

S.F.T.R.F. S.A.
Société Française du Tunnel du Fréjus
S.I.T.A.F. S.p.A.
Società Italiana Traforo Autostradale Fréjus

TRAFORO AUTOSTRADALE DEL FREJUS
GALLERIA DI SICUREZZA
TUNNEL ROUTIER DU FREJUS
GALERIE DE SECURITE

PROGETTO DEFINITIVO 2006
PROJET 2006

VENTILAZIONE IN FASE DI CANTIERE /
VENTILATION EN PHASE DE CHANTIER
Relazione tecnica / Note technique

LOMBARDI SA
INGENIEURS-CONSEILS



INDICE

	pagina
1. INTRODUZIONE	1
1.1 Inquadramento generale	1
1.2 Obiettivi generali	2
1.3 Documentazione di riferimento	3
1.4 Riferimenti normativi	4
1.5 Analisi delle fasi precedenti del progetto	4
1.6 Composizione del progetto definitivo	5
2. PRINCIPI GENERALI	5
2.1 Galleria di sicurezza	5
2.2 Esigenze della ventilazione	5
2.3 Cantiere	6
2.4 Traforo	7
2.5 Rifugi 7	
2.6 Stazioni Tecniche	7
2.7 Laboratorio IN2P3	8
2.8 Sicurezza	8
2.8.1 Principi	8
2.8.2 Sicurezza dei rifugi	8
2.8.3 Sicurezza del cantiere	9
3. BASI DI DIMENSIONAMENTO	10
3.1 Ventilazione della galleria di sicurezza nella fase di scavo	10
3.2 Raffreddamento della galleria di sicurezza nella fase di scavo	14
3.2.1 Definizione della potenza richiesta per il raffreddamento di cantiere	14
3.2.2 Condizioni Ambientali	16
3.2.3 Concetto generico del raffreddamento	16
3.3 Ventilazione della galleria di sicurezza nella fase di finitura	18

3.4	Ventilazione dei rifugi e della cabina di sopravvivenza	19
4.	PRINCIPI COSTRUTTIVI	20
4.1	Ventilazione della galleria di sicurezza in fase di scavo	20
4.2	Raffreddamento della galleria di sicurezza in fase di scavo	22
4.2.1	Unità di raffreddamento	23
4.2.2	Raffreddamento diretto della fresa	24
4.2.3	Torri di raffreddamento	24
4.3	Ventilazione della galleria di sicurezza in fase di finitura	25
4.4	Ventilazione dei rifugi	25

TABLE DE MATIERES

	Page
1. INTRODUCTION	27
1.1 Contexte général	27
1.2 OBJECTIFS GENERAUX	28
1.3 Documentation de Référence	29
1.4 Références normatives	30
1.5 Analyse des phases du projet précédent	30
1.6 Contenu du projet définitif	31
2. PRINCIPES GENERAUX	31
2.1 Galerie de sécurité	31
2.2 Exigences de la ventilation	31
2.3 Le chantier	32
2.4 Le tunnel	33
2.5 Les abris	33
2.6 Les Stations Techniques	33
2.7 Laboratoire IN2P3	34
2.8 Sécurisations	34
2.8.1 Principes	34
2.8.2 Sécurité des abris	34
2.8.3 Sécurité du chantier	35
3. BASES DE DIMENSIONNEMENT	36
3.1 Ventilation de la galerie de sécurité en phase de creusement	36
3.2 Refroidissement de la galerie de sécurité en phase de creusement	40
3.2.1 Définition de la puissance requise pour le refroidissement du chantier	40
3.2.2 Condition de l'environnement	42
3.2.3 Concept Générique du Refroidissement	42

3.3	Ventilation de la galerie de sécurité en phase de finition	43
3.4	Ventilation des abris et de la cabine de survie	45
4.	PRINCIPES CONSTRUCTIFS	46
4.1	Ventilation de la galerie de sécurité en phase de creusement	46
4.2	Refroidissement de la galerie de sécurité en phase de creusement	48
4.2.1	Unités frigorifiques	49
4.2.2	Refroidissement direct du tunnelier	50
4.2.3	Tour de refroidissement	50
4.3	Ventilation de la galerie de sécurité en phase de finition	51
4.4	Ventilation des abris	51

1. INTRODUZIONE

1.1 Inquadramento generale

Il traforo autostradale del Fréjus collega il Piemonte con la Savoia (Bardonecchia - Modane), sull'asse Torino - Lione. La circolazione si svolge in maniera bi-direzionale su una larghezza carrabile di 9 metri e una lunghezza di 12'867.814 metri.

Il presente progetto costituisce la messa a punto del Progetto definitivo della galleria di sicurezza. Il progetto base, elaborato nel 2005, e precedente all'incendio del 4 giugno 2005 che ha causato la morte di due persone nel traforo, è stato sottoposto ad analisi in materia di sicurezza da parte del Comitato di Sicurezza, anche a seguito della lettera dei Ministri concernente la proposta *"di un diametro adatto della galleria che dovrà permettere in ogni evenienza la circolazione dei veicoli di soccorso in tutta sicurezza e agio"*.

Gli elementi principali, non compresi nel progetto definitivo del 2005, che derivano dallo studio effettuato e che confluiscono nel presente progetto definitivo sono i seguenti:

- Adeguamento del diametro della galleria di sicurezza da 5.50 a 8.00 m.
- Adeguamento del sistema di ventilazione, le SAS ai portali che permettevano la messa in sovrappressione di tutta la galleria di sicurezza, sono sostituite da una serie di acceleratori posati in volta lungo la galleria. È pure prevista un'estrazione in corrispondenza delle centrali B e C.
- Realizzazione di 5 by-pass per il passaggio dei veicoli di soccorso dalla galleria di sicurezza al traforo.

L'insieme degli altri aspetti progettuali del progetto definitivo del 2005 non sono stati modificati, in particolare;

- Le opere esterne ai portali.
- Gli impianti, ad esclusione della ventilazione, mantengono lo stesso standard previsto nel progetto definitivo 2005. Vengono unicamente adeguati per rispondere alle modifiche del genio civile.
- Il concetto del trasferimento degli impianti attuali dai locali tecnici del traforo (PHT) alle nuove stazioni tecniche della galleria di sicurezza.

- Il concetto di aggiornamento della GTC non è stato modificato, anche se ha dovuto essere adeguato in seguito alla modifica del concetto di ventilazione della galleria di sicurezza che impone un coordinamento con il sistema del traforo stradale.

La galleria di sicurezza sarà realizzata ad una distanza di ca. 50 m dal traforo principale, parallelamente a questo. Verranno realizzati complessivamente 34 rifugi, in media uno ogni 367 m, nei collegamenti trasversali tra il traforo e la galleria di sicurezza.

