



## Calcolo della potenzialità e dei consumi energetici del collegamento ferroviario Torino-Modane: applicazione di modelli e simulazione

### Calculations of the carrying capacity and energy consumption on the Turin-Modane railway connection: application of models and simulation

*Dott. Ingg. Norberto COLTRO<sup>(\*)</sup>, Luca SACCO, Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA<sup>(\*\*)</sup>*

**SOMMARIO** - Sono richiamati ed applicati al collegamento Torino-Modane, lungo la linea Torino-Lione, i principali metodi teorici per il calcolo della potenzialità ferroviaria. La stessa è poi calcolata, attraverso la ricostruzione fedele della linea, mediante il software di simulazione Open Track ed ipotizzando diversi scenari di traffico. L'attenzione viene focalizzata infine anche sul confronto dei consumi energetici dei due diversi percorsi, quello rappresentato dalla linea storica e quello del nuovo tracciato ipotizzato.

#### 1. Introduzione

Negli ultimi decenni il trasporto ferroviario in ambito europeo, in particolare quello delle merci, è stato soggetto ad un costante e significativo declino rispetto agli altri modi di trasporto, pur in un contesto complessivo d'incremento delle tonnellate trasportate, fatti salvi alcuni anni recenti.

Questo fenomeno è specialmente dovuto al fatto che, parallelamente, si è riscontrato un incremento del trasporto merci su gomma; si è andati perciò incontro ad una disparità nell'utilizzo modale sempre più accentuata. Fin dal termine dello scorso secolo, gli organi di governo territoriale, internazionale e nazionale, hanno comunque indirizzato gran parte dei loro sforzi nel raggiungimento dell'obiettivo d'estendere e rendere competitiva la rete di Alta Capacità ed Alta Velocità (trasporto persone).

In Italia, "per raggiungerlo è stata innanzitutto approvata una disciplina innovativa rispetto al regime ordinario di approvazione, finanziamento, esecuzione e vigilanza sui lavori pubblici: la legge 443/2001, c.d. legge obiettivo. In secondo luogo, sempre nel 2001, il CIPE ha approvato un Programma delle infrastrutture strategiche per la modernizzazione e lo sviluppo del Paese"<sup>(1)</sup>.

<sup>(\*)</sup> RFI.

<sup>(\*\*)</sup> Politecnico di Torino.

<sup>(1)</sup> Relazione sullo stato di attuazione del Programma Infrastrutture Strategiche, presentata al CIPE (Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica) il 6 marzo 2009.

**SUMMARY** - This document recalls the main theoretical methods for the calculation of the railway carrying capacity and applies them to the Turin-Modane connection, along the Turin-Lyon line. The same is then calculated - through a trustworthy reconstruction of the line - by means of the Open Track simulation software and assuming various traffic scenarios. Finally, the attention is also focused on the comparison of energy consumption between the two different tracks, namely the historical line and the hypothetical new one.

#### 1. Introduction

In the last decades, railway transport in Europe, and the one of goods in particular, has witnessed a constant and relevant decline versus other modes of transport - even though in an overall context of increment in the number of tons handled - with the exception of some recent years.

Such phenomenon is mainly due to the parallel increase of transport of goods by road; a progressively sharper discrepancy in the use of modalities has therefore been witnessed. Since the end of the last century, nevertheless, the local, international and national government authorities have addressed a large part of their efforts in achieving the goal of extending and making competitive the High Capacity and High Speed (passenger transport) network.

In order to attain such objective, an innovative discipline was approved in Italy versus the ordinary procedure of approval, financing, implementation and control on the public works, namely: law 443/2001, i.e. the so-called "target law". Secondly, in 2001, CIPE (the Italian Inter-ministerial Economic Planning Committee) approved a Program of the strategic infrastructures for the modernization and development of the Country"<sup>(1)</sup>.

<sup>(\*)</sup> RFI.

<sup>(\*\*)</sup> Politecnico di Torino.

<sup>(1)</sup> Report on the status of implementation of the Strategic Infrastructure program, submitted to CIPE on March the 6th 2009.

L'idea alla radice di queste azioni è tentare d'offrire un servizio migliore ed economicamente interessante, così da attrarre domanda sul trasporto ferroviario e riequilibrare nuovamente i due modi. In quest'ottica s'inseriscono, in riferimento alla tratta ferroviaria Torino-Lione, le analisi condotte da società come Alpetunnel, sui cui studi preliminari s'innestano quelli di LTF - considerati, a torto o ragione, "di parte" - o altri commissionati dalla Regione Piemonte, dalla Comunità Montana Bassa Valle di Susa alla società Polinomia o altri ancora come quelli di FARE (Ferrovie Alpine Ragionevoli ed Efficienti) sotto l'Osservatorio Valle di Susa, al fine d'ottenere una previsione della domanda merci e della ripartizione modale della stessa nei decenni futuri per l'attraversamento dell'arco alpino.

Il secondo quesito al quale occorre dare una risposta, dopo il primo relativo all'analisi della reale *necessità* di quest'opera, è legato alla scelta del *tracciato* sul quale realizzare un nuovo corridoio, tenendo ben presente quali possano essere le problematiche anche locali di un territorio in molti casi delicato e complesso qual è quello della Valle di Susa, in particolar modo la Bassa Valle. L'ultimo problema, ma non meno rilevante in ordine d'importanza, è relativo alla ricerca delle *risorse finanziarie* necessarie alla realizzazione di un'opera di questo rilievo: nessuno di questi tre quesiti è oggetto di quest'articolo, seppure si forniscano alcuni spunti per poter rispondere al primo quesito. Questo contributo è da intendersi come definizione e calcolo della *potenzialità effettiva* della linea storica Torino-Modane, che dovrà o potrà poi essere attentamente confrontata con le stime di traffici futuri, sia intesi come totalità d'attraversamento dell'arco alpino sia nello specifico del valico del Frejus. Parimenti, l'attenzione viene posta sulle ricadute energetiche che l'esercizio su un'eventuale nuova linea potrebbe comportare.

In un'epoca nella quale ci si pone tra gli obiettivi primari l'utilizzo ottimale e l'adeguamento tecnologico delle risorse disponibili, di basilare importanza risulta il calcolo della capacità di circolazione ferroviaria. Un incremento d'utilizzo delle infrastrutture ferroviarie è strettamente subordinato alla quantificazione delle prestazioni degli impianti e del materiale impiegato, allo scopo di definire margini di capacità e tracce residue di fatto disponibili.

Le prime metodologie in merito hanno origine e sviluppo a partire dagli anni '50 e molti articoli sono già stati redatti al merito, come oltre richiamato. La capacità di circolazione resta in ogni caso un concetto di non semplice definizione. In primo luogo, essa può essere *teorica* o *pratica*; inoltre si effettua una distinzione tra la sua porzione utilizzata e quella residua.

La potenzialità delle linee e delle stazioni presenta un notevole rilievo ma, data la molteplicità di fattori eterogenei da cui è influenzata, questa grandezza *non è in genere univocamente definibile*. L'ipotesi adottata è quella di riferirsi al numero delle unità di traffico, i treni, nell'unità di tempo, il giorno. Una prima distinzione da farsi è di riferirsi alla capacità di linea distinguendola da quella d'impianto. Per *potenzialità di linea* s'intende il numero di tre-

The idea which lays at the root of such actions is the attempt to offer a better, economically appealing service which may attract demands on railway transport, thus balancing again the two modes. The analyses run by companies such as *Alpetunnel*, whose preliminary studies are referred to in the research developed by LTF - and such research is considered, rightly or wrongly, as "one-sided" - or other studies commissioned by the Regional Council of Piedmont and by *Comunità Montana Bassa Valle di Susa* to company Polinomia, or even other ones developed by FARE (Reasonable, Efficient Alpine Railways) on the Observatory of *Valle di Susa*, are part of this perspective as related to the Turin-Lyon railway section and aim at obtaining a forecast on the demand of goods and on the modal split of such demand for the crossing of the alpine arch in the forthcoming decades.

The second issue to be addressed - after the first one, which is related to the actual analysis of the *need* of such implementation - is linked to the selection of the *track* on which a new corridor should be developed, taking into account the local issues of a territory which is - in many cases - delicate and complex such as the one of Valle di Susa, with particular reference to the Low Valley (Bassa Valle). The last issue, and though certainly not the least one, concerns the procurement of the *financial resources* required to develop a work of such significance: none of these three issues shall be dealt within this article, even though some hints are provided to address the first one. This contribution is to be meant as a definition and calculation of the *actual carrying capacity* of the historical Turin-Modane line, which shall have then to be compared to the estimates of forthcoming traffic, meant both as the crossing of the alpine arch in general and - more specifically - of the Frejus Pass. Focus is also on the energy expenditure the operation of a new line might involve.

In a time where the optimum utilization and the technological adaptation of the resources available are considered as crucial objectives, calculating the daily capacity of railway traffic is of utter importance. Incrementing the use of the railway infrastructures is strictly linked to the quantification of the performance of both the systems and rolling stock utilized, in order to define margins of capacity and the residual slots which are actually available.

The first relevant methodologies have originated and been developed since the nineteen fifties, and several articles have already been published, as it is recalled hereafter. The very concept of carrying capacity cannot in any case be easily defined. First of all, it can be either *theoretical* or *practical*; furthermore, a distinction is made between its utilized portion and the residual one.

The carrying capacity of the lines and stations is remarkably significant but, since it is affected by multifold, heterogeneous factors, such value - in general - *cannot be defined univocally*. The assumption adopted is referred to the number of traffic units - i.e. the trains - within the time unit - i.e. the day. A first distinction to be referred to is the capacity of the line, which must be separated from the one

ni in grado di circolare sulla linea nell'unità di tempo e gli elementi principali che influiscono su questo valore sono la configurazione plano-altimetrica del tracciato, la configurazione del piano del ferro di linee e stazioni, le caratteristiche degli impianti di segnalamento e sicurezza, il numero delle sottostazioni elettriche, il regime di circolazione adottato e conseguentemente gli intervalli di distanziamento tra treni, i programmi di esercizio e di manutenzione, le prestazioni del materiale rotabile usato. La *potenzialità dell'impianto*, in condizioni di esercizio definite, è invece la quantificazione dell'attitudine dell'impianto stesso a ricevere treni nel tempo sui binari di circolazione senza attese, dovute ad altri movimenti incompatibili, ai segnali di protezione, ossia all'ingresso della stazione. Quest'ultima dipende logicamente dalle frequenze degli arrivi.

“La capacità di infrastruttura ha un valore determinato non solamente dalle caratteristiche dell'infrastruttura (parametro tecnico), ma anche dalle caratteristiche del traffico (parametro commerciale) e dai livelli di qualità desiderati (parametro tecnico/commerciale). Non costituisce pertanto un bene disponibile in quantità predeterminata da assegnare alle imprese ferroviarie che ne fanno richiesta, ma un bene la cui quantità, dipendente significativamente dal traffico, viene determinata contestualmente alla strutturazione delle tracce”<sup>(2)</sup>.

### 2. Parametri determinanti la capacità di circolazione

Gli elementi che compongono il sistema ferroviario influenzano direttamente la capacità, che si differenzia in funzione della tipologia e delle prestazioni dei treni e dell'orario assegnato, dello stato dell'infrastruttura e delle modalità d'esercizio. I principali parametri che influenzano la capacità ferroviaria sono i parametri dell'infrastruttura, quelli operativi e gli effetti dell'esercizio.

#### 2.1. Parametri dell'infrastruttura

I parametri dell'infrastruttura sono definiti di seguito.

- Il *numero dei binari di linea*: nel caso di linee a singolo binario si prende in esame la sezione caratterizzata dal maggiore tempo di percorrenza fra due stazioni attigue di precedenza ed incrocio. Ovviamente, in questo caso i margini di sicurezza, trattandosi di circolazione promiscua dei due sensi di marcia, sono incrementati.
- La *distanza tra due località di servizio atte ad incroci o precedenze*: questa distanza che intercorre tra due posti di servizio è un parametro di fondamentale importanza, infatti identifica la sezione di blocco critica e di conseguenza condiziona tutta la linea; su questa sezio-

of the system. By *carrying capacity of the line* we mean the number of trains which can circulate on the line within the time unit; the main elements which affect this value are the configuration of the track layout, the configuration of the upper surface of the rail of both the lines and the stations, the features of the signalling and safety systems, the number of electrical sub-stations, the circulation conditions applied and - consequently - the distancing intervals between the trains, the operation and maintenance programs, the performance of the rolling stock utilized. On the other hand, the *carrying capacity of the system*, in given operation conditions, is the quantification of the aptitude of the system itself to receive trains throughout the time unit on the circulation tracks without waiting time due to other incompatible movements and/or to the protection signals, i.e. when entering the station. This last item obviously depends on the frequency of the arrivals.

“The value of the infrastructure capacity depends not only on the features of the infrastructure itself (technical parameter), but also on the characteristics of the traffic (commercial parameter) and on the wished quality level (technical/commercial parameter). Therefore, this is not a commodity available in a predetermined quantity to be allocated to the railway companies which request it, but its quantity - which significantly depends on the traffic - is determined within the context of the structure of hourly slots”<sup>(2)</sup>.

### 2. Parameters determining the traffic capacity

The elements which compose the railway system affect directly the capacity and the latter varies as a function of the typology and performance of the train and of the allocated timetable, of the status of the infrastructure and of its operational modalities. The main parameters which affect the railway capacity are related to the infrastructure, the operation and the effects of the service.

#### 2.1. Infrastructure

The infrastructure parameters are defined hereinafter.

- *Number of tracks on the line*: in case of single track lines, the section which is characterized by the longest journey time between two contiguous stations of priority and crossing. In this case, since it is a promiscuous circulation in both travel directions, the safety margins are obviously incremented.
- The *distance between two places of service appropriate for crossings or priorities*: this distance between two places of service is a parameter of utter significance, since it identifies the critical block conditions and therefore affects the whole line; this section defines the-

<sup>(2)</sup> RFI COM NI ORG 001 del 07 Aprile 2004.

<sup>(2)</sup> RFI COM NI ORG 001 of April the 7th 2004.

ne di blocco si definisce il numero teorico di treni che possono circolare nell'intervallo di tempo sulla linea.

- Il *tempo totale di riferimento*: solitamente si considera il giorno intero o il periodo di punta, tenendo sempre presente la necessità di dedicare, nelle 24 ore, un tempo per le operazioni di manutenzione programmata e straordinaria.
- *Velocità teorica e velocità di fiancata*: nel caso della rete ferroviaria italiana la velocità teorica è quella prescritta dal gestore dell'infrastruttura e riportata nei fascicoli di circolazione linea, distinti nei quattro ranghi di velocità, mentre la velocità di fiancata è la massima con la quale il treno può percorrere un tratto di linea in funzione delle caratteristiche geometriche e costruttive della linea stessa, oltre al suo stato di manutenzione.

### 2.2. Parametri operativi

I parametri operativi sono descritti di seguito.

- Il *modello di esercizio*: è la programmazione delle tracce orarie occupate dai treni che circolano in linea che, assieme alle specifiche tecniche che regolano il distanziamento spaziale e temporale ed ai perditempo per le operazioni d'incrocio e precedenza, costituisce il tempo effettivo di percorrenza di ciascun treno; in sostanza, si tratta della struttura e della successione dei servizi offerti, suddivisi per tipologia di traccia oraria; sotto quest'aspetto le metodologie per il calcolo della capacità ferroviaria si distinguono in due categorie principali: quelle che tengono conto del numero di treni programmati e forniscono la capacità residua e quelle nelle quali il tempo di percorrenza dei treni è solamente la media di essi.
- Le caratteristiche del *materiale rotabile*: la marcia del treno, lo spazio di frenatura richiesto e conseguentemente il distanziamento e la velocità pratica consentiti sono determinati dalle caratteristiche di trazione e frenatura nonché dalla composizione dei convogli; tutto ciò è a sua volta strettamente correlato alle caratteristiche plano-altimetriche della linea, oltre che eventualmente a dispositivi, quali l'assetto cassa variabile, attivo o passivo, utili per compensare a bordo parte dell'accelerazione centrifuga dei tratti curvilinei.
- La *tipologia di traffico*: s'intende in questo caso la ripartizione delle diverse classi di materiale rotabile in circolazione, che si distinguono per le caratteristiche di potenza e velocità dei mezzi di trazione, nonché per le capacità frenanti dei convogli, che complessivamente concorrono, insieme ad altri fattori, a determinare la velocità ammissibile in linea; si determina così la fondamentale differenziazione tra marcia omotachica da quella eterotachica.
- Il sistema di *distanziamento*: questo fattore determina la lunghezza delle sezioni di blocco, e si ripercuote direttamente sulla minima distanza ammissibile tra due

refore the theoretical number of trains which can circulate on the line within the given time interval.

