the carrier population;*
- c) *the type of freight varies randomly for each ton drawn from the set of tons, we have that the number attributed to each ton for each mode is a random variable.*

*We name transport cost the average of this random variable for each mode. Its value varies with the freight flow between the two territories in the time unit: we name cost function relative to a transport mode the relation between the transport cost of this mode and the freight flow – measured as the number of tons moved – that uses it in one time unit. Each cost function is relative to a given time interval in which the law of evolution over time of the infrastructural, technological and organizational characteristics of the transport mode remains unchanged. If at some time the law changes, because a new infrastructure comes into operation, or a process of technological and/or organizational innovation of the transport mode begins, the cost function changes.*

*The cost function of a transport mode assumes two substantially different forms, depending on whether the characteristics of the transport mode remain unchanged as the freight flow that uses it varies, or they change as freight flow varies. In the case of road transport the geometric characteristics, the traffic rules, and also other rules, as those concerning the rest break of drivers, remain un-*

al variare del flusso. Nel caso del trasporto stradale le caratteristiche geometriche, le regole riguardanti la circolazione e anche altre, come quelle riguardanti il riposo degli autisti, restano invariate. Il funzionamento del sistema di trasporto è determinato dal comportamento dei conducenti, i quali hanno la libertà di scelta delle decisioni di guida, nel rispetto delle regole della circolazione. Questa libertà si riduce all'aumentare del flusso veicolare, e conseguentemente aumenta il costo del trasporto. Quest'ultimo in alcuni casi aumenta ulteriormente a seguito della imposizione di qualche forma di road pricing, in genere crescente all'aumentare del flusso veicolare, imposta per indurre una parte degli utenti della strada a trasferirsi su altri modi di trasporto. Quindi, tenendo conto che una parte della capacità stradale è utilizzata dai veicoli passeggeri, si ha che il costo del trasporto percepito dagli spedizionieri delle merci è funzione crescente, in genere più che lineare, del flusso di merci che utilizza il modo di trasporto stradale.

Nel caso del trasporto ferroviario, se le caratteristiche del sistema di trasporto restano invariate al variare del flusso delle merci, come in genere avviene nel servizio di trasporto tradizionale, si ha una situazione simile a quella del trasporto stradale. L'aumento del flusso crea congestione nei centri di smistamento, i tempi di attesa aumentano, e con essi aumenta il costo del trasporto, il quale quindi è una funzione crescente, in misura più che lineare, del flusso delle merci. Del tutto diversa è invece la forma della funzione di costo nel caso in cui le caratteristiche del trasporto ferroviario vengono modificate al variare del flusso delle merci, come per esempio avviene nel caso del trasporto intermodale.

Si consideri la Fig. 2, la quale mostra una sequenza di curve calcolate da BALLIS e GOLIAS [2], ciascuna delle quali fornisce, per un dato tipo di terminale intermodale, il costo monetario per il trasbordo di una UTI in funzione del numero di UTI trasbordate giornalmente. I terminali considerati nella figura hanno caratteristiche diverse, dipendenti dal tipo di attrezzature di movimentazione, dal numero e dalla lunghezza dei binari di movimentazione e dal modo in cui questi binari sono utilizzati. Le curve sono disposte sequenzialmente nella figura, supponendo che al crescere del numero di UTI movimentate giornalmente vengano impiegati terminali di capacità crescente, andando da un tipo di terminale a quello più prossimo di maggiore capacità quando "la capacità è esaurita o perché l'attrezzatura è inidonea, o per limitata capacità dei binari di movimentazione" [2]. Con questo criterio ad ogni intervallo di UTI movimentate giornalmente corrisponde il terminale che realizza il minimo costo di movimentazione.

La curva tratteggiata riportata nella figura, calcolata dall'autore di questo articolo, la quale interpola i punti di minimo delle varie curve, è la curva esponenziale decrescente di equazione:

$$y = 30 + 105 \exp(-0.008x) \quad (1)$$

*changed. The functioning of the system is defined by the behaviour of drivers, who have the freedom of driving decisions, in accordance with the traffic rules. This freedom decreases as vehicular flow increases, and the transport cost increases correspondingly. In some cases the latter increases further as a consequence of the imposition of some form of road pricing, in order to induce a share of road users to shift to another transport mode. Thus, considering that a portion of road capacity is used by passenger vehicles, we have that the transport cost perceived by freight carriers is an increasing function, more than linear, of the freight flow that uses the road transport mode.*

*In the case of rail transport, if the characteristics of the transport system remain unchanged as freight flow varies, as it generally occurs in the traditional transport service, the situation is like that of the road transport. The flow increase causes congestion in the marshalling yards, the waiting times rise and the transport cost increases correspondingly: thus it is an increasing function, more than linear, of freight flow. Instead the cost function is totally different when the characteristics of rail transport change as freight flow varies, as it occurs e.g. in the case of intermodal transport.*

*Consider Fig. 2, which shows a sequence of curves computed by BALLIS and GOLIAS [2], each of which furnishes, for a given type of intermodal terminal, the monetary transhipment cost of one ITU as a function of the number of ITUs transhipped per day. The terminals considered in the figure have different designs, depending on the type of handling equipment, the number and the length of the transhipment tracks, and the way in which these tracks are utilized. The curves are placed sequentially in the figure by*

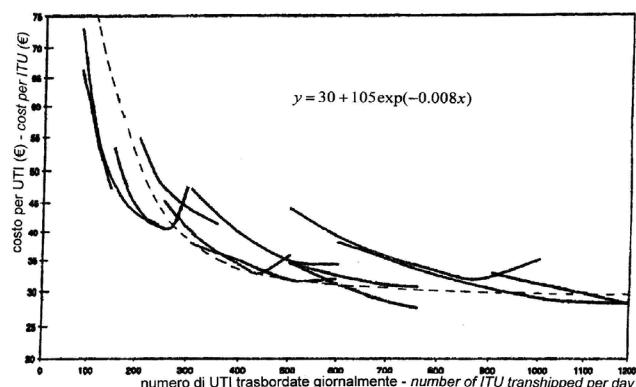


Fig. 2 – Funzioni di costo monetario di terminali intermodali con caratteristiche diverse, calcolate da BALLIS e GOLIAS [2] e funzione di costo del trasbordo (linea tratteggiata) la cui espressione analitica è riportata nella figura.

Fig. 2 – Monetary cost functions of intermodal terminals with various characteristics computed by BALLIS and GOLIAS [2] and transhipment cost function (broken line) whose equation is shown in the figure.

dove  $y$  è il costo di movimentazione di una UTI espresso in euro, mentre  $x$  è il numero di UTI movimentate giornalmente. Essa rappresenta la relazione fra costo di movimentazione e numero di UTI movimentate giornalmente nell'ipotesi che al crescere del numero di UTI movimentate vengano impiegati terminali di capacità crescente, cominciando da quelli di capacità minima. Poiché questo criterio è quello che dà luogo, come si è detto, al minimo costo di movimentazione, esso è quello generalmente adottato nella progettazione dei terminali, per cui possiamo assumere la (1) come la relazione fra il costo sopportato dagli spedizionieri per la movimentazione delle merci nei terminali ed il flusso di merci movimentate giornalmente.

Riteniamo che una funzione esponenziale decrescente fra costo e flusso, nella quale il costo sopportato dagli utenti diminuisce all'aumentare del flusso, si applichi non solo ai terminali intermodali, ma è la tipica funzione di costo di un sistema di trasporto ferroviario delle merci soggetto ad un processo di innovazione tendente ad invertire, essenzialmente con la introduzione del trasporto intermodale, il trend decrescente della proporzione di traffico merci trasportato dalla ferrovia. Infatti, se il processo di innovazione ha successo, l'aumento del flusso ferroviario delle merci richiede non solo terminali di maggiore capacità, ma anche migliore tecnologia e organizzazione del sistema di trasporto nel suo complesso, per esempio partenze più frequenti, treni di maggiore lunghezza e capacità che riducono il costo sopportato dagli utenti [15]. Invece, nel caso in cui il processo di innovazione fallisse nel suo obiettivo di invertire il trend decrescente del trasporto ferroviario, ed il flusso di merci trasportate dalla ferrovia continuasse a diminuire, la capacità dei terminali costruiti per sostituire il servizio di trasporto tradizionale verrebbe ridotta, le partenze dei treni diverrebbero meno frequenti, dando luogo all'aumento del costo del trasporto sopportato dagli utenti.

Questo articolo studia il sistema di trasporto delle merci fra l'Italia Nord Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro Settentrionale, il quale utilizza, come si è visto nell'Introduzione, tre modi di trasporto: il modo di trasporto stradale, il modo di trasporto ferroviario del Frejus; il modo di trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere. Il comportamento di questo sistema è studiato durante una sequenza  $\Sigma$  di intervalli temporali unitari (per esempio un anno), in un periodo di tempo durante il quale le funzioni di costo dei tre modi di trasporto restano immutate, a partire dalla metà degli anni '80 del secolo scorso, quando ha avuto inizio il processo di innovazione del trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere. Sia  $T^t$  il totale delle merci (misurate per esempio in tonnellate) scambiate in entrambe le direzioni fra i due territori nell'unità di tempo al tempo  $t$ , e trasportate complessivamente dai tre modi di trasporto. Supponiamo che  $T^t$ , denominato *flusso delle merci*, aumenti nel tempo al tasso  $r'$ , tendendo ad un valore asintotico  $K$ . Il tasso  $r'$  diminuisce al crescere di  $T^t$ , e tende a zero quando  $T^t$  si avvicina a  $K$ .

*supposing that terminals of increasing capacity are used as the number of ITUs transhipped per day increases, going from a type of terminal to that of the next higher level as "the capacity is exhausted either due to the equipment inadequacy or due to track capacity limitations" [2]. With this criterion the terminal corresponding to each interval of ITUs transhipped per day is that of minimum cost per that interval.*

*The broken line shown in the figure, computed by the author of this paper, which interpolates the minimum points of the successive curves, is the exponential decreasing function of equation:*

$$y = 30 + 105 \exp(-0.008x) \quad (1)$$

*where  $y$  is the transhipment cost of one ITU measured in euro, and  $x$  is the number of ITUs transhipped per day. It represents the relation between the transhipment cost and the number of ITUs transhipped per day, in the hypothesis that terminals of increasing capacity are used as the number of ITUs increases, starting from that of minimum capacity. Since this is the criterion which gives rise to minimum transhipment cost, as said above, it is that normally used in the terminal design; thus we can assume Eq. (1) as the relation between the cost borne by carriers for the transhipment of freight in a terminal and the flow of freight transhipped per day.*

*We maintain that a decreasing exponential function between cost and flow, in which the cost borne by users decreases as flow increases, applies not only to intermodal terminals, but it is the typical cost function of a freight rail transport system subject to an innovation process tending to reverse, essentially by introducing the intermodal transport, the decreasing trend of the proportion of freight traffic carried by rail. In fact, if the innovation process is successful, the increase in rail freight flow needs not only terminals of greater capacity, but also better technology and organization of the transport system as a whole, e.g. more frequent departures and trains of greater length and capacity, which reduce the cost borne by users [15]. Instead, were the innovation process unsuccessful in its objective of reversing the decreasing trend of rail transport, and freight flow continued to diminish, the capacity of terminals built to substitute the wagonload service would be reduced, the departures of trains would become less frequent, giving rise to an increase in cost borne by users.*

*This paper studies the freight transport system between the North-Western Italy and the Western part of the Central-Northern Europe, which uses, as said in the Introduction, three transport modes: the road transport, the Frejus rail transport, the rail transport of the Swiss Alps. The behaviour of this transport system is studied during a sequence  $\Sigma$  of unit time intervals (e.g. one year), in a time period during which the cost functions of the three transport modes remain unchanged, starting from the mid-'80s of the last century, when the innovation process of the rail transport of the Swiss Alps began. Let  $T^t$  be the amount of freight (measured e.g. in tons) exchanged in both directions*

Indicando con  $\bar{r}$  il valore iniziale di  $r^t$ , corrispondente ad un flusso nullo, l'equazione che definisce l'evoluzione di  $T^t$  è:

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + \bar{r} \left( 1 - T^t / K \right) \right] \quad (2)$$

Indicando con  $x_i^t$  la frazione di  $T^t$  che usa il modo  $i$  al tempo  $t$ , in cui  $i = 1$  individua il trasporto stradale,  $i = 2$  il trasporto ferroviario del Frejus e  $i = 3$  il trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere, il flusso di merci sul modo  $i$  al tempo  $t$  è  $x_i^t T^t$ .