Durante i lavori di realizzazione della galleria di sicurezza previsti, che inizieranno nel 2008, la gestione del traforo autostradale non dovrà subire impedimenti. In ogni caso i lavori, sia di genio civile che dell'impiantistica, dovranno essere effettuati senza mettere in pericolo il corretto funzionamento del traforo stradale.

Questo rapporto descrive tutti gli aspetti legati al buon funzionamento della ventilazione in fase di realizzazione della galleria di sicurezza e dei rifugi.

1.2 Obiettivi generali

Il sistema di ventilazione comprende le seguenti componenti:

- Ventilazione in fase finale.
- Ventilazione in fase di cantiere, con messa a disposizione parziale per la sicurezza dei rifugi via via che questi sono realizzati.

La ventilazione di esercizio della galleria è trattata in un rapporto separato (vedi rapporto 6145.2-R-08).

Questo documento tratta:

- la ventilazione,
- la sicurezza di cantiere della galleria
- la sicurezza del personale

durante i lavori di realizzazione della galleria di sicurezza.

Per ragioni di sicurezza del traforo e del cantiere, è previsto di realizzare ed equipaggiare al più presto i rifugi nei rami di connessione tra traforo e galleria. La

distanza tra il fronte di scavo o la fresa ed il ramo aperto il più vicino sarà dell'ordine di 500 m al massimo.

1.3 Documentazione di riferimento

- [1] Circolare interministerielle no. 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 mètres.
- [2] Directive 2004/54/CE du parlement européen et du conseil du 29 avril 2004 concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen.
- [3] Tunnel routier du Fréjus, Construction de la galerie de sécurité. Equipement de ventilation galerie de sécurité. Document gs96RT14, 30.9.2002, MUSI.NET S.p.A.
- [4] Tunnel routier du Fréjus, Construction de la galerie de sécurité. Equipement de ventilation en phase de creusement. Document gs96RT23, 30.9.2002, MUSI.NET S.p.A.
- [5] Tunnel routier du Fréjus, Projet 2006, Galerie de sécurité. Equipement ventilation. Rapport 6145.2-R-08.
- [6] Les documents de l'AVP, en particulier:
Ventilation en phase de chantier, note technique (6145.0-R-7) 12/07/2004, Lombardi SA.
- [7] Le dossier "Basculement des PHT dans les stations techniques de la galerie de sécurité" (6145.0-R-24 et annexes) 30/09/2004, Lombardi SA.
- [8] Observations des sociétés concessionnaires sur l'avant-projet, 20/09/2004, SFTRF e SITAF.
- [9] Decreto del Presidente della Repubblica (DPR) 20 marzo 1956, n. 320, « Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro in sotterraneo »
- [10] Mise en œuvre de dispositifs de ventilation mécanique lors des travaux de creusement en souterrains de galeries, de puits ou de grandes excavations. Recommandation adoptée le 27 juin 1990 par le comité technique national des industries du bâtiment et des travaux publics.
- [11] Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés, « Mise en œuvre de dispositifs de ventilation mécanique lors des travaux de creusement en souterrains de galeries, de puits, ou de grandes excavations », Recommandation R352 adoptée le 27 juin 1990
- [12] AFTES (France), « Recommandations Relatives à la Ventilation des Ouvrages Souterrains en Cours de Construction », p. 76-106, Tunnels et ouvrages souterrains - N° 176, mars/avril 2003.

[13] SIA 196, « Ventilation des chantiers souterrains», 1998

[14] SITAF, Traforo Autostradale del Fréjus, Libro di documentazione dell'opera, ristampa 1990

1.4 Riferimenti normativi

Le principali norme da tener presente sono le seguenti:

- D.P.R. del 20.3.56 no 320 [9].
- Raccomandazione francese della cassa nazionale di assicurazione malattia dei lavoratori [11].
- AFTES: Raccomandazioni relative alla ventilazione delle opere sotterranee in fase di costruzione [12].

Si farà inoltre riferimento alla norma Svizzera SIA 196 "Ventilazione dei cantieri sotterranei" [13].

Per la ventilazione dei rifugi in fase cantiere è auspicabile rispettare per quanto possibile gli standard minimi generalmente applicabili. Il dimensionamento della ventilazione dei rifugi si atterrà dunque alla Circolare Interministeriale no. 2006-20 del 29 marzo 2006.

La possibilità di fuga verso l'esterno in caso di evento dovrà essere sempre garantita da tutti i rifugi accessibili agli utenti del traforo.

1.5 Analisi delle fasi precedenti del progetto

Le osservazioni fatte dal Committente sin dalla precedente fase AVP sono riassunte nel documento "Observations des sociétés concessionnaires sur l'avant-projet" emesso da SFTRF e SITAF il 20/09/2004 sono integrate nel presente rapporto.

In particolare si tratta dei seguenti punti:

- Introduzione di una condotta aspirante in caso di utilizzo di esplosivo.
- Specificare le modalità di ventilazione del cantiere dopo la fase di scavo.
- Esplicitare le ipotesi di calcolo della ventilazione.

1.6 Composizione del progetto definitivo

Il progetto definitivo 2006 per la ventilazione in fase di cantiere prende in conto i seguenti documenti:

Relazioni tecniche:

6145.2-R-05	Relazione tecnica
6145.2-R-06	Disciplinare descrittivo e prestazionale
6145.2-R-07	Computo metrico estimativo del genio civile

2. PRINCIPI GENERALI

2.1 Galleria di sicurezza

Le caratteristiche principali della Galleria di sicurezza del Traforo del Fréjus sono:

- Lunghezza 12'875 m
- Pendenza 0.54% (Francia → Italia)
- Diametro idraulico 8.1 m (fase di scavo all'esplosivo)
Minimo 9.0 m scavato, 8.0 m dopo il rivestimento (fase di scavo con fresatrice)
- Sezione ca. 70 m² (fase di scavo all'esplosivo)
ca. 70 m² scavato, 53 m² dopo rivestimento (fase di scavo con fresatrice)
- Altitudine 1'228 m.s.m entrata nord
1'298 m.s.m entrata sud

2.2 Esigenze della ventilazione

La realizzazione della galleria di sicurezza del traforo del Fréjus è un'opera d'importanza notevole, il cui termine è previsto 6 anni dopo l'inizio dei lavori. Nel corso dei lavori è essenziale non solo limitare al minimo i pericoli legati al cantiere, ma utilizzare al meglio tutte le opzioni possibili per migliorare al più presto la

sicurezza di cantiere e del traforo. Per questa ragione è previsto di realizzare il più presto i rifugi nei rami di collegamento tra il traforo e la galleria.

In fase di cantiere i collegamenti e la galleria in costruzione possono dare un certo incremento del livello di sicurezza per gli utenti del traforo. Inoltre costituiscono dei luoghi sicuri in caso d'incidente grave sul cantiere, in particolare in caso d'incendio. In fase di realizzazione la galleria può già essere utilizzata per l'intervento in caso di emergenza nel traforo. In caso di emergenza sul cantiere invece l'intervento può facilmente effettuarsi attraverso il traforo.