- The *total reference time*: either the whole day or the peak period are generally considered, keeping in mind the need to allow - within the 24 hours - some time for the planned and extraordinary maintenance operations.
- *Rated speed and permissible line (side) speed*: in the specific case of the Italian railway network, the rated speed is dictated by the provider of the infrastructure and reported in the line circulation files, distinguished in four ranks of speed, whilst the permissible line (side) speed is the highest one at which a train can cover a given section of the line on the basis of the geometric features of the line itself, besides its maintenance status.

### 2.2. Operational parameters

The operational parameters are described hereinafter.

- The *service model*: it is the programming or scheduling of the hourly slots occupied by the trains which circulate on the line and - together with the technical specifications which regulate the time and space distance and the downtime generated by the crossing and priority operations - constitutes the actual coverage time of each train; essentially, this is the structure and succession of the services offered, divided by typology of hourly slot. On this aspect, the methodology to calculate the railway capacity is broken down into two main categories, namely: those which take into consideration the number of programmed trains and provide the residual capacity and those where the coverage time of the trains is calculated by average.
- The features of the *rolling stock*: the travel of the train, the braking space required and - consequently - the distance and practical speed allowed depend on the traction and braking features, as well as on the composition of the trains; all this - on its turn - is strictly connected to the features of the line layout, besides - in case - to devices such as the tilting body (which can be active or passive), which are used to compensate on board part of the centrifugal acceleration along the curves.
- The *traffic typology*: in this case, this means the breaking down into the different classes of circulating rolling stock, which is diversified according to the features of power and speed of the towing means, as well as to the braking capacity of the trains: all this - together with other factors - determines the speed allowed on the line; this sets the essential diversification between the operation of lines with homogeneous or dissimilar train speeds.
- The *distancing system*: this factor determines the length of the block sections and directly affects the minimum distance allowed between two travelling trains

treni in marcia, quindi sulla massima intensità di traffico, ossia sulla potenzialità stessa.

### 2.3. Effetti dell'esercizio

Gli effetti dell'esercizio sono così definiti.

- La *generazione e propagazione dei ritardi*: il ritardo effettivo dato dall'interferenza dipende dalla differenza di velocità dei treni coinvolti, dal distanziamento minimo, dalla distanza tra due successive stazioni, dalle regole di priorità per la circolazione, dai tempi per la formazione e liberazione degli itinerari in stazione.
- La *qualità del servizio richiesta ed attesa*: essa dipende di regola dalla tipologia di traffico e dai requisiti fissati da accordi fra gestori dei servizi e gestori delle infrastrutture.

### 3. Le precedenze

Nella circolazione ferroviaria i treni presentano caratteristiche d'importanza e di velocità diverse fra loro. Si presenta pertanto la necessità di permettere ai treni più veloci di sorpassare quelli più lenti. È possibile eseguire tale operazione nelle stazioni provviste di binari laterali che consentono di ricoverare il treno più lento al fine di lasciare il passo al convoglio a marcia più rapida. Può presentarsi il caso in cui una precedenza sia già prevista dall'orario di servizio, in questo caso è chiamata "precedenza normale"; se invece, a causa di un andamento della circolazione diverso da quello previsto - solitamente per effetto di ritardi - si presenta la necessità d'effettuare la precedenza di un treno nei confronti d'un altro in una stazione in cui tale operazione non era prevista nell'orario di servizio, s'effettua una "precedenza anormale".

### 4. I metodi di calcolo della potenzialità di linea<sup>(3)</sup>

Come noto dalla letteratura, le tecniche d'analisi e calcolo della potenzialità possono suddividersi in tre macro gruppi:

- o *simulazioni sintetiche e analitiche*, che modellano l'infrastruttura ferroviaria attraverso espressioni matematiche in modo semplice;
- o di *ottimizzazione*, che si basano sulla ricerca degli orari saturati ottimali;
- o di *simulazione*, che forniscono modelli in grado di rappresentare la realtà per convalidare i dati di orario.

Mentre la computazione analitica viene usualmente eseguita per ottenere una prima indicazione sulla capacità di circolazione attraverso formule matematiche o espres-

sions - and - subsequently - the maximum traffic intensity, i.e. the actual carrying capacity.

### 2.3. Effects of the operations

The effects of the operations are defined as follows:

- The *generation and propagation of the delays*: the actual delay generated by the interference depends on the different speeds of the trains involved, on the minimum distancing, on the distance between two subsequent stations, on the priority rules for circulation, on the time required for the setting up and release of the itineraries at the station.
- The *requested and expected quality of the service*: this usually depends on the traffic typology and on the requirements defined through agreements between the providers of the services and those who manage the infrastructures.

### 3. Priorities

In railway operation, the trains are diversified by importance and speed. The fastest train needs to be allowed overcoming the slower ones. This operation can be performed at the stations provided with side tracks, which allow parking the slower train so that it leaves the way to the faster speed one. It may occur that a priority is included in the service schedule, and it is called "standard overtaking", if - on the other hand - need arises to give priority to a train versus another one in a station where this operation is not part of the standard time-table, because of a circulation trend different than expected, usually as a result of delays, this will be called "anomalous overtaking".

### 4. Methods to calculate the line carrying capacity<sup>(3)</sup>

As reported in the relevant literature, the techniques to analyse and calculate the carrying capacity can be divided into three large categories, namely:

- o *synthesis and analysis*, which model the railway infrastructure simply, through mathematic expressions;
- o *optimizing methods*, i.e. based on the search for the optimum saturated timetables;
- o *simulations*, which provide models to represent the reality and validate the timetable data.

Whilst the analytical computing is usually performed to obtain a first indication on the traffic capacity through either mathematic formulas or algebraic expressions, the

<sup>(3)</sup> S. RICCI, E. KONTAXI, Ingegneria Ferroviaria, dicembre 2009.

<sup>(3)</sup> RICCI S., KONTAXI E., Ingegneria Ferroviaria, December 2009.

sioni algebriche, gli ambienti di simulazione sono strumenti che generano solitamente gli orari grafici, per mezzo di equazioni specificamente definite nel tempo ad intervalli finiti.

Appartengono alla prima categoria le tecniche che utilizzano espressioni di tipo deterministico, matematicamente sono equazioni con incognite tra loro indipendenti, e vengono anche definiti metodi statici. Le metodologie appartenenti al secondo gruppo fanno uso di espressioni di tipo probabilistico e, dal punto di vista matematico, sono insiemi d'equazioni con incognite dipendenti l'una dall'altra; vengono anche definite dinamiche. Nel terzo gruppo trovano collocazione i metodi di ottimizzazione (metodi asincroni) basati su modelli operativi che cercano di calcolare e minimizzare i ritardi nella circolazione eterotachica, e quelli di simulazione (sincroni) che rappresentano gli step della ricerca al momento più avanzati.

La linea analizzata, Torino-Modane, è interamente a doppio binario ed elettrificata a 3000 V in c.c.; ha una lunghezza complessiva di circa 105 km; per il calcolo della potenzialità è stata suddivisa in due sottotratte, quella di Bassa e quella di Alta Valle: la prima presenta 5 stazioni e 6 fermate, una pendenza massima del 10,9‰ e la sezione critica tra Avigliana e S. Antonino Vaie (di lunghezza pari a 10460 m); nella sezione di Alta Valle invece vi sono 5 stazioni e 3 fermate, la pendenza massima è del 31‰ e la sezione critica è quella compresa tra Bussoleno e Chiomonte (lunghezza di 15079 m). Sulla linea sono stati applicati alcuni tra i principali modelli appartenenti alle tre categorie descritte precedentemente.

**4.1. I metodi sintetici**

Il *metodo denominato FS* si basa su varie formulazioni, quella che si richiama ora permette il calcolo della capacità a partire dalla conoscenza dello stato attuale in termini di numero di treni che circolano sulla linea:

$$P = \left( N_{pr} + \frac{T-t-\theta}{p_k + t_m} \right) * K_{FS} \quad [1.1]$$

I tempi sono sempre espressi in minuti, e:

$N_{pr}$  = somma dei treni che circolano sulla linea (preesistenti);

$T$  = periodo di riferimento;

$t$  = tempo di sospensione del servizio dovuto alla manutenzione;

$\theta$  = intervallo di tempo già coperto dai treni che circolano sulla linea;

$p_k$  = tempo di percorrenza della sezione rilevante da parte del k-esimo treno;

$t_m$  = tempo morto relativo a ciascun treno inerente alle operazioni di distanziamento (valori nel range 1÷3,5 minuti);

simulation environments are tools which -usually - generate the graphic timetables through equations which are specifically defined in time at finite intervals.

The first category includes those techniques which utilize expressions of the deterministic type; mathematically, they are equations whose unknowns are independent on one another, and are also defined as "static methods". The methodologies, which belong to the second category, resort to probabilistic expressions and - on the mathematic point of view - are sets of equations whose unknowns are independent on one another; they are also defined as "dynamic". The third category includes the optimising (asynchronous) methods based on operational models which attempt to calculate and minimise the delays in the dissimilar speed circulation as well as the simulation (synchronous) ones, which represent the most advanced research steps to date.

The analysed line, i.e. Turin-Modane, is fully double-track electrified at 3,000 V dc. of an overall length of nearly 105 km; for the purpose of the carrying capacity calculation, it has been divided into two sub-sections, namely the Low and High Valley: the first one includes 5 stations and 6 stops, a maximum slope of 10.9‰ as well as the critical section between Avigliana and S. Antonino Vaie (length = 10'460 m). On the other hand, the High Valley section includes 5 stations and 3 stops, the maximum slope is 31‰ and the critical section is between Bussoleno and Chiomonte (length = 15'079 m). Some of the main models belonging to the three aforementioned categories have been applied to the line.

**4.1. The synthesis methods**

The *method denominated FS* is based upon several formulations, the one which being dealt with here allows calculating the capacity starting from the knowledge of the current status in terms of the number of trains which circulate on the line:

$$P = \left( N_{pr} + \frac{T-t-\theta}{p_k + t_m} \right) * K_{FS} \quad [1.1]$$

The time is always expressed in minutes, and:

$N_{pr}$  = sum of the trains which circulate on the line (existing);

$T$  = reference period of time;

$t$  = time of service stoppage for maintenance purposes;

$\theta$  = time interval already covered by the trains which circulate on the line;

$p_k$  = coverage time of the relevant section by the k<sup>th</sup> train;

$t_m$  = downtime relevant to each train for the distancing operations (values within the range of 1 to 3.5 minutes);

$K_{FS}$  = coefficiente di rendimento adimensionale (<1), assunto pari a 0,6 (limite inferiore di variabilità) in considerazione della notevole tortuosità della linea.

Questa formula ha il difetto di non tener conto della eterotachicità del traffico. Applicando la formula [1.1] si giunge ad un valore di potenzialità di 218 treni/giorno per direzione per quanto riguarda la tratta di Alta Valle e 278 treni/giorno per direzione relativamente alla tratta di Bassa Valle. Si tratta di valori di potenzialità decisamente elevati, come si vedrà in seguito, ottenuti con un modello fortemente semplificativo.

In tempi successivi (2004) l'espressione è stata superata da quella adottata da Rete Ferroviaria Italiana (RFI), che prende in considerazione i valori ricavati secondo un intervallo medio di distanziamento minimo dei treni, maggiorato di margini d'ampliamento e di tempi supplementari. I margini d'ampliamento consistono nella pratica in una maggiorazione di 1/3 nel caso di potenzialità oraria e 2/3 per quella giornaliera, mentre i tempi supplementari sono di 0,25' per impianto, cioè per ogni stazione presente sulla linea. Con questo metodo si definiscono la capacità teorica e quella commerciale. Nel caso di flussi unidirezionali (doppio binario) considerando la sezione rilevante, la capacità teorica è calcolata con la seguente formula:

$$CTG = \frac{N * 1320}{D_n} \quad [1.2]$$

dove N è il numero di binari e  $D_n$  il tempo di distanziamento in linea indicato come "normale" nello scenario tecnico; in prima approssimazione il tempo percorso alla velocità di rango A.

La capacità commerciale è inferiore di quella teorica, tanto più quanto aumentano il numero di livelli di velocità commerciale presenti sulla linea, le differenze di velocità tra tali livelli, la distanza fra gli impianti in cui è possibile effettuare precedenze ed incroci, la percentuale di vuoti tecnici, il tutto calcolabile in prima approssimazione sulla base del coefficiente K di eterotachicità:

$$CMG = \frac{CTG}{K} \quad [1.3]$$

Il valore del coefficiente K varia in funzione del numero di livelli di velocità ed è compreso tra 1,2 e 1,9. Tramite la formula [1.3], utilizzando un valore di K pari a 1,5 (relativo a 3 livelli di velocità) s'ottiene una potenzialità pratica di 176 treni/giorno per direzione sulla tratta di Alta Valle e 207 treni/giorno su quella di Bassa Valle. Questa formulazione, pur essendo di facile e rapida applicazione, presenta l'inconveniente di considerare i livelli di eterotachicità solo qualitativamente attraverso l'adozione d'un coefficiente che tiene conto del numero di differenti livelli di velocità, ma non delle differenze tra le stesse o del numero di treni che compongono ciascuna classe.

$K_{FS}$  = non-dimensional performance coefficient (<1), assumed equal to 0.6 (lower limit of variability) because of the remarkable tortuosity of the line.

The shortcoming of this formula is that it does not take into account the dissimilar speeds of the traffic. By applying formula [1.1], we attain a carrying capacity of 218 trains/day per direction as related to the High Valley section and 278 trains/day per direction in the Low Valley one. These are remarkably high carrying capacity values, as we will see further on, obtained by a remarkably simplifying model.

In later times (2004) this expression was superseded by the one adopted by the Italian Railway Network (RFI), which takes into consideration the values obtained according to a minimum average headway of trains, increased by margins of enlargement and additional time. The margins of enlargement consist in adding 1/3 to the hourly carrying capacity and 2/3 to the daily one, whilst the additional time is 0.25' per installation, i.e. for every station present on the line. This method enables to define the rated capacity and the commercial one. In case of one-direction flows (double track), considering the relevant section, the rated capacity is calculated through the following formula:

$$CTG = \frac{N * 1320}{D_n} \quad [1.2]$$

where N is the number of tracks and  $D_n$  is the distancing time in the line indicated as "standard" in the technical scenario; as a first approximation, the time covered at rank A speed.

The commercial capacity progressively decreases versus the rated one with the increase in the number of levels of commercial speed present on the line, in the speed difference between such levels, in the distance between the installations where priorities and crossings can be performed, and in the downtime required for technical purposes. All this can be calculated as a first approximation on the basis of coefficient K (dissimilar speed):

$$CMG = \frac{CTG}{K} \quad [1.3]$$

The value of coefficient K varies depending upon the number of speed levels and is included between 1.2 and 1.9. Formula [1.3] - if a value of K equal to 1.5 (relevant to 3 levels of speed) is used - shows a practical carrying capacity of 176 trains/day per direction on the High Valley section and of 207 trains/day on the Low Valley one. Even though this formulation is easy and fast to be applied, its inconvenience lays in its considering the levels of dissimilar speed on a quality point of view only, by adopting a coefficient which takes into account the number of the different speed levels but not the differences between said speeds or the number of trains which compose every class.