Poiché sia la capacità che l'organizzazione del trasporto del modo stradale e di quello ferroviario del Frejus non hanno subito variazioni sostanziali al variare del flusso nel periodo di tempo considerato, mentre il costo del trasporto stradale è andato aumentando per effetto della imposizione, a partire dal 2001, di una tassa commisurata alle prestazioni sul traffico pesante che percorre le strade della Svizzera [7], [8], attribuiamo alle funzioni di costo di entrambi questi modi di trasporto un forma polinomiale crescente del secondo ordine. Invece la funzione di costo del trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere, le cui caratteristiche sono state modificate progressivamente al variare del flusso allo scopo di invertire il trend decrescente della proporzione di traffico merci trasportata, è una funzione esponenziale come la (1). Quindi le espressioni delle funzioni di costo dei tre modi di trasporto sono:

$$\begin{aligned} \text{modo 1: } c_1(x_1^t T^t) &= \alpha_0 + \alpha_1 x_1^t T^t + \alpha_2 (x_1^t T^t)^2 \\ \text{modo 2: } c_2(x_2^t T^t) &= \beta_0 + \beta_1 x_2^t T^t + \beta_2 (x_2^t T^t)^2 \\ \text{modo 3: } c_3(x_3^t T^t) &= \gamma_0 + \gamma_1 \exp(\gamma_2 x_3^t T^t) \end{aligned} \quad (3)$$

dove  $\gamma_2 < 0$ .

Il modello assume che uno spedizioniere attribuisce a ciascuna tonnellata di merce trasportata da ciascun modo un costo al tempo  $t + 1$  sulla base della sua conoscenza delle prestazioni del modo al tempo  $t$ , e quindi che il costo del trasporto attribuito al tempo  $t + 1$  al modo  $i$  è funzione del flusso  $x_i^t T^t$ . Assumendo inoltre l'ipotesi correntemente utilizzata nella teoria dell'utilità aleatoria e quindi in quella della ripartizione modale, che i residui dei costi intorno alle loro medie siano variabili di Gumbel identicamente e indipendentemente distribuite con media nulla e con fattore di scala uguale a 1, è stato dimostrato in [12] che la frazione  $\bar{x}_i^t$  di  $T^{t+1}$  che userebbe il modo  $i$  al tempo  $t + 1$  se ciascun spedizioniere scegliesse, per ciascuna tonnellata di merce che intende spedire, il modo di trasporto a cui attribuisce il costo più basso, è data da:

$$\bar{x}_i^t = \frac{\exp(-c_i[x_i^t T^t])}{\sum_{j=1}^3 \exp(-c_j[x_j^t T^t])} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

La validità delle ipotesi con le quali stata ottenuta la (4), e di quelle riguardanti le espressioni attribuite alle funzioni di costo (3), sarà verificata nel paragrafo 3 osser-

*between the two territories in one time unit at time  $t$ , and carried overall by the three transport modes. We suppose that  $T^t$ , named freight flow, increases over time at rate  $r^t$ , tending to an asymptotic value  $K$ . Rate  $r^t$  decreases as  $T^t$  increases, and tends to zero when  $T^t$  approaches  $K$ . By denoting  $\bar{r}$  as the starting value of  $r^t$ , corresponding to zero freight flow, the equation that defines the evolution of  $T^t$  is*

$$T^{t+1} = T^t \left[ 1 + \bar{r} \left( 1 - T^t / K \right) \right] \quad (2)$$

*By denoting  $x_i^t$  as the proportion of  $T^t$  that uses mode  $i$  at time  $t$ , where  $i = 1$  denotes the road transport,  $i = 2$  the Frejus rail transport and  $i = 3$  the rail transport of the Swiss Alps, the freight flow on mode  $i$  at time  $t$  is  $x_i^t T^t$ .*

*Since both capacity and organization of the road mode and of the Frejus rail mode remained unchanged as the freight flow varied in the time period we are considering, while the road transport cost increased over time as a consequence of the imposition, starting from 2001, of the imposition of a performance based fee on the heavy traffic travelling the Swiss roads [7], [8], we attribute to the cost functions of both these modes an increasing second order polynomial form. Instead the cost function of the rail transport of the Swiss Alps, whose characteristics have been modified progressively as freight flow varied, in order to reverse the decreasing trend of the proportion of freight traffic, is an exponential function like Eq. (1). So the expressions of the cost functions of the three transport modes are:*

$$\begin{aligned} \text{modo 1: } c_1(x_1^t T^t) &= \alpha_0 + \alpha_1 x_1^t T^t + \alpha_2 (x_1^t T^t)^2 \\ \text{modo 2: } c_2(x_2^t T^t) &= \beta_0 + \beta_1 x_2^t T^t + \beta_2 (x_2^t T^t)^2 \\ \text{modo 3: } c_3(x_3^t T^t) &= \gamma_0 + \gamma_1 \exp(\gamma_2 x_3^t T^t) \end{aligned} \quad (3)$$

where  $\gamma_2 < 0$ .

*The model supposes that a user assigns to each ton carried by each mode a cost at time  $t + 1$  on the basis of his knowledge of the performance of the mode at time  $t$ , and thus that the average cost assigned to mode  $i$  at time  $t + 1$  is a function of freight flow  $x_i^t T^t$ . Moreover, assuming the hypothesis commonly used in the theory of random utility, and thus in that of modal split, that the residuals of the costs about their averages are Gumbel variables identically and independently distributed with null mean and scale parameter equal to 1, it has been proven in [12] that the fraction  $\bar{x}_i^t$  of  $T^{t+1}$  that would use mode  $i$  at time  $t + 1$  if each carrier chose, for each ton that he intends to send, the transport mode to which he assigns the minimum cost, is given by:*

$$\bar{x}_i^t = \frac{\exp(-c_i[x_i^t T^t])}{\sum_{j=1}^3 \exp(-c_j[x_j^t T^t])} \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

*The validity of the hypotheses by which Eq (4) has been obtained, and of those concerning the expressions attributed to cost functions (3), will be proven in Section 3 by showing that the results obtained by the application of the model reproduces with good approximation the experimental results.*

vando che i risultati ottenuti dalla applicazione del modello riproducono con notevole fedeltà i risultati sperimentali.

Gli utenti si spostano da un modo di trasporto ad un altro ritenuto più conveniente con un certo ritardo, che è dovuto a numerosi fattori, fra i quali limitata fiducia nelle future possibilità di un nuovo modo di trasporto, difficoltà ad adattare la propria organizzazione logistica, in generale semplice inerzia. A causa di questo ritardo, solo alcuni di coloro che ritengono il modo  $i$  migliore di quello che stanno usando al tempo  $t$  abbandoneranno quest'ultimo al tempo  $t + 1$ . Ciò significa che  $x_i^{t+1} - x_i^t$  è solo una frazione di  $\bar{x}_i^t - x_i^t$ , per cui si ha:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \delta [\bar{x}_i^t - x_i^t] \quad (5)$$

dove il parametro  $\delta$ ,  $0 < \delta < 1$  che supponiamo essere costante nel tempo, è il rapporto della differenza  $x_i^{t+1} - x_i^t$  della proporzione di flusso di merci sul modo  $i$  ai tempi  $t + 1$  e  $t$ , rispetto alla differenza  $\bar{x}_i^t - x_i^t$  della proporzione che si realizzerebbe se tutti gli utenti utilizzassero al tempo  $t + 1$  il modo di trasporto che giudicano migliore. Esso è quindi una misura del ritardo con cui gli utenti si spostano da un modo di trasporto ad un altro: quanto più lenti sono gli utenti, tanto più basso è  $\delta$ .

Poiché  $x_1^t = 1 - x_2^t - x_3^t$ , otteniamo dalla (2) e dalla (5) che l'evoluzione nel tempo del sistema di trasporto che stiamo esaminando è data, partendo dai valori iniziali  $T^0$ ,  $x_2^0$  e  $x_3^0$  di  $T^t$ ,  $x_2^t$  e  $x_3^t$  rispettivamente, dalla iterata applicazione del seguente sistema di equazioni:

$$\begin{aligned} x_2^{t+1} &= x_2^t + \delta [\bar{x}_2^t - x_2^t] \\ x_3^{t+1} &= x_3^t + \delta [\bar{x}_3^t - x_3^t] \\ T^{t+1} &= T^t [1 + \bar{r}(1 - T^t / K)] \end{aligned} \quad (6)$$

in cui ad ogni iterazione si sostituiscono a  $T^t$ ,  $x_2^t$  e  $x_3^t$ , i valori ottenuti nella iterazione precedente, e dove le funzioni  $\bar{x}_2^t$  e  $\bar{x}_3^t$  assumono le espressioni seguenti, ottenute dalla (4) ponendo  $x_1^t = 1 - x_2^t - x_3^t$ :

$$\bar{x}_2^t = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(1 - x_2^t - x_3^t)T^t] + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_3(x_3^t T^t)]} \quad (7)$$

$$\bar{x}_3^t = \frac{1}{1 + \exp[c_3(x_3^t T^t) - c_1(1 - x_2^t - x_3^t)T^t] + \exp[c_3(x_3^t T^t) - c_2(x_2^t T^t)]} \quad (8)$$

Lo stato del sistema al tempo  $t$  è individuato da un punto di coordinate  $(x_2^t, x_3^t, T^t)$  in un insieme detto *spazio delle fasi* il quale, come si vede nella Fig. 3, è un prisma formato dalla porzione non negativa dello spazio  $(x_2, x_3, T)$  limitata dal piano  $T = K$  e dal piano  $x_2 + x_3 = 1$ , i quali danno luogo rispettivamente alla faccia triangolare superiore del prisma ed alla faccia rettangolare opposta allo spigolo  $OK$ . L'evoluzione nel tempo del sistema di trasporto è rappresentata da una traiettoria nello spazio delle fasi, formata dalla successione dei punti le cui coordinate sono generate dalla ripetuta applicazione del sistema di equazioni (6).