In termini di sicurezza bisogna comunque considerare il potenziale di pericolo legato all'interazione di un traforo in esercizio con un grande cantiere.

2.3 Cantiere

La fase di cantiere può essere suddivisa in due fasi principali:

- Fase di scavo;
- Fase di finitura, con realizzazione in particolare degli impianti.

Le esigenze legate alla ventilazione di cantiere durante la fase di scavo sono relativamente convenzionali. Il cantiere per la realizzazione dei rifugi seguirà il fronte di scavo ad una distanza dell'ordine di 500 m. I rifugi parzialmente realizzati costituiscono dunque una via di fuga ottimale per il personale di cantiere.

La fase di finitura della galleria richiede l'adozione di soluzioni diverse, che verranno trattate separatamente.

In entrambe le fasi l'esigenza primaria per la sicurezza di cantiere rispetto al traforo è d'impedire la penetrazione dei fumi nella galleria attraverso i rifugi già realizzati o in corso di realizzazione in caso d'evento nel traforo.

2.4 Traforo

È necessario evitare che l'aria proveniente dal cantiere possa penetrare nel traforo. Inoltre un incendio sul cantiere non deve compromettere il livello di sicurezza del traforo.

Più concretamente, durante la realizzazione dei rifugi bisogna limitare al minimo il pericolo d'incidenti. Gli elementi principali da tenere in considerazione sono certamente:

- il traffico di cantiere,
- il pericolo d'incidenti legato alle limitazioni della disponibilità della carreggiata o l'eventuale diminuzione della visibilità a causa delle polveri.

2.5 Rifugi

La Circolare Interministeriale Francese [1] contiene le prescrizioni precise per la ventilazione dei rifugi. Ci si limita qui ad un richiamo dei punti più importanti trattati per la galleria di sicurezza del Fréjus, trattata in [1]:

- Segnaletica adeguata;
- Mezzi adeguati per prevenire la penetrazione dei fumi nei rifugi, per esempio le porte;
- Mantenimento di una buona qualità dell'aria mediante un rinnovo di 3 ricambi/ora.
- La ventilazione dovrà essere automaticamente rinforzata durante l'occupazione di un rifugio.
- La circolazione dell'aria si farà nel senso rifugio-SAS-traforo in modo da mantenere l'atmosfera del rifugio in sovrappressione di ca. 80 Pa rispetto al traforo.

2.6 Stazioni Tecniche

Le nuove stazioni tecniche ST saranno in corso di realizzazione durante la fase di scavo della galleria. Le esigenze in termini di ventilazione e di sicurezza saranno dunque legate unicamente ad un cantiere di genio civile di tipo convenzionale.

2.7 Laboratorio IN2P3

Il laboratorio IN2P3 è ventilato tramite il canale di aria fresca del traforo e non pone restrizioni particolari in fase di cantiere. Va considerata la necessità di una separazione aerodinamica adeguata tra il laboratorio e la galleria in fase di scavo, che può essere soddisfatta utilizzando delle SAS provvisorie.

2.8 Sicurezza

2.8.1 Principi

Gli elementi principali per garantire la sicurezza della manodopera durante la realizzazione della galleria di sicurezza saranno:

- Chiusura fisica tra cantiere e rifugi, così come tra rifugi e traforo;
- Ventilazione di cantiere di tipo convenzionale;
- Ventilazione dei rifugi necessaria a generare una sovrappressione all'interno dei rifugi rispetto sia al traforo che al cantiere della galleria. L'aria fresca sarà fornita tramite una condotta di aria compressa interrata lungo la galleria di sicurezza;
- Messa a disposizione di una cabina di sopravvivenza in prossimità del fronte di scavo, rifornita di aria fresca tramite la stessa condotta di aria compressa.
- Dotazione minima ma funzionale degli equipaggiamenti di sicurezza all'interno dei rifugi.

2.8.2 Sicurezza dei rifugi

La sicurezza degli utenti nel traforo in fase di cantiere sarà garantita in modo completamente analogo a quello della fase finale.

Dopo il completamento dello scavo, ogni rifugio verrà chiuso tramite tre porte:

- Una porta tra il traforo e il SAS;
- Una porta tra il SAS e il rifugio;

- Una porta scorrevole tra il rifugio e la galleria.

La ventilazione sarà garantita da un'apposita condotta per l'aria compressa.

In tutti i rifugi in servizio in fase di cantiere devono già essere installati i seguenti impianti:

- Segnalazione adeguata delle vie di fuga;
- Illuminazione delle vie di fuga (segnalazione luminosa di fuga);
- Sistema di controllo per la regolazione della sovrappressione nel rifugio rispetto al traforo.
- Sistema di interruzione dell'aria compressa in caso di apertura della porta scorrevole per ridurre la pressione fra rifugio e galleria.
- Mezzi adeguati di comunicazione con gli utenti in fuga nei rifugi ed in corrispondenza delle uscite. Questa esigenza può essere soddisfatta utilizzando telefoni di cantiere;
- Alimentazione elettrica di emergenza per assicurare il funzionamento degli impianti di sicurezza indispensabili fino alla totale evacuazione degli utenti.

La possibilità di evacuazione degli utenti del traforo e l'intervento delle squadre di soccorso attraverso il cantiere della galleria dovranno essere garantite in qualsiasi situazione. I responsabili di cantiere dovranno prendere tutte le disposizioni a questo scopo e mettere a disposizione le risorse tecniche ed umane necessarie.

2.8.3 Sicurezza del cantiere

Verranno adottate tutte le misure di sicurezza convenzionali per un cantiere di questo tipo. Inoltre alla cabina di sopravvivenza nel cantiere vicino al fronte di scavo, i rifugi già scavati garantiranno la possibilità di protezione temporanea del personale, di evacuazione e d'intervento.

Per permettere l'accesso a questi rifugi dalla galleria di sicurezza anche in caso di una sovrappressione importante nel rifugio in rispetto alla galleria, che può raggiungere i 1'180 Pa [5], è previsto un sistema che permetta l'interruzione temporanea dell'alimentazione di aria compressa (durante l'apertura della porta) per ridurre il livello di sovrappressione. Questa procedura è dunque simile al sistema definitivo, che prevede lo spegnimento del ventilatore di aria fresca in caso d'accesso del rifugio dalla galleria di sicurezza.

3. BASI DI DIMENSIONAMENTO

Le disposizioni finali per la ventilazione dipendono fortemente dalle caratteristiche di cantiere, che allo stato attuale sono ancora in corso di definizione. Ci si limiterà dunque ad una descrizione relativamente sommaria delle misure adottate per garantire la ventilazione di cantiere.

3.1 Ventilazione della galleria di sicurezza nella fase di scavo

Il cantiere sarà ventilato in modo convenzionale, con una prima condotta in volta per l'immissione di aria fresca ed una seconda condotta aspirante per l'evacuazione dell'aria viziata e dei gas liberati dagli esplosivi.