CANCIANI considera la potenzialità di circolazione delle linee ferroviarie a doppio binario con circolazione bitachica alternante considerando il perditempo di precedenza. La circolazione bitachica alternante definisce uno schema in cui i treni appartengono in numero uguale a due classi di velocità e s'alternano fra queste. L'espressione per il calcolo è la seguente:

$$P = \frac{T}{p + (f_{12} * l)} * n \quad [1.4]$$

dove:

$$p = \frac{d_{blocco}}{v_1} + t_a \quad \text{è il tempo minimo per effettuare una precedenza,}$$

con  $t_a$  tempo d'accelerazione;  $(f_{12} * l)$  è il tempo perso per effetto eterotachico;  $f_{12}$  è la differenza fra gli inversi di velocità dei treni lenti ( $v_1$ ) e veloci ( $v_2$ );  $n$  tiene conto della quantità di treni che circolano durante l'intervallo temporale fra 2 treni veloci.

Applicando la [1.4] risulta una potenzialità di 252 treni/giorno per direzione per la tratta di Alta Valle e 235 treni/giorno per quella di Bassa. È interessante notare come esclusivamente applicando questo metodo risulti una potenzialità inferiore per la tratta di Bassa Valle. Questo risultato si può giustificare considerando che il modello di circolazione in questione è un "bitachica alternante", che già di per sé traduce uno schema che si avvicina a quello ideale ai fini dello sfruttamento della linea, ed inoltre nella tratta di Alta Valle si trovano sezioni di blocco con velocità ammesse sì inferiori, ma con valori molto ravvicinati tra le differenti classi. In altre parole si può affermare che, in generale, un modello d'esercizio che preveda la circolazione di molti convogli con classi di velocità sensibilmente differenti è meno efficiente in termini di potenzialità di uno che preveda una maggiore omotachicità, seppure con una velocità di percorrenza pari a quella dei convogli più lenti.

4.2. I metodi analitici

Il *procedimento di calcolo UIC* è quello riportato in una prima edizione nella fiche 405R del 1978, superato in seguito dalla 405-2I del 1983 e poi dalla 406R del 2004. Secondo questo metodo l'espressione della potenzialità, riferita all'intera giornata e determinata dalla sezione tra due località di servizio a maggiore tempo d'occupazione (sezione determinante), vale:

$$P = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}} \quad [1.5]$$

nella quale:

CANCIANI considers the carrying capacity of the two-speed alternate circulation double track railway lines including the downtime generated by the priorities. The alternate two-speed circulation defines a scheme where the same amount of trains belongs to two classes of speed and the trains alternate between them. The expression for the calculation is as follows:

$$P = \frac{T}{p + (f_{12} * l)} * n \quad [1.4]$$

where:

$$p = \frac{d_{blocco}}{v_1} + t_a \quad \text{is the minimum time to perform a priority,}$$

with  $t_a$  acceleration time;  $(f_{12} * l)$  is the downtime due to dissimilar speeds;  $f_{12}$  is the difference between the inverses of speed of the slow ( $v_1$ ) and fast ( $v_2$ ) trains;  $n$  takes into account the quantity of trains which circulate during the time interval between 2 fast trains.

Applying [1.4], the result is a carrying capacity of 252 trains/day per direction on the High Valley section and 235 trains/day on the Low Valley one. It is worth noticing that the sole application of this method shows lower carrying capacity for the Low Valley section. This result can be justified if we consider that the circulation model in exam is "two-speed alternate" which - by itself - translates a scheme close to the ideal one as related to the utilization of the line and - furthermore - the High Valley contains block sections where the allowed speed is lower, but whose values are very close for the different classes. In other words, we may state that - in general terms - a model of service including the circulation of several trains at remarkably different speed classes is less efficient in terms of carrying capacity than if the speeds were more homogeneous, even if the coverage speed were equal to the one of the slowest trains.

4.2. The analytic methods

The *UIC calculation procedure* was reported as a first edition in leaflet 405R of 1978, then superseded by leaflets 405-2I of 1983 and 406R of 2004. According to this method, the expression of the carrying capacity - referred to the whole day and determined by the section between two service locations with the largest occupation time (determining section) - is:

$$P = \frac{T}{t_{fm} + t_r + t_{zu}} \quad [1.5]$$

where:

- $t_{fm}$  è l'intervallo minimo medio tra i treni calcolato definendo due matrici d'uguale dimensione contenenti: la quantità dei casi di successione dei treni, ripartite secondo classi di tempi di percorrenza; i tempi di occupazione nei diversi casi di successione dei treni, ottenuti mediante la seguente espressione

$$t_{fm} = L/v = (\lambda+d+l)/v + D/v + t_m \quad [1.6]$$

dove  $\lambda$  è la distanza di visibilità del segnale,  $d$  è la lunghezza della sezione di preavviso,  $l$  è la lunghezza del convoglio,  $D$  è la lunghezza della sezione determinante,  $v$  la velocità di percorrenza del convoglio e  $t_m$  il tempo di predisposizione delle operazioni di distanziamento; il prodotto delle due matrici fornisce la matrice dei tempi d'occupazione complessivi. La somma di tutti gli elementi di questa matrice fornisce il tempo giornaliero totale d'occupazione dell'infrastruttura e, dal rapporto tra quest'ultimo ed il numero dei casi di successione s'ottiene l'intervallo medio di distanziamento dei treni;

- $t_r$  è il cosiddetto margine d'ampliamento, che racchiude in sé l'applicazione della teoria delle code e quindi l'impostazione di un dato livello di servizio. Per il calcolo di  $t_r$ , occorre considerare che tale margine è collegato al fattore d'utilizzazione della sezione

$$\rho = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r} \quad (\text{rapporto fra il tempo medio di servizio e l'intervallo medio tra due arrivi consecutivi}).$$

Per evitare la formazione di code questo valore deve essere al massimo pari a 0,6 e perciò  $t_r \geq 0,67 * t_{fm}$ ;

- $t_{zu}$  è un tempo supplementare di natura sperimentale che tiene conto del numero delle sezioni di blocco sul tratto di linea in esame espresso in minuti; l'espressione per il calcolo di tale tempo è  $t_{zu} = 0,25 * a$  (dove  $a$  rappresenta il numero di posti di blocco intermedi della sezione rilevante).

Il denominatore rappresenta quindi l'intervallo medio a seguito di ciascun treno entro cui non si può avere circolazione. Applicando quindi la [1.5] si perviene ad un valore di potenzialità giornaliera di 138 treni per direzione relativamente alla tratta di Alta Valle e 165 treni giornalieri per quanto riguarda la tratta di Bassa Valle. Questo metodo prevede d'introdurre elementi che esplicitano, in maniera più o meno diretta, l'influenza di fattori che alterano la regolarità di marcia, quale ad esempio il margine d'ampliamento che racchiude in sé l'applicazione della teoria delle code.

Il metodo di GENOVESI e RONZINO, sviluppato nel 2006 ampliando quanto proposto da CORRIERE nel 1982, estende il concetto del coefficiente di ritardo anche ai perditempi dovuti alle fermate d'orario oltre che alle cause ritardanti di tipo accidentale. Inoltre, per avvicinare quanto più possibile a valori reali la capacità, il metodo introduce il coefficiente di stabilità. L'aspetto più importante di questo modello è che ci consente di quantificare la differenza di potenzialità teorica tra il blocco fisso (livello 2

- $t_{fm}$  is the minimum average headway calculated by defining two matrixes of the same dimension, containing the quantity of cases of succession of the trains (divided according to the classes of coverage time) and the time of occupation in the different cases of succession of the trains, which is obtained through the following expression

$$t_{fm} = L/v = (\lambda+d+l)/v + D/v + t_m \quad [1.6]$$

where  $\lambda$  is the visibility distance of the signal,  $d$  is the length of the notice section,  $l$  is the length of the train,  $D$  is the length of the determining section,  $v$  is the running speed of the train and  $t_m$  is the time to arrange the headway operations; the product of the two matrixes gives the one of the overall occupation time. The sum of all the elements of this matrix gives the total daily time the infrastructure is occupied, and the ratio between the latter and the number of cases of succession gives the average distancing interval between the trains;

- $t_r$  is the so-called enlargement margin, which involves the application of the queuing theory and - subsequently - the setting up of a given level of service. To calculate  $t_r$ , we need to consider that said margin is linked to the utilization factor of section

$$\rho = \frac{t_{fm}}{t_{fm} + t_r} \quad (\text{i.e. the ratio between the average service time and the average interval between two consecutive arrivals}).$$

In order to prevent the generation of queues, this value must be no greater than 0.6 and - therefore -  $t_r \geq 0,67 * t_{fm}$ ;

- $t_{zu}$  is an additional time of experimental nature which takes into account the number of block sections on the line section under exam expressed in minutes; the expression for the calculation of such time is  $t_{zu} = 0,25 * a$  (where  $a$  represents the number of intermediate block sections in the relevant section).

The denominator represents therefore the average interval after each train transit during which no circulation would be allowed. Subsequently, by applying [1.5], we reach a daily carrying capacity value of 138 trains per direction as related to the High Valley and of 165 trains in the Low Valley section. This method includes the introduction of elements which makes more or less directly explicit the influence of factors which alter the regularity of the travel such as - for instance - the margin of enlargement which includes in itself the application of the queuing theory.

The GENOVESI and RONZINO method, which was developed in 2006 by widening what was proposed by CORRIERE in 1982, extends the concept of coefficient of delay to the downtime due to the scheduled stops, i.e. besides the accidental causes of delay. Furthermore, the method introduces the stability coefficient in order to make the capacity as close as possible to real values. The most important aspect of this model is that it allows quantifying the difference of theoretical carrying capacity between the fixed

del sistema ERTMS/ETCS) e il blocco mobile (livello 3 dello stesso).

*Blocco fisso*

Nel caso del blocco fisso, con sezioni di blocco di lunghezza  $b$  prefissata, la distanza minima tra due treni che si susseguono può scriversi come somma di una distanza fissa  $d=f(n,b)$ , che dipende dalla lunghezza del blocco  $b$  e dal numero  $n$  degli aspetti che il segnalamento concatenato può assumere, più la lunghezza del treno  $L_t$  più un franco di sicurezza  $f$ :

$$\delta_{\min} = d(n,b) + L_t + f \quad [1.7]$$

dove  $n$  rappresenta il numero di aspetti del segnalamento, mentre  $d$  esprime fisicamente il concetto che un treno che segue non deve essere rallentato nella sua marcia, per causa di un segnale "giallo"; in particolare:

$$d = b + \frac{b}{n-2} = \frac{n-1}{n-2} * b \quad [1.8]$$

La funzione di deflusso  $q-v$  nel caso di blocco fisso ad  $n$  aspetti diventa quindi:

$$q = \frac{v}{\frac{n-1}{n-2}b + L_t + f} \quad [1.9]$$

Riferendosi alla situazione più frequente di blocco automatico a tre aspetti, il coefficiente del termine  $b$  vale 2, ossia il doppio della sezione di blocco.

*Blocco mobile*

Passando ora ad analizzare il caso del blocco mobile, si osserva come il termine che esprime il distanziamento spaziale minimo sia dato, in analogia al caso stradale, dalla somma dello spazio di frenatura, della lunghezza del treno e di uno spazio di sicurezza:

$$\delta_{\min} = \text{spazio di frenatura} + L_t + f \quad [1.10]$$

Lo spazio di frenatura può essere espresso come funzione della velocità iniziale  $v$  e della decelerazione costante  $\gamma$  del convoglio:

$$\text{spazio di frenatura} = \frac{kv^2}{2\gamma} \quad [1.11]$$

Ne segue che il flusso corrispondente al distanziamento spaziale minimo risulta essere pari a:

$$q = \frac{v}{k \frac{v^2}{2\gamma} + L_t + f} \quad [1.12]$$

Per ottenere un valore "reale" della capacità, compren-

block (level 2 of the ERTMS/ETCS system) and the moving one (level 3 of the same).

*Fixed block*

In case of fixed block, with block sections of established length  $b$ , the minimum distance between two subsequent trains can be written as the sum of a fixed distance  $d=f(n,b)$ , which depends on the length of block  $b$  as well as on number  $n$  of the aspects the linked signalling system may take, plus the length of the train  $L_t$  plus a safety margin  $f$ :

$$\delta_{\min} = d(n,b) + L_t + f \quad [1.7]$$

where  $n$  represents the number of aspects of the signalling system, whilst  $d$  physically expresses the concept that a train must not be slowed down in its travel because of a "yellow" signal; in particular:

$$d = b + \frac{b}{n-2} = \frac{n-1}{n-2} * b \quad [1.8]$$

The  $q-v$  flow function, in case of fixed block at  $n$  aspects becomes therefore:

$$q = \frac{v}{\frac{n-1}{n-2}b + L_t + f} \quad [1.9]$$

With reference to the most frequent conditions of three-aspect automatic block, the coefficient of term  $b$  is worth 2, i.e. the double of the block section.

*Moving block*

Passing to analyse the case of the moving block, we can observe that the term which expresses the minimum space distancing is given - by analogy to the road case - from the sum of the braking space, the length of the train and some safety space:

$$\delta_{\min} = \text{braking space} + L_t + f \quad [1.10]$$

The braking space can be expressed as a function of initial speed  $v$  and constant deceleration  $\gamma$  of the train:

$$\text{braking space} = \frac{kv^2}{2\gamma} \quad [1.11]$$

Consequently, the flow which corresponds to the minimum space distancing is equal to:

$$q = \frac{v}{k \frac{v^2}{2\gamma} + L_t + f} \quad [1.12]$$

In order to obtain a "real" value of the capacity, which

sivo anche di un'intrinseca "stabilità" è necessario considerare due fattori correttivi:

- il coefficiente di ritardo specifico;
- il coefficiente di stabilità.

Il coefficiente di ritardo specifico  $D$ , proposto per primo da Ferdinando CORRIERE nel 1982 va inteso come "la quantità di tempo perduta da un generico convoglio, per la presenza di cause [...] ritardanti, nel percorrere la lunghezza unitaria di linea"<sup>(4)</sup> e si esprime in s/m. L'estensione di questo metodo consiste però nell'estendere la causa di ritardo ai perditempi dovuti alle fermate d'orario oltre che a quelle di tipo accidentale. Questo comporta che la formula [1.9] venga modificata ponendo al posto della velocità come definita precedentemente, questa:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{1 + D\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}} \quad [1.13]$$

Vi sono due modi per valutare il coefficiente  $D$ : la prima strada è quella di misurare i ritardi effettivamente registrati sulla linea o nel nodo, comprensivi dei perditempo dovuti alle fermate d'orario; il valore che si ottiene attraverso questo procedimento è però tanto più realistico quanto più la linea è già caricata, ossia il più possibile vicino a condizioni di saturazione. Un'altra possibilità è quella di ricavare  $D$  da un'analisi statistica dei ritardi di altre linee o altre situazioni di traffico. Nella pratica ci si riferisce usualmente al seguente schema: nel caso di flusso omotachico la velocità è quella massima ammessa dallo spazio di frenatura ed il ritardo è  $D = D_0 + D_{ferm}$  (cause accidentali più perditempo per fermate); nel caso invece di flusso eterotachico la velocità è la minore tra la massima ammessa dallo spazio di frenatura e la più alta tra quelle delle diverse classi di treni.

Il coefficiente di stabilità  $\chi$ , è il secondo parametro che occorre introdurre per avvicinare i risultati del modello alla realtà. L'idea è quella di considerare un numero massimo di treni coinvolti dal ritardo o dall'arresto del treno generico che precede. In altri termini, un flusso si dice "stabile" se ogni treno, in caso di ritardo, coinvolge un numero di treni  $m \leq m^*$ , dove  $m^*$  è un numero precedentemente fissato, funzione della qualità del servizio che il gestore della rete vuole ottenere. Il coefficiente di stabilità relativo alla tratta fra le stazioni  $i$  e  $j$  è:

$$\chi_{0,(i-j)} = \frac{L_{i-j}}{\frac{n-1}{n-2} b_{medio} + L_i + f} \geq 1 \quad [1.14]$$

<sup>(4)</sup> Ingegneria Ferroviaria, gennaio-febbraio 1984.

should include also some intrinsic "stability", two correction factors are to be taken into consideration, namely:

- the coefficient of specific delay;
- the stability coefficient.