*Users shift from a transport mode to another deemed more suitable with some delay, which is due to many factors, including limited confidence in the future possibilities of a new transport mode, difficulties in adapting the logistical organization, and simple inertia, in general. Because of this delay, only some of those who deem mode  $i$  better than that they are using at time  $t$  will abandon it at time  $t + 1$ . This means that  $x_i^{t+1} - x_i^t$  is only a fraction of  $\bar{x}_i^t - x_i^t$ , so we have:*

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \delta [\bar{x}_i^t - x_i^t] \quad (5)$$

*where parameter  $\delta$ ,  $0 < \delta < 1$  which we suppose to be constant over time, is the ratio of the difference  $x_i^{t+1} - x_i^t$  between the proportions of freight flows on mode  $i$  at times  $t + 1$  and  $t$ , to the difference  $\bar{x}_i^t - x_i^t$  of the proportions that would occur if all users chose at time  $t + 1$  the mode that they deem the best. Thus it is a measure of the delay with which users shift from one mode to another: the slower users are, the smaller  $\delta$  is.*

*Since  $x_1^t = 1 - x_2^t - x_3^t$ , we have from Eq. (2) and Eq. (5) that the evolution over time of the transport system we are examining is given, starting from the initial values  $T^0$ ,  $x_2^0$  and  $x_3^0$  of  $T^t$ ,  $x_2^t$  and  $x_3^t$  respectively, by the iterated application of the following system of equations:*

$$\begin{aligned} x_2^{t+1} &= x_2^t + \delta [\bar{x}_2^t - x_2^t] \\ x_3^{t+1} &= x_3^t + \delta [\bar{x}_3^t - x_3^t] \\ T^{t+1} &= T^t [1 + \bar{r}(1 - T^t / K)] \end{aligned} \quad (6)$$

*in which at each iteration  $T^t$ ,  $x_2^t$  and  $x_3^t$ , assume the values obtained in the previous iteration, and where functions  $\bar{x}_2^t$  and  $\bar{x}_3^t$  assume the following expressions, obtained from Eq (4) with  $x_1^t = 1 - x_2^t - x_3^t$ :*

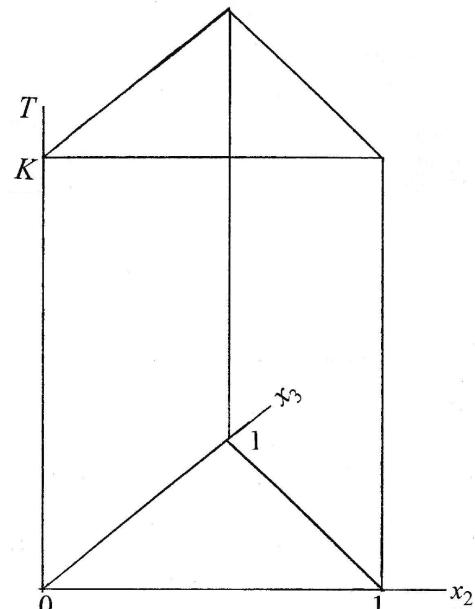


Fig. 3 – Lo spazio delle fasi.  
Fig. 3 – The phase space.

Si consideri un punto nello spazio delle fasi, le cui coordinate  $x_2^*, x_3^*, T^*$  siano soluzioni del sistema:

$$\begin{aligned} x_2^* &= x_2^* + \delta \left[ \bar{x}_2^* - x_2^* \right] \\ x_3^* &= x_3^* + \delta \left[ \bar{x}_3^* - x_3^* \right] \\ T^* &= T^* \left[ 1 + \bar{r} \left( 1 - T^* / K \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

in cui  $\bar{x}_2^*$  e  $\bar{x}_3^*$  hanno le espressioni (7) e (8) rispettivamente, con  $x_2^t = x_2^*$ ,  $x_3^t = x_3^*$ ,  $T^t = T^*$ . Le (9) indicano che questo punto riproduce se stesso nella ripetuta applicazione del sistema (6), cioè è un *punto fisso*. Si ricava immediatamente che, poiché  $\bar{r} > 0$ ,  $T^* = K$ , qualunque siano  $x_2^*$  e  $x_3^*$  i quali, poiché  $\delta > 0$ , sono a loro volta soluzioni del sistema:

$$\begin{aligned} x_2^* &= \bar{x}_2 \left( x_2^*, x_3^*, K \right) \\ x_3^* &= \bar{x}_3 \left( x_2^*, x_3^*, K \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Dalla (10), dove  $\bar{x}_2$  e  $\bar{x}_3$  sono le componenti di una funzione vettoriale definita nell'insieme costituito dalla base superiore del prisma di Fig. 3, si vede che  $x_2^*$  e  $x_3^*$  sono indipendenti da  $\delta$ . Poiché la funzione è continua e l'insieme di definizione è chiuso e limitato, è noto dall'Analisi che almeno un punto fisso di tale funzione, soluzione del sistema di equazioni (10), certamente esiste.

Si consideri un punto nello spazio delle fasi di coordinate  $(x_2, 0, K)$ , nel quale cioè si ha  $x_3 = 0$ . Poiché la funzione di costo  $c_3(x_3 T)$  ha una forma simile alla (1), il coefficiente  $\gamma_1$  nella terza delle (3) è molto elevato, per cui dalla (8) si ha che  $\bar{x}_3(x_2, 0, K) = 0$ , qualunque sia  $x_2$ ,  $0 \leq x_2 \leq 1$ . La funzione  $\bar{x}_2(x_2, 0, K)$  è definita su un insieme compatto, il segmento  $[0, 1]$  dell'asse reale, ed ha quindi almeno un punto fisso  $x_2^*$ , cioè  $x_2^* = \bar{x}_2(x_2^*, 0, K)$ . Poiché  $\bar{x}_3(x_2, 0, K) = 0$ , qualunque sia  $x_2$ , si ha che  $\bar{x}_3(x_2^*, 0, K) = 0$ , e quindi il punto di coordinate  $(x_2^*, 0, K)$  è un punto fisso del sistema (6). Se la traiettoria, avente origine nel punto  $(x_2^0, x_3^0, T^0)$  che rappresenta lo stato del sistema nell'istante iniziale del processo di innovazione, generata dalla ripetuta applicazione del sistema (6) converge verso il punto  $(x_2^*, 0, K)$  per  $t \rightarrow \infty$ , esso è l'*attrattore*, cioè il punto di equilibrio asintotico, del sistema di trasporto. Se il punto  $(x_2^*, 0, K)$  fosse l'attrattore del sistema, l'evoluzione di quest'ultimo sarebbe caratterizzata da una progressiva diminuzione nel tempo della proporzione  $x_3^t$  di traffico merci trasportata dal modo 3. Ciò significherebbe il fallimento del piano di innovazione che dà luogo alla funzione  $c_3(x_3 T)$ , posto in atto per invertire il trend decrescente della proporzione di traffico merci trasportato dal modo 3. È quindi importante individuare le condizioni in cui il punto  $(x_2^*, 0, K)$  non è l'attrattore del sistema.

Supponiamo che il processo di innovazione del modo 3 abbia inizio in un'epoca  $t = 0$  in cui la proporzione di traffico sul modo 3 è ancora abbastanza elevata, mentre il costo del trasporto è alquanto superiore a quello del trasporto stradale. In queste condizioni la proporzione di utenti che ritengono il modo 3 migliore degli altri è minore di quella di coloro che lo utilizzano, cioè  $\bar{x}_3^0 < x_3^0$ . Vediamo dalla seconda delle (6) che all'epoca successiva a

$$\bar{x}_2^t = \frac{1}{1 + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_1(1 - x_2^t - x_3^t) T^t] + \exp[c_2(x_2^t T^t) - c_3(x_3^t T^t)]} \quad (7)$$

$$\bar{x}_3^t = \frac{1}{1 + \exp[c_3(x_3^t T^t) - c_1(1 - x_2^t - x_3^t) T^t] + \exp[c_3(x_3^t T^t) - c_2(x_2^t T^t)]} \quad (8)$$

The state of the system at time  $t$  is identified by a point of coordinate  $(x_2^t, x_3^t, T^t)$  in a set named phase space, which is, as Fig. 3 shows, a prism constituted by non-negative portion of the space  $(x_2, x_3, T)$  bounded by the plane  $T = K$  and by the plane  $x_2 + x_3 = 1$ , which give rise to the upper triangular face of the prism and to the rectangular face opposite to the edge  $OK$  respectively. The evolution over time of the transport system is represented by a trajectory in the phase space, formed by the succession of points whose coordinates are generated by the iterated application of system (6).

Consider a point in the phase space whose coordinates  $x_2^*, x_3^*, T^*$  are solutions of the system:

$$\begin{aligned} x_2^* &= x_2^* + \delta \left[ \bar{x}_2^* - x_2^* \right] \\ x_3^* &= x_3^* + \delta \left[ \bar{x}_3^* - x_3^* \right] \\ T^* &= T^* \left[ 1 + \bar{r} \left( 1 - T^* / K \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

where  $\bar{x}_2^*$  and  $\bar{x}_3^*$  have the expressions (7) and (8) respectively, with  $x_2^t = x_2^*$ ,  $x_3^t = x_3^*$ ,  $T^t = T^*$ . Eqs. (9) show that this point reproduces itself in the iterated applications of system (6), i.e. it is a fixed point. We have that, as  $\bar{r} > 0$ ,  $T^* = K$ , whatever  $x_2^*$  and  $x_3^*$ , which, as  $\delta > 0$ , are in their turn solutions of the system:

$$\begin{aligned} x_2^* &= \bar{x}_2 \left( x_2^*, x_3^*, K \right) \\ x_3^* &= \bar{x}_3 \left( x_2^*, x_3^*, K \right) \end{aligned} \quad (10)$$

We see from Eqs. (10), where  $\bar{x}_2$  and  $\bar{x}_3$  are the components of a vector function defined in the set constituted by the upper base of the prism of Fig. 3, that  $x_2^*$  and  $x_3^*$  are independent of  $\delta$ . Since this function is continuous and the definition set is closed and bounded, we know from the Analysis that at least one fixed point of this function, solution of system (10), certainly exists.

Consider a point in the phase space of coordinates  $(x_2, 0, K)$ , i.e. in which  $x_3 = 0$ . Since cost function  $c_3(x_3 T)$  has a form like Eq. (1), coefficient  $\gamma_1$  in the third Eq. (3) is very high, so that we have from Eq. (8) that  $\bar{x}_3(x_2, 0, K) = 0$ , whatever  $x_2$ ,  $0 \leq x_2 \leq 1$ . Function  $\bar{x}_2(x_2, 0, K)$  is defined in a compact set, the segment  $[0, 1]$  of the real axis, and thus it has at least a fixed point  $x_2^*$ , i.e.  $x_2^* = \bar{x}_2(x_2^*, 0, K)$ . Since  $\bar{x}_3(x_2, 0, K) = 0$ , whatever  $x_2$ , we have that  $\bar{x}_3(x_2^*, 0, K) = 0$ , and thus the point of coordinates  $(x_2^*, 0, K)$  is a fixed point of system (6). If the trajectory generated by the iterated application of system (6), starting from the point  $(x_2^0, x_3^0, T^0)$  that represents the state of the system at the initial time of the innovation process, converges towards the point  $(x_2^*, 0, K)$  as  $t \rightarrow \infty$ , the latter is the attractor, i.e. the asymptotic equilibrium point, of the transport system. Were the point  $(x_2^*, 0, K)$  the attractor of the system, the evolution of the latter would be characterized by a progressive decrease over time of proportion  $x_3^t$  of freight traffic carried by mode 3. This would

quella in cui il processo di innovazione ha avuto inizio, alcuni utenti del modo 3 lo abbandonano, causando una diminuzione della proporzione  $x_3^t$ . Questa diminuzione, come si vede dalla seconda delle (6), dipende dal valore del parametro  $\delta$ , quindi dalla rapidità con cui gli utenti cambiano la scelta del modo di trasporto.