La ventilazione di cantiere deve tener conto di due fasi distinte:

- Scavo convenzionale all'esplosivo fino ca. 1'600 m (caso più restrittivo, lato Francia);
- Scavo con fresatrice (TBM) fino a metà galleria, da ca. 1'600 m e 6'500 m.

Durante lo scavo con la TBM il rivestimento della galleria verrà realizzato da elementi in calcestruzzo prefabbricato e posati sotto lo scudo, con emissioni minime di polveri. I rifugi saranno invece realizzati all'esplosivo.

Il fabbisogno minimo di aria fresca richiesta è definito nella raccomandazione della AFTES [12], che prescrive una velocità di ritorno d'aria nella galleria fra 0.5 m/s e 1.5 m/s, per il comfort dei posti di lavoro.

Gli obiettivi principali della ventilazione sono i seguenti:

- Diluizione ed evacuazione di tutte le sostanze inquinanti, in particolare fumi Diesel, polveri, gas liberati dalle volate, eventuali gas provenienti dal terreno (radon, metano ecc.);
- Mantenimento di condizioni di comfort accettabili e conformi alle prescrizioni per le attività richieste (in particolare temperatura e umidità relativa sufficientemente basse).

Le principali esigenze per la diluizione e l'evacuazione delle sostanze inquinanti possono essere riassunte come segue:

- Apporto di aria fresca per il comfort del personale (ca. 1.5 m³/minuto, persona);
- Diluizione fumi Diesel: apporto di aria fresca corrispondente almeno a 40 l/s per CV;
- Volate: protezione del personale durante la fase di evacuazione dei fumi;
- Aspirazione ed evacuazione delle polveri;
- Altri gas e polveri sono meno penalizzanti, ma richiedono un monitoraggio continuo.

I criteri minimi di comfort possono esser riassunti come segue:

- Temperatura:
 - o Zone di lavoro (in particolare fronte): 26 °C [12]
 - o Zone di transito: 35 °C
- Umidità relativa:
 - o fino al 100%
- Velocità dell'aria:
 - o minimo 0.5 m/s
 - o massimo 1.5 m/s.

L'analisi è basata sulle seguenti assunzioni:

- Smarino con nastro trasportatore;
- Mezzi con motore Diesel dotati di filtro per le particelle;
- Assunzione di mezzi standard di cantiere (questa ipotesi dovrà essere verificata una volta conosciuta la dotazione di cantiere proposta dall'impresa)

Fabbisogno d'aria per kW 4.08 m ³ /min (secondo AFTES 2003)									
Methodo	Cantiere	Attrezzatura	N°	Motore	Potenza [kW]	fattore d'uso	fattore tempo	Fabbisogno d'aria [m ³ /s]	
								Diesel	Poussière
Scavo in tradizionale	Smarino	Pala gommata	1	Diesel	235	0.7	100%	11.18	10
	Smarino	Jumbo	1	Diesel	135	0.7	100%	6.42	
	CLS proiettato	Macchina per CLS	1	Diesel	85	0.7		4.04	
	CLS proiettato	Autobetoniera	1	Diesel	80	0.7		3.81	
	Rivestimento def.	Autobetoniera	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Rivestimento def.	Autopompa	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Finiture	Autobetoniera	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Finiture	Autopompa	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Transporto	Autocarro	2	Diesel	160	0.7	100%	7.61	
Scavo com fresa	Fresa	TBM	1	elect.			100%		10
	Finiture	Autobetoniera	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Finiture	Autopompa	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Transporto	Autocarro	4	Diesel	320	0.7	100%	15.23	
								22.8	10

Tab. 3.1 : Fabbisogno d'aria fresca e d'aspirazione minimale dovuto a mezzi in galleria.

La prescrizione francese [12] raccomanda di raccogliere ed evacuare le polveri, i fumi ed i gas contenuti nel terreno tramite un condotto di aspirazione verso l'esterno. La portata di captazione e di evacuazione dovrebbe corrispondere a 300 l/s per m² di sezione scavata.

Concretamente per lo scavo in tradizionale, un'aspirazione di 20 m³/s (70 m² x 0.3 m/s) è necessaria al fronte di lavoro. Nello stesso tempo, un flusso di ritorno di 35 m³/s (70 m² x 0.5 m/s) è richiesto per il comfort dei posti di lavoro.

La portata d'aria fresca complessiva da convogliare sino al fronte di lavoro tradizionale ammonta dunque a 55 m³/s (35 m³/s + 20 m³/s). Questa portata è sufficiente per la diluizione dei gas di scarico dei motori Diesel di una potenza complessiva sviluppata effettivamente di 700 CV (515 kW) [12]. Secondo una stima del numero e del tipo dei mezzi impegnati nel cantiere contemporaneamente, il fabbisogno di aria fresca reale ammonta a 48.3 m³/s per lo scavo in tradizionale e sarà dunque soddisfatto con la portata messa a disposizione (Tab. 3.1).

Per lo scavo con la TBM la sezione della galleria alla fresa è più piccola (53 m²), perché il rivestimento definitivo sarà installato immediatamente, composto dei conci prefabbricati. Le portate e potenze ammontano dunque ai valori seguenti:

	Avanzamento in tradizionale	Fresa
Aspirazione	20 m ³ /s	16 m ³ /s
Aria di ritorno	35 m ³ /s	27 m ³ /s
Spingente	55 m ³ /s	43 m ³ /s
Potenza Diesel ammissibile	1100 CV (810 kW)	860 CV (630 kW)
Potenza Diesel richiesta (Tab. 3.1)	710 kW	336 kW

Tab. 3.2 : Caratteristiche della ventilazione.

Per lo scavo dei collegamenti laterali, sarà utilizzato lo stesso sistema di condotti. Durante la fase di sparo ed evacuazione gas volata in un ramo di collegamento, le attività al fronte di scavo della galleria stessa devono essere interrotte l'aria fresca è portata tramite una biforcazione a T nel collegamento. Allo stesso modo, l'aria viziata è aspirata attraverso un elemento a T.

L'utilizzo di esplosivo pone delle restrizioni legate all'evacuazione dei gas tossici ed alla protezione del personale, che possono in principio essere risolte nel modo seguente:

- Durante la volata ed i 15 minuti che seguono, interruzione dell'aria fresca e dunque unicamente aspirazione dei fumi attraverso il condotto di estrazione;
- Utilizzo della cabina di sopravvivenza e dei rifugi per la protezione del personale durante la volata.

