

# Impatto acustico di una linea ferroviaria ad alta capacità in una valle alpina: il caso della bassa Val di Susa

Gianfranco Chiocchia<sup>1</sup>, Marina Clerico<sup>1</sup>, Pietro Salizzoni<sup>2</sup>, Massimo Marro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

<sup>2</sup>Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, University of Lyon, CNRS UMR 5509, Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard, 36, avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France

## 1. Introduzione

In questi ultimi anni sono state progettate alcune nuove linee ferroviarie attraverso l'arco alpino e sul territorio italiano, con l'obiettivo di promuovere il trasporto di merci su ferro a discapito di quello su gomma. Tra queste vi è la nuova linea Torino Lyon la quale, sebbene fosse inizialmente progettata principalmente per il trasporto passeggeri, è attualmente concepita come una linea ad uso prioritario per le merci. In questo senso, la Torino-Lyon ha subito la stessa sorte delle altre linee ad alta velocità italiane, che da tratte per solo passeggeri sono state destinate, almeno nelle intenzioni, ad un utilizzo spurio merci e passeggeri.

Secondo una consuetudine lessicale che ha preso piede nel nostro paese all'inizio degli anni duemila, tali linee sono dette ad 'Alta Capacità', nella misura in cui permetterebbero, grazie a particolari sistemi di controllo, di fare circolare flussi di merci superiori ad una linea tradizionale. L'uso del condizionale è d'obbligo poiché, sebbene parte di queste linee siano entrate in funzione in Italia già da qualche anno (ci si riferisce alla linea Torino-Milano-Roma-Napoli), su di esse non è ad oggi circolato neanche un treno merci.

In linea di principio una linea ad alta capacità è caratterizzata da un'alta frequenza dei transiti dei treni, sia durante il giorno che durante la notte. Non è difficile immaginare che una alta frequenza dei transiti, in particolare durante il periodo notturno, possa essere responsabile di un impatto acustico rilevante. L'impatto è accentuato in una valle alpina stretta, che costituisce un ambiente particolarmente critico, in cui sono ridotti gli effetti di attenuazione del segnale sonoro ed accentuati quelli di amplificazione, a causa di fenomeni di rifrazione e riflessione.

La quantificazione dell'impatto acustico di queste linee deve fare fronte a due problemi principali. Il primo riguarda l'identificazione dei parametri che meglio caratterizzano le particolarità del segnale sonoro causa dell'inquinamento acustico, in questo caso il rumore intermittente indotto dal passaggio dei treni. La seconda riguarda la definizione di modelli semplificati di propagazione sonora nell'ambiente esterno che forniscano previsioni attendibili, tenendo conto delle peculiarità ambientali dell'area in esame, nello specifico una valle alpina.

In questo articolo presentiamo i risultati di una valutazione dell'impatto acustico nella bassa Val di Susa della nuova linea ad alta capacità Torino-Lyon. Lo studio è stato condotto una decina di anni fa, e riguarda pertanto un progetto oggi abbandonato, con un tracciato della linea in sinistra idrografica della Dora. L'attenzione era posta sul tratto Bruzolo-S. Didero, che risultava essere l'unico tratto non in galleria.

Nell'incertezza che caratterizza la definizione del nuovo tracciato, riteniamo utile riproporre questi risultati, soprattutto nel caso in cui si optasse per la soluzione definita 'low-cost', che prevede la realizzazione del solo tunnel di base tra Susa et St. Jean Di Maurienne. In questo caso i treni percorrerebbero a cielo aperto il tragitto tra Susa e la cintura torinese con un impatto acustico considerevole, e per la cui valutazione risultano pertanto del tutto valide le conclusioni tratte allora.

In quanto segue presentiamo per sommi capi lo studio d'impatto condotto dal Politecnico di Torino all'inizio degli anni duemila [1], analogo a quello condotto tre anni prima per una valle alpina austriaca [2]. A tal fine (§ 2) riassumiamo gli aspetti peculiari della propagazione acustica nelle valli alpine e sintetizziamo i principali riferimenti bibliografici riguardo gli effetti sulla salute indotti da rumori intermittenti, quali il rumore ferroviario. In seguito definiamo una metodologia per la valutazione dell'impatto e descriviamo il modello di calcolo adottato (§ 3). Infine presentiamo le valutazioni svolte su un modello di esercizio della linea Torino-Lyon proposto nel passato (§ 4) e traiamo qualche considerazione conclusiva (§ 5).

## **2. Propagazione del rumore ferroviario in una valle alpina**

### **2.1 Aspetti legislativi e norma ISO/DIS 9613-2**

Attualmente, nella gran parte della legislazione europea la valutazione dell'impatto acustico delle linee ferroviarie fa riferimento ad indicatori ottenuti a partire da medie di lungo periodo del livello sonoro  $L$ , usualmente indicate con i simboli  $L_{dn}$ ,  $L_{den}$ ,  $L_{eq}$ . Questi indicatori altro non sono che medie energetiche nelle quali l'energia acustica complessivamente emessa in un determinato lasso di tempo (il giorno, la notte, le 24 ore o qualsiasi altro periodo) viene considerata come uniformemente distribuita su di esso e quindi ridotta al suo valore medio espresso in decibel (dB). Essi sono definiti secondo standard internazionali nella norma ISO/DIS 9613-2, che prescrive modelli per la loro quantificazione tenendo conto dell'eventuale presenza di ostacoli, delle condizioni atmosferiche (stratificazione termica e intensità del vento), dell'inferenza distruttiva dovuta al suolo, dei fenomeni di riflessione dovuti a pareti e di attenuazione indotte dalla presenza di vegetazione. È chiaro, tuttavia, che in tal modo tutte le specificità dovute al disuniforme andamento temporale del rumore vengono perse ed in particolar modo quelle legate ai suoi picchi.

Tali modelli, benché contemplino una varietà di condizioni ambientali, hanno due principali limitazioni, che riguardano l'attenuazione dei livelli sonori dovuta al suolo e alle condizioni dinamiche e termodinamiche dell'atmosfera.

L'attenuazione da parte del suolo è stimata considerando principalmente i fenomeni di interferenza distruttiva di raggi acustici diretti e riflessi. Questi effetti possono essere significativi nel caso in cui la propagazione avvenga su un terreno pressoché pianeggiante e nel caso in cui i raggi acustici non siano soggetti a forti curvature indotte da fenomeni meteorologici. In tal caso il livello sonoro del

segnale può subire una notevole attenuazione allorché raggiunge ricettori posti ad una distanza di poche centinaia di metri e posizionati a livello del suolo. Al contrario, quando la morfologia dell'area è caratterizzata da una forte concavità del terreno, tali effetti risultano del tutto trascurabili, anche per ricettori posti a svariate centinaia di metri dalla sorgente sonora.

L'effetto delle condizioni atmosferiche è basato su una stima dell'incurvatura dei raggi acustici indotti da condizioni atmosferiche disomogenee in prossimità del suolo. Pur tuttavia tali stime sono valide solo per deboli curvature e pertanto non attendibili nel caso di forti venti o importanti gradienti di temperatura, ovvero in condizioni che si manifestano con frequenza in una valle alpina, soggetta non di rado ad episodi di föhn e di inversione termica al suolo [3].