Supponiamo dapprima che  $\delta$  sia basso: dalla seconda delle (6) si vede che anche la diminuzione di  $x_3^t$  da un'epoca  $t$  alla successiva  $t+1$  è piccola. In un intervallo temporale in cui il flusso complessivo  $T^t$  cresce con tasso  $r^t$  elevato, si ha, dato il valore abbastanza elevato di  $T^{t+1} - T^t$ , che  $x_3^{t+1}T^{t+1} > x_3^tT^t$  anche se  $x_3^{t+1} < x_3^t$ . Dalla terza delle (3) si vede che l'incremento del flusso sul modo 3 causa una diminuzione di costo del trasporto su questo modo, mentre le altre equazioni (3) mostrano che l'incremento del flusso sugli altri modi determina un incremento dei rispettivi costi del trasporto. Quindi si ha  $\bar{x}_3^{t+1} > \bar{x}_3^t$ . Poiché la diminuzione di  $x_3^t$  dall'epoca  $t$  a quella  $t+1$  è piccola, si ha che, anche se  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  è negativo,  $|\bar{x}_3^{t+1} - x_3^{t+1}| < |\bar{x}_3^t - x_3^t|$ . Questo significa che  $|\bar{x}_3^t - x_3^t|$  è progressivamente decrescente nel tempo, finché si annulla, dopo di che  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  diventa positivo, causando un progressivo aumento di  $x_3^t$ . La traiettoria che rappresenta nello spazio delle fasi l'evoluzione del sistema, in un primo tratto, partendo dal suo punto iniziale, si dirige verso il punto fisso  $(x_2^*, 0, K)$ , quindi cambia direzione puntando su un altro punto fisso  $(x_2^{**}, x_2^{**}, K)$  con  $x_3^{**} > 0$ .

Invece, se il valore di  $\delta$  è alto, la diminuzione di  $x_3^t$  da un'epoca alla successiva è elevata, per cui si ha  $x_3^{t+1}T^{t+1} < x_3^tT^t$  anche se  $T^{t+1} > T^t$ . La terza delle (3) mostra che la progressiva diminuzione del flusso sul modo 3 causa un corrispondente incremento del costo del trasporto sul modo, dando luogo ad una progressiva diminuzione di  $\bar{x}_3^t$ , per cui  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  non può diventare positivo. La traiettoria che rappresenta l'evoluzione del sistema non cambia direzione, ed è attratta dal punto fisso  $(x_2^*, 0, K)$ , evidenziando il fallimento del piano di innovazione. Un analogo risultato si ottiene se all'epoca  $t=0$  la proporzione di flusso delle merci  $x_3^0$  sul modo 3 è piccola, e anche nel caso in cui il tasso di crescita  $r^t$  è basso. Infatti, poiché  $x_3^t$  nella fase decrescente diminuisce quasi linearmente, come si vedrà successivamente dall'analisi della figura 7, se poniamo  $x_3^{t+1} = (1-\eta)x_3^t$ ,  $\eta > 0$ , si ha che  $\eta$  aumenta al diminuire di  $x_3^t$ , per cui all'epoca  $t=0$ , se  $x_3^0$  è piccola,  $\eta$  è grande. D'altra parte, poiché la (2) può essere scritta come  $T^{t+1} = T^t(1+r^t)$ , si ha che  $x_3^{t+1}T^{t+1} = x_3^tT^t = (1-\eta)(1+r^t)$ . Se  $r^t$  è piccolo e/o  $\eta$  è grande, si ha che  $(1-\eta)(1+r^t) < 1$ . In entrambi questi casi non è possibile che si abbia  $x_3^{t+1}T^{t+1} > x_3^tT^t$ , per cui il costo del trasporto del modo 3 aumenta progressivamente nel tempo, causando una progressiva diminuzione di  $\bar{x}_3^t$ .

È importante a questo punto osservare che eventuali incentivi, applicati al trasporto ferroviario per diminuirne il costo stimato dagli utenti, modificano l'andamento della funzione di costo, mantenendone però inalterata la parte iniziale, per valori del flusso prossimi allo zero. È infatti ragionevole supporre che se, nonostante gli incen-

mean the failure of the innovation process that gives rise to cost function  $c_3(x_3T)$ , implemented in order to reverse the decreasing trend of the proportion of freight traffic carried by mode 3. Thus it is important to discover the conditions in which the point  $(x_2^*, 0, K)$  is not the attractor of the system.

Suppose that the innovation process of mode 3 begins at time  $t$  when the proportion of traffic on mode 3 is still quite high, while the transport cost is rather higher than that of the road transport. In these conditions the proportion of users that deem mode 3 better than the other modes is less than that of those who use it, i.e.  $\bar{x}_3^0 < x_3^0$ . We see from the second Eq. (6) that at time immediately after that in which the innovation process began, some users of mode 3 abandon it, causing a decrease in the proportion  $x_3^t$ . This decrease, as we see from the second Eq. (6), depends on the value of parameter  $\delta$ , thus on the quickness with which users shift from one transport mode to another.

Suppose at first that  $\delta$  is low: the second Eq. (6) shows that also the decrease in  $x_3^t$  from an epoch  $t$  to the successive  $t+1$  is small. In a time period in which the overall flow  $T^t$  increases with a rather high rate  $r^t$  we have, given the rather high value of  $T^{t+1} - T^t$ , that  $x_3^{t+1}T^{t+1} > x_3^tT^t$  even if  $x_3^{t+1} < x_3^t$ . The third Eq. (3) shows that the increase in the flow on mode 3 causes a decrease in the transport cost of this mode, while the other Eqs. (3) show that the increase in flow on the other modes causes increases in their respective transport costs. Thus we have  $\bar{x}_3^{t+1} > \bar{x}_3^t$ . Since the decrease in  $x_3^t$  from  $t$  to  $t+1$  is small, we have that, even if  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  is negative,  $|\bar{x}_3^{t+1} - x_3^{t+1}| < |\bar{x}_3^t - x_3^t|$ . This means that  $|\bar{x}_3^t - x_3^t|$  is progressively decreasing over time, until it equals zero and then  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  becomes positive, causing a progressive increase in  $x_3^t$ . The trajectory that represents the evolution of the system in the phase space, in a first part starting from its initial point goes towards the fixed point  $(x_2^*, 0, K)$ , then it changes direction and goes towards another fixed point  $(x_2^{**}, x_2^{**}, K)$  with  $x_3^{**} > 0$ .

Instead, if the value of  $\delta$  is high, the decrease in  $x_3^t$  from an epoch to the successive one is great, so that we have  $x_3^{t+1}T^{t+1} < x_3^tT^t$  even if  $T^{t+1} > T^t$ . The third Eq. (3) shows that the progressive decrease in the flow on mode 3 causes a corresponding increase in the transport cost of the mode, giving rise to a progressive decrease in  $\bar{x}_3^t$ , so that  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  cannot become positive. The trajectory that represents the evolution of the system does not change direction, and it is attracted by the fixed point  $(x_2^*, 0, K)$ , highlighting the failure of the innovation plan. A similar result occurs if at  $t=0$  the proportion  $x_3^0$  of freight flow on mode 3 is small, and also in the case in which the increase rate  $r^t$  is low. In fact, since  $x_3^t$  in its decreasing phase diminishes quite linearly, as will be seen later on from the analysis of figure 7, if we write  $x_3^{t+1} = (1-\eta)x_3^t$ ,  $\eta > 0$ , we have that  $\eta$  increases as  $x_3^t$  diminishes, so that  $\eta$  is large at  $t=0$  if  $x_3^0$  is small. On the other hand, since Eq. (2) can be written as  $T^{t+1} = T^t(1+r^t)$ , we have that  $x_3^{t+1}T^{t+1} = x_3^tT^t = (1-\eta)(1+r^t)$ . If  $r^t$  is small and/or  $\eta$  is large, we have that  $(1-\eta)(1+r^t) < 1$ . In both these cases we cannot have  $x_3^{t+1}T^{t+1} > x_3^tT^t$ , so that the transport cost on mode 3 increases progressively over time, causing the progressive decrease in  $\bar{x}_3^t$ .

tivi, i flussi continuassero a diminuire, ad un certo punto gli incentivi verrebbero soppressi. Pertanto essi non eliminano il punto fisso  $(x_2^*, 0, K)$ , ma ne riducono il bacino di attrazione, cioè l'insieme dei punti origine delle traiettorie che convergono in esso.

Da questa analisi si ricava quindi che per il successo del piano di innovazione del modo 3 sono necessarie tre condizioni:

- valore ancora abbastanza elevato della proporzione di flusso delle merci sul modo 3 all'epoca in cui il piano di innovazione entra in funzione;
- favorevoli condizioni generali dell'economia, che danno luogo ad un tasso di crescita abbastanza elevato del flusso delle merci complessivo sui tre modi di trasporto;
- notevole resistenza degli utenti a modificare la scelta del modo di trasporto.

Nel prossimo paragrafo si mostrerà che il verificarsi di queste tre condizioni ha reso possibile il successo del piano di innovazione posto in atto per invertire il trend decrescente del trasporto ferroviario attraverso le Alpi Svizzere.

### 3. L'evoluzione del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere

Utilizzando i dati raccolti da ALPINFO [1], i quali forniscono il numero di t/anno movimentate su strada e su ferrovia attraverso i valichi alpini, sono stati calcolati i valori dei flussi di merce trasportati annualmente fra l'Italia Nord Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro Settentrionale in entrambe le direzioni complessivamente dai tre modi di trasporto nel periodo 1984-2014. Essi sono riportati nella Fig. 4, interpolati da una curva i cui punti sono stati generati dalla (2), con un valore asintotico  $K = 70 \cdot 10^6$  t/anno ed un tasso  $\bar{r} = 0.11$ , iniziando da un valore  $T^0 = 30 \cdot 10^6$  t/anno nel 1980. Inoltre, utilizzando i dati ALPINFO sono state calcolate le proporzioni  $x_1^t, x_2^t, x_3^t$  dei flussi di merce trasportata dai tre modi di trasporto nella sequenza temporale  $\Sigma$  fra il 1984 e il 2014.