L'analisi mostra (Tab. 4.1 e Tab. 4.2) che una condotta spingente del diametro di 2.2 m e una condotta aspirante del diametro di 1.5 m di buona qualità (tipo S) sono adeguate per mantenere le portate richieste durante le due fasi della costruzione della galleria. Inoltre, una degradazione della qualità delle condotte fino al livello di tipo A è ugualmente accettabile, ma implica una potenza elevata per la ventilazione spingente sulla distanza massima di 6500 m come pura una perdita di oltre 50% dell'aria viziata aspirata al fronte per perdita nella galleria. In tale ipotesi l'aria ritornando verso il portale a piena sezione accumulerebbe quest'aria viziata e si caricherebbe con il suo contenuto di polveri.

3.2 Raffreddamento della galleria di sicurezza nella fase di scavo

La temperatura del massiccio supera i 30°C [1] sotto la punta del Fréjus e la dissipazione di calore dei mezzi del cantiere è molto importante, per cui si ritiene necessario prevedere un raffreddamento dell'aria.

3.2.1 Definizione della potenza richiesta per il raffreddamento di cantiere

Calore della roccia

La temperatura della roccia lungo il tracciato della galleria arriva fino a ca. 30-35°C. Il calcolo del calore trasmesso dalla roccia all'aria è complesso perché dipende, in ogni punto della galleria, dal tempo trascorso dal momento dello scavo, e diminuisce quindi dal fronte di scavo lungo il tracciato. Il calore risultante è dunque determinato in funzione dei parametri seguenti:

- Coefficiente di convezione locale (dipendente dal numero di Reynolds, dalla rugosità della parete e dal diametro)
- Temperatura iniziale della parete (temperatura del massiccio)
- Temperatura desiderata dell'aria
- L'età della galleria, funzione della velocità e della distanza dal fronte d'avanzamento.

Le proprietà fisiche medie della roccia considerate sono:

- Capacità termica: 900 J/(kg K)
- Conduttività: 2.3 W/(m K)
- Densità: 2600 kg/m³

Per tener conto di un possibile afflusso d'acqua calda attraverso la roccia, una conduttività effettiva tre volte più elevata di 6.9 W/(m K) viene applicata nei calcoli transienti di scambio di calore.

Calore dissipato delle macchine motrici

Nel caso di scavo con fresa (TBM), quest'ultima rappresenta una sorgente di calore molto importante (Fig. 3.1). Ca. 60% della potenza assorbita serve per il distacco dei pezzi di roccia, riscaldandoli 40°C al di sopra della temperatura della roccia. Il 40% di potenza rimanente copre le perdite secondarie che devono essere dissipate direttamente dalla fresa. Queste perdite si sviluppano nei motori e nel sistema idraulico o rispettivamente nell'azionamento controllato a frequenza.

L'utilizzo temporale tipico di una fresa per lo scavo oscilla tra 30% e 50%. Il tempo rimanente è utilizzato, tra l'altro, per il suo spostamento, per l'approvvigionamento del materiale necessario e per la manutenzione. Tenendo conto di questi periodi di inattività, il raffreddamento richiesto per una fresa può essere adatto alla potenza della fresa ridotta del 50%. Il raffreddamento viene quindi dimensionato per la potenza media invece che per la potenza istantanea. Questo modo di procedere è giustificato in ragione dell'accumulazione temporale del calore dissipato nella roccia, che viene solo poco a poco trasmesso all'aria della galleria.

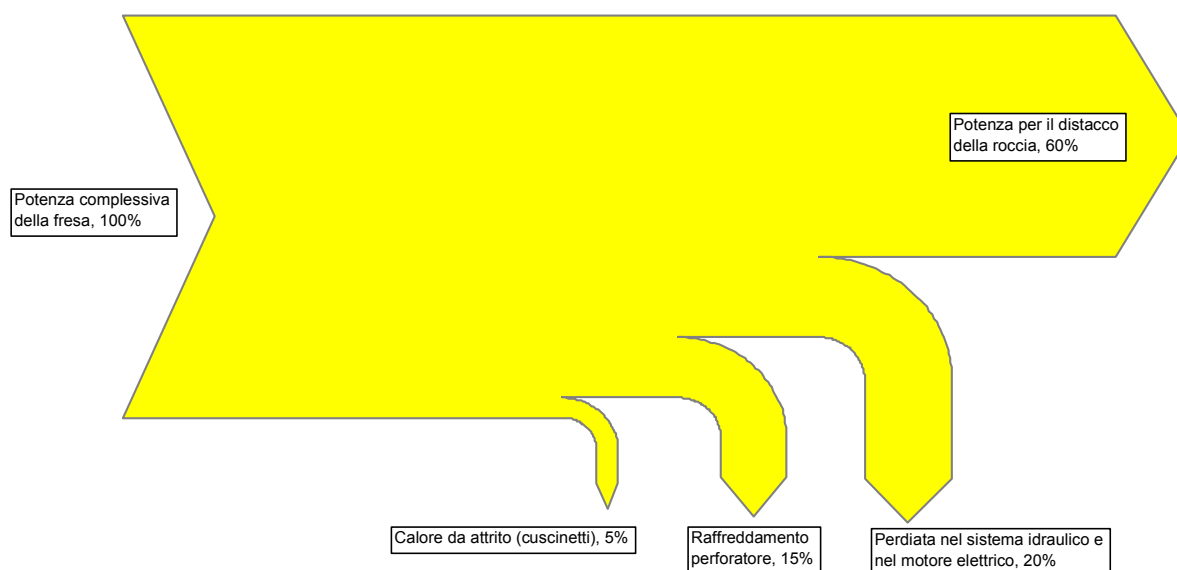


Fig. 3.1 : Bilancio energetico della fresa.

Il calore dissipato dalle altre attrezzature è più contenuto. Per i mezzi a motore Diesel valgono i valori di potenza meccanica elencati nella Tab. 3.1, che devono tuttavia essere corretti con un rendimento di ca. 30% per ottenere la potenza termica complessiva effettivamente dissipata.

Calore di idratazione del calcestruzzo

Quando il calcestruzzo fa presa si libera il calore di idratazione. Nel calcolo del raffreddamento viene considerata una frazione di cemento di 400 kg per m³ calcestruzzo. Ogni kg di cemento libera 380 kJ di calore.

Poiché il rivestimento della galleria stessa è fatto con dei conci prefabbricati, l'unico contributo di calcestruzzo al riscaldamento dell'aria nella fase con TBM risulta dal collegamento trasversale con il tunnel che è in fase di rivestimento.

Calore liberato durante lo smarino

La temperatura del materiale di scavo è di ca. 40°C superiore alla temperatura della roccia. Esso si raffredda parzialmente durante il disgaggio e lo smarino. Come ipotesi conservativa viene considerato un raffreddamento fino alla temperatura dell'aria della galleria.

3.2.2 Condizioni Ambientali

Si considera il seguente stato dell'aria prelevata dall'esterno:

- Temperatura esterna: 20°C
- Umidità iniziale: 100% (nessun effetto di raffreddamento per evaporazione è considerato)

Con queste condizioni l'effetto di raffreddamento dovuto alla ventilazione pura è marginale (per 43 m³/s, la potenza termica di raffreddamento ammonta solo a 215 kW). Si tratta dunque di un'ipotesi conservativa per il dimensionamento del sistema di raffreddamento.