Per i suddetti motivi i modelli forniti dalla norma ISO/DIS 9613-2 sono da ritenersi validi solo nel caso in cui la propagazione avvenga su terreno pressoché pianeggiante e in assenza di forti venti e di forti stratificazioni termiche dell'atmosfera, e sono pertanto poco adatti a descrivere la propagazione sonora in una valle alpina.

## 2.2 Il disturbo del rumore intermittente

Come già scritto nell'introduzione, pressoché la totalità delle legislazioni dei paesi europei sul rumore indotto dai mezzi di trasporto fanno riferimento ad indicatori ottenuti con medie di lungo periodo dei livelli sonori, quali  $L_{dn}$ ,  $L_{den}$ ,  $L_{eq}$ . Fa eccezione la legislazione Svedese che prescrive anche limitazioni per i livelli massimi del segnale sonoro, usualmente indicato come  $L_{max}$ . Tuttavia, dall'inizio degli anni '80, numerosi studi hanno dimostrato che gli indicatori di lungo periodo risultano inadatti a quantificare i disturbi al sistema neurovegetativo indotti da sorgenti di rumore 'impulsive', quali quelle legati al transito di treni o aeroplani [4].

Ci sono due aspetti che caratterizzano le sorgenti di rumore dette 'impulsive', il rapido incremento del livello sonoro e la differenza considerevole tra il valore massimo e quello di fondo. Entrambi i fattori contribuiscono ad acuire il disturbo percepito rispetto ad altri tipi di rumore [5]. Per queste ragioni, al fine di caratterizzare eventi sonori intermittenti, diversi ricercatori hanno suggerito di sostituire indicatori di breve periodo quale  $L_{max}$  a quelli di lungo periodo [6,7]. Affrontando lo stesso problema anni addietro, Robinson [8] propose di quantificare l'inquinamento sonoro tramite un indicatore misto, indicato come  $L_{NP}$ , ottenuto combinando linearmente i primi due momenti della distribuzione statistica (la media e la varianza) del livello sonoro:

$$L_{NP} = L_{eq} + k\sigma \quad (1)$$

laddove  $\sigma$  rappresenta la deviazione standard e  $k$  una costante empirica pari a 2.56.

La valutazione dei disturbi di rumori intermittenti sulla salute umana e sul sistema neurovegetativo è un argomento controverso la cui discussione va al di là degli obiettivi di questo lavoro. Vi è comunque un aspetto sul quale vi è un ampio consenso e che riteniamo in questa sede rilevante: il disturbo arrecato durante le ore notturne, in particolare nell'indurre al risveglio dal sonno.

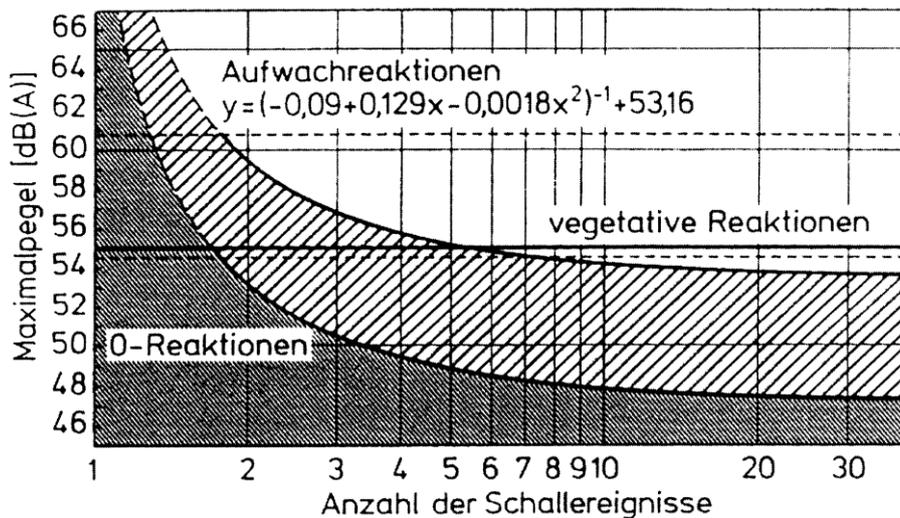


Figura 1. Soglia del risveglio (Aufwachreaktionen) in funzione del numero  $N$  (asse delle ascisse) e del livello acustico massimo (asse delle ordinate) degli episodi sonori [14].

Tenuto conto dell'indiscussa funzione di ristoro del sonno, la sua interruzione è ritenuto l'effetto più deleterio delle sorgenti impulsive di rumore [9,10,11]. Lavori sperimentali [12,13] hanno mostrato come una soglia sonora relativamente bassa, compresa tra i 52 dB(A) e i 60 dB(A), induca al risveglio le fasce più sensibili della popolazione. Questi studi hanno inoltre dimostrato come tale soglia sia ridotta nel caso di eventi sonori caratterizzati da un gap crescente tra valore di fondo e valore massimo, che una percentuale crescente della popolazione si risvegli allorché aumentano i valori massimi di livello sonoro, e che il tempo necessario a riaddormentarsi cresca allo stesso modo. Per quantificare questi disturbi, Griefhan [14] ha sintetizzato i risultati della letteratura esistente definendo, in base a considerazioni empiriche, il livello acustico corrispondente ad una soglia del risveglio (Aufwachreaktionen) in funzione del numero di eventi sonori notturni  $N$  e del loro livello sonoro massimo  $L_{max}$ . I risultati, diagrammati in un grafico, sono riportati in Figura 1, dove l'asse delle ascisse rappresenta il numero di eventi  $N$  (in scala logaritmica) e l'asse delle ordinate riporta i valori di  $L_{max}$ . La parte più scura del diagramma corrisponde a condizioni che non comportano alcun disturbo mentre la parte grigia riguarda reazioni di tipo vegetativo. Il limite superiore di questa regione definisce il valore di  $L_{max}$  corrispondente alla soglia del risveglio, che decresce rapidamente all'aumentare del numero degli eventi  $N$  ed è descritto dalla seguente relazione:

$$L_{max} = \frac{1}{-0.018N^2 + 0.129N - 0.09} + 53,16 \quad (2)$$

Il diagramma rappresenta pertanto un utile strumento per la per quantificare l'impatto di una sorgente impulsiva di rumore sui residenti nelle aree limitrofe in funzione del numero e del livello massimo degli eventi sonori. Nell'analisi che segue esso verrà assunto come riferimento per valutare l'impatto acustico dovuto ai frequenti transiti notturni dei treni previsti in un modello di esercizio della nuova linea ad alta capacità tra Torino e Lyon.

### 3. Una metodologia per la valutazione dell'impatto

Per quanto detto nel paragrafo precedente una valutazione attendibile dell'impatto acustico di una sorgente impulsiva in una valle alpina non può basarsi sulla stima di indicatori di lungo periodo (Ldn, Lden, Leq) né fare riferimento ai modelli di propagazione sonora forniti dalla norma ISO-DIS 9613-2.

É stato pertanto necessario definire una metodologia che prendesse in considerazione gli aspetti peculiari dell'inquinamento sonoro ferroviario in una valle. Il metodo proposto é volto a valutare l'impatto sulla popolazione focalizzando l'attenzione principalmente sul disturbo arrecato nelle ore notturne, quantificato secondo il criterio fornito da Griefahn (Figura 1).