Come si è detto nel paragrafo precedente, si è supposto che le funzioni di costo dei modi 1 e 2 siano polinomi del secondo ordine, mentre quella del modo 3 sia una esponenziale decrescente. La sequenza dei valori  $x_1^t, x_2^t, x_3^t$  nel periodo fra il 1984 e il 2014 ha permesso di stimare, attraverso la procedura illustrata in [12], i coefficienti di queste funzioni di costo ed il valore del parametro  $\delta$  della (5). È risultato che  $\delta = 0.0379$ , mentre le espressioni delle tre funzioni di costo sono:

$$\begin{aligned} c_1(x_1^t T^t) &= 1.0 + 0.125 x_1^t T^t - 0.00059 (x_1^t T^t)^2 \\ c_2(x_2^t T^t) &= 0.337 - 0.074 x_2^t T^t + 0.343 (x_2^t T^t)^2 \\ c_3(x_3^t T^t) &= 4.32 + 239 \exp(-0.349 x_3^t T^t) \end{aligned} \quad (11)$$

in cui  $T^t$  è misurato in milioni di tonnellate. Queste tre funzioni di costo sono rappresentate graficamente

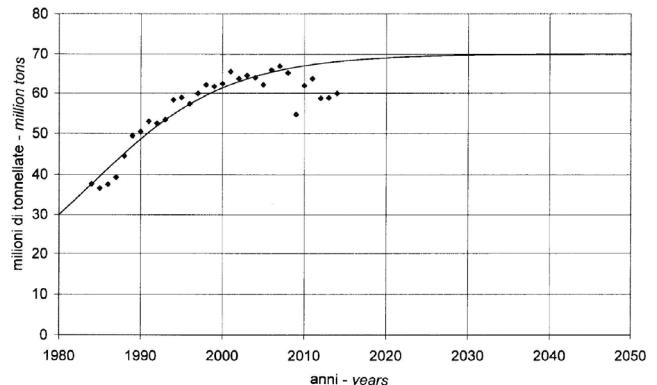


Fig. 4 – Andamento del flusso merci fra l'Italia Nord Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro Settentrionale generata dalla (2) con  $\bar{r} = 0.11$  e  $K = 7 \cdot 10^6$  t/anno (linea continua) sovrapposto ai punti osservati.

Fig. 4 – Pattern of freight flows between the North-Western Italy and the Western part of the Central-Northern Europe generated by Eq. (2) with  $\bar{r} = 0.11$  and  $K = 7 \cdot 10^6$  tons per year (continuous line) superimposed on the observed points.

*It is important at this point to remark that possible incentives, which are applied to rail transport in order to decrease the cost deemed by users, modify the pattern of the cost function, but they maintain unchanged the initial part, for values of flow close to zero. In fact it is reasonable to suppose that, whether rail flows continued to decrease, in spite of the incentives, at a certain point the latter would be suppressed.*

*Therefore they do not eliminate the fixed point  $(x_2^*, 0, K)$ , but they reduce its attraction basin, i.e. the set of the origin points of the trajectories converging towards it.*

*From this analysis we see that three conditions are necessary for the success of the innovation plan of mode 3:*

*a) the value of the proportion of freight flow on mode 3 is still quite high at time when the innovation process comes into operation;*

*b) the general conditions of economy are good, so that they cause a rather high value of the increase rate of overall freight flow on the three transport modes;*

*c) the resistance of users to change transport mode is rather high.*

*The next Section will show that the occurrence of these three conditions made successful the innovation plan implemented in order to reverse the decreasing trend of freight rail transport through the Swiss Alps.*

### 3. The evolution of freight rail transport through the Swiss Alps

*By using the data collected by ALPINFO [1], which furnish the number of tons per year moved on road and on rail through the Alpine passes, we have computed the yearly*

nella Fig. 5. Si osserva, tenendo conto di quanto si è detto al paragrafo 2, che i costi riportati nella Fig. 5 sono numeri senza dimensioni, misurati in una scala in cui la loro varianza è  $\pi^2/6$ , poiché si è supposto che il parametro di scala della variabile di Gumbel considerata nella stima dei costi è uguale a 1.

Il sistema di equazioni (6) assume quindi la forma seguente:

$$\begin{aligned} x_2^{t+1} &= x_2^t + 0.0379 \left| \bar{x}_2^t - x_2^t \right| \\ x_3^{t+1} &= x_3^t + 0.0379 \left| \bar{x}_3^t - x_3^t \right| \\ T^{t+1} &= T^t \left[ 1 + 0.11 \left( 1 - T^t / 70 \right) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

in cui le espressioni di  $\bar{x}_2^t$  e  $\bar{x}_3^t$  sono quelle della (7) e della (8) rispettivamente, con le espressioni delle funzioni di costo  $c_1(x_1^t T^t)$ ,  $c_2(x_2^t T^t)$  e  $c_3(x_3^t T^t)$  date dalle (11).

Tenendo conto di quanto si è detto nel paragrafo precedente, i punti fissi della (12) sono i punti di coordinate  $(x_2^*, x_3^*, 70)$ , dove  $x_2^*$  e  $x_3^*$  sono le soluzioni del sistema (10), nel quale  $K = 70$  e le espressioni di  $\bar{x}_2$  e  $\bar{x}_3$  sono quelle della (7) e della (8) rispettivamente, con  $x_2^* = x_2^*$ ,  $x_3^* = x_3^*$ ,  $T^* = 70$ , mentre le funzioni di costo  $c_1(x_1^* T^*)$ ,  $c_2(x_2^* T^*)$  e  $c_3(x_3^* T^*)$  assumono le espressioni (11).

Supponiamo che sia  $x_3^* = 0$ . In questo caso la coordinata  $x_2^*$  è soluzione dell'equazione  $x_2 = \bar{x}_2(x_2^*, 0, 70)$ , la quale si scrive esplicitamente nel modo seguente:

$$x_2^* = \frac{1}{1 + \exp[c_2(70x_2^*) - c_1(70[1 - x_2^*])] + \exp[c_2(70x_2^*) - c_3(0)]} \quad (13)$$

Calcolando la soluzione della (13) come intersezione della funzione a secondo membro della (13) con la bisettrice dell'ortante positivo del piano  $(x_2, \bar{x}_2)$  si ottiene  $x_2^* = 0.074$ . Sostituendo questo valore nella espressione di  $\bar{x}_3$  ( $x_2^*, 0, 70$ ), dalla equazione  $x_3^* = \bar{x}_3(x_2^*, 0, 70)$  si ricava che  $x_3^* = 1/(5.387 \cdot 10^{10}) = 0$ , per cui si ha che il punto nello spazio delle fasi di coordinate  $(0.074, 0, 70)$  è un punto fisso del sistema (12).

Supponendo che l'anno di inizio del processo di innovazione del modo di trasporto 3, che ha dato luogo alla funzione di costo  $c_3(x_3^* T^*)$  riportata nella (11), sia il 1984, in cui  $T^0 = 37.64$ ,  $x_2^0 = 0.215$ ,  $x_3^0 = 0.379$ , la ripetuta applicazione del sistema (12) fornisce la sequenza delle coordinate  $(x_2^t, x_3^t, T^t)$  dei punti della traiettoria che descrive l'evoluzione del sistema nello spazio delle fasi. Nella Fig. 6 è riportata la proiezione di questa traiettoria nel piano  $(x_3, T)$ , sovrapposta ai punti sperimentali, le cui coordinate sono state ricavate dai dati ALPINFO. Come previsto nel paragrafo precedente, essa in un primo tratto si dirige verso il punto di coordinate  $(0, 70)$ , proiezione nel piano  $(x_3, T)$  del punto fisso  $(0.074, 0, 70)$ , quindi cambia direzione dirigendosi asintoticamente verso il punto  $P^{**}$  di coordinate  $(0.483, 70)$ , proiezione nel piano  $(x_3, T)$  del punto fisso  $(0.061, 0.483, 70)$ , mostrando che esso è l'attrattore del sistema, mentre il punto fisso  $(0.074, 0, 70)$  non lo è.

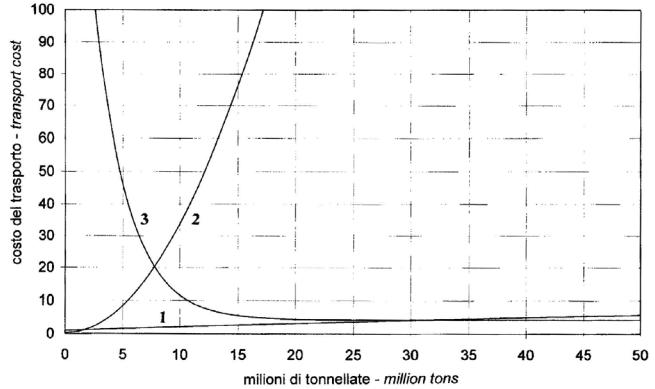


Fig. 5 – Andamento delle funzioni di costo per il trasporto stradale 1, il trasporto ferroviario del Frejus 2 ed il trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere 3.

Fig. 5 – Pattern of the cost functions for the road transport 1, the Frejus rail transport 2 and the rail transport of the Swiss Alps 3.

values of freight flows carried as a whole by the three transport modes between the North-Western Italy and the Western part of the Central-Northern Europe in both directions in the period 1984-2014. They are shown in Fig. 4, interpolated by a curve whose points have been generated by Eq. (2), with an asymptotic value  $K = 70 \cdot 10^6$  tons per year and a rate  $\bar{r} = 0.11$ , starting with a value  $T^0 = 30 \cdot 10^6$  tons per year in 1980. Besides, by using the ALPINFO data we have computed the proportions  $x_1^t$ ,  $x_2^t$ ,  $x_3^t$ , of freight flows carried by the three transport modes in the time sequence  $\Sigma$  between 1984 to 2014.

As said in the previous §, we have supposed that the cost functions of modes 1 and 2 are second order polynomials, whereas that of mode 3 is a decreasing exponential. By using the values  $x_1^t$ ,  $x_2^t$ ,  $x_3^t$  in the time period between 1984 and

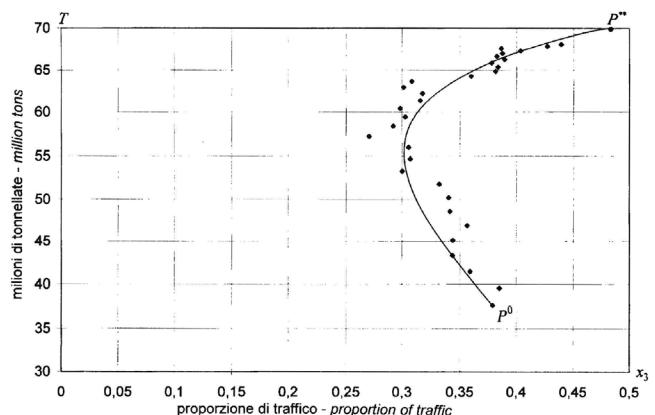


Fig. 6 – Proiezione sul piano  $(x_3, T)$  della traiettoria generata dal sistema (12) con  $\bar{r} = 0.11$  e  $\delta = 0.379$ , avente origine nel punto  $P^0$  di coordinate  $(0.379, 37.64)$ .

Fig. 6 – Projection on the plane  $(x_3, T)$  of the trajectory generated by the system (12) with  $\bar{r} = 0.11$  and  $\delta = 0.379$ , whose origin is point  $P^0$  of coordinates  $(0.379, 37.64)$ .

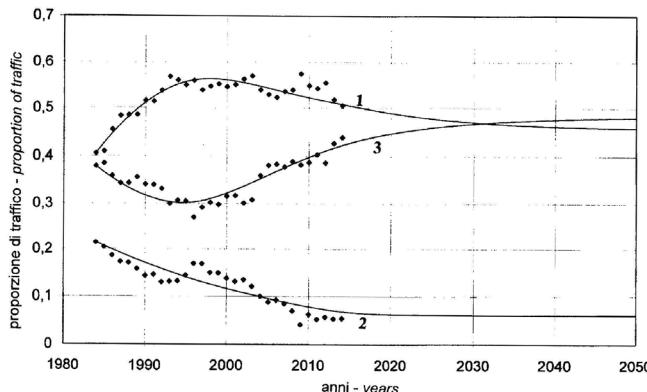


Fig. 7 – Traiettorie delle proporzioni di flusso delle merci calcolate dal modello (linee continue) fra l'Italia Nord-Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro-Settentrionale sul trasporto stradale **1**, sul trasporto ferroviario del Frejus **2** e sul trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere **3**, sovrapposte ai punti osservati.