3.2.3 Concetto generico del raffreddamento

Il raffreddamento deve garantire una temperatura massima di 26°C in corrispondenza dei posti di lavoro in galleria, come richiesto in [12].

Per la climatizzazione è previsto un sistema flessibile con macchine frigorifere e radiatori distribuiti in galleria in zone ove un raffreddamento è necessario (Fig. 3.2).

Le macchine sono munite di un gruppo frigorifero a liquido refrigerante che raffredda un circuito d'acqua nell'evaporatore. Quest'acqua fredda alimenta da parte sua il radiatore munito di un ventilatore per raffreddare l'aria della galleria. Il calore prodotto dal gruppo frigorifero viene trasmesso nel condensatore ad un circuito d'acqua di raffreddamento esterno con una temperatura d'entrata di ca. 25°C ed una temperatura d'uscita di ca. 35°C. Questo circuito d'acqua viene raffreddato fuori della galleria in una torre di raffreddamento.

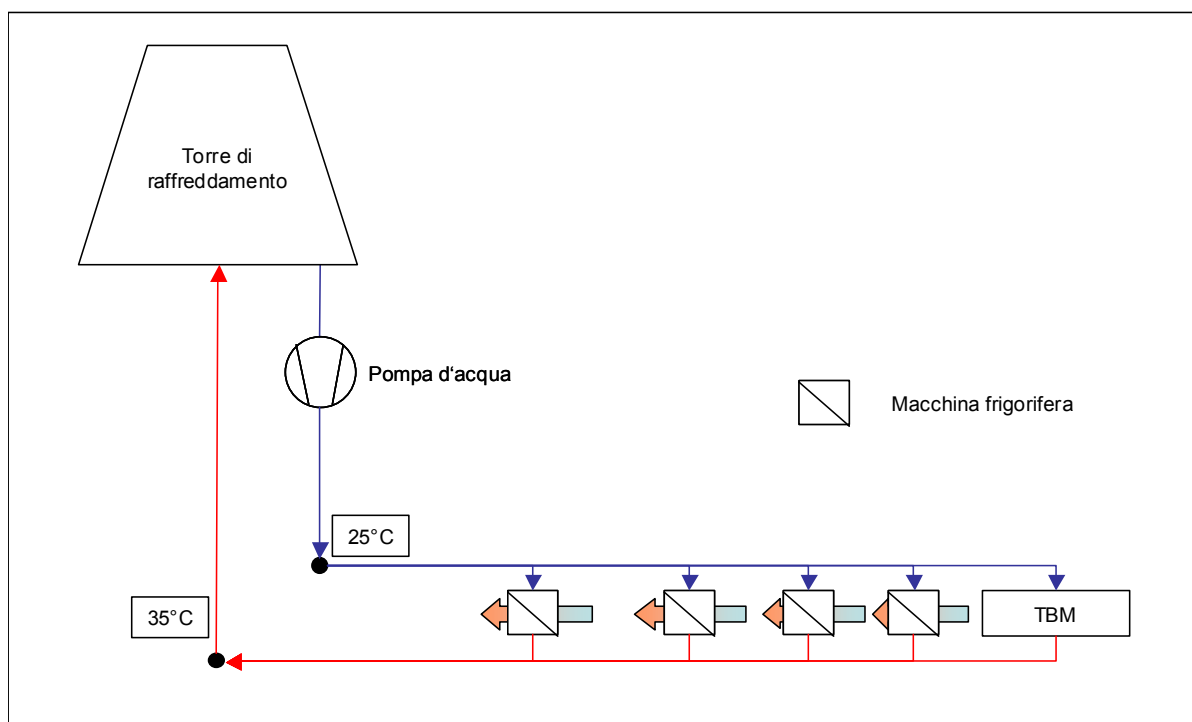


Fig. 3.2 : Concetto di raffreddamento.

Le dimensioni limitate delle unità permettono di installarle direttamente in galleria o nelle nicchie previste ca. ogni 400 m. Per compensare il calore importante liberato da una fresa, un numero adeguato di macchine frigorifere viene installato direttamente sul suo back-up.

3.3 Ventilazione della galleria di sicurezza nella fase di finitura

Nella fase di montaggio degli impianti nella galleria di sicurezza, occorre prevedere un tipo diverso di ventilazione, senza condotte. Per questa fase una parte degli acceleratori della ventilazione definitiva sarà già installata nella galleria.

Il fabbisogno di aria fresca nella fase di finitura può essere stimato in ca. 20-30 m³/s, corrispondente ad una velocità d'aria in galleria di ca. 0.5 - 0.7 m/s.

Si può stimare che la ventilazione naturale, legata principalmente alla differenza di pressione meteorologica tra i due imbocchi, sarà sufficiente durante ca. il 75% del tempo (stima effettuata sulla base dei dati del Traforo del Monte Bianco, Fig. 3.3 e Fig. 3.4).

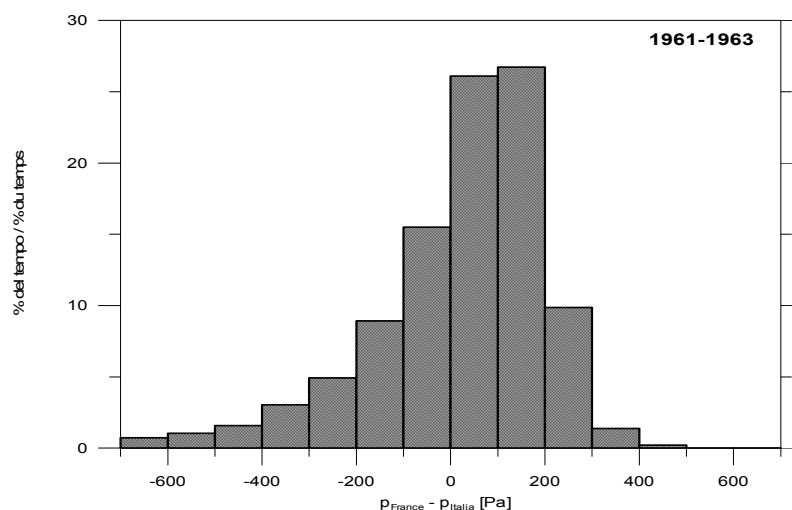


Fig. 3.3 : Pressione motrice Monte-Bianco.

In caso di circolazione naturale insufficiente, la messa in esercizio di un acceleratore con una spinta statica di 750 N sarebbe - in regime puramente stazionario - già sufficiente per assicurare la ventilazione. Comunque, per poter cambiare il regime di esercizio con facilità e rapidità come pure per garantire una certa ridondanza, un totale di due copie di acceleratori è previsto su ogni portale.