A tal fine é necessario conoscere il numero di passaggi previsti nel modello di esercizio di una linea nonché associare ad ogni passaggio i livelli di Lmax ai ricettori in funzione della loro posizione rispetto alla linea ferroviaria. Il calcolo di Lmax ha richiesto la formulazione di un modello 'ad hoc', nominato TR-Noise ( presentato in § 3.1), che permettesse di stimare i livelli sonori istantanei indotti da sorgenti sonore in movimento. Il codice di calcolo é formulato adottando una serie di ipotesi semplificatrici riguardo la propagazione sonora e necessita come parametro di ingresso l'intensità delle sorgenti sonore. Per questi motivi l'utilizzo del modello richiede una accurata calibrazione e validazione per mezzo di un confronto con misure in situ (§ 3.2).

#### 3.1 Modellizzazione

Il programma TR-Noise adotta una approssimazione quasi stazionaria per la descrizione della propagazione sonora in campo aperto e il calcolo dei livelli sonori istantanei. Tale approssimazione si basa sulla riproduzione della non stazionarietà di un segnale come successione di stati stazionari; é valida nella caso in cui la velocità di propagazione del segnale sia significativamente superiore rispetto alla velocità con la quale si muove la sorgente sonora (condizione certamente verificata nel caso dei treni, meno in quello degli aerei). Questa é rappresentata come una somma pesata di monopoli e dipoli acustici [1] che si muovono ad una velocità uniforme lungo la linea ferroviaria.

In questo modo é possibile ottenere numerose informazioni che caratterizzano un evento sonoro: la durata dell'evento, il suo livello di picco, il rapporto tra valore di picco e quello di fondo, nonché il Single Event Level (SEL: anche in questo caso si tratta di un indicatore che esprime il valore medio dell'energia acustica emessa ma valutato sulla durata del singolo evento, per esempio il transito del treno). Secondo l'analisi di Griefhan [14] tali informazioni sono necessarie per quantificare il disturbo arrecato alla popolazione nelle ore notturne (§ 2.2).

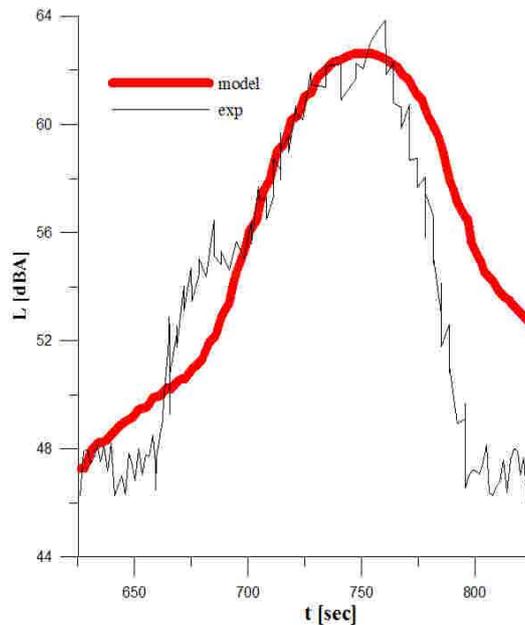


Figura 2: Evoluzione temporale del livello sonoro  $L$  misurato e calcolato da TR-Noise in un punto fisso.

A titolo di esempio, in Figura 2 è mostrato un confronto tra un segnale temporale a punto fisso e la sua simulazione calcolata con TR-Noise. Nella figura 3 invece è mostrata la distribuzione spaziale dell'intensità acustica al suolo calcolata da TR-Noise per una sorgente sonora in movimento lungo il tracciato. Il modello di propagazione sonora nell'ambiente esterno tiene in conto diversi fattori che contribuiscono alla attenuazione del segnale sonoro, quale la divergenza geometrica e l'assorbimento atmosferico, calcolato per otto bande di frequenza diverse.

Diversamente da come prescritto dalla norma ISO/DIS 9613-2, TR-Noise non considera le riflessioni dovute ad ostacoli e soprattutto trascura completamente gli effetti di attenuazione indotti dalla presenza del terreno. La scelta di adottare queste semplificazioni è unicamente giustificata dall'applicazione del modello ad aree con forti concavità del terreno, quale una valle alpina, nelle quali i modelli forniti dalla norma ISO/DIS 9613-2 sono del tutto inappropriati. Una stima accurata di questi effetti, e di quelli indotti dalle riflessioni, necessiterebbe un enorme sforzo computazionale nel tracciare un gran numero di raggi acustici in un dominio di svariati chilometri quadrati e con una orografia altamente irregolare.

Purtuttavia, nel caso in cui il suolo è caratterizzato da una forte concavità si può ragionevolmente supporre che i fenomeni di interferenza distruttiva indotti risultino trascurabili per la maggior parte dei ricettori posizionati ad una quota superiore rispetto a quella della linea ferroviaria. Avendo l'intenzione di applicare il modello in una valle alpina, si è ritenuto pertanto di trascurare questi effetti, non senza verificarne comunque l'attendibilità, validando il modello tramite un accurato confronto tra dati numerici e sperimentali.

La principale differenza tra TR-Noise ed altri codici di calcolo i cui modelli di propagazione sono basati sulla norma ISO/DIS 9613-2 (e.g. SoundPlan, Mithra) sono pertanto due:

- TR-Noise permette di calcolare l'andamento dei segnali sonori istantanei e non solo gli indicatori basati su medie di lungo periodo ( $L_{dn}$ ,  $L_{den}$ ,  $L_{eq}$ );
- TR-Noise non considera gli effetti di attenuazione indotti dal suolo.

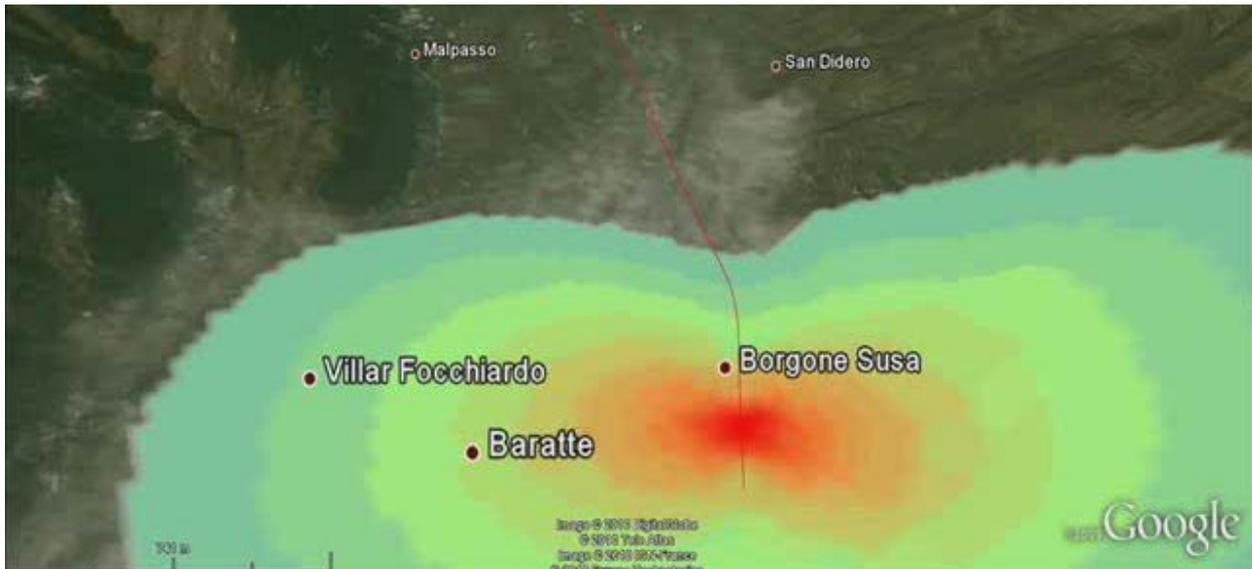


Figura 3: Campi di livello sonoro istantaneo [dB(A)] al suolo calcolati con TR-Noise.