The specific delay coefficient  $D$ , which was first proposed by Ferdinando CORRIERE in 1982, is meant as "the amount of time lost by a generic train because of the presence of delaying causes [...] in covering the length unit of the line"<sup>(4)</sup> and is expressed in s/m. Yet, the method in exam is wider since it extends the causes of delay to the downtime due to the scheduled stops, besides the accidental ones. Formula [1.9] should therefore be modified by setting this value instead of the previously defined speed:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}}{1 + D\sqrt{\frac{2\gamma b}{k}}} \quad [1.13]$$

Coefficient  $D$  can be evaluated in two different ways: the first one is by measuring the delays which have actually been recorded either on the line or within the railway centre, including the downtime due to the scheduled stops; the value obtained through this procedure is however more realistic the more the line is loaded, i.e. as close as possible to its saturation conditions. Another option would be obtaining  $D$  from a statistical analysis of other lines or other traffic conditions. In the practice, the following scheme is usually referred to: in case of single speed flow, the max. speed allowed by the braking space and the delay is  $D = D_0 + D_{ferm}$  (accidental causes plus downtime for stops). On the other hand, in case of differential speed flow, the speed is the lowest one between the maximum speed allowed by the braking space and the highest one of those which are developed by the different classes of trains.

The stability coefficient  $\chi$  is the second parameter which needs to be introduced so that the results of the model come closer to reality. The idea is to consider a maximum number of trains involved in either the delay or generic stop of the preceding train. In other words, a flow is considered as "steady" if every train, in case of delay, involves a number of trains  $m \leq m^*$ , where  $m^*$  is a previously defined figure, as a function of the quality of service the network provider intends to achieve. The stability coefficient relevant to the section between stations  $i$  and  $j$  is:

$$\chi_{0,(i-j)} = \frac{L_{i-j}}{\frac{n-1}{n-2} b_{medio} + L_i + f} \geq 1 \quad [1.14]$$

<sup>(4)</sup> Ingegneria Ferroviaria, January-February 1984.

dove  $L_{i,j}$  rappresenta la distanza tra le stazioni  $i$  e  $j$ . Per passare poi al valore del coefficiente di stabilità associato all'intera linea è necessario fare la media ponderata, rispetto alle distanze  $L_{i,j}$  fra le stazioni, dei coefficienti valutati per ogni tratta:

$$\chi_{linea} = \frac{\sum \chi_{(i-j)} L_{i-j}}{\sum L_{i-j}} \quad [1.15]$$

La formula definitiva per il calcolo della capacità reale del blocco fisso risulta quindi essere:

$$C = \chi_{linea}^{-1} \frac{\frac{\sqrt{2\gamma b/k}}{1 + D\sqrt{2\gamma b/k}}}{\frac{n-1}{n-2} b + L_i + f} \quad [1.16]$$

Grazie alla [1.16] si è ricavato, con l'attuale configurazione di blocco fisso, un valore di potenzialità pratica pari a 136 treni/giorno per direzione per la tratta di Alta Valle e di 182 treni/giorno per la tratta di Bassa Valle. Nell'ipotesi d'implementare un sistema di *blocco mobile* secondo questo modello si potrebbe pervenire ad una potenzialità effettiva di 350 treni/giorno. Questa formulazione presenta l'inconveniente di basarsi sull'ipotesi fondamentale di omotachicità del flusso. I valori tuttavia, specie nell'ipotesi di blocco fisso, non risultano eccessivamente elevati, anche grazie all'introduzione di coefficienti riduttivi quali quello di ritardo - legato sia ai perditempi dovuti alle fermate d'orario che alle cause ritardanti di tipo accidentale - e quello di stabilità.

4.3. I metodi analogici

Nel 1984 CORRIERE, in seguito alla sua trattazione precedente, analizza la riduzione della potenzialità che scaturisce dall'inserzione di treni lenti in una circolazione omotachica, considerando come tempo morto non utilizzabile la differenza dei tempi di percorrenza, in una sezione di blocco, dei due tipi di circolazione, per il numero delle sezioni di blocco comprese tra due stazioni di precedenza interessate. Giunge pertanto, a partire dall'espressione della potenzialità oraria utilizzata dalle FS in presenza di priorità di circolazione (circolazione eterotachica), alla seguente formulazione:

$$P = K * \left( \sum_i N_i + \frac{T - t - \sum_i N_i * T_i * (1 + D_i * v_i)}{T_f * (1 + D_f * v_f)} \right) \quad [1.17]$$

in cui:

$D_i$  = entità media dei ritardi della classe  $i$  (treni prioritari) per unità di lunghezza della linea;

where  $L_{i,j}$  represents the distance between stations  $i$  and  $j$ . In order to move to the value of the stability coefficient associated to the whole line, we need to make the weighted average, as related to distances  $L_{i,j}$  between the stations, of the coefficients which have been evaluated for each section:

$$\chi_{linea} = \frac{\sum \chi_{(i-j)} L_{i-j}}{\sum L_{i-j}} \quad [1.15]$$

Therefore, the final formula to calculate the actual capacity of the fixed block is:

$$C = \chi_{linea}^{-1} \frac{\frac{\sqrt{2\gamma b/k}}{1 + D\sqrt{2\gamma b/k}}}{\frac{n-1}{n-2} b + L_i + f} \quad [1.16]$$

Thanks to [1.16], we have obtained - through the current fixed block configuration - a carrying capacity value equal to 136 trains/day per direction for the High Valley section and to 182 trains/day for the Low Valley one. Assuming to implement a mobile *block* system in compliance with this model, we could reach a carrying capacity of 350 trains/day. The inconvenience of such formulation is that it is based upon the essential assumption of a homogeneous speed flow. The values, nevertheless, mainly in the fixed block assumption, do not seem to be excessively high, also thanks to the introduction of reduction coefficients such as the delay coefficient (which is linked to both the downtime due to the scheduled stops and the accidental delaying causes) and the stability coefficient.

4.3. The analogical methods

In 1984, CORRIERE - as a result of his previous approach - analysed the reduction in the carrying capacity arising from the introduction of slow trains into a homogeneous speed circulation, considering as unusable downtime the difference in the coverage time - in a block section - of the two types of circulation for the number of block sections included between two priority stations involved. Starting from the expression of hourly carrying capacity utilised by the Italian Railways (FS) in case of circulation priorities (dissimilar speed circulation), he reached the following formulation:

$$P = K * \left( \sum_i N_i + \frac{T - t - \sum_i N_i * T_i * (1 + D_i * v_i)}{T_f * (1 + D_f * v_f)} \right) \quad [1.17]$$

where:

$D_i$  = average entity of the delay for class  $i$  (priority trains) per length unit of the line;

$D_f$  = entità media dei ritardi della classe f (treni non prioritari) per unità di lunghezza della linea;

$N_i$  = numero dei treni prioritari;

$T$  = periodo di riferimento;

$t$  = tempo di sospensione del servizio dovuto alla manutenzione;

$T_i$  = distanziamento temporale dei treni di classe i;

$v_i$  = velocità dei treni di classe i;

$K$  = coefficiente di riduzione ( $\leq 1$ ) per tenere conto della materiale impossibilità di saturare completamente gli intervalli lasciati liberi dai treni prioritari.

Applicando quindi la [1.17] ed assumendo cautelativamente un coefficiente  $K$  pari a 0,7 si determina una potenzialità di 165 treni/giorno per direzione per la tratta di Alta Valle e 222 treni/giorno per quella di Bassa Valle. Questo modello ci permette quindi d'introdurre elementi che esplicano, in maniera più o meno diretta, l'influenza di fattori che alterano la regolarità di marcia, quali i ritardi dovuti alla differenza dei tempi di percorrenza dei treni lenti e di quelli veloci tra due stazioni di precedenza.

Il metodo di REITANI e MALASPINA è basato sulla fusione tra le formule di tipo statico ed analitico; infatti esso parte dai presupposti della formula generale dei metodi statici, integrandoli con elementi propri di quelli analitici, grazie all'introduzione d'un coefficiente che permette di tenere conto della probabilità che il ritardo, calcolato con il metodo di Corriere, si verifichi. In sostanza, con questo metodo, è possibile considerare più classi di velocità, tradurre le regole di priorità imposte alla circolazione e quantificare i ritardi per l'effettuazione delle precedenza, essendo l'eterotachicità dei flussi, i gradi di priorità nella circolazione, l'entità e l'incidenza dei ritardi, la composizione del traffico, fattori che incidono in maniera determinante sul valore della potenzialità. Partendo dalla formula generale dei metodi statici,  $P = T/(I+t_m)$ , dove  $T$  è il tempo di riferimento,  $I$  rappresenta l'intervallo temporale minimo tra i convogli e  $t_m$  il tempo morto, si fa riferimento ad un intervallo di distanziamento tra treni più rispondente alle caratteristiche di traffico eterotachico, ossia la media pesata dei distanziamenti propri delle diverse classi di treni. Per il calcolo dei ritardi dovuti alle interferenze tra convogli di classi differenti si fa riferimento ai coefficienti  $p_{ij}$ , che traducono le regole di priorità nel metodo di CASCETTA e NUZZOLO. L'espressione finale sarà dunque:

$$P = \frac{T}{K * Z} \quad [1.18]$$

in cui  $K$  è un coefficiente di eterotachicità, con valori compresi tra 1 e 1,3 e  $Z$ , dato da  $I + t_m$ , sarà pari a:

$$\frac{D}{\sum N_i} * \sum_{i=1}^n \left( \frac{N_i}{v_i} + \sum_{j=1}^n c_{ij} \frac{p_{ij}^2 * N_i * N_j^2}{2(\sum_h N_h - N_i)} * \left| \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_j} \right| \right) + t_m \quad [1.19]$$

$D_f$  = average entity of the delay for class f (non-priority trains) per length unit of the line;

$N_i$  = number of the priority trains;

$T$  = reference period of time;

$t$  = time of suspension of the service because of maintenance;

$T_i$  = time distancing for the class i trains;

$v_i$  = speed of the class i trains;

$K$  = reduction coefficient ( $\leq 1$ ) to keep into account the physical impossibility to fully saturate the intervals which are left available by the priority trains.

Subsequently, applying [1.17] and assuming a precautionary coefficient  $K$  equal to 0.7, we can determine a carrying capacity of 165 trains/day per direction for the High Valley and 222 trains/day for the Low Valley. Subsequently, this model enables to introduce elements which make more or less directly explicit the influence of factors which alter the regularity of travel, such as the delays due to the difference in the coverage time of the slow trains and of the fast ones between two priority stations.

The REITANI and MALASPINA method is based on the merging of static and analytic formulas; it starts from the assumptions of the general formula of the static methods, integrating them with elements which are typical of the analysis ones, thanks to the introduction of a coefficient which allows taking into account the probability that the delay calculated with CORRIERE'S method actually occurs. Essentially, this method allows taking into consideration several speed classes, translating the priority rules which are dictated to the circulation and quantifying the delays for the carrying out of the priorities, since the dissimilar speeds of the flows, the priority degrees in the circulation, the entity and influence of the delays, and the composition of the traffic are factors which significantly affect the value of the carrying capacity. Starting from the general formula of the static methods,  $P = T/(I+t_m)$ , where  $T$  is the reference time,  $I$  represents the minimum time interval between the trains and  $t_m$  is the downtime, reference is made to a distancing interval between the trains which responds more to the features of the dissimilar speed traffic, i.e. the weighted average of the distancing which is specific to the different classes of trains. As related to the calculation of the delays due to the interferences between trains of different classes, reference is made to coefficients  $p_{ij}$  which translate the priority rules into the method devised by CASCETTA and NUZZOLO. The final expression shall then be:

$$P = \frac{T}{K * Z} \quad [1.18]$$

where  $K$  is a dissimilar speed coefficient with values included between 1 and 1.3 and  $Z$ , given by  $I + t_m$ , shall be equal to:

$$\frac{D}{\sum N_i} * \sum_{i=1}^n \left( \frac{N_i}{v_i} + \sum_{j=1}^n c_{ij} \frac{p_{ij}^2 * N_i * N_j^2}{2(\sum_h N_h - N_i)} * \left| \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v_j} \right| \right) + t_m \quad [1.19]$$

in cui:

$N_i$  = numero di treni della classe  $i$ -esima compresi in orario;

$N_j$  = numero di convogli della classe  $j$ -esima.

In questo modello la scelta del tratto "I" di linea da considerare per il calcolo deve ricadere su quello più elevato in termini di distanza, e non già di tempo come si usa solitamente. Tramite questa formulazione - con  $K$  pari a 1,2 relativo a tre classi di velocità - si è giunti a determinare il valore di potenzialità rispettivamente di 143 e 182 treni/giorno per direzione per la tratta di Alta e Bassa Valle. Questo metodo permette, oltre a considerare più classi di velocità dei convogli, di tradurre le regole di priorità imposte alla circolazione e di quantificare i ritardi per l'effettuazione delle precedenza. Risulta quindi essere più completo nel tentativo di modellizzare la circolazione dei treni nella maniera più fedele possibile alla realtà, impiegando la maggior parte dei parametri in gioco descrivibili impiegando equazioni matematiche.

Il metodo di DELFINO e GALAVERNA è utile per quantificare l'incremento di potenzialità ottenibile, su linee a traffico misto, grazie all'introduzione del blocco mobile. Esso si basa come punto di partenza sulle considerazioni di MALASPINA e REITANI. Più precisamente, le formule per il calcolo sono le stesse già viste precedentemente nel modello di REITANI e MALASPINA nel caso di blocco elettrico automatico a sezioni fisse, mentre nel caso del blocco mobile le formule sono state modificate introducendo per il distanziamento minimo tra un convoglio di categoria  $i$  e quello che lo precede di categoria  $j$ , l'espressione:

$$D_{ij} = \frac{S_i^2}{2d_i} + S_j * t_r + L_{ij} + H \quad [1.21]$$

dove:

$S_i$  = velocità del treno che segue;

$S_j$  = velocità del treno che precede;

$D_{ij}$  = ritardo specifico;

$t_r$  = tempo di reazione;

$L_i$  = lunghezza del convoglio;

$H$  = margine spaziale di sicurezza;

$d_i$  = decelerazione.

In questo caso si è ottenuta una potenzialità dell'intera linea, nell'ipotesi di realizzare un sistema di blocco mobile, di ben 335 treni/giorno per direzione.

#### 4.4. Influenza del grado di eterotachicità sulla potenzialità<sup>(5)</sup>

L'eterotachicità di circolazione di per se stessa non rappresenta un elemento di criticità, ma genera inefficienze.

<sup>(5)</sup> F. CROCCO, S. DE MARCO, D. W.E. MONGELLI, Ingegneria Ferroviaria, gennaio 2010.

where:

$N_i$  = number of trains of the  $i^{th}$  class included in the time-table;

$N_j$  = number of trains of the  $j^{th}$  class.

In this model, the section "I" of the line to be taken into consideration for the calculation is to be the highest one in terms of distance, and not of time, as it is usually the case. Through this formulation - i.e. with  $K$  equal to 1.2 relevant to three classes of speed - we have determined the carrying capacity value of 143 and 182 trains/day per direction respectively on the High and Low Valley sections. Besides taking into consideration different speed classes of the trains, this method allows translating the priority rules dictated to the circulation and quantifying the delays due to the carrying out of the priorities. It therefore results to be more complete in the attempt of modelling the circulation of the trains in the closest way to reality, utilising the largest part of the parameters involved, which can be described through mathematical equations.