L'alimentazione elettrica può essere effettuata utilizzando quella di cantiere.

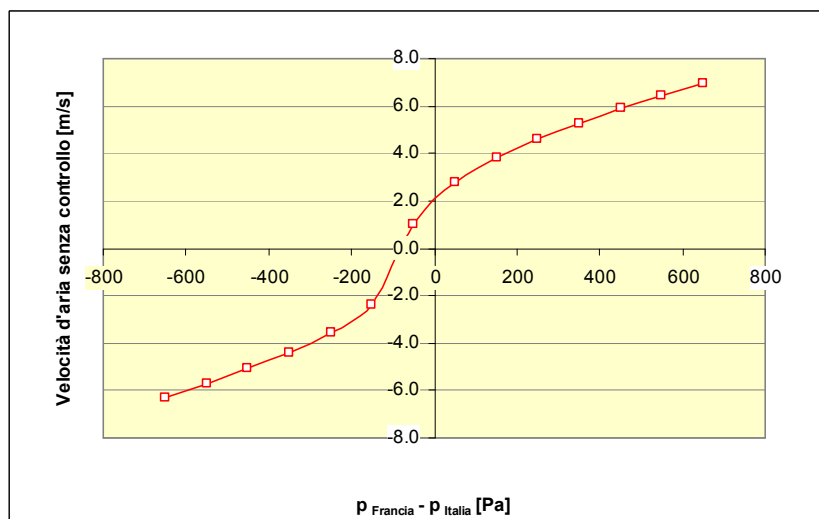


Fig. 3.4 : Velocità d'aria nella galleria di sicurezza in inverno ($dT=25^{\circ}\text{C}$ interiore-estere) in dipendenza della pressione motrice.

Dopo la realizzazione dell'impianto definitivo di ventilazione della galleria di sicurezza, sarà possibile ventilare come in condizioni normali di servizio.

3.4 Ventilazione dei rifugi e della cabina di sopravvivenza

La ventilazione dei rifugi in fase di costruzione sarà garantita da una condotta sotto pressione appositamente predisposta, che assicurerà anche l'approvvigionamento di aria fresca necessario alla sicurezza del personale della TBM e dunque l'alimentazione della cabina di sopravvivenza.

La configurazione lato traforo dei rifugi sarà identica alla configurazione finale, con una porta HCM 120, una serranda di regolazione motorizzata e una serranda taglia-fuoco.

Il fabbisogno d'aria fresca per al massimo 17 rifugi ed una cabina di sopravvivenza può essere stimato come segue:

- Rifugi (ventilazione sanitaria) massimo $14 \times 160 \text{ m}^3/\text{h}$ (ricambio del volume di rifugio 0.3 volte per ora).
- Rifugi (ventilazione incendio) massimo $3 \times 1590 \text{ m}^3/\text{h}$ (ricambio del volume di rifugio 3 volte per ora).

– Cabina di sopravvivenza max. 1 x 375 m³/h.

Per ridurre le dimensioni del sistema di aria compressa ad un livello ragionevole mantenendo tuttavia un grado di sicurezza elevato è necessario accettare una riduzione dello standard richiesto dalla Circolare Francese [1] in merito alla ventilazione dei rifugi in fase di cantiere.

La ventilazione sanitaria è prevista con un ricambio d'aria di 0.3 volta del volume invece di 3 volte, mentre la ventilazione in caso di evento è prevista con 1'590 m³/h (3 ricambi) invece di 2'500 m³/h per i tre rifugi i più vicini alla posizione d'evento.

	Esercizio normale	Evento galleria di sicurezza (cantiere)	Evento traforo
Rifugio (ventilazione sanitaria)	17 x 160 Nm ³ /h	14 x 160 Nm ³ /h	14 x 160 Nm ³ /h
Rifugio (ventilazione evento)	-	3 x 1'590 Nm ³ /h	3 x 1'590 Nm ³ /h
Cabina di sopravvivenza	1 x 375 Nm ³ /h	1 x 375 Nm ³ /h	-
Totale	4'970 Nm ³ /h	7'385 Nm ³ /h	7'010 Nm ³ /h

Tab. 3.3 : Fabbisogno d'aria compressa.

La ventilazione dei rifugi in fase di cantiere avverrà dunque attraverso la galleria di sicurezza, come in fase finale. La condotta di aria compressa sarà interrata per garantire una resistenza termica e meccanica elevata. Risulta dall'analisi (Tab. 4.5) che è richiesto un tubo di diametro interno di 200 mm con una pressione di alimentazione di 8 bar.

La pressurizzazione dei rifugi a 80 Pa di sovrappressione rispetto al traforo avviene tramite la serranda di regolazione ed il suo sistema di controllo previsto per la ventilazione definitiva.

4. PRINCIPI COSTRUTTIVI

4.1 Ventilazione della galleria di sicurezza in fase di scavo

Per lo scavo in tradizionale come pure durante la fase seguente con avanzamento con fresa, sono usate condotte spingente ed aspirante a diametro costante.

La potenza massima assorbita della ventilazione spingente ammonta a 575 kW (Tab. 4.2), mentre la potenza massima del ventilatore di aspirazione in prossimità del fronte di scavo sarà di 41 kW.

Sarà inoltre necessario prevedere, a dipendenza della configurazione precisa dei cantieri, una ventilazione secondaria per i cantieri per la realizzazione dei collegamenti trasversali, da realizzare con degli elementi di biforcazione sulle due condotte principali. Per poter disporre della possibilità di ventilare o il fronte di scavo principale oppure il cantiere del collegamento, delle serrande devono essere previste in corrispondenza delle biforcazioni delle condotte.

		SPINGENTE		ASPIRANTE	
Lunghezza	[m]	1600	1600	1600	1600
Portata al fronte [m³/s]		55.0	55.0	20.0	20.0
Potenza Diesel amiss.	[CV]	1100	1100		
Classe della condotta		S	A	S	A
No. condotte		1	1	1	1
No. segmenti		1	1	1	1
Diametro condotta [m]		2.2	2.2	1.5	1.5
Coeff. di attrito λ		0.015	0.018	0.015	0.018
Superficie di fuga attiva f*	[m ² /m ²]	5.0E-06	1.0E-05	5.0E-06	1.0E-05
Π_0		0.01	0.01	0.01	0.00
Fattore K		1.2E-03	5.5E-03	3.6E-03	1.7E-02
Fattore $t_{travers}$		0.01	0.02	0.01	0.00
Fattore t		0.44915	0.57134	0.53673	0.67141
A1 53 sinistra		-0.20	-0.13	-0.15	-0.04
A1 53 destra		-0.20	-0.13	-0.15	-0.04
diff sinistra-destra		0.00	0.00	0.00	0.00
ω		1.03	1.07	1.06	1.13
Portata al portale	[m ³ /s]	56.8	58.9	18.9	17.7
Velocità fine condotta	[m/s]	14.47	14.47	10.70	10.02
Velocità inizio condotta	[m/s]	14.93	15.50	11.31	11.30
Π_1		11	14	17	21
dp	[Pa]	1228	1523	1006	1117
Rendimento venti. globale		70%	70%	70%	70%
Potenza	[kW]	100	128	29	32

Tab. 4.1 : Dimensionamento della ventilazione per lo scavo in tradizionale.