### 3.2 Taratura e validazione del modello

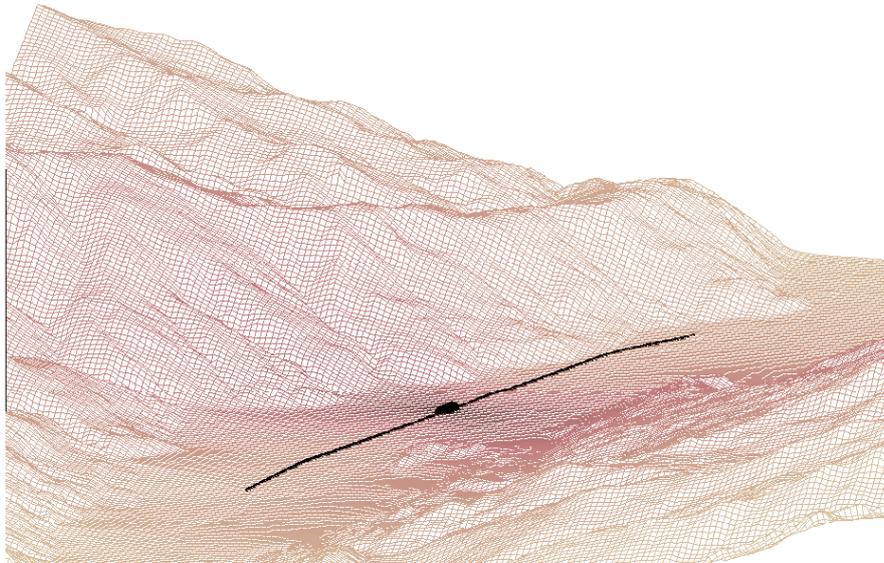
Le misure sperimentali in situ sono necessarie a calibrare il modello e a verificarne l'accuratezza dei risultati. Più specificatamente, le misure in situ hanno una duplice finalità:

- Valutare l'attendibilità delle ipotesi adottate dal modello, in particolare per quanto riguarda gli effetti del suolo sulla propagazione del rumore in campo aperto.
- Stimare la potenza acustica delle emissioni sonore delle varie tipologia di treni;

In linea generale, l'attenuazione del segnale sonoro in funzione della distanza della sorgente dipende da tre fattori: la divergenza geometrica, l'assorbimento atmosferico e l'interferenza distruttiva dovuta al suolo. Come già accennato quest'ultimo effetto, che dipende fortemente dalla morfologia del terreno, è del tutto trascurato nel modello di propagazione implementato in TR-Noise (§ 3.1). Questa ipotesi è giustificata allorché la morfologia dell'area in esame sia caratterizzata da una forte concavità del suolo, poiché gran parte dei ricettori è localizzata a quote più elevate della sorgente. Non è tuttavia a priori noto quale sia il dislivello minimo a partire dal quale i fenomeni di interferenza distruttiva siano trascurabili. Per questo motivo risulta necessario confrontare i risultati delle simulazioni numeriche con misure in situ, in corrispondenza di versi punti ricettori. Solo dopo questa fase di validazione il codice di calcolo potrà essere utilizzato per simulare scenari futuri per valutare l'impatto di modelli di esercizio della linea.

Le caratteristiche generiche della potenza acustica emessa per unità di lunghezza da diverse tipologie di treni ed in funzione della loro velocità è riportata in diverse fonti bibliografiche [15,16]. È altresì noto che l'intensità della sorgente è fortemente variabile in funzione della vetustà del parco rotabile e dalle condizioni di usura dei binari. Pertanto, per rimuovere fonti ulteriori di errore nei calcoli si è preferito avere una stima diretta di tali intensità, ricavandone il valore a partire da misure effettuate in prossimità della linea (~10 m).

## 4. Un caso studio: l'Alta Capacità nella bassa Val di Susa



*Figura 4: Orografia della valle di Susa e tracciato della linea Ferroviaria.*

La metodologia di valutazione di impatto delineata nel § 3 è stata applicata a diversi casi studio [1,2]. In questa sede riportiamo i risultati della valutazione dell'impatto acustico nella bassa Val di Susa, e più precisamente nella conca di Bruzolo e Chianocco, relative al modello di esercizio proposto per la nuova linea ad Alta Capacità Torino-Lyon. Le valutazioni che seguono riguardano il tracciato proposto all'inizio degli anni duemila, che prevedeva un tratto di linea a cielo aperto tra Borgone e Chianocco. In ogni caso le conclusioni tratte allora rimangono valide per valutare l'impatto di altre ipotesi di tracciato che prevedano tratti di linea non in galleria nell'attraversamento della bassa Val di Susa.

I fattori che rendono la bassa Valle di Susa un'area particolarmente esposta in potenza all'impatto acustico di una linea ad alta capacità sono due:

- Si tratta di una valle stretta (Figura 4), ovvero con un fondovalle avente una larghezza dello stesso ordine dell'altezza dei monti che lo delimitano, che presenta pertanto condizioni critiche dei fenomeni di propagazione acustica
- rispetto ad altre valli alpine (quale ad esempio la Valle Maurienne) è un'area ad alta urbanizzazione e ad alta densità di popolazione

In quanto segue riportiamo i principali risultati delle fasi del lavoro: la campagna di misura (§ 4.1), la taratura del modello (§ 4.2) e la simulazione di uno scenario di traffico (§ 4.3)

### 4.1 Campagna di misure

La campagna di misura è stata effettuata tra le ore 21 del 6 giugno 2001 a le 2 del mattino del giorno seguente. L'orario notturno ha permesso di rilevare i segnali sonori minimizzando i disturbi indotti da altre sorgenti di rumore. I segnali sono stati registrati con un microfono di classe I, come indicato dalla norme EN 60651/1994 e EN 60804/1994, che è stato adeguatamente calibrato prima e dopo

ogni serie di misura. Le misure sono state eseguite in quattro ricettori diversi, qui indicate come PM1 – PM4, posizionati a diverse distanze e dislivello dalla linea (Si veda la tabella 1). Tutti i ricettori erano posti lungo una stessa direttrice posta perpendicolarmente rispetto alle linea e in direzione nord. In totale sono stati registrati 18 eventi sonori ai quali sono stati anche associati la lunghezza e la velocità del treno in transito.

Ricettore	$\Delta z$ [m]	$d$ [m]
PM1	-	11
PM2	-	215
PM3	13	643
PM4	68	750

Tabella 1: Dislivello  $\Delta z$  e distanza  $d$  dei ricettori rispetto alla linea ferroviaria.

#### 4.1.1 Intensità della sorgente sonora

Il ricettore più prossimo alle linea ferroviaria (PM1) é stato utilizzato per ricavare la potenza acustica della sorgente sonora per i diversi tipi di treno. Il parametro utilizzato per la calibrazione é stato il SEL, che é una misura dell'energia acustica emessa da una sorgente sonora e che può essere facilmente ricavata integrando nel tempo i segnali registrati al ricettore.