The DELFINO and GALAVERNA method is useful to quantify the carrying capacity increment which can be achieved on mixed traffic lines thanks to the introduction of the moving block. Its starting point are the considerations made by MALASPINA and REITANI. More precisely, the formulas for the calculation are the same which have already been presented when dealing with REITANI and MALASPINA'S model in the case of fixed section automatic electrical block, whilst - in the case of moving block - the formulas have been modified by introducing the following expression for the minimum distancing or headway between a train of category  $i$  and the preceding one of category  $j$ :

$$D_{ij} = \frac{S_i^2}{2d_i} + S_j * t_r + L_{ij} + H \quad [1.21]$$

where:

$S_i$  = speed of the following train;

$S_j$  = speed of the preceding train;

$D_{ij}$  = specific delay;

$t_r$  = response time;

$L_i$  = length of the train;

$H$  = space safety margin;

$d_i$  = deceleration.

In this case, the carrying capacity obtained for the whole line - in the assumption of developing a mobile block system - of up to 335 trains/day per direction.

#### 4.4. Influence of the dissimilar speed level on the carrying capacity<sup>(5)</sup>

By itself, having dissimilar speeds in the operation of trains does not represent a critical element, but it generates inefficiencies.

<sup>(5)</sup> F. CROCCO, S. DE MARCO, D.W.E. MONGELLI, Ingegneria Ferroviaria, January 2010.

cienze nel caso in cui ci si trovi in condizioni di saturazione della linea. Per analizzare l'interazione tra più convogli che transitano a differenti velocità sulla stessa linea s'impiega una metodologia semplificata d'analisi della circolazione in linea, valida per stabilire la potenzialità in caso di blocco fisso, come funzione della separazione minima necessaria, cioè della lunghezza che può essere impegnata da un solo treno alla volta. Questo calcolo s'effettua ovviamente in riferimento alla sezione (tratta di linea posta tra due posti di movimento dotati di binari di precedenza) rilevante, quella cioè che determina il maggior intervallo di tempo tra due treni che si succedono. Definiamo ora alcune grandezze:

$d_{a-b}$  = distanza tra i posti di movimento A e B;

$v_i$  e  $v_j$  = velocità commerciale di percorrenza rispettivamente per il treno di categoria  $i$  e per quello di categoria  $j$ ;

$D_{sb}$  = separazione spaziale minima richiesta dal sistema di blocco tra il treno che precede  $i$  ed il treno che segue  $j$ ;

$t_i$  e  $t_j$  = tempi di percorrenza della tratta A-B per il treno  $i$  e per quello  $j$ ,

con  $v_i t_i = v_j t_j = d_{a-b}$ ;

$\tau_{ij}$  = minimo intervallo di tempo tra due successivi inoltri in linea di treni di tipo  $i$  e  $j$ , necessario affinché la marcia del treno  $i$  non influenzi quella del treno  $j$ .

Distinguiamo dunque due casi:

- 1)  $v_i > v_j$ : i due convogli si trovano alla minima distanza nell'istante in cui il treno  $i$  attraversa il posto di movimento A. Il treno  $j$  può allora attraversare la sezione A dopo un tempo pari a:

$$\frac{D_{sb}}{v_i}$$

- 2)  $v_i < v_j$ : il treno che precede è più lento di quello che segue e, per non influenzarsi, devono trovarsi alla minima distanza consentita in sicurezza dal sistema di blocco nell'istante in cui il convoglio  $j$  giunge alla località B. In quel momento la distanza temporale tra i due convogli è pari nuovamente a:

$$\frac{D_{sb}}{v_i}$$

Il ritardo con cui il treno  $j$  deve impegnare la tratta per non essere rallentato dal treno  $i$  è dato da:

$$t_i + \frac{D_{sb}}{v_i} - t_j = \frac{d_{a-b} + D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{a-b}}{v_j}$$

Si suppone che la probabilità che un treno di categoria  $i$  sia seguito da uno di categoria  $j$  sia pari a  $p_{ij}$ :

$$p_{ij} = p_i * p_j \quad [1.22]$$

ates inefficiencies in line saturation conditions. In order to analyse the interaction between several trains in transit at different speeds on the same line, a simplified analysis model of line circulation is utilised; such model is valid to establish the carrying capacity in case of fixed block, as a function of the minimum separation required, i.e. of the length which can be engaged by only one train a time. Obviously, the calculation is made as referred to the relevant section (line section set between two handling places provided with priority tracks), i.e. the one which determines the greatest time interval between two subsequent trains. We are now defining some variables:

$d_{a-b}$  = distance between the train-regulating signal cabin A and B;

$v_i$  and  $v_j$  = coverage commercial speed respectively for the train of category  $i$  and for the one of category  $j$ ;

$D_{sb}$  = minimum space separation required by the block system between the preceding train  $i$  and the following train  $j$ ;

$t_i$  and  $t_j$  = coverage time of section A-B for train  $i$  and for the  $j$  one,

with  $v_i t_i = v_j t_j = d_{a-b}$ ;

$\tau_{ij}$  = minimum time interval between two successive deliveries to the line of trains of types  $i$  and  $j$ , which is required so that the travel of train  $i$  does not affect the one of train  $j$ .

Two cases need to be distinguished, namely:

- 1)  $v_i > v_j$ : the two trains are at the minimum distance at the moment train  $i$  crossing train-regulating signal cabin A. Train  $j$  can then cross section A after a time equal to:

$$\frac{D_{sb}}{v_i}$$

- 2)  $v_i < v_j$ : the preceding train is slower than the following one and - in order not to influence each other - they are to be at the minimum distance allowed in safety conditions from the block system at the moment train  $j$  reaches location B. At that moment, the time distance between the two trains is again equal to:

$$\frac{D_{sb}}{v_i}$$

The delay by which train  $j$  is to engage the section in order not to be slowed down by train  $i$  is given by:

$$t_i + \frac{D_{sb}}{v_i} - t_j = \frac{d_{a-b} + D_{sb}}{v_i} - \frac{d_{a-b}}{v_j}$$

The probability that a train of category  $i$  is followed by one of category  $j$  is equal to  $p_{ij}$ :

$$p_{ij} = p_i * p_j \quad [1.22]$$

$p_i$  e  $p_j$  rappresentano rispettivamente la probabilità di transito dei convogli delle due categorie  $i$  e  $j$ , date dal rapporto tra il numero di convogli di una categoria ed il numero complessivo di convogli circolanti sulla linea e nel periodo considerato. Conseguentemente, si può ottenere  $T$  come:

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} * \tau_{ij} \quad [1.23]$$

dove  $n$  è il numero di categorie di convogli, quindi di velocità. La potenzialità oraria sarà dunque pari a:

$$P = \frac{1}{T} \quad [1.24]$$

Ne deriva però un valore puramente teorico, in quanto non considera un ritardo anche minimo e la sua conseguente propagazione. È possibile riferirsi, per il calcolo della potenzialità pratica, agli standard di regolarità indicati da GALATOLA, in riferimento al tempo di distanziamento minimo. Si assume cioè un margine di sicurezza che sia tale da evitare che il ritardo di un treno influisca sulla marcia dei successivi: praticamente questo si traduce nel considerare che tra un treno ed il seguente vi sia sempre una traccia libera. Attraverso i calcoli si perviene ad un valore di potenzialità pratica rispettivamente di 195 treni/giorno e 238 treni/giorno per la tratta d'Alta e Bassa Valle.

Simulando diverse composizioni di traffico sulla medesima tratta, attraverso questo modello è possibile osservare gli evidenti effetti positivi in grado di garantire un'organizzazione dell'orario che preveda l'introduzione di fasce orarie omotachiche. Questo risultato è particolarmente importante, specialmente in vista dell'analisi attraverso il software di simulazione.

È opportuno ricordare che, pur essendo la potenzialità un indicatore attribuito ad una linea ferroviaria, quindi legato alle caratteristiche dell'infrastruttura, essa dipende altresì fortemente dalle caratteristiche dei treni e dalla composizione del traffico, oltre che dal livello di regolarità ipotizzato o richiesto. Questa considerazione aiuta nella comprensione di una così alta variabilità nei risultati ottenuti.

## 5. Il simulatore Open Track

Si è passati quindi a simulare l'esercizio ferroviario sulla linea attraverso il software Open Track<sup>(6)</sup>, in modo da riuscire ad introdurre contemporaneamente la molteplicità dei parametri in gioco, soprattutto simulare il reale modello d'esercizio ferroviario, con la programmazione delle tracce orarie ed una successione reale delle diverse tipologie di treni, ciascuna caratterizzata da una ben defi-

<sup>(6)</sup> Programma di simulazione di reti ferroviarie sviluppato come parte del progetto di ricerca dallo "Swiss Federal Institute of Technology for Transport Planning and Systems".

$p_i$  and  $p_j$  represent respectively the probability of transit of trains of the two categories  $i$  and  $j$ , given by the ratio between the number of trains of a category and the overall number of trains which circulate on the line within the period of time under exam. Consequently,  $T$  can be obtained as:

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} * \tau_{ij} \quad [1.23]$$

where  $n$  is the number of trains and - therefore - of speeds. The hourly carrying capacity shall therefore be equal to:

$$P = \frac{1}{T} \quad [1.24]$$

The resulting values are however merely theoretical, since they do not consider any even minimum delay and its subsequent propagation. The practical carrying capacity can be obtained by referring to the regularity standards indicated by GALATOLA, which are related to the minimum distancing time. A safety margin is therefore taken as appropriate to prevent the delay of a train from affecting the travelling of the subsequent ones: in practice, this translates into considering that a free section is always available between a train and the following one. The calculations lead to a practical carrying capacity value of 195 trains/day and 238 trains/day respectively for the sections of High and Low Valley.

By simulating the different traffic compositions along the same section, the model enables to observe the obvious positive effect which can be ensured by arranging the timetable so that it includes the introduction of homogeneous speed slots. This result is particularly significant, mainly in view of the analysis through the simulation software.

It is worth reminding that - even though the carrying capacity is an indicator allocated to a railway line, and therefore linked to the features of the infrastructure, it also largely depends on the features of the trains as well as on the composition of the traffic, besides the level of regularity which is assumed or requested. This consideration helps in understanding such a high variability in the results obtained.

## 5. The Open Track simulator

A simulation of the railway service on the line in exam with the support of the Open Track<sup>(6)</sup> simulator has been thereafter run, in order to be able to introduce simultaneously the multiplicity of the parameters at stake, and - mainly - to try to simulate the real model of railway ser-

<sup>(6)</sup> A program for the simulation of railway networks developed as part of the research project of the "Swiss Federal Institute of Technology for Transport Planning and Systems".

nita velocità di percorrenza. I dati di input gestiti da Open Track® si possono schematizzare in tre grandi categorie: materiale rotabile (pesi, prestazioni e composizioni), infrastruttura (configurazione plano-altimetrica e sistema di segnalamento) e *timetable* (definizione degli orari). Open Track (di seguito O.T.) usa un processo di simulazione misto continuo/discreto che calcola sia la soluzione numerica (continua) delle equazioni differenziali del moto per i treni, sia i processi discreti dei sistemi di segnalamento e di distribuzione dei ritardi. L'equazione differenziale del moto calcola il moto d'avanzamento del treno basato sull'accelerazione massima possibile per passo temporale: il grado d'accelerazione è determinato usando le caratteristiche prestazionali del treno e il layout dei binari, come ad esempio lo sforzo massimo di trazione, la resistenza all'avanzamento del treno, la pendenza e il raggio di curvatura della linea e le velocità massime per arco. La velocità del treno è ottenuta usando l'integrazione, mentre la distanza percorsa attraverso una doppia integrazione. I movimenti del treno sono controllati anche attraverso gli impianti di segnalamento presenti lungo la linea, basandosi sul presupposto fondamentale della circolazione ferroviaria, secondo il quale ogni sezione di blocco non può essere occupata da più di un treno contemporaneamente, al fine di garantire una marcia in completa sicurezza.

Nel processo di simulazione si sviluppa una gran varietà di dati in uscita (output). O.T. permette all'utente di presentare questi dati in molti formati diversi, tra cui diagrammi di vario tipo e soprattutto orari grafici. L'obiettivo che ci si prefigge impiegando il simulatore O.T. è quello di saturare la potenzialità della linea, sulla base del modello d'esercizio definito dall'utente. Durante la simulazione ogni treno alimenta un tachigrafo virtuale (output database), che immagazzina dati come accelerazione, velocità e distanza coperta. In questo modo possono essere effettuate diverse valutazioni dopo che la simulazione è stata completata.

Dopo aver riprodotto sul simulatore il layout della linea in esame, tra Bivio Pronda (Torino, I) e la stazione di Modane (F), in termini di andamento plano altimetrico e sistema di segnalamento, ed aver riprodotto le caratteristiche del materiale rotabile, si è passati a creare differenti scenari di modelli d'esercizio per poter effettuare la simulazione.

#### *Gli scenari<sup>(7)</sup>*

Considerando un primo scenario formato da 15 treni regionali Torino-Bardonecchia al giorno, 13 regionali Torino-Susa, 9 treni passeggeri di lunga percorrenza per Parigi ed ipotizzando di saturare la capacità residua esclusiva-

<sup>(7)</sup> Con riferimento ad un giorno ferialo tipo, secondo i dati forniti da RFI sulla linea storica, si è fatto riferimento alla circolazione effettiva di 4 coppie di treni/giorno per quanto riguarda il trasporto viaggiatori lunga percorrenza, 25 coppie di treni passeggeri regionali sull'intera tratta nazionale e circa 45 treni merci, per un totale di circa 74 coppie di treni/giorno.

vice, with the programming of the slots and a realistic succession of the different typologies of trains, each of them characterized by a well-defined coverage speed. The input data managed by Open Track® can be summarised into three large categories, namely: rolling stock (weight, performance and composition), infrastructure (track layout configuration and signalling system) and timetable. Open Track (hereinafter O.T.) uses a continuous/discrete mixed simulation process which calculates both the (continuous) numerical solution of the differential equations of motion for the trains and the discrete processes of the signalling and delay distribution systems. The differential equation of motion calculates the forward motion of the train based upon the maximum acceleration allowed per time unit: the degree of acceleration is determined using the performance features of the train and the layout of the track, such as - for instance - the maximum traction effort, the resistance to the forward motion of the train, the slope, the curve radius of the line and the maximum speed per arch. The speed of the train is obtained using integration, whilst the distance covered is achieved through double integration. The movements of the train are controlled also through the signalling systems present along the line, on the basis of the essential assumption of railway operation, according to which no block section can be occupied by more than one train a time, in order to ensure full safety conditions.

The simulation process develops a large variety of output data. O.T. enables the user to present these data in several different formats, amongst which diagrams of various types and - mainly - graphic time diagrams. The O.T. simulator has been used with the aim of saturating the carrying capacity of the line, on the basis of the service model defined by the user. During the simulation, every train supplies a virtual tachograph (output database), which stores data such as acceleration, speed and distance covered. This allows performing several evaluations once the simulation is completed.

After reproducing the layout of the line in exam, between Bivio Pronda (Turin, I) and the station of Modane (F), in terms of horizontal and vertical layout as well as signalling system and the features of the rolling stock on the software, different scenarios of service models have been generated in order to carry out the simulation.

#### *The scenarios<sup>(7)</sup>*

Considering a first scenario, consisting of 15 Turin-Bardonecchia local trains per day, 13 Turin-Susa local trains per day, 9 mainline passenger trains to Paris, and assuming to saturate the residual daily capacity with freight trains, we

<sup>(7)</sup> With reference to a typical workday, in compliance with the data supplied by RFI on the historical line, we have referred to the actual circulation of 4 pairs of trains/day as related to mainline passenger transport, 25 pairs of local passenger trains along the whole Italian section and approximately 45 goods trains, for a total of approximately 74 pairs of trains/day.

mente con treni merci si è ottenuto un totale di 83 treni merci per direzione, con un margine quindi di circa 35-40 tracce merci al giorno per senso di marcia ancora disponibili. La potenzialità massima della linea con questo modello d'esercizio risulta essere complessivamente di 107 treni/giorno per senso di marcia per la tratta di Alta Valle e 120 treni/giorno per quella di Bassa Valle (tabella 1). Tra i modelli analizzati nel capitolo 4 quello che maggiormente si è avvicinato numericamente a questo risultato è quello UIC, pur non essendo il più completo, tra quelli teorici, nel contemplare la totalità dei parametri influenti nel calcolo della potenzialità, pur ribadendo la rilevanza dei livelli di perturbazione definiti.