Fig. 7 – Trajectories of the proportions of freight flow computed by the model (continuous lines) between the North-Western Italy and the Western part of the Central-Northern Europe on road transport **1**, on the Frejus rail transport **2** and on the rail transport of the Swiss Alps **3**, superimposed on the observed points.

La Fig. 7 riporta le traiettorie delle sequenze delle proporzioni  $x_1^t$ ,  $x_2^t$ ,  $x_3^t$  del flusso delle merci sui tre modi di trasporto, mentre la Fig. 8 riporta la sequenza dei flussi  $x_1^t T^t$ ,  $x_2^t T^t$ ,  $x_3^t T^t$ . Le traiettorie in entrambe le figure sono sovrapposte ai punti ricavati dai dati sperimentali ALPINFO, ai quali si adattano abbastanza fedelmente, evidenziando la validità delle ipotesi del modello. Si osserva che nell'intervallo temporale fra il 1984 e il 1995, in cui la proporzione  $x_3^t$  è decrescente, il flusso  $x_3^t T^t$  è crescente. Poiché la funzione di costo del modo **3** è decrescente, questo fatto dà luogo ad un aumento della proporzione  $\bar{x}_3^t$ . Data la resistenza degli utenti a cambiare modo di trasporto, individuata dal basso valore del parametro  $\delta$ , si è visto nel precedente paragrafo che la proporzione  $|\bar{x}_3^t - x_3^t|$  si va riducendo nel tempo fino ad annullarsi, dopodiché  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  diventa positivo, determinando l'inversione, da decrescente a crescente, del trend della proporzione del flusso di merci sul modo **3**.

Come si è visto nel precedente paragrafo, questo mutamento di trend, evidenziato dal mutamento di direzione della traiettoria di Fig. 6, è dovuto a tre fattori: *a)* il valore abbastanza alto,  $x_3^0 = 0.379$ , della proporzione del flusso delle merci sul modo **3** quando si è dato inizio al processo di innovazione; *b)* l'elevato tasso di crescita nel tempo del flusso complessivo delle merci sui tre modi di trasporto; *c)* la resistenza degli utenti a cambiare modo di trasporto, evidenziata dal basso valore del parametro  $\delta$ . In particolare ai primi due fattori è dovuto l'incremento

2014 we have estimated, through the procedure presented in [12], the coefficients of these cost functions and the value of parameter  $\delta$  of Eq. (5). The result is that  $\delta = 0.0379$ , while the expressions of the cost functions are:

$$\begin{aligned} c_1(x_1^t T^t) &= 1.0 + 0.125x_1^t T^t - 0.00059(x_1^t T^t)^2 \\ c_2(x_2^t T^t) &= 0.337 - 0.074x_2^t T^t + 0.343(x_2^t T^t)^2 \\ c_3(x_3^t T^t) &= 4.32 + 239 \exp(-0.349x_3^t T^t) \end{aligned} \quad (11)$$

where  $T$  is measured in million tons. These three cost functions are represented graphically in Fig. 5. We note, considering what has been said in § 2, that the costs shown in the figure are dimensionless numbers, which are measured in a scale in which their variance is  $\pi^2/6$ , because the scale parameter of the Gumbel variable we have considered in the cost estimation is equal to 1.

Thus the system (6) assumes the following form:

$$\begin{aligned} x_2^{t+1} &= x_2^t + 0.0379[\bar{x}_2^t - x_2^t] \\ x_3^{t+1} &= x_3^t + 0.0379[\bar{x}_3^t - x_3^t] \\ T^{t+1} &= T^t [1 + 0.11(1 - T^t / 70)] \end{aligned} \quad (12)$$

where the expressions of  $\bar{x}_2^t$  and  $\bar{x}_3^t$  are those of Eq. (7) and Eq. (8) respectively, while the expressions of the cost functions  $c_1(x_1^t T^t)$ ,  $c_2(x_2^t T^t)$  and  $c_3(x_3^t T^t)$ , are given by Eqs. (11).

Considering what we have said in the previous Section, the fixed points of the system (12) are the points of coordinates  $(x_2^*, x_3^*, 70)$ , where  $x_2^*$  and  $x_3^*$  are the solutions of the system (10), in which  $K = 70$  and the expressions of  $\bar{x}_2$  and  $\bar{x}_3$  are those of Eq. (7) and Eq. (8) respectively, with  $x_2^* = x_2^*$ ,

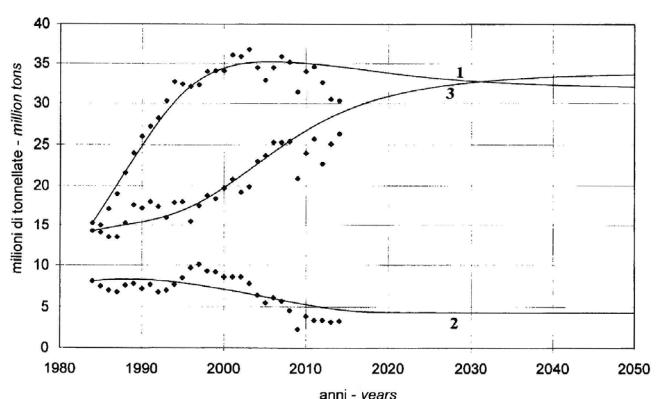


Fig. 8 – Traiettorie del flusso delle merci calcolate dal modello (linee continue) fra l'Italia Nord-Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro-Settentrionale sul trasporto stradale **1**, sul trasporto ferroviario del Frejus **2** e sul trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere **3**, sovrapposte ai punti osservati.

Fig. 8 – Trajectories of the freight flows computed by the model (continuous lines) between the North-Western Italy and the Western part of the Central-Northern Europe on the road transport **1**, on the Frejus rail transport **2** and on the rail transport **3** of the Swiss Alps, superimposed on the observed points.

to nel tempo del flusso delle merci sul modo **3**, anche quando la proporzione  $x_3^t$  è decrescente.

Allo scopo di evidenziare le conseguenze che sarebbero derivate dal ritardare oltre il 1984 l'inizio del processo di innovazione del modo di trasporto **3**, sono state calcolate le coppie di valori  $(x_3^t, T^t)$  che si sarebbero verificate negli anni dopo il 1984 se, in assenza del processo di innovazione, la proporzione del flusso merci sul modo **3** avesse continuato a diminuire seguendo il trend relativo al primo decennio dopo il 1984, individuato dalla sequenza dei punti relativi agli anni fra il 1984 e il 1994 riportati nella Fig. 7. La sequenza dei punti le cui coordinate sono le suddette coppie  $(x_3^t, T^t)$  relative agli anni fra il 1984 e il 2016 è rappresentata dalla curva a tratto spesso della Fig. 9. Assumendo gli anni relativi a punti diversi di questa curva come anni iniziali del processo di innovazione, e supponendo che i corrispondenti valori di  $x_2^t$  siano quelli precedentemente calcolati e riportati in Fig. 7, sono state calcolate le proiezioni sul piano  $(x_3, T)$  delle traiettorie aventi inizio in tali punti, le quali rappresentano nel piano  $(x_3, T)$  l'evoluzione del sistema negli anni successivi all'inizio del processo di innovazione. Le proiezioni delle traiettorie relative ai vari anni fino al 2004 sono attratte dalla proiezione  $P^{**}$  del punto fisso  $(0.061, 0.483, 70)$ , quelle relative agli anni successivi sono attratte dalla proiezione  $P^*$  del punto fisso  $(0.074, 0, 70)$  evidenziando che, se l'inizio del processo di innovazione fosse stato ri-

$x_3^t = x_3^*, T^t = 70$ , while the cost functions  $c_1(x_1^t T^t)$ ,  $c_2(x_2^t T^t)$  and  $c_3(x_3^t T^t)$  assume the expressions (11).

Suppose that  $x_3^* = 0$ . In this case the coordinate  $x_2^*$  is solution of the equation  $x_2^* = \bar{x}_2(x_2^*, 0, 70)$ , which is written explicitly as follows:

$$x_2^* = \frac{1}{1 + \exp[c_2(70x_2^*) - c_1(70[1 - x_2^*])] + \exp[c_2(70x_2^*) - c_3(0)]} \quad (13)$$

By computing the solution of Eq. (13) as intersection of the function at the right side of Eq. (13) with the bisector of the positive orthant of the plane  $(x_2, \bar{x}_2)$  we have  $x_2^* = 0.074$ . By substituting this value in the expression of  $\bar{x}_3(x_2^*, 0, 70)$ , we have from the equation  $x_3^* = \bar{x}_3(x_2^*, 0, 70)$  that  $x_3^* = 1/(5.387 \cdot 10^{10}) = 0$ , so the point of coordinates  $(0.074, 0, 70)$  is a fixed point of the system (12).

By supposing that the starting point of the innovation process of the transport mode **3**, which has given rise to the cost function  $c_3(x_3^t T^t)$  shown by Eq. (11), is 1984, when  $T^0 = 37.64$ ,  $x_2^0 = 0.215$ ,  $x_3^0 = 0.379$ , the iterated application of system (12) furnishes the sequence of the coordinates  $(x_2^t, x_3^t, T^t)$  of the points of the trajectory that describes the evolution of the system in the phase space. Fig. 6 shows the projection of this trajectory on the plane  $(x_3, T)$ , superimposed on the experimental points, whose coordinates have been obtained from the data ALPINFO. As said in the previous §, in a first part it goes towards the point of coordinates  $(0, 70)$ , projection on the plane  $(x_3, T)$  of the fixed point  $(0.074, 0, 70)$ , then it changes direction going asymptotically towards the point  $P^{**}$  of coordinates  $(0.483, 70)$ , projection on the plane  $(x_3, T)$  of the fixed point  $(0.061, 0.483, 70)$ , showing that the latter is the attractor of the system, whereas the fixed point  $(0.074, 0, 70)$  is not.

Fig. 7 shows the trajectories of the sequences of the proportions  $x_1^t, x_2^t, x_3^t$  of the freight flows on the three transport modes, while Fig. 8 shows the sequence of the flows  $x_1^t T^t, x_2^t T^t, x_3^t T^t$ . The trajectories of both figures are superimposed on the points obtained from the experimental data ALPINFO which they fit quite well, highlighting the validity of the hypotheses of the model. We observe that in the time interval between 1984 and 1995, in which the proportion  $x_3^t$  is decreasing, the flow  $x_3^t T^t$  is increasing. Since the cost function of mode **3** is decreasing, this fact causes an increase in the proportion  $\bar{x}_3^t$ . Given the resistance of users to change transport mode, highlighted by the low value of parameter  $\delta$ , we have seen in the previous Section that the proportion  $|\bar{x}_3^t - x_3^t|$  is decreasing over time until it becomes zero, then  $\bar{x}_3^t - x_3^t$  becomes positive, causing the inversion, from decreasing to increasing, of the trend of the proportion of freight flow on mode **3**.