Per ricavare la potenza acustica per unità della sorgente si é proceduto cercandone i valori che fornissero un perfetto accordo tra i SEL misurati e simulati in corrispondenza del PM1. Si fa notare che l'imposizione di pari valori del SEL non implica valori identici di  $L_{max}$  (Figura 5-b). Durante i rilievi é stata notato un aumento delle velocità dei treni nel periodo notturno, al quale però non sono corrisposti significativi incrementi dell'intensità della potenza acustica emessa per unità di lunghezza.

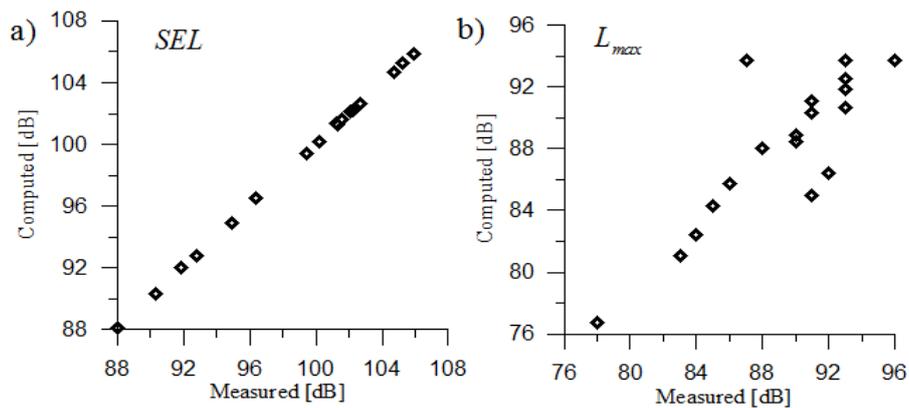


Figura 5: Taratura del modello tramite il segnale acquisito nel punto di misura PM1. a) SEL; b)  $L_{max}$ .

#### 4.2 Confronto tra risultati numerici e misure sul campo

Benché alcune delle registrazioni fossero disturbate da rumori occasionali (abbaiare di cani, serrande e saracinesche...) che producevano picchi spuri nei segnali, la qualità delle misure é stata sufficiente per permettere di ricavare le informazioni necessarie a tarare e validare il modello.

	<b>PM1</b>	<b>PM2</b>	<b>PM3</b>	<b>PM4</b>
<b>Mis.</b>	101.6	81.2	82.2	75.8
<b>Calc.</b>	101.6	87.9	81.2	79.9

Tabella 2: < SEL > misurato e calcolato [dB(A)].

Vengono qui riportati i risultati i valori di due indicatori, SEL e Lmax, per ogni evento sonoro. Un confronto tra i valori misurati e calcolati per ogni evento e per ogni ricettore é presentato nelle figure 6-7-8. Nella tabella 2 sono invece indicati le medie di insieme di questi due parametri, indicate come <SEL> e <Lmax>, per ogni punto ricettore. Una prima rapida osservazione dei dati mostra come valori di SEL e Lmax decrescano in modo diverso con la distanza dalla sorgente, e che per PM2 e PM3 le differenze tra i parametri considerati siano minime, nonostante i due ricettori siano distanti più di 400m l'uno dall'altro.

	<b>PM1</b>	<b>PM2</b>	<b>PM3</b>	<b>PM4</b>
<b>Mis.</b>	90.8	67.5	69.6	59.1
<b>Calc.</b>	89.9	74.7	66.1	63.4

Tabella 3: < L<sub>max</sub> > [dB(A)] misurato e calcolato.

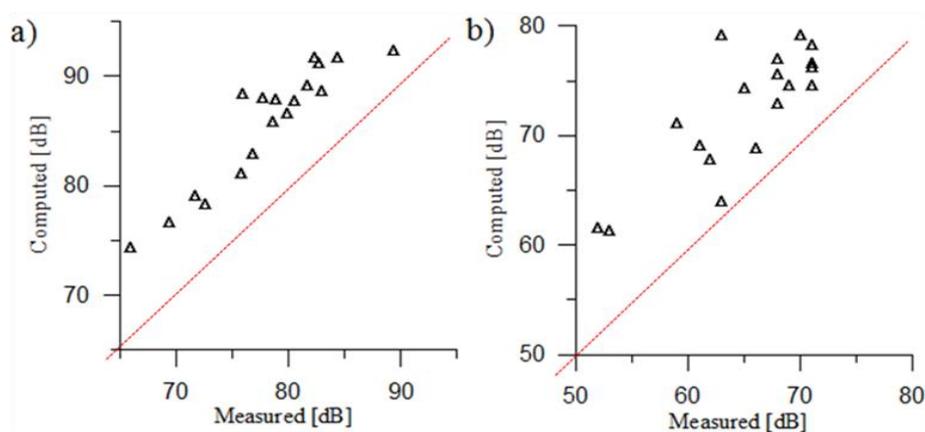


Figura 6: Confronto tra risultati numerici e misure rilevate nel PM2. a) SEL; b) L<sub>max</sub>.

Nel PM2 i valori misurati sono sistematicamente inferiori rispetto a quelli calcolati da TR-Noise, con uno scarto di circa 7 dB(A). Data la distanza ridotta tra il punto ricettore e la linea ferroviaria, questo scarto non può essere attribuito a fattori meteorologici. Esso può essere invece pienamente attribuito ai fenomeni di interferenza distruttiva dovuti al suolo e che risultano determinanti nell'attenuare il segnale sonoro che si propaga dalla sorgente al PM2, posizionati alla stessa quota. Poiché tali effetti non sono simulati da TR-Noise, i risultati numerici non possono che fornire una sovrastima sistematica dei dati sperimentali.

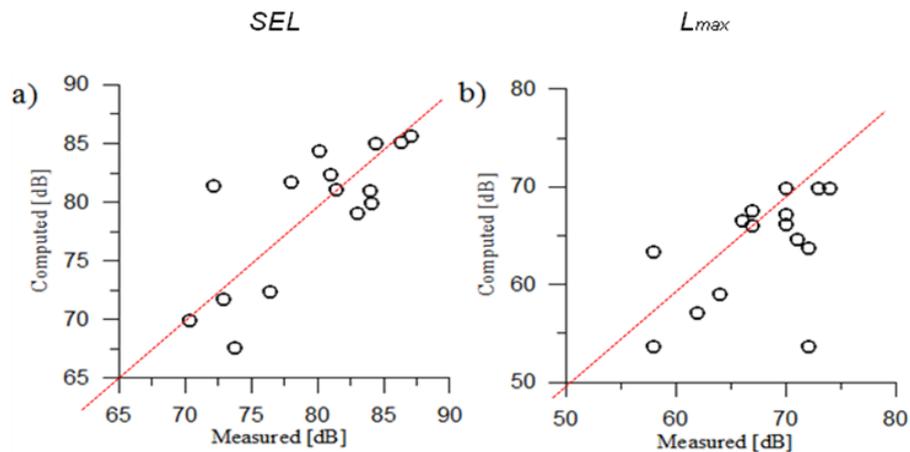


Figura 7: Confronto tra risultati numerici e misure rilevate nel PM3. a) SEL; b)  $L_{max}$ .