In un secondo scenario si è invece considerato di ricreare il modello d'esercizio previsto per l'orizzonte temporale del 2018-2020 dagli accordi stabiliti tra gestore ferroviario e l'Agenzia per la Mobilità Metropolitana di Torino (MTM), che richiedono di garantire un servizio passeggeri regionale che preveda:

- 40 coppie di treni/giorno da Torino a Bardonecchia, con fermate ad Avigliana, Bussoleno e poi in tutte le rimanenti stazioni;
- 40 da Torino a Susa, con fermate ad Avigliana, poi in tutte le rimanenti stazioni;
- 80 da Torino ad Avigliana con fermate in tutte le stazioni (Servizio Ferroviario Metropolitan).

Effettuando l'esercizio passeggeri in una finestra temporale ipotizzata di 16 ore giornaliere ed aggiungendo 10 coppie di treni/giorno di lunga percorrenza, rimarrebbero disponibili solo 37 tracce merci al giorno per direzione, che sarebbero completamente saturate dai convogli merci attualmente in circolazione. Complessivamente si avrebbe quindi una capacità massima della tratta metropolitana (Torino-Avigliana) di 127 treni/giorno, mentre si avrebbero solo 87 treni/giorno sulla tratta di Bassa Valle (Torino-Susa) e 67 treni/giorno su quella di Alta Valle (tabella 2).

Va osservato che questi ultimi due valori, di per sé molto bassi, si spiegano considerando che la tratta metropolitana, per garantire un servizio passeggeri a così alta frequenza (mediamente un treno ogni 24' dalle ore 6 alle 22 che effettui servizio da Torino ad Avigliana, cui se ne devono aggiungere altrettanti che transitano senza fermare per effettuare servizio da Avigliana a Bardonecchia), si saturerebbe velocemente, diventando quindi una sorta di "collo di bottiglia" e non permettendo alla restante tratta di linea di sfruttare appieno la propria potenzialità.

TABELLA 1 - TABLE 1

SCENARIO 1 - NUMERO DI TRENI/GIORNO (LINEA STORICA)  
SCENARIO 1 - NUMBER OF TRAINS/DAY (HISTORICAL LINE)

Scenario 1	Freight trains/treni merci	Regional trains/treni regionali	Long-range pass. trains/treni lunga percorrenza	Total/Totale
High Valley/Alta Valle	83	15	9	107
Low Valley/Bassa Valle	83	13+15	9	120
Metro service/Metropolitana	83	13+15	9	120

have obtained a total of 83 freight trains per direction, therefore with a margin of 35 to 40 freight trains still available per day per travel direction. The maximum carrying capacity of the line with this model of service results to be a total of 107 trains/day per travel direction for the High Valley section and of 120 trains/day

for the Low Valley one (table 1). The UIC model was the numerically closest one to this result amongst those we have analysed in the chapter 4, even though this method somewhat fails - as compared to other the theoretical ones - to include all the parameters which affect the calculation of the carrying capacity, though reminding the relevance of perturbation levels.

In a second scenario, on the other hand, we have recreated the service model which is planned for the 2018 to 2020 timeframe as a result of the agreements established between the railways provider and the Agency for Metropolitan Mobility of Turin (MTM), which should ensure a local passenger service including:

- 40 pairs of trains/day between Turin and Bardonecchia, with stops in Avigliana, Bussoleno and then in all the remaining stations;
- 40 of them from Turin to Susa, with stops in Avigliana, and then in all the remaining stations;
- 80 of them from Turin to Avigliana with stops in all the stations (Metropolitan Railways Service).

With the passenger service developed in a 16 hours/day time window and adding 10 pairs of mainline trains/day, only 37 freight trains per direction per day would remain available, i.e. the line would be fully saturated by the current traffic of freight trains. As a whole, we would therefore have a maximum capacity in the metropolitan section (i.e. Turin - Avigliana) of 127 trains/day, whilst we would have only 87 trains/day on the Low Valley section (Turin- Susa) and 67 trains/day on the High Valley one (table 2).

It is worth observing that these last two values, which are very low *per se*, are justified if we consider that the metropolitan section, in order to ensure a passenger service of such high frequency (an average of 1 train every 24 minutes from 6 a.m. to 10 p.m. from Turin to Avigliana, which are to be added to the same number of them transiting with no stops to perform the service from Avigliana to Bardonecchia) would quickly saturate and become therefore a sort of "bottleneck", not allowing the remaining section of the line to be utilized at its full carrying capacity.

Infine è stato considerato uno scenario che prevedesse esclusivamente la circolazione di treni merci e passeggeri regionali, escludendo quindi totalmente le corse per il servizio internazionale di lunga percorrenza. Tale modello di esercizio ha portato a verificare la possibilità d'inserire 29 treni merci ulteriori rispetto ai 37 già presenti, mantenendo il medesimo servizio passeggeri locale del secondo scenario. Complessivamente si avrebbe una potenzialità di circolazione di 146 treni/giorno sulla tratta metropolitana, 106 treni/giorno sulla tratta di Bassa Valle e 86 treni/giorno sulla tratta di Alta Valle, rimanendo valide, relativamente a questi due ultimi valori, le considerazioni sviluppate precedentemente (tabella 3).

Tutti gli scenari descritti prevedono, come da richieste RFI, la garanzia d'una finestra temporale pari a 3 ore per le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria, richieste dalle particolarità orografiche della linea.

Nel seguito si riassumono brevemente i risultati ottenuti effettuando la simulazione con i tre scenari descritti, suddividendoli per tratta e per tipologia di convoglio. Il modello di circolazione dei tre scenari precedentemente descritti prevedrebbe di formare batterie omotachiche di convogli merci distanziati tra loro, nella zona in salita tra Bussoleno e il tunnel del Frejus, mediamente di 13 km. Questa condizione richiederebbe quindi una disponibilità di potenza di circa 1000 kW/km nelle sezioni a maggiore pendenza, contro una disponibilità attuale di 540 kW/km<sup>(8)</sup>.

<sup>(8)</sup> Considerando la situazione attuale di una sottostazione ogni 20 km, con possibilità di fornire circa 10,8 MW l'una. Il potenziamento delle sottostazioni elettriche richiederebbe un intervento non particolarmente oneroso dal punto di vista economico, se paragonato alla realizzazione di una nuova infrastruttura, ma con problematiche connesse all'inserimento ambientale, specialmente se il contesto d'inserimento è un ambiente fortemente urbanizzato.

TABELLA 2 - TABLE 2

SCENARIO 2 - NUMERO DI TRENI/GIORNO (LINEA STORICA)  
SCENARIO 2 - NUMBER OF TRAINS/DAY (HISTORICAL LINE)

Scenario 2	Freight trains/treni merci	Regional trains/treni regionali	Long-range trains/treni lunga percorrenza	Total/Totale
High Valley/Alta Valle	37	20	10	67
Low Valley/Bassa Valle	37	20+20	10	87
Metro service/Metropolitana	37	20+20+40	10	127

TABELLA 3 - TABLE 3

SCENARIO 3 - NUMERO DI TRENI/GIORNO (LINEA STORICA)  
SCENARIO 3 - NUMBER OF TRAINS/DAY (HISTORICAL LINE)

trains per day per direction - treni/giorno per direzione				
Scenario 3	Freight trains/treni merci	Regional trains/treni regionali	Long-range trains/treni lunga percorrenza	Total/Totale
High Valley/Alta Valle	66	20	-	86
Low Valley/Bassa Valle	66	20+20	-	106
Metro service/Metropolitana	66	20+20+40	-	146

Finally, we have considered a scenario which would include the sole circulation of freight trains and local passenger ones, thus excluding completely the mainline international service. This model of service has led to ascertain the opportunity to introduce further 29 freight trains in addition to the 37 ones which were previously considered, while keeping the same local passenger service of the second scenario. As a whole, we would have a daily carrying capacity of 146 trains/day on the metropolitan section, 106 trains/day on the Low Valley sections and 86 trains/day on the High Valley, and these last two values would allow safeguarding the considerations we have developed above (table 3). All the scenarios

we have described include, as requested by RFI, the guarantee of a three-hour time window for routine and extraordinary maintenance as called for by the orographic features of the line.

We have shortly summarised hereunder the results achieved by running the simulation with the three aforementioned scenarios, dividing them by section and type of train. The circulation model of the three aforementioned scenarios would involve the establishment of set of homogeneous speed goods trains at an approx.13 km distancing to one another in the uphill area between Bussoleno and the tunnel of Frejus. These conditions would therefore call for a power availability of approx. 1000 kW/km in the steepest slope sections, against a current availability of 540 kW/km<sup>(8)</sup>.

<sup>(8)</sup> In the light of the current conditions of one sub-station every 20 km, with potential to supply approx. 10.8 MW to each station. The enhancement of the electrical sub-stations would call for not such an economically burdensome action, if compared to the implementation of a new infrastructure, but with issues related to their introduction into the environment, mainly if the context they should be introduced into is strongly urbanised.

In tabella 4 si riporta un grafico riassuntivo dei valori ottenuti applicando i modelli esposti.

Un'ipotesi da valutare potrebbe essere quella d'impiegare treni merci a potenza distribuita lungo gli assi dell'intero convoglio. I principali vantaggi consisterebbero essenzialmente in un miglioramento delle prestazioni sia in fase d'accelerazione sia in quella di frenatura. I primi infatti deriverebbero da un incremento del peso aderente a parità di massa complessiva, che garantirebbe la possibilità d'aumentare lo sforzo massimo che può essere trasmesso alle ruote senza slittamento delle stesse, oltre che di ridurre conseguentemente lo sforzo di trazione al ganccio: tutto ciò si tradurrebbe nella possibilità di superare anche le pendenze più critiche a velocità superiori e con migliori prestazioni in fase di spunto. La possibilità d'una frenatura senza ritardo procedendo lungo il convoglio e senza più l'inconveniente della necessità d'un tempo di ricarica dell'impianto dopo una frenata potrebbe permettere invece velocità di percorrenza più elevate nelle tratte in discesa. Valutando queste possibilità con il simulatore si è pervenuti ad un incremento di potenzialità quantificabile, in prima approssimazione, in 15 treni/merci per

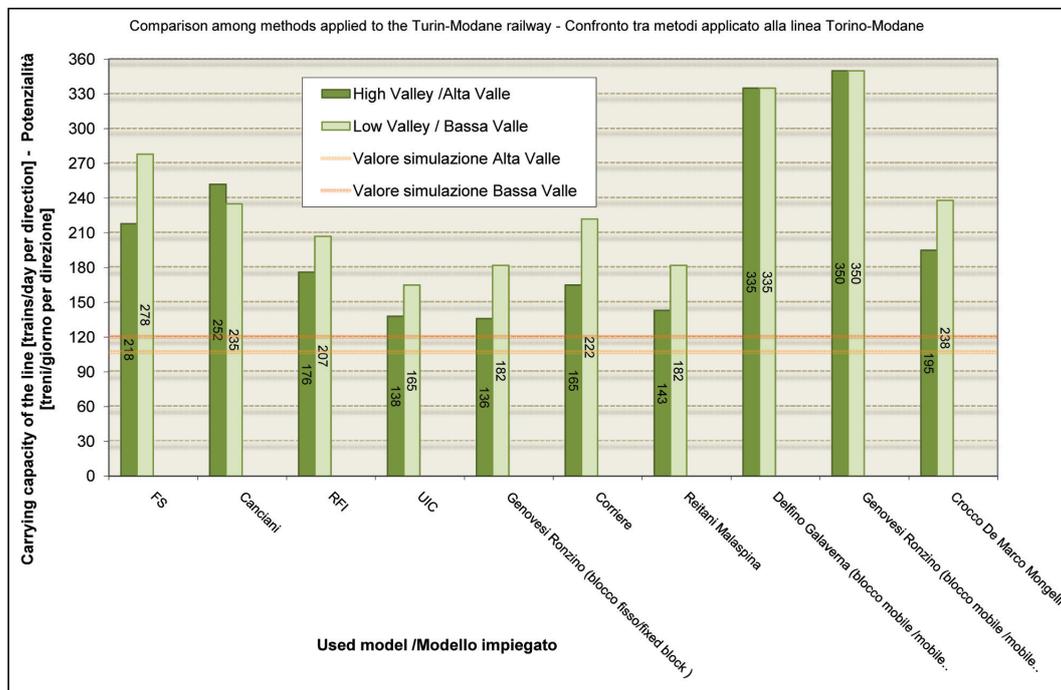
Table 4 reports as summary diagram of the values obtained by applying the aforementioned models.

An option to be evaluated would be the utilisation of freight trains with *electrical motors applied to the wagons* (EMU freight sets).

The main advantages would actually lay in improved performance during both acceleration and braking. The former would actually derive from an increase of the adhering weight at the same overall mass, which would allow increasing the maximum effort transmitted to the wheels without generating any sliding of the wheels themselves, besides reducing consequently the traction effort to the hook: all this would also mean that the most critical slopes could be overcome at faster speed and with better performance at breakaway. On the other hand, braking without delay throughout the train and with no longer the inconvenience of requiring a re-pressuring time of the system after braking would allow for higher coverage speed in the downhill sections. Evaluating these opportunities through the simulator, we have reached a carrying capacity increment which can be quantified - as a first approximation - in 15 freight trains

TABELLA 4 - TABLE 4

CONFRONTO TRA I MODELLI PER IL CALCOLO DELLA POTENZIALITÀ DELLA LINEA TORINO-MODANE E RISULTATI DEL SIMULATORE OPEN TRACK - COMPARISON AMONG MODELS TO CALCULATE THE CARRYING CAPACITY OF THE TURIN-MODANE LINE AND RESULTS OF THE OPEN TRACK SIMULATOR



direzione al giorno. L'impiego di questa tipologia di materiale rotabile non contribuirebbe comunque a risolvere, anzi, il problema principale dell'insufficiente *potenza delle sottostazioni elettriche*.

In un secondo momento si è utilizzato il programma simulando l'esercizio sulla medesima linea, ma con l'ipotesi d'implementarla con il sistema di segnalamento/distanziamento ETCS/ERTMS di livello 2<sup>(9)</sup>, oggi già operativo sulla rete ferroviaria in Italia sulle direttrici principali ad Alta Velocità. Sono stati ricreati i medesimi scenari già sviluppati ed i risultati ottenuti possono così sintetizzarsi: con il primo scenario precedentemente presentato s'osserva l'incremento della potenzialità che passa, per quanto riguarda l'Alta Valle da 107 a 152 treni/giorno (+42%), mentre relativamente alla tratta di Bassa Valle i 120 treni/giorno diventerebbero 165 (+37%). Il secondo scenario mostra invece un incremento più variabile tra le varie tratte, infatti la potenzialità della tratta metropolitana aumenterebbe da 127 a 151 treni/giorno (+19%), quella della tratta di Bassa Valle passerebbe da 87 a 111 treni/giorno (+27%) mentre nella tratta di Alta Valle la capacità di 67 treni/giorno crescerebbe a 91 treni/giorno (+36%). Relativamente al terzo scenario, la tratta metropolitana, con l'implementazione del sistema ETCS di livello 2 vedrebbe aumentare la potenzialità da 146 a 170 treni/giorno (+16%), quella di Bassa Valle da 106 a 130 treni/giorno (+22%) e quella di Alta Valle da 86 a 110 (+28%). Diversamente dai casi precedenti, questi scenari prevedono batterie omotachiche di convogli merci distanziati, sempre nella tratta in salita tra Bussoleno ed il tunnel del Frejus, di circa 6,5 km contro i 13 km della situazione attuale, con le medesime conseguenze già esposte in termini di potenze disponibili sull'attuale impianto elettrico; in questo caso sarebbero quasi richiesti indicativamente 2000 kW/km di potenza elettrica (tabelle 5, 6 e 7).