As seen in the previous Section, this change in the trend, highlighted by the change in the direction of the trajectory in Fig. 6, is due to three factors: a) the still quite high value of the proportion of freight flow on mode **3**,  $x_3^0 = 0.379$ , when the innovation process come into operation; b) the high rate of increase over time of the overall freight flow on the three transport modes; c) the resistance of users to change transport mode, highlighted by the low value of parameter  $\delta$ . In particular the first two factors are the caus-

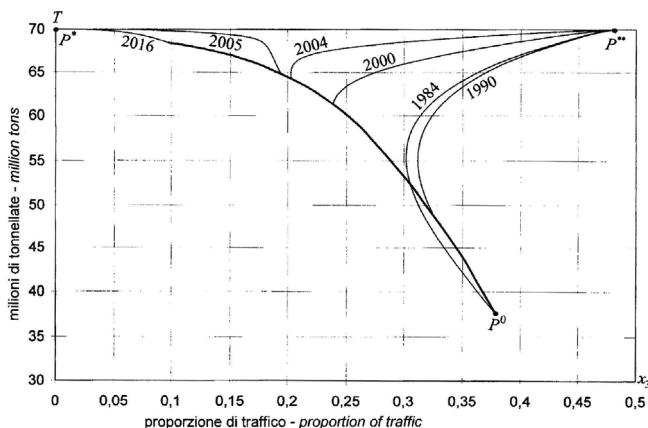


Fig. 9 – Curva (a tratto spesso) dei punti le cui coordinate sono il flusso totale  $T^t$  e la proporzione di flusso  $x_3^t$  sul modo **3** che si sarebbero verificati negli anni fra il 1984 e il 2016 in assenza di innovazioni, e proiezioni nel piano  $(x_3, T)$  delle traiettorie generate dal sistema (12) aventi origine in punti della curva corrispondenti ad anni diversi.  
Fig. 9 – Curve (thick line) of the points whose coordinates are the total flow  $T^t$  and the proportion of flow  $x_3^t$  on mode **3** which would have occurred in the years between 1984 and 2016 in the absence of innovations, and projections on the plane  $(x_3, T)$  of the trajectories generated by system (12), originating from points of the curve corresponding to various years.

tardato oltre il 2004, non sarebbe stato possibile impedire il progressivo declino del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere.

Allo scopo di conoscere l'influenza del tasso di crescita della domanda di trasporto complessiva, sono state calcolate le proiezioni nel piano  $(x_3, T)$  delle traiettorie che rappresentano l'evoluzione del sistema nell'ipotesi che il processo di innovazione abbia avuto inizio nel 1984 e che il parametro  $\delta$  abbia il valore stimato 0.0379, mentre il tasso di crescita  $\bar{r}$  assuma valori inferiori al valore stimato 0.11. Queste proiezioni delle traiettorie sono riportate nella Fig. 10, dove hanno origine nel punto  $P^0$  di coordinate (0.379, 37.64) relative al 1984. Si vede che quando  $\bar{r}$  è inferiore a 0.07 esse sono attratte dalla proiezione  $P^*$  del punto fisso (0.074, 0, 70), evidenziando l'incapacità del processo di innovazione di impedire il declino del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere.

Infine, per valutare l'importanza della resistenza degli utenti ad abbandonare un modo di trasporto sono state calcolate le proiezioni nel piano  $(x_3, T)$  delle traiettorie che rappresentano l'evoluzione del sistema nell'ipotesi che il processo di innovazione abbia avuto inizio nel 1984 e che il parametro  $\bar{r}$  abbia il valore stimato 0.11, mentre il parametro  $\delta$  assuma valori diversi maggiori di quello 0.0379 stimato. Queste proiezioni delle traiettorie sono riportate nella Fig. 11, dove hanno origine nel punto  $P^0$  di coordinate (0.379, 37.64) relative al 1984. Si vede che quando  $\delta$  supera 0.0588 esse sono attratte dalla proiezione  $P^*$  del punto fisso (0.074, 0, 70), mostrando che una, neppure troppo elevata, riduzione della resistenza degli utenti rispetto a quella effettivamente verificatasi, avrebbe

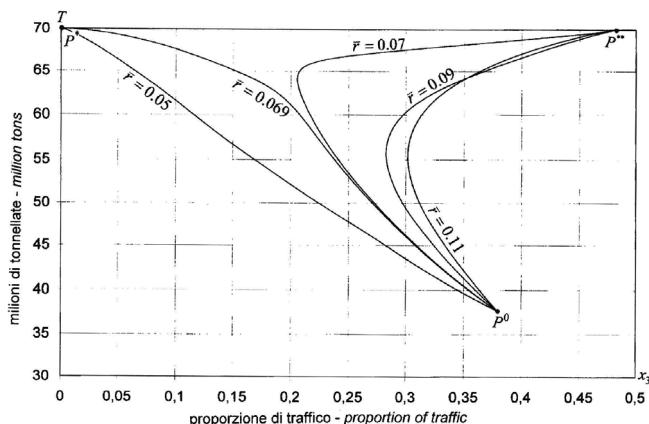


Fig. 10 – Proiezioni sul piano  $(x_3, T)$  delle traiettorie generate dal sistema (12), aventi origine nel punto  $P^0$  di coordinate (0.379, 37.64) relative a diversi valori del parametro  $\bar{r}$ .

Fig. 10 – Projections on the plane  $(x_3, T)$  of the trajectories generated by the system (12), whose origin is point  $P^0$  of coordinates (0.379, 37.64), relative to various values of parameter  $\bar{r}$ .

*es of the increase over time in freight flow on mode 3 also when the proportion  $x_3^t$  is decreasing.*

*In order to highlight the consequences that would have occurred if the start of the innovation process of mode 3 had been delayed beyond 1984, we have computed the pairs of the values  $(x_3^t, T^t)$  that would have occurred in the years after 1984 if, in the absence of the innovation process, the proportion of freight flow on mode 3 had continued to decrease following the trend of the first decade after 1984, shown by the sequence of the points relative to the years between 1984 and 1994 shown in Fig. 4. The sequence of the points whose coordinates are the said pairs  $(x_3^t, T^t)$  relative to the years between 1984 and 2016 are represented by the thick line of Fig. 9. Assuming the years relative to the points of this curve as initial years on the innovation process, and supposing that the corresponding values of  $x_2^t$  are those computed above and shown by Fig. 7, we have computed the projections on the plane  $(x_3, T)$  of the trajectories originating from these points, which represent in the plane  $(x_3, T)$  the evolution of the system in the years after the beginning of the innovation process. The projections of the trajectories relative to the various years until 2004 are attracted by the projection  $P^{**}$  of the fixed point (0.061, 0.483, 70), those relative to the successive years are attracted by the projection  $P^*$  of the fixed point (0.074, 0, 70), highlighting that, if the beginning of the innovation process had been delayed beyond 2004, it would not have been possible to prevent the progressive decline of the freight rail transport through the Swiss Alps.*

*In order to know the influence of the growth rate of the overall freight traffic, we have computed the projections on the plane  $(x_3, T)$  of the trajectories that represent the evolution of the system in the hypothesis that the innovation process began in 1984 and parameter  $\delta$  has the estimated value 0.0379, whereas the growth rate  $\bar{r}$  assumes values lower than the estimated value 0.11. These projections of the trajectories are shown in Fig. 10, where they originate from point  $P^0$  of coordinates (0.379, 37.64) relative to 1984. We see that when  $\bar{r}$  is less than 0.07, they are attracted by the projection  $P^*$  of the fixed point (0.074, 0, 70), highlighting the inability of the innovation process to prevent the decline of the freight rail transport through the Swiss Alps.*

*Finally, in order to value the importance of the resistance of users to abandon a transport mode, we have computed the projections on the plane  $(x_3, T)$  of the trajectories that represent the evolution of the system in the hypothesis that the innovation process began in 1984, and parameter  $\bar{r}$  has the estimated value 0.11, whereas parameter  $\delta$  assumes values higher than the estimated value 0.0379. Fig. 11 shows the projections of these trajectories, which originate from point  $P^0$  of coordinates (0.379, 37.64) relative to 1984. We see that when  $\delta$  exceeds 0.0588 they are attracted by the projection  $P^*$  of the fixed point (0.074, 0, 70), showing that a rather little decrease in the user resistance compared to that really estimated would have made unsuccessful the attempt to prevent, through the innovation process, the progressive decline of the freight rail transport through the Swiss Alps.*

be reso inefficace il tentativo di impedire, mediante il processo di innovazione, il progressivo declino del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere.

Da questa analisi risulta che due dei tre fattori che hanno determinato il successo del piano di innovazione del trasporto ferroviario attraverso le Alpi Svizzere – l'elevato tasso di crescita della domanda di trasporto complessiva e la resistenza degli utenti ad abbandonare il trasporto ferroviario delle merci – sono indipendenti dalle decisioni di coloro che hanno elaborato e messo in atto il piano di innovazione. Ma il terzo fattore, l'aver deciso di dare inizio ad un processo di innovazione della organizzazione del trasporto ferroviario oltre trenta anni fa – quando la proporzione di traffico ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere era ancora abbastanza grande ed il tasso di crescita della domanda di trasporto delle merci era elevato - in maniera del tutto indipendente dal processo di innovazione delle infrastrutture ferroviarie, è indubbiamente un merito di chi ha avuto la responsabilità del piano di innovazione. Se l'inizio del processo di innovazione della organizzazione del trasporto fosse stato rinviato nel tempo, attendendo il completamento del piano di rinnovamento delle infrastrutture ferroviarie, è molto probabile che il declino del trasporto ferroviario non sarebbe stato arrestato.

## 4. Conclusioni

Questo articolo ha studiato le ragioni del successo del processo di innovazione del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere, posto in atto - per invertire il trend decrescente della proporzione di traffico trasportato dalla ferrovia – essenzialmente sostituendo il tradizionale servizio di trasporto a carro completo con un sistema di trasporto intermodale i cui terminali sono andati crescendo nel tempo in numero e capacità, assumendo anche la funzione gateway.

Il trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere è in competizione, per il trasferimento delle merci fra l'Italia Nord Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro Settentrionale, con altri due modi di trasporto: il trasporto stradale – costituito dagli itinerari che superano le Alpi attraverso i trafori del Frejus, del Monte Bianco, del Gran San Bernardo, del Gottardo e del San Bernardino – ed il trasporto ferroviario del Frejus. Le funzioni di costo di questi due modi di trasporto sono funzioni crescenti del flusso di merci che li utilizza, tra l'altro a causa della imposizione, da parte della Confederazione Elvetica, di una tassa sul traffico pesante stradale commisurata alle prestazioni. Invece la funzione di costo del trasporto ferroviario delle Alpi Svizzere è decrescente, come conseguenza dell'aumento – al crescere del flusso delle merci che lo utilizza – del numero e della capacità dei terminali, e della frequenza e della capacità dei treni che collegano le coppie di terminali, insieme con l'offerta di incentivi al trasporto ferroviario.

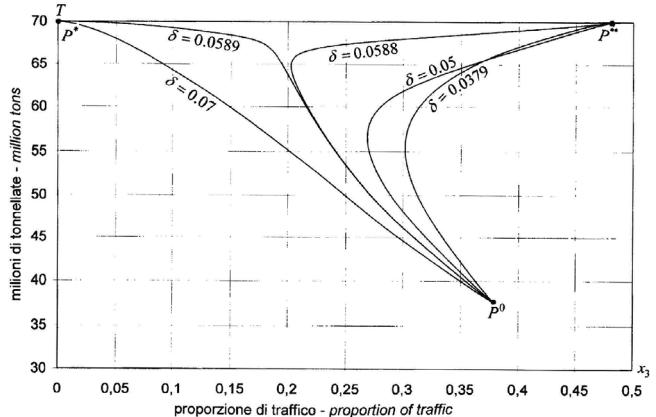


Fig. 11 – Proiezioni sul piano  $(x_3, T)$  delle traiettorie generate dal sistema (12) aventi origine nel punto  $P^0$  di coordinate  $(0.379, 37.64)$  relative a diversi valori del parametro  $\delta$ .