Al contrario, i valori relativi al PM3 mostrano un buon accordo tra misure e simulazioni (Figura 7). Questo risultato fornisce la dimostrazione che un dislivello di appena 13m su una distanza di 643 m sia già sufficiente a cancellare gli effetti dell'interferenza distruttiva. Nella fattispecie questo è imputabile all'orografia del tratto considerato, caratterizzato da un rapido dislivello in prossimità del ricettore, che produce localmente una forte concavità del terreno. In questo senso, l'accordo tra misure e simulazioni dimostra a posteriori la validità dell'ipotesi fatta nella formulazione del modello, secondo la quale i fenomeni di attenuazione sonora dovuti al terreno sono trascurabili, almeno per tutti quei ricettori posti ad una altezza superiore a 10m rispetto al livello della ferrovia.

#### 4.3 Valutazione dell'impatto acustico impatto della nuova linea AC

L'ottima corrispondenza tra i risultati teorici e le misure nella postazione PM-3 permette di validare il modello e fare una predizione dell'andamento tipico giornaliero dei livelli acustici istantanei indotto dal transito dei treni per un assegnato modello di esercizio della linea. Come già detto, nei paragrafi seguenti si riportano i risultati relativi al modello di esercizio dei primi anni duemila. Si prevedeva un traffico complessivo di 40 milioni di tonnellate di merci annue (da sommare al traffico passeggeri) distribuito sulla nuova linea e sulla linea storica (§5.2), i cui tracciati risultavano essere contigui nel tratto di linea allo scoperto, lungo 4500 m, compreso tra lo sbocco di un tunnel in regione Crotte a 450 m di quota e l'imbocco di un altro tunnel a monte di Borgone ad una quota che può variare tra 440 m e 410 m circa.

La simulazione, eseguita supponendo che i treni sulla linea AC viaggiassero alla normale velocità di esercizio anche nella conca di Bruzolo – S. Didero, ha richiesto i seguenti passi:

- 1) definizione dei tracciati della linea nuova e della linea storica, distanti rispettivamente 425 m e 643 m dal PM-3
- 2) La formulazione di un modello di esercizio, il quale a sua volta comprende:
  - a) la capacità complessiva delle due linee e la ripartizione del traffico tra esse
  - b) l'individuazione delle tipologie di convogli comprensive di velocità, lunghezze e potenze acustiche specifiche caratteristiche; la distribuzione oraria dei treni sulle 24 ore, divisa per linea e per direzione di marcia.
- 3) Il calcolo tramite TR-Noise dell'andamento temporale del rumore prodotto in PM-3 dal passaggio dei treni, per ciascuno dei due sensi di marcia
- 4) La sovrapposizione in PM-3 di tutti i segnali generati dai treni che si susseguono secondo il prospetto orario di cui sopra.

### 4.3.1 Definizione del modello di esercizio

Per quanto riguarda la capacità dell'insieme delle due linee si è assunto l'obiettivo di un volume di traffico di 40 milioni di tonnellate di merci all'anno (quale quello ipotizzato per il 2030 all'epoca in cui il modello fu concepito, v. §5.2), supponendo un tonnellaggio medio per treno di 450 ton:

- 342 treni merci
- 76 locomotori di spinta
- 32 treni a lunga percorrenza (LP)
- 20 treni regionali

I locomotori di spinta non sono stati considerati nella simulazione, che quindi potrebbe fornire valori acustici approssimati per difetto. Per individuare una ragionevole ripartizione di tale traffico al 2030 tra la linea storica e quella AC erano state formulate le seguenti ipotesi [1]:

1. I 40 regionali restano sulla linea storica.
2. Dei 32 treni a lunga percorrenza, 16 circolano sulla linea storica e 16 sulla nuova linea (treni ad alta velocità destinati al traffico giornaliero Milano –Torino – Lyon – Paris).
3. Il traffico merci è stato distribuito sulle due linee saturando completamente quella storica e collocando il resto (che ne costituisce la parte dominante) sulla AC.
4. Si è assunta una pausa notturna di un'ora tra le 2 e le 3 sulla linea nuova in ambedue le direzioni per ispezione e manutenzione del tunnel.

A tutti i treni merci sulla linea storica è stato attribuito una velocità di 100 km/h. A nessun treno sulla linea storica è stata consentita una velocità superiore a 160 km/h: si tratta di una scelta cautelativa, in quanto il previsto ammodernamento potrebbe portare alla fissazione di un limite più elevato. Coerentemente col modello di esercizio sopra descritto, sulla linea AC sono stati collocati soltanto treni a lunga percorrenza (pochi) e merci (molti). Ai primi è attribuita l'unica velocità di 220 km/h, ai secondi l'unica di 120 km/h.

Le potenze acustiche specifiche sono state determinate sia utilizzando le informazioni ricavate dalla campagna di misure (§4.1.1), sia considerando i valori prescritti dalle norme austriache [16] per la predizione del rumore di treni e motrici appartenenti alle tipologie sopra descritte. Tra i due insiemi di dati c'è una buona corrispondenza, anche se per i treni merci ambedue si fermano a velocità di 100 km/h e per quelli passeggeri a 200 km/h. I valori di potenza acustica per i treni viaggianti sulla linea AC sono stati allora dedotti per estrapolazione dai precedenti sulla base della legge per cui l'energia acustica emessa cresce con la terza potenza della velocità del treno. In realtà recenti ricerche suggeriscono una potenza più elevata, per cui questa legge (valida per l'emissione di origine meccanica e non aerodinamica; ma la seconda è trascurabile alle velocità considerate) fornirebbe valori approssimati per difetto. L'averla conservata fa quindi parte delle numerose ipotesi cautelative adottate in questa simulazione.

A conclusione di tutto ciò, sono state messe a punto le distribuzioni orarie dei passaggi dei diversi treni, tenendo presente alcuni criteri:

- separazione temporale tra i treni su uno stesso binario il più possibile uniforme (dell'ordine di 9-12 minuti)

- treni merci sulla linea storica concentrati nelle ore notturne, le tracce diurne essendo occupate da regionali e passeggeri lunga percorrenza (LP)
- i treni LP sulla linea AC sono stati collocati nelle ore diurne.

#### 4.3.2 Risultati della simulazione

Sono stati calcolati gli andamenti dei livelli acustici istantanei prodotto dal transito complessivo sulle due linee supponendo un livello di rumore di fondo costante e pari a 45 dB(A), giustificato dalla presenza di un'autostrada, di una statale e di una provinciale. Il calcolo è stato svolto per una giornata tipo con inizio alle 22:00 e termine alle 22:00 del giorno successivo. Le 24 ore sono state divise in 3 gruppi di 8 ore ciascuno, il primo dei quali secondo le convenzioni usualmente adottate rappresenta il periodo notturno (ore 22:00 – 06:00) e l'insieme degli altri due (ore 06:00 – 22:00) il periodo diurno.

Il quadro che emerge è visibilmente drammatico. Considerando l'effetto complessivo delle due linee, la sovrapposizione dei traffici produce frequentissimi livelli di picco, all'incirca 100, compresi tra 75 e 80 dB(A) separati gli uni dagli altri da periodi di quiete non più lunghi di 4 o 5 minuti e spesso assai più brevi. Facendo riferimento al grafico di Figura 2 si può innanzitutto notare che tali condizioni di impatto acustico non sono neanche rappresentate sul grafico, il cui asse delle ascisse si ferma a 40 eventi / notte e il cui asse delle ordinate è limitato a 66 dB(A). Adattando l'espressione algebrica fornita dalla (2) è tuttavia possibile stimare il valore di picco ammissibile secondo Griefhan, nell'ipotesi che se ne verificano 100 a notte. Secondo tale schema, si trova che i loro livelli di picco non devono superare 53 dB, un valore ben inferiore a quello fornito dai risultati delle simulazioni.