## 6. Gli scenari energetici

Si è ritenuto opportuno, parallelamente al calcolo della potenzialità della linea storica, effettuare anche un confronto dei consumi energetici, a parità di materiale rotabile, sui due diversi percorsi, quello rappresentato dalla linea storica e quello del nuovo tracciato ipotizzato. I calcoli, sviluppati tramite l'ausilio d'un foglio elettronico (Microsoft Excel<sup>®</sup>), sono stati condotti considerando l'impiego di un convoglio ETR 500 ed un ETR 600 per il trasporto passeggeri, mentre per quanto riguarda il trasporto merci i calcoli sono stati condotti impiegando un convoglio composto da tre locomotori E. 402 B e 20 carri merci, per un totale di 1600 t rimorchiate, ed uno con 800 t rimorchiate,

<sup>(9)</sup> Attrezzare una linea con sistema di segnalamento ETCS 2 comporta ovviamente la necessità di dotare i veicoli che la percorrono di un adeguato sistema di bordo in grado d'interfacciarsi con il sistema di segnalamento stesso.

per direzione per day. In any case, the use of this typology of rolling stock would not settle the main issue, but rather the contrary, i.e. the insufficient *power of the electrical substations*.

At a second stage, the program has been used to simulate the service on the same line, but with the assumption of implementing it with the level 2 ETCS/ERTMS signalling system<sup>(9)</sup>, which is already operational on the Italian railway network on the main High Speed lines. The same scenarios as before have been recreated, and the results obtained can be summarised as follows: the first scenario, which was presented above - shows an increment in the carrying capacity - as far as the High Valley is concerned - from 107 to 152 trains/day (+42%), whilst - in the Low Valley - the 120 trains/day would become 165 (+37%). On the other hand, the second scenario shows a more variable increment in the different sections: the carrying capacity of the metropolitan area would increase from 127 to 151 trains/day (+19%), the one of the Low Valley would move from 87 to 111 trains/day (+27%) whilst, in the High Valley, the capacity of 67 trains/day would increase to 91 trains/day (+36%). As related to the third scenario, i.e. the metropolitan section, the implementation of the ETCS level 2 signalling system would increase the carrying capacity from 146 to 170 trains/day (+16%), the Low Valley one from 106 to 130 trains/day (+22%) and the one of the High Valley from 86 to 110 (+28%). Unlike the previous cases, these scenarios include homogeneous speed sets of freight trains at a distancing - again in the uphill section between Bussoleno and the tunnel of Frejus - of approximately 6.5 km against the 13 km of the current status, with the same conditions which have been detailed in terms of power available on the current electrical system; in this case, the indicative electrical power requirements would be 2000 kW/km (tables 5, 6 and 7).

## 6. The energy scenarios

Parallel to the calculation of the carrying capacity on the historical line, it has been considered important to carry out also a comparison of the energy consumption, by the same rolling stock, on the two different pathways, i.e. the one which is represented by the historical line and the one of the new, assumed track. The calculations, which have been developed with the support of a spreadsheet (Microsoft Excel<sup>®</sup>), have taken into consideration the use of an ETR 500 train and of an ETR 600 for passenger transport, whilst - as far as goods transport is concerned - the calculations have been made using an E. 402 B locomotives and 20 freight wagons, for a total of 1,600

<sup>(9)</sup> Obviously, equipping a line with an ETCS 2 signaling system would entail the need of providing the vehicles which cover it with an appropriate on-board system which can interface to the signaling system itself.

e 2 locomotori E.402 B. I consumi energetici ottenuti si riferiscono alla percorrenza d'un singolo convoglio alla velocità consentita dalle linee e dalle caratteristiche prestazionali del materiale rotabile.

Per quanto riguarda la linea storica i consumi sono dati dalla percorrenza della distanza compresa tra il Bivio Pronda e la stazione di Modane, per un totale di 101 km percorsi sul binario pari, di cui gli ultimi 11 km ca. non influenti ai fini del calcolo, presentando una resistenza complessiva negativa, grazie alla presenza di livellette con pendenza negativa. Sulla base dell'andamento del nuovo tracciato previsto in uno studio preliminare si è proceduto con il calcolo dei consumi necessari a percorrere la linea tra il nuovo scalo merci di Orbassano e la stazione di S. Jean de Maurienne, corrispondente ad una distanza pari a 106 km, di cui gli ultimi 30 con pendenze delle livellette negative procedendo verso Ovest, ma con resistenza complessivamente positiva per velocità superiori a 180 km/h. Occorre precisare che, proseguendo oltre Modane in direzione Ovest lungo la linea storica devono essere percorsi ancora circa 30 km per giungere a S. Jean de Maurienne, con ovvia incidenza in termini di tempo di percorrenza. Il confronto energetico si basa sul calcolo dei consumi effettivi sulla linea storica (fig. 1) in base alle velocità puntuali effettivamente sostenibili, mentre sulla ipotizzata linea nuova (fig. 2) si sono supposti diversi scenari di velocità di percorrenza.

6.1. Il treno merci

Nel calcolo è stato adottato un coefficiente di aderenza  $f_a = 0,2$  per la determinazione del massimo sforzo di trazione trasmissibile alle ruote, mentre per il calcolo della resistenza ordinaria si è impiegata, non avendo a disposizione valori sperimentali, la formula binomia  $r = a + b \cdot V^2$  con valori di  $a$  e  $b$  pari rispettivamente a 2,5 e  $3 \cdot 10^{-4}$ , e  $V$  in [km/h]; la resistenza dovuta alle curve si è determinata attraverso la nota formula di Von Röckl. In entrambi i casi i valori ottenuti in [N/kN] sono poi moltiplicati per la massa complessiva del convoglio. Noto lo sforzo di trazione mediante la

towed tons, and one with 800 towed tons, and 2 E.402 B locomotives. The energy consumption value obtained refers to the distance covered by only one train at the speed which is allowed by both the lines and the performance features of the rolling stock.

As far as the historical line is concerned, the consumption is given by the coverage of the distance included between Bivio Pronda and the station of Modane, for a total of a 101 km covered on the even track, whose last 11 km approx are irrelevant to the calculation purposes, show an overall negative resistance, thanks to the presence of leveling curves with negative incline. On the basis of the trend of a new track, which has been developed in a preliminary study, we have calculated the consumption required to cover the line between the new freight terminal of Orbassano and the station of S. Jean de Maurienne, i.e. a distance of

TABELLA 5 - TABLE 5

SCENARIO 1 - NUMERO DI TRENI/GIORNO (LINEA STORICA CON ETCS 2)  
SCENARIO 1 - NUMBER OF TRAINS/DAY (HISTORICAL LINE WITH ETCS 2)

Scenario 1	Freight trains/treni merci	Regional trains/treni regionali	Long-range trains/treni lunga percorrenza	Total/Totale	Increase given to ETCS lev. 2/ Incremento dato da ETCS livello 2
High Valley/ Alta Valle	128	15	9	152	+42%
Low Valley/ Bassa Valle	128	13+15	9	165	+37%
Metro service/ Metropolitana	128	13+15	9	165	+37%

TABELLA 6 - TABLE 6

SCENARIO 2 - NUMERO DI TRENI/GIORNO (LINEA STORICA CON ETCS 2)  
SCENARIO 2 - NUMBER OF TRAINS/DAY (HISTORICAL LINE WITH ETCS 2)

Scenario 2	trains per day per direction - treni/giorno per direzione				Total/Totale	Increase given to ETCS lev. 2/ Incremento dato da ETCS livello 2
	Freight trains/treni merci	Regional trains/treni regionali	Long-range trains/treni lunga percorrenza			
High Valley/ Alta Valle	61	20	10		91	+36%
Low Valley/ Bassa Valle	61	20+20	10		111	+27%
Metro service/ Metropolitana	61	20+20+40	10		151	+19%

TABELLA 7 - TABLE 7

SCENARIO 3 - NUMERO DI TRENI/GIORNO (LINEA STORICA CON ETCS 2)  
 SCENARIO 3 - NUMBER OF TRAINS/DAY (HISTORICAL LINE WITH ETCS 2)

Scenario 3	Freight trains/treni merci	Regional trains/treni regionali	Long-range trains/treni lunga percorrenza	Total/Totale	Increase given to ETCS lev. 2/ Incremento dato da ETCS livello 2
High Valley/ Alta Valle	90	20	-	110	+28%
Low Valley/ Bassa Valle	90	20+20	-	130	+22%
Metro service/ Metropolitana	90	20+20+40	-	170	+16%

106 km, the last 30 of which show negative vertical curves Westwards, but an overall positive resistance for speeds higher than 180 km/h. We need to underline that - continuing Westwards past Modane along the historical line - some additional 30 km need to be covered to reach S. Jean de Maurienne, and this is obviously affecting the coverage time. The energy comparison is based upon the calculation of the actual consumption on the historical line (fig. 1) on the basis of the punctual speeds which are actually sustainable, whilst different scenarios of coverage speed have been assumed on the hypothetical new line (Figure 2).

caratteristica meccanica, tenuto conto della zona dell'aderenza ( $T_{max} = f_a * W_{aderente}$ ), l'equazione del moto utilizzata è la nota:

$$T - R = \frac{W \alpha}{g} \frac{dv}{dt} \quad [1.25]$$

6.1. The freight train

In the calculation, we have adopted an adhesion coefficient  $f_a = 0.2$  to determine the maximum tractive effort which can be transmitted to the wheels while - to calcu-

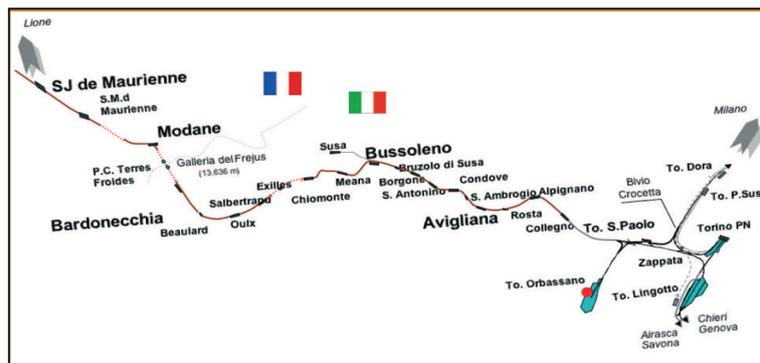
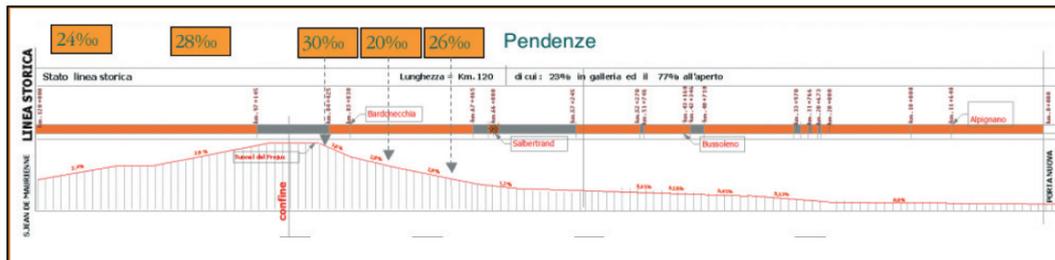


Fig. 1 - Profilo altimetrico e corografia della linea storica tra S. Jean de Maurienne e Torino. Altimetry profile and chorology of the historical line between S. Jean de Maurienne and Turin.

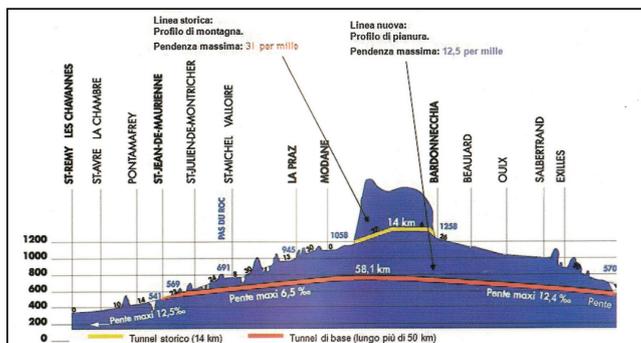


Fig. 2 - Profilo altimetrico della nuova linea ipotizzata nella tratta di attraversamento delle Alpi. *Altimetry profile of the new hypothetical line in the Alps crossing section.*

late the ordinary resistance, since we had no experimental values available - we have used the binomial formula  $r = a + b \cdot V^2$  with values of  $a$  and  $b$  respectively equal to  $2.5$  and  $3 \cdot 10^{-4}$ , and  $V$  in [km/h]; the resistance due to the curves has been determined through the familiar formula of Von Röckl. In both cases, the values obtained in [N/kN] have then been multiplied by the overall mass of the train. The tractive effort being known through the *mechanical characteristic*, taking into account the area of adhesion ( $T_{max} = f_a \cdot W_{aderente}$ ), the motion equation used is the well-known:

$$T - R = \frac{W \alpha}{g} \frac{dv}{dt} \quad [1.25]$$

dove:

T = forza di trazione;

R = somma delle resistenze che si oppongono al moto del veicolo;

W/g = massa del veicolo;

dv/dt = accelerazione del veicolo;

$\alpha$  = coefficiente maggiorativo per le masse rotanti.

Attraverso l'integrazione tabellare, per differenze finite di velocità, si determinano, istante per istante, tutti i parametri del moto quali spazio percorso, tempo impiegato, velocità ed accelerazioni, oltre a potenza impegnata e consumi. Sviluppando il calcolo per tutta l'estensione della linea, noto l'andamento piano-altimetrico - quindi le resistenze - e le limitazioni di velocità - quindi gli sforzi di trazione necessari - è possibile ottenere il tempo di percorrenza della tratta in questione ed i consumi complessivi. Il consumo energetico sulla linea storica è risultato pari rispettivamente a 28.518 MJ (1600 t rimorciate) e 15.197 MJ (800 t rimorciate), ad una velocità media di percorrenza pari a 90 km/h<sup>(10)</sup>. Il risparmio ottenibile dalla percorrenza della nuova linea è approssimativamente quantificabile in un valore del 15% circa (3.992 - 2.327 MJ nei due casi) per una velocità programmata di 140 km/h e del 40% circa (10.340 - 6.108 MJ) nel caso di velocità di 100 km/h. Da non trascurare inoltre che il convoglio più pesante potrebbe percorrere la nuova linea, per velocità inferiori a 120 km/h, in doppia trazione (due locomotori) invece della tripla necessaria per superare le livellette più impegnative della linea storica; il convoglio con 800 t rimorciate invece potrebbe essere trainato da una sola locomotiva (sempre a velocità inferiori a 120 km/h) invece delle due necessarie sulla linea storica.

where:

T = tractive effort;

R = sum of the resistances which oppose to the motion of the vehicle;

W/g = mass of the vehicle;

dv/dt = acceleration of the vehicle;

$\alpha$  = increase coefficient for the rotating masses.

All the motion parameters such as space covered, time utilized, speeds and accelerations - besides power utilized and consumption - are determined instant by instant through the tabular integration by finite speed differences. By developing the calculation on the whole extension of the line, knowing the track layout - and therefore the resistances - as well as the speed limitations - and therefore the traction efforts required - we can obtain the coverage time of the section in exam as well as the overall consumption. The energy consumption on the historical line has resulted to be equal to 28,518 MJ (1600 tons towed) and 15,197 MJ (800 tons towed), at an average coverage speed of 90 km/h<sup>(10)</sup>. The savings which can be obtained from the coverage of the new line can be quantified in a value of approx. 15% (i.e. 3,992 - 2,327 MJ in either case) for a programmed speed of 140 km/h and of approx. 40% (10,340 - 6,108 MJ) in case of a speed of 100 km/h. Moreover, it must not be overlooked that the heaviest trains might cover the new line, for speeds lower than 120 km/h, in double traction (i.e. two locomotives) instead of the triple one which is required to overcome the most demanding vertical curves of the historical line; on the other hand, the train with 800 hauled tons could be towed by only one locomotives (always at a lower speed than 120 km/h) instead of the two ones which are required on the historical line.