Fig. 11 – Projections on the plane  $(x_3, T)$  of the trajectories generated by the system (12), whose origin is point  $P^0$  of coordinates  $(0.379, 37.64)$ , relative to various values of parameter  $\delta$ .

*This analysis shows that two of the three factors that made successful the innovation plan of the freight rail transport through the Swiss Alps – the high growth rate of the overall transport demand and the resistance of users to abandon the freight rail transport – are independent of the decisions of those who devised and implemented the innovation plan. But the credit of the third factor, the decision to begin a process of innovation of the rail transport organization more than thirty years ago – when the proportion of freight rail traffic through the Swiss Alps was still rather high, and the growth rate of the freight transport demand was high – in a way completely independent of the process of innovation of the rail infrastructure, should be attributed to those who had the responsibility of the innovation plan. Had they delayed over time the beginning of the innovation plan, waiting for the completion of the renewal of the rail infrastructures, it is very likely that the decline of the rail transport would not have been stopped.*

## 4. Conclusions

*This paper has studied the reasons for the success of the innovation plan of the rail transport through the Swiss Alps, which has been implemented, in order to reverse the declining trend of the proportion of traffic carried by rail, essentially by replacing the traditional wagonload service with an intermodal transport system, whose terminals have increased over time in number and capacity, assuming also the gateway function.*

*The freight rail transport through the Swiss Alps is in competition – to transfer goods between North-Western Italy and the Western part of the Central Northern Europe – with two other transport modes: the road transport – constituted*

## SCIENZA E TECNICA

L'articolo ha mostrato che esistono due differenti tipi di evoluzione nel tempo, partendo da una data epoca, di un sistema di trasporto delle merci composto da vari modi, uno dei quali – caratterizzato da una funzione di costo decrescente – presenta all'inizio del processo di evoluzione un trend decrescente della proporzione di traffico che lo utilizza. In un tipo di evoluzione questo trend decrescente prosegue nel tempo, tendendo asintoticamente ad un valore nullo della proporzione di traffico. Nell'altro tipo di evoluzione il trend continua ad essere decrescente per un certo intervallo di tempo, quindi cambia verso, con un progressivo aumento della proporzione di traffico, tendendo ad un valore asintotico di quest'ultima maggiore di zero. Il verificarsi dell'uno o dell'altro dei due tipi di evoluzione dipende da tre fattori: il valore iniziale della proporzione di traffico; il tasso di crescita nel tempo del volume di traffico complessivo su tutti i modi di trasporto; la resistenza degli utenti a spostarsi da un modo di trasporto ad un altro.

Il trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere, soggetto ad un processo di innovazione che ha avuto inizio a metà circa degli anni '80 del secolo scorso e che ha dato luogo ad una funzione di costo decrescente, ha seguito il secondo tipo di evoluzione, per cui è oggi caratterizzato da un trend crescente della proporzione di traffico che lo utilizza. Questo successo del processo di innovazione è dovuto ai valori favorevoli dei tre fattori precedentemente citati: il valore ancora abbastanza alto della proporzione di traffico all'inizio del processo di innovazione; l'elevato tasso di crescita della domanda di trasporto delle merci fra l'Italia Nord Occidentale e la parte occidentale dell'Europa Centro Settentrionale nella fase iniziale del processo di innovazione; la resistenza degli utenti ad abbandonare il trasporto ferroviario delle merci.

Le circostanze che hanno consentito il successo del processo di innovazione del trasporto ferroviario delle merci attraverso le Alpi Svizzere suggeriscono alcune indicazioni che sarebbe opportuno tenere in conto nelle varie situazioni in cui ci si propone di invertire il trend decrescente del trasporto ferroviario delle merci. Occorre innanzitutto considerare che è estremamente difficile raggiungere questo proposito quando la proporzione del traffico merci sul trasporto ferroviario ha raggiunto valori molto bassi e ci si trova a competere con modi di trasporto alternativi efficienti ed aggressivi. In questi casi anche gli incentivi possono risultare inefficaci perché, come si è visto al paragrafo 2, essi non riescono ad eliminare il punto  $P^*$  della Fig. 9, ma possono solo ridurne il bacino di attrazione, cioè l'insieme dei punti origine delle traiettorie che convergono in esso.

Poiché il successo delle varie tecniche di innovazione che possono essere poste in atto dipende in larga misura da circostanze esterne, è importante che l'innovazione venga concepita come un processo da attuare step-by-step, mediante successivi interventi da porre in

by the routes that cross the Alps through the tunnels of Frejus, of Mont Blanc, of Gran San Bernard, of Gotthard and of San Bernardino – and the rail transport of Frejus. The cost functions of these two transport modes are increasing functions of the freight flow that uses them, due, among other things, to the imposition by the Swiss Confederation of a performance based fee on heavy traffic. Instead the cost function of the rail transport through the Swiss Alps is decreasing, because the growth of the traffic that uses it causes the increase in the number and in capacity of the terminals and in the frequency and the capacity of the trains that connect the pairs of terminals, and also due to the supply of incentives to rail transport.

The paper has shown that there are two different types of over time evolution, beginning from a given time, of a freight transport system composed by various modes, one of which – characterized by a decreasing cost function – presents at the beginning of the evolution process a decreasing trend of the proportion of traffic that uses it. In one type of evolution this decreasing trend continues over time, tending asymptotically to a zero value of the traffic proportion. In the other type of evolution the trend continues to be decreasing for some time, then it changes direction, with a progressive increase in the traffic proportion, tending to an asymptotic value of the latter greater than zero. The occurrence of one or other type of evolution depends on three factors: the initial value of the traffic proportion; the growth rate over time of the overall traffic on all transport modes; the user resistance to shift to another transport mode.

The freight rail transport through the Swiss Alps, which was subject to an innovation process that began in the mid-'80s of the last century and gave rise to a decreasing cost function, followed the second type of evolution, so that it is now characterized by an increasing trend of the proportion of traffic that uses it. This success of the innovation process is due to the favourable values of the said three factors: a still rather high value of the traffic proportion at the beginning of the innovation process; the high growth rate of freight transport demand between the North-Western Italy and the Western part of the Central-Northern Europe when the innovation process started; the resistance of users to give up the freight rail transport.

The circumstances that made successful the innovation process of the freight rail transport through the Swiss Alps suggest some indications that should be taken into account in the various situation in which one intends to reverse the decreasing trend of freight rail transport. First of all one should consider that it is very difficult to reach this objective when the proportion of freight rail traffic has reached very low values and rail is competing with efficient and forceful alternative transport modes. In these cases also incentives can be ineffective because, as said in § 2, they cannot remove fixed point  $P^*$  of Fig. 9, but they can only reduce its attraction basin, i.e. the set of the origin points of the trajectories converging towards it.

As the success of the various innovation techniques that can be implemented depends to a large extent on external circumstances, it is important that the innovation is devised as

atto in risposta alle variazioni del flusso delle merci e delle circostanze esterne. In questo processo vanno inserite le modifiche da apportare alle infrastrutture ferroviarie: dati gli effetti che producono nelle funzioni di costo, esse non possono essere concepite e/o attuate in modo indipendente dalla riorganizzazione del trasporto, ma le loro caratteristiche ed i tempi della loro entrata in esercizio vanno coordinate con le varie fasi di tale riorganizzazione.

*a step-by-step process, to be implemented through successive interventions as reactions to the variations of freight flows and of the external circumstances. The modifications of the rail infrastructures should be inserted in this process: as they produce effects on the cost functions, they cannot be devised and/or implemented in a way independent of the transport reorganization, but their characteristics and the times in which they become operational should be coordinated with the various phases of this reorganization.*

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ALPINFO, 1984-2016, "Trafico merci attraverso le Alpi".
- [2] BALLIS A., GOLIAS J., 2002, "Comparative evolution of existing and innovative rail-road freight transport terminals", Transp. Res., A 36, 593-611.
- [3] DALLA CHIARA B., 2009, "Sistemi di trasporto intermodali: progettazione ed esercizio", EGAF, Forlì.
- [4] DALLA CHIARA B., DEFLORIO F.P., SPIONE D., 2008, "The rolling road between the Italian and the French Alps", Transp. Res., E44, 1162-1174.
- [5] DALLA CHIARA B., PELLICELLI M., 2011, "Sul costo del trasporto combinato strada-rotaia", Ingegneria Ferroviaria, 951-965.
- [6] DALLA CHIARA B., MANTI E., MARINO M., 2013, "Terminali intermodali con funzione gateway: simulazione progettuale su un caso studio", Ingegneria Ferroviaria.
- [7] DATEC, 2001, *Rapporto sul progetto di legislazione sul traffico merci*.
- [8] DATEC, 2017, "Rapporto sul trasferimento del traffico".
- [9] DEFLORIO F.P., DALLA CHIARA B., 2005, "Autostrada ferroviaria e trasporto stradale lungo la direttrice del Frejus: analisi di scenari mediante un modello di rete", Ingegneria Ferroviaria, 815-825.
- [10] DE JONG G., KOUNWENHOVEN M., BATES J., KOSTER P., VERHOEF E., TASSEY L., WARFFEMIOUS P., 2014, "New SP-value of time and reliability for freight transport in Netherland", Transp. Res., E 64, 71-87.
- [11] European Commission, 2001, "A study of single wagonload rail traffic", Symonds Group Ltd. East Grinstead, U.K.
- [12] FERRARI P., 2014, "The dynamics of modal split for freight transport", Transp. Res., E70, 163-176.
- [13] FERRARI P., 2015, "Dynamic cost functions and freight transport modal split", Transp. Res., E77, 115-134.
- [14] HUPAC, 2008, "40 years Hupac: 1967-2007", From road to rail, www.hupac.ch.
- [15] JANIC M., 2008, "An assessment of the performance of the European long intermodal trains (LIFTS)", Transp. Res. A42, 1326-1339.
- [16] LAW T.C., SMALL K.A., 2001, "The value of time and reliability measurement from a value pricing experiment", Transp. Res., E37, 231-251.
- [17] LUPI M., DANESI A., FARINA A., PRATELLI A., 2012, "Il trasporto marittimo di container in Italia. Studio sulle rotte Deep e Short Sea Shipping in partenza dai principali porti italiani e sulle quote modali ferroviarie", Ingegneria Ferroviaria, 409-444.
- [18] LUPI M., PRATELLI A., GIACHETTI A., FARINA A., 2018, "Il trasporto ferroviario in Italia: una analisi dei collegamenti ferroviari di trasporto combinato", Ingegneria Ferroviaria, 209-245.
- [19] MARINOV M., ZUNDER T., ISLAM D.M.Z., 2010, "Concepts, models and methods for rail freight and logistics performances: an inception paper", 12th WTCR, Lisbon, Portugal.
- [20] THALMANN P., 2004, "The dynamics of freight transport development", Ashgate Publishing Company, Burlington VT, USA.
- [21] WOXENIUS J., 1998, "Intermodal Transhipment Technologies - An overview", IF Transportation - researchgate.net.