La frequenza dei picchi e la loro intensità si traduce naturalmente anche in elevati valori dei livelli equivalenti. Come specificato in §2, l'uso di questi ultimi, benché prescritto dalle norme vigenti, mal si applica ad un fenomeno intermittente quale quello qui considerato perché nasconde dietro un valore medio energetico la specificità di questo tipo di disturbo. Vale tuttavia la pena di analizzare anch'essi perché l'insieme delle due linee produce un livello equivalente costantemente superiore a 65 dB(A), un valore superiore a quelli consentiti per legge nelle zone residenziali. Ma, ciò che aggrava la situazione, tale valore emerge per un ricettore posto a 643 m di distanza dalla linea storica e a 425 m dalla nuova linea AC, in ambo i casi ben al di là della cosiddetta fascia di pertinenza dell'infrastruttura ferroviaria, stimata usualmente pari a 200m per lato. I tracciati delle due linee mostrano casi di abitati notevolmente più vicini ad esse (nella zona di Bruzolo e nelle frazioni alte di Chianocco) e parimenti sottoposti a propagazione acustica libera: per essi l'impatto ambientale potrà essere ancora più catastrofico di quello calcolato per S. Didero.

A conclusione di quanto esposto, è evidente che nelle condizioni previste per linea ad alta capacità Torino – Lione la zona di forte impatto acustico non può essere stimata tra i 100 e i 200 metri per lato, come nella maggior parte dei casi di pianura. Le valutazioni che conducono a queste stime, oltre ad essere basate sull'uso del Leq come parametro di giudizio, si avvalgono di codici di calcolo che non tengono conto degli effetti tipici delle valli alpine.

### 4.3.3 Impatto acustico e possibili mitigazioni

L'intero calcolo è stato eseguito senza considerare interventi di mitigazione, barriere acustiche in particolare. Si ricorda qui, tuttavia, che la loro l'efficacia è massima per ricettori posti alla stessa quota delle sorgenti o più in basso, mentre decresce sensibilmente se questi sono in posizione elevata. Ciò per l'impossibilità di schermare la radiazione acustica verso l'alto, in particolare quella prodotta dai treni merci, il cui rumore nasce in misura significativa anche da regioni differenti dal contatto ruota – rotaia.

Per quanto detto nel §2 inoltre, è bene ricordare che si tratta di un tipo di impatto acustico di difficilissima mitigazione, perché l'incessante sequenza di picchi produce nelle popolazioni una forma psicologica di attenzione che si traduce nell'attesa del nuovo picco. In queste condizioni occorrerebbe abbattere il rumore al di sotto di quanto sarebbe necessario se esso fosse continuo per indurre gli abitanti a non farvi più caso ed a riprendere il sonno.

Le protezioni acustiche da predisporre sulla Torino – Lyon (barriere o altro) dovranno quindi essere in grado di abbattere sotto la soglia dei 53 dB non i livelli medi equivalenti del rumore notturno, bensì i livelli di picco, se si desidera evitare il ripetuto (e rapidamente definitivo) risveglio dei residenti. Se perfino il primo obiettivo (imposto sui Leq) è assai impegnativo, il secondo si configura probabilmente come impossibile, a meno di ricorrere a coperture integrali della linea.

## 5. Considerazioni conclusive

Lo studio qui presentato ha analizzato l'impatto acustico di una linea ad alta capacità in una valle alpina densamente popolata, dimostrandone le elevate criticità, nel caso di un tracciato a cielo aperto. I risultati presentati nei paragrafi precedenti sono senza dubbio datati, nella misura in cui riguardano un modello di esercizio accantonato nel 2006. Pur tuttavia, a dieci anni di distanza, una loro analisi fornisce spunti interessanti di analisi che permettono di orientarsi nei sempre più tortuosi dibattiti riguardo all'opportunità di costruire una nuova linea AC. Ci sono a nostro avviso due spunti di riflessione. Il primo riguarda nuove ipotesi di tracciato che non prevedano il transito dei treni in galleria nella bassa val Susa, la cosiddetta soluzione 'Low-Cost'. La seconda riguarda l'attendibilità del modello di esercizio allora analizzato basato su stime di flussi di traffico merci che, a dieci anni di distanza, si sono rivelate del tutto inattendibili.

### 5.1 L'impatto del progetto 'Low cost'

La valutazione dell'impatto della nuova linea mostra in modo inequivocabile cosa comporti realizzare un corridoio ad alta intensità di traffico in una valle densamente popolata. Nel caso in cui la linea si sviluppi a cielo aperto, l'impatto acustico sarebbe estremamente elevato. Causa ne sono l'alta frequenza di passaggi notturni e l'intensità dei livelli sonori massimi registrati in gran parte del fondo valle. In questo senso il problema si configura, per quanto riguarda gli effetti sulla popolazione, in modo del tutto analogo ai problemi di inquinamento acustico nelle vicinanze di innumerevoli aeroporti [17], che per queste ragioni sono costretti a interrompere il traffico nelle ore notturne. É

bene notare che la programmazione di tracce notturne é necessaria per raggiungere flussi di traffico sufficientemente elevati da giustificare la costruzione della linea. Per questi motivi nel definire i tracciati ci si é rapidamente orientati ad interrare gran parte della linea, prevedendo decine di chilometri di gallerie, dapprima in sinistra idrografica e attualmente nella destra idrografica.

La crisi economica e l'allarme per il nostro crescente debito pubblico rendono quantomeno incerto il piano di finanziamento dell'intera opera, il cui costo secondo stime indipendenti [18] si aggirerebbe nel migliore dei casi attorno ai 17 miliardi di euro. A fronte di questa incertezza si avanza con sempre più insistenza l'ipotesi di un tracciato 'Low-Cost' [19], che fondamentalmente prevede la realizzazione del solo tunnel di base tra Susa e St. Jean di Maurienne e utilizzerebbe pertanto la linea storica per tutta la tratta della bassa valle. Non é dato sapere quanto questa ipotesi sia accreditata nelle sedi competenti o quanto sia figlia di fantasie della carta stampata che spesso animano le campagne di comunicazione sul tema. Nel dubbio, pensiamo sia utile ribadire che tale progetto risulterebbe sostanzialmente incompatibile con una distribuzione diffusa di abitazioni residenziali. Per essere sintetici potremmo dire che tali livelli di rumore notturno impedirebbero il sonno a gran parte della popolazione. E laddove non si riesce a dormire, difficilmente si riesce a vivere.

## 5.2 Sull'attendibilità del modello di esercizio

Le criticità dell'opera in sintesi sono intrinsecamente legate alla alta frequenza dei passaggi nelle ore notturne, imposte da un modello di esercizio che doveva fare fronte ad una domanda di trasporto, al 2030, di circa 40 milioni di tonnellate anno. Tale cifra derivava da stime dell'evoluzioni del flusso di traffico dell'allora Alpetunnel (ora Lyon Turin Ferroviaire) che ne prevedevano un rapidissimo incremento [20], tale da saturare in pochi anni la linea storica e da rendere impellente la costruzione della nuova. A circa quindici anni di distanza, senza discutere le ipotesi fatte nell'elaborare i modelli di traffico, non possiamo esimerci dal confrontare l'andamento dei flussi previsti con l'andamento rilevato negli anni seguenti.