<sup>(10)</sup> Velocità ottenuta ipotizzando l'impiego di materiale rotabile con velocità massima ammessa pari a 100 km/h.

<sup>(10)</sup> Speed obtained assuming the use of rolling stock of maximum speed allowed 100 km/h.

6.2. Treno passeggeri ad Alta Velocità

Analogamente a quanto svolto precedentemente si è adottato un coefficiente di aderenza  $f_a = 0,2$  per la determinazione del massimo sforzo di trazione trasmissibile alle ruote, mentre per il calcolo della resistenza ordinaria sono stati impiegati i valori sperimentali della resistenza ordinaria in piano, dedotti dalla marcia in esercizio, sia dell'ETR 500 (fig. 3) che dell'ETR 600, mentre la resistenza dovuta alle curve è stata determinata, in analogia al caso precedente, mediante Von Röckl.

Integrando l'equazione del moto [1.25], analogamente al caso precedente, si sono ottenuti i risultati illustrati in fig. 4.

Il consumo energetico sulla nuova linea, con velocità programmata di 220 km/h risulta pari, per l'ETR 500 a 10.220 MJ, superiore del 4% ai 9.627 MJ consumati dallo stesso convoglio sulla linea storica ad una velocità media di percorrenza pari a 110 km/h (linea arancio), mentre sarebbe pressoché identico nel caso dell'ETR 600. Va però osservato come, con lo stesso dispendio in termini energetici, sulla nuova linea sarebbe ipotizzabile per il trasporto passeggeri garantire un tempo di percorrenza quasi dimezzato.

Se si effettua infine un ulteriore confronto con il trasporto aereo, si evidenzia come, per coprire la distanza da Torino a Parigi un ETR 500 impiegherebbe su una linea interamente ad Alta Velocità circa 84.000 MJ, mentre un aereo per percorrere la distanza che separa le medesime località consuma circa 300.000 MJ<sup>(11)</sup>. La capienza di un aereo di

6.2. High-speed passenger train

As in the previous exercise, we have adopted an adhesion coefficient  $f_a = 0.2$  to determine the maximum tractive effort which can be transmitted to the wheels, whilst - for the calculation of ordinary resistance - we have adopted the experimental values of ordinary resistance on plain which have been derived from the operational speeds of both ETR 500 (fig. 3) and ETR 600, whilst the resistance due to the curves has been determined, as in the previous case, through Von Röckl.

Integrating motion equation [1.25], as in the previous case, the results in fig. 4 have been obtained.

The energy consumption on the new line, with rated speed of 220 km/h, results to be equal - for ETR 500 - to 10,220 MJ, i.e. 4% greater than the 9,627 MJ which are consumed by the same train on the historical line at an average coverage speed of 110 km/h (orange line), whilst it would be almost identical in the case of ETR 600. It must be observed, however, that passenger transport can be assumed to guarantee a coverage time almost cut by half with the same expenditure in energy terms.

Finally, a further comparison versus air transport highlights that, to cover the distance from Turin to Paris, an ETR 500 would use - on a fully High Speed line - approximately 84.000 MJ, whilst an aircraft covering the distance which separates the same locations is consuming approximately 300.000 MJ<sup>(11)</sup>. The capacity of a line air-

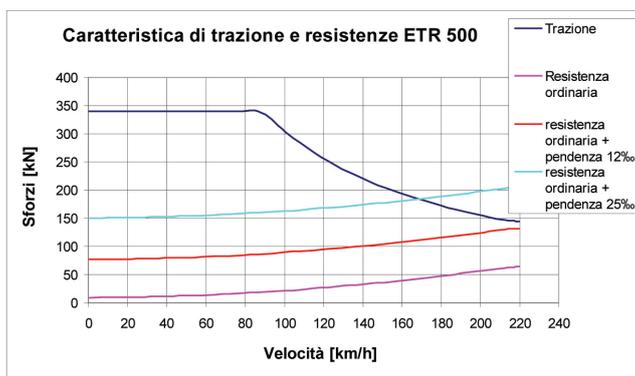


Fig. 3 - Caratteristica meccanica e resistenze dell'ETR 500. Mechanical feature and resistances of ETR 500 (Speed v. strengths: traction, ordinary resistances, idem plus a slope of 12% or 25%).

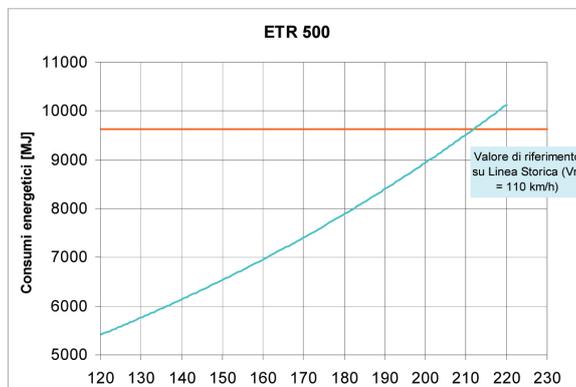


Fig. 4 - I consumi energetici dell'ETR 500 - linea storica (arancio) e nuova (curva variabile in funzione della velocità impostata). The energy consumption of ETR 500 - historical line (orange) and new one (variable curve as a function of speed setting, Vm=110 on the historic line).

<sup>(11)</sup> Calcolato considerando un servizio effettuato con un Boeing 737, dotato di due motori da 110 kN di spinta l'uno.

<sup>(11)</sup> Calculated considering a service performed with a Boeing 737, provided with 2 of 110 kN thrust engines.

linea per quella tratta è di circa 150 passeggeri, contro i 590 dell'ETR 500, quindi il consumo energetico per persona trasportata nel caso del treno sarebbe di 140 MJ, mentre per l'aereo salirebbe a ben 1600 MJ/passeggero.

In tabella 8 sono presentati i risultati complessivi della valutazione energetica in funzione delle velocità di percorrenza: nel caso della linea storica esse sono le massime ammesse dalle caratteristiche dell'infrastruttura, mentre per quanto riguarda il nuovo tracciato sono ipotesi di velocità ammissibili.

## 7. Conclusioni

Si può affermare, sulla base dei calcoli effettuati, che i modelli teorici analizzati forniscono un buon risultato in prima approssimazione; in generale però nessun modello risulta in grado di rappresentare fedelmente i parametri operativi, la programmazione delle tracce orarie e le caratteristiche del materiale rotabile in termini di trazione e frenatura. Questi parametri, insieme alle caratteristiche plano-altimetriche del tracciato, oltre ad altre eventuali soluzioni sul materiale rotabile quali l'assetto cassa variabile, influenzano la velocità pratica e quindi conseguentemente la potenzialità. La ricostruzione della linea in un ambiente di simulazione costituisce pertanto un valido strumento d'analisi perché garantisce la possibilità d'affinare il calcolo.

Dalle analisi effettuate si è osservato che la linea attuale risulta penalizzata dalla lunghezza delle sezioni di blocco, in particolar modo nella tratta di Alta Valle. Anche per questa ragione implementare sulla linea esistente un

craft for that section is approximately 150 passengers, against the 590 ones of 'ETR 500; subsequently, the energy consumption per person transported in the case of the train would be 140 MJ, whilst - in the case of the aircraft - it would be up to 1600 MJ/passenger.

Table 8 shows the overall results of the energy assessment as a function of the operation speed: in the case of the historical line, they are the highest ones allowed by the features of the infrastructure, whilst - as far as the new track is concerned - the values are assumptions of allowed speed.

## 7. Conclusions

On the basis of the calculations which have been run, it can be stated that the theoretical models which have been analysed supply a good result as a first approximation; in general - though - no model seems to be up to reliably represent the operational parameters, the programming of the hourly slots and the features of the rolling stock in terms of both traction and braking. These parameters - together with the track layout and besides any other solutions on the rolling stock, such as the tilting body - influence the practical speed and then - consequently - the carrying capacity of the line. Subsequently, reconstructing the line in a simulation environment is a valid analysis tool, since it ensures the possibility to refine the calculation.

The analyses performed have allowed observing that the current line is penalized by the length of the block sections, in particular in the High Valley. Also for this reason, implementing a ETCS level 2 signalling system would en-

TABELLA 8 - TABLE 8

I CONSUMI ENERGETICI [MJ] – CONFRONTI CON DIVERSE TIPOLOGIE DI CONVOGLI  
ENERGY CONSUMPTION [MJ] – COMPARISONS WITH DIFFERENT TYPES OF TRAINS

Energy consumption/Consumi energetici [MJ]		Historic line/Linea storica (Bivio Pronda-Modane)	New line designed/Nuova Linea progettata (Orbassano-S. Jean de Maurienne)		
Freight transport/trasporto merci (E 402B)	Running time/tempo di percorrenza	1h:09 min	1h:05 min	55 min	47 min
	Speed/velocità	90 km/h	100 km/h	120 km/h	140 km/h
	hauled/1600 t rimorchiate	28.518 MJ	18.178 MJ	20.475 MJ	24.526 MJ
	hauled/800 t rimorchiate	15.197 MJ	9.089 MJ	10.238 MJ	12.870 MJ
Passenger transport/trasporto passeggeri	Running time/tempo di percorrenza	55 min	46 min	36 min	30 min
	Speed/velocità	110 km/h	140 km/h	180 km/h	220 km/h
	ETR 500	9.627 MJ	6.178 MJ	7.776 MJ	10.220 MJ
	ETR 600	6.410 MJ	4.055 MJ	5.124 MJ	6.500 MJ

sistema di segnalamento ETCS di livello 2 garantirebbe un buon miglioramento delle prestazioni della linea in termini di potenzialità, soprattutto nell'ipotesi di ottimizzare le sezioni di blocco, a patto che questa soluzione sia compatibile con le prestazioni del materiale rotabile. Ulteriori miglioramenti si potrebbero ottenere intervenendo sul materiale rotabile, in particolare notevoli vantaggi potrebbero essere ottenuti con l'impiego di treni merci a potenza distribuita, fermo restando il problema dell'insufficiente potenza delle sottostazioni elettriche.

Dal punto di vista energetico, infine, la percorrenza dei convogli merci su una nuova linea garantirebbe un contenimento dei consumi nell'ordine del 35-40% rispetto alla situazione attuale, mentre nel caso del trasporto passeggeri non si avrebbe un risparmio energetico significativo, ma si potrebbe dimezzare il tempo di percorrenza, aprendo a scenari di concorrenza nei confronti del modo aereo, decisamente meno conveniente dal punto di vista dei consumi.

sure a sound improvement in the performance of the line as related to carrying capacity, mainly in the assumption of optimizing the block sections, provided that this solution is compatible with the performance of the rolling stock. Further improvements could be obtained by intervening on the rolling stock; in particular, remarkable advantages could be obtained through the use of an electrical motor on each wagon of the freight trains, even though the issue of insufficient power in the electrical substations remains.

Finally, on the energy point of view, the transit of the freight trains on the new line would allow containing consumptions within 35 to 40% within the current conditions, whilst, in case of passenger transport, no significant energy savings would be achieved; the operation time could though be cut by half, opening to competitive scenarios versus the air transport world, which is definitely less cost-effective in terms of consumption.

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] CIPE, "Relazione sullo stato di attuazione del Programma Infrastrutture Strategiche", 6 Marzo 2009.
- [2] RICCI S., KONTAXI E., "Tecniche e metodologie per la determinazione della capacità ferroviaria: analisi comparata e prospettive d'integrazione", Ingegneria Ferroviaria, Dicembre 2009.
- [3] RFI COM NI ORG 001, "Determinazione della capacità di infrastruttura ferroviaria: linee", 7 Aprile 2004.
- [4] GENOVESI P., RONZINO C.D., "Flussi e capacità delle linee ferroviarie a doppio binario", Ingegneria Ferroviaria, luglio/agosto 2006.
- [5] CORRIERE F., "Potenzialità e regolarità di esercizio nelle linee ferroviarie", Ingegneria Ferroviaria, gennaio/febbraio 1984.
- [6] REITANI G., MALASPINA R., "Un criterio di calcolo della potenzialità di circolazione ferroviaria su linee a doppio binario", Ingegneria Ferroviaria, agosto 1995.
- [7] CASCETTA E., NUZZOLO A., "Un modello analitico per il calcolo della capacità di circolazione delle linee ferroviarie", Ingegneria Ferroviaria, febbraio 1980.
- [8] ABRIL A., BARBER F., INGOLOTTI L., SALIDO M. A., TORMOS P., LOVA A., "An assessment of railway capacity", Science Direct, 4 aprile 2007.
- [9] DELFINO A., GALAVERNA M., "Blocco fisso e blocco mobile: analisi di potenzialità", Ingegneria Ferroviaria, giugno 2003.
- [10] GALATOLA M., "Analisi della circolazione ferroviaria: gli indici di compattezza e di qualità", Ingegneria Ferroviaria, luglio/agosto 2004.
- [11] GALATOLA M., "La potenzialità delle linee ferroviarie e la qualità del servizio offerto", Ingegneria Ferroviaria, gennaio 2005.
- [12] CROCCO F., DE MARCO S., MONGELLI D.W.E., "Considerazioni sull'effetto del grado di eterotachicità sulla potenzialità di circolazione delle linee ferroviarie", Ingegneria Ferroviaria, gennaio 2010.
- [13] Osservatorio per il collegamento ferroviario Torino-Lione, Quaderno 1 - Linea storica Tratta di Valico, 2007.
- [14] Osservatorio per il collegamento ferroviario Torino-Lione, Quaderno 3 - Linea storica Tratta di Valle, 2007.
- [15] CARGANICO C., CESARIO P., "ERTMS: la modularità nell'implementazione dall'utilizzo di sistemi di blocco esistenti alla realizzazione del blocco mobile", Ingegneria Ferroviaria, gennaio/febbraio 1999.
- [16] DALLA CHIARA B., "Engineering and Design of Railway Systems, Trains lines operation and innovation", Ed. Agit MarioGros, 2010.

- [17] UIC, "Influence of ETCS on line capacity", marzo 2008.
- [18] WINTER P., "Compendium on ERTMS", UIC, 2009.
- [19] SENESI F., MARZILLI E., "ETCS: sviluppo e messa in esercizio in Italia", CIFI, 2010.
- [20] Osservatorio per il collegamento ferroviario Torino-Lione, *Indirizzi operativi per la progettazione preliminare della nuova linea*, 29 Gennaio 2010.
- [21] VICUNA G., "Organizzazione e Tecnica Ferroviaria", CIFI, 1986.
- [22] Ente Ferrovie dello Stato, "Plano-Profilo della linea Torino-Modane", Compartimento di Torino Ente FS, ultima revisione, giugno 1989<sup>(12)</sup>.

---

---

### Sommaire

#### CALCUL DE LA POTENTIALITÉ ET DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DE LA LIAISON FERROVIAIRE TURIN-MODANE: APPLICATION DE MODÈLES ET SIMULATION

Les principales méthodes théoriques pour le calcul de la potentialité ferroviaire sont rappelées et appliquées à la liaison ferroviaire Turin-Modane. Cette potentialité est en suite calculée, à travers la reconstruction fidèle de la ligne, au moyen du software de simulation «Open Track» et en imaginant différents scénarios de trafic. L'attention est attirée enfin aussi sur la comparaison de la consommation énergétique entre deux parcours différents, celui représenté par la ligne historique et celui du nouveau tracé hypothétique.

### Zusammenfassung

#### DIE BERECHNUNG DER BETRIEBSLEISTUNGSFÄHIGKEITS UND ENERGIE-VERBRAUCHS MITTELS SIMULATIONSMODELLEN FÜR DIE NBS TURIN-MODANE

Zuerst werden kürzlich die üblichen Berechnungsverfahren der Leistungsfähigkeit einer Eisenbahnlinie zusammen gefasst. Danach wird das Simulationsmodell OPEN TRACK im Detail für verschiedenen Verkehrsniveaus gebraucht. Im Besonderen wird es ein Vergleich des Energieverbrauchs für die alte und die NBS zwischen Turin und Modane.

---

<sup>(12)</sup> Documentazione fornita direttamente da RFI.