Il confronto é presentato nella figura 8, e mostra, per usare un eufemismo, una discrepanza notevole tra dati misurati e simulati. Tale crescita avrebbe dovuto manifestarsi a seguito di una domanda spontanea di trasporto su ferro, indotta da ragioni oscure alla maggior parte degli addetti ai lavori, tanto da suscitare notevoli critiche. Tra queste riteniamo istruttivo ricordarne una delle più autorevoli, quella espressa del Conseil Général des Ponts et Chaussées, la cui commissione nel valutare il progetto concludeva affermando "innanzitutto che gli studi condotti da Alpetunnel (i proponenti, oggi la Lyon Turin Ferroviaire, ndr) si fondano su un metodo opinabile: le ipotesi sull'evoluzione del traffico merci sono particolarmente ottimiste.. [...] la valutazione delle esternalità porta a sovrastimare la redditività socio-economica del progetto" [21].

Il risultato é che, al 2010 la previsione si é dimostrata pari a circa 10 volte il flussi di traffico effettivamente rilevato, il cui valore scende con regolarità dalla fine degli anni '90 [22].

Per questi motivi, di fronte alla una dose di allarmismo testé espressa riguardo all'impatto potenziale di una soluzione 'low-cost', riteniamo doveroso esprimerne una ben maggiore di scetticismo, riguardo alla possibilità che tali volumi di traffico passino effettivamente per la bassa val di Susa nei

prossimi 20/30 anni, inficiandone il tenore di vita degli abitanti. A fronte di questi dati, la nostra preoccupazione non é tanto volta ai disturbi del sonno dei malcapitati residenti nell'area, quanto ai nefasti effetti che potrà avere sul bilancio pubblico [23] la spesa elevata per un progetto i cui benefici, a vent'anni dalla sua concezione, risultano essere difficilmente dimostrabili [22].

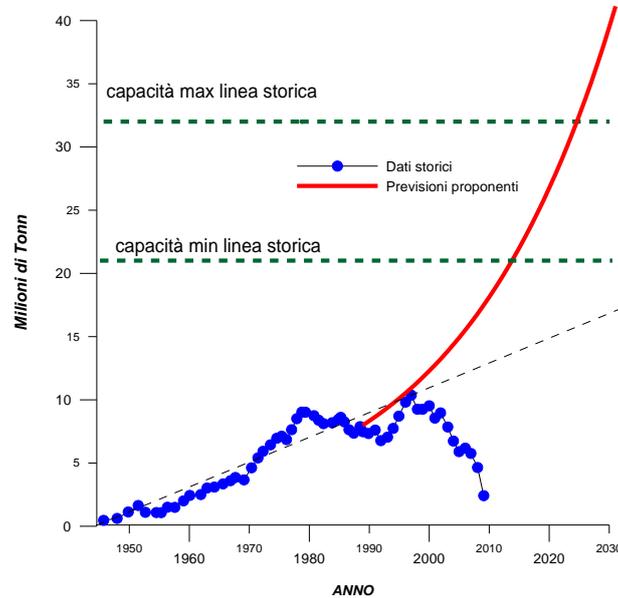


Figura 8: Confronto tra stime dei flussi di traffico su ferro elaborate dai proponenti dell'opera alla fine degli anni '90 (in rosso) e andamenti rilevati (in blu) [20].

## Bibliografia

- [1] Chiocchia. G, Cancelli C., Clerico M., "Studio dell'inquinamento acustico nella bassa Val Susa", Rapporto finale contratto di ricerca CMBVS-DIASP, Politecnico di Torino, (2002).
- [2] Cancelli C., Chiocchia G., "Akustische Auswirkungen des Neubaus einer Hochleistungsbahnstrecke", NTS n. 81, DIASP, Politecnico di Torino, (1999).
- [3] Stull R.B., "An Introduction to Boundary Layer Meteorology", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, (1988).
- [4] Kalivoda M.T., Steiner J.W., "Taschenbuch der angewandten Psychoakustik", Springer, (1998).
- [5] Kryter K.D., "Physiological, psychological and social effects of noise", NASA RP, 1115, (1984).
- [6] Berglund B, Berglund U, Lindvall T. , "Scaling loudness, noisiness and annoyance of aircraft noise", J. Acoust. Soc. Am. 27 (2), 930-934 (1975).
- [7] Moehler U., "Community response to railway noise: a review of social surveys", J. Sound Vib., 120 (2), 321-332 (1988).

- [8] Robinson D.W., "Concept of noise pollution level", NPL Aero Rep. Ac., 38, British A.R.C. (1969).
- [9] Griefahn B., "Sleep disturbances related to environmental noise", *Noise Health*, 4 (15), 57-60 (2002).
- [10] Fields J.M., Marchand L., "An updated catalogue of 521 social surveys of residents' reactions to environmental noise (1943-2000)", NASA/CR, 2001, 211257, (2001).
- [11] Vallet M., Gagneux J.M., Blanchet V., Favre B., Labiale G., "Long term sleep disturbance due to traffic noise", *J. Sound Vib.*, 90, 173-191 (1983).
- [12] Vernet M., "Effect of train noise on sleep for people living in houses bordering the railway line", *J. Sound Vib.* 66 (3), 483-492, (1979).
- [13] Osada Y., "Experimental study on the sleep interference by train noise", *Bulletin of Institute of Public Health*, (1974).
- [14] Griefahn B., "Research on noise and sleep: present state", in *Noise as public health problem* Edts. Berglund B., Lindvall T. (5), Swedish Council for Building Research, 17-20 (1990).
- [15] Barisikov B., King III W.F., On the sources of wavyside noise generated by high-speed trains. *J. Sound Vibr.*, 66, 311-332 (1987).
- [16] *Berechnung des Schallemission durch Schienenverkehr*, ÖAL-Richtlinie Nr.30, 2. Ausgabe, September 1995, Österreichisches Arbeitsring für Lärmbekämpfung.
- [17] Hall F. L., Birnie S. E., Taylor S. M., Palmer J. E., "Direct comparison of community response to road traffic noise and to aircraft noise", *J. Acoust. Soc.Am.* 70 (6), 1690-1698
- [18] Debernardi A., Grimaldi R., Beria P. (2011), Cost benefit analysis to assess modular investment: the case of the New Turin-Lyon Railway, presented at "Contemporary Issues in CBA in the Transport Sector", Workshop on March 16, 2011. Centre for Transport Studies (KTH), Stockholm (Sweden)
- [19] Tropeano, M., Tav, c'è l'accordo sul progetto low cost, *La Stampa*, Cronache 30/01/2012.
- [20] A. De Bernardi, A. Tartaglia, 2008, *Ferrovie Alpine ragionevoli ed Efficienti*, 17/06/2008
- [21] Documento N°2002-M-026-01 de "Inspection générale des finances" e N°2002-0190-01 de "Conseil Général des Ponts et Chaussées", RAPPORT D'AUDIT sur LES GRANDS PROJETS D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT
- [22] Beria P., Grimaldi R., An early evaluation of italian high-speed projects, *TemaLab*, ISSN 1970-9870 Vol 4 - No 3 - settembre 2011 - pagg. 15-28.
- [23] Corte dei Conti (2009), *Relazione sul risultato del controllo eseguito sulla gestione finanziaria di Rete Ferroviaria Italiana (R.F.I.) S.p.A. per l'esercizio 2007*. Delibera 44-09.