		SPINGENTE		ASPIRANTE	
Lunghezza	[m]	6500	6500	6500	6500
Portata al fronte [m³/s]		43.0	43.0	16.0	16.0
Potenza Diesel amiss.	[CV]	860	860		
Classe della condotta		S	A	S	A
No. condotte		1	1	1	1
No. segmenti		1	1	1	1
Diametro condotta [m]		2.2	2.2	1.5	1.5
Coeff. di attrito λ		0.015	0.018	0.015	0.018
Superficie di fuga attiva f^*	[m ² /m ²]	5.0E-06	1.0E-05	5.0E-06	1.0E-05
Π_0		0.01	0.01	0.01	0.00
Fattore K		7.7E-02	3.7E-01	2.4E-01	1.2E+00
Fattore $t_{travers}$		0.01	0.02	0.01	0.00
Fattore t		0.80334	0.91889	0.89252	0.97037
A1 53 sinistra		0.12	0.42	0.32	0.75
A1 53 destra		0.12	0.42	0.32	0.75
diff sinistra-destra		0.00	0.00	0.00	0.00
ω		1.28	1.65	1.51	2.26
Portata al portale	[m ³ /s]	54.9	70.8	10.6	7.1
Velocità fine condotta	[m/s]	11.31	11.31	6.00	3.99
Velocità inizio condotta	[m/s]	14.43	18.62	9.07	9.03
Π_1		55	85	95	178
dp	[Pa]	3669	5687	1790	1491
Rendimento venti. globale		70%	70%	70%	70%
Potenza	[kW]	288	575	41	34

Tab. 4.2 : Dimensionamento della ventilazione per lo scavo con fresa.

4.2 Raffreddamento della galleria di sicurezza in fase di scavo

L'evoluzione delle diverse temperature nella galleria in fase di costruzione è illustrata in Fig. 4.1. In prossimità del fronte di scavo, la temperatura dell'aria in galleria è mantenuta a 26°C tramite le unità di raffreddamento installate nelle zone di lavoro ed in modo concentrato a valle della fresa. Si assume che l'aria fresca presa all'esterno a 20°C sia immediatamente riscaldata dal ventilatore della condotta spingente di ca. 5°C, a 25°C. La parete della galleria è raffreddata oppure riscaldata dall'aria della galleria in modo transiente in funzione della conduzione radiante del calore nella roccia.

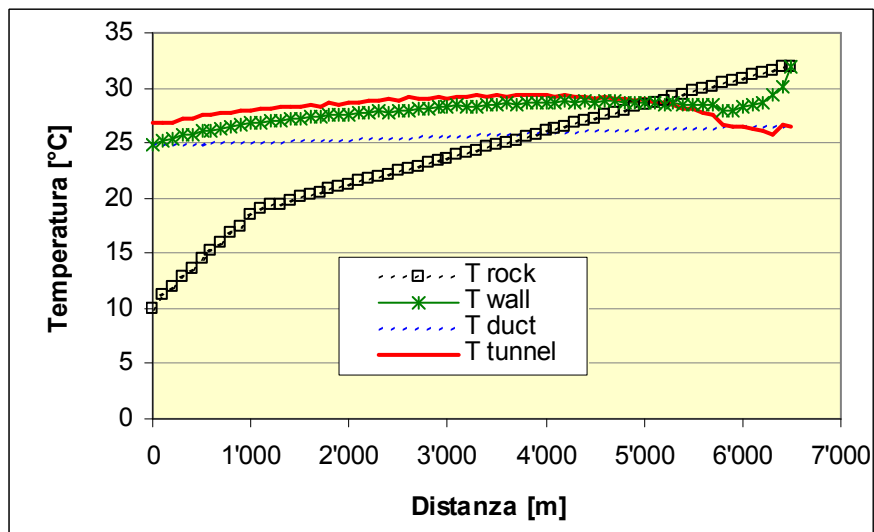


Fig. 4.1 : Evoluzioni di temperatura per l'avanzamento massimo con fresa.

Dati termici:

Calore trasmesso della roccia, globale:	0.02	MW	(calcolo transiente)
Calore dissipato dai veicoli:	1.33	MW	(400 kW _{mech} , 30% rendimento)
Calore dissipato dal calcestruzzo:	0.09	MW	(ca. 50 m ³ béton al giorno)
Calore dissipato dalla fresa:	2.30	MW	(80% della potenza di 5.7 MW a 50% del tempo)
Fabbisogno di raffreddamento:	3.72	MW	

4.2.1 Unità di raffreddamento

Queste apparecchiature sono disponibili con una potenza frigorifera compresa fra ca. 150 e 400 kW. Per il presente progetto vengono considerati apparecchi con una potenza relativamente elevata con le seguenti caratteristiche:

- potenza frigorifera unitaria 300 kW
- Fattore di rendimento 4
- Potenza elettrica 75 kW
- Temperatura d'entrata dell'acqua (condensatore) 25 °C
- Temperatura d'uscita dell'acqua (condensatore) 35 °C
- Portata d'acqua di raffreddamento 9 l/s
- Dimensioni complessive ventilatore/evaporatore ca. 7.0 x 1.0 x 1.0 m

- Dimensioni complessive unità frigorifera ca. 3.5 x 1.0 x 1.0 m

Le richieste per ogni cantiere sono dunque le seguenti:

- N° macchine di raffreddamento di 300 kW: 12
- Portata d'acqua di raffreddamento delle macchine: 108 l/s

4.2.2 Raffreddamento diretto della fresa

Portata d'acqua di raffreddamento

per i sistemi idraulici ed il motore

della fresa (20% della potenza nominale) ca. 25 l/s

4.2.3 Torri di raffreddamento

Le torri di raffreddamento richieste all'esterno sono disponibili sul mercato in dimensioni standardizzate. Vengono considerate delle torri di tipo evaporativo. Il loro dimensionamento dipende dalla potenza da dissipare, dalla temperatura dell'acqua in entrata ed in uscita come pure dalla temperatura ambiente a bulbo umido. Quest'ultima non supera i 20°C durante 95% del tempo nella regione del progetto, dunque una temperatura d'acqua dopo il raffreddamento di ca. 25°C può essere ottenuta.

Una torre con una potenza di raffreddamento di ca. 5 MW per 420 m³/h di acqua ed i parametri elencati sopra consuma ca. 55 kW per il suo ventilatore e misura ca. 6 x 6 m. Una tale torre può trattare ca. 13 unità di raffreddamento. Il flusso d'acqua evaporata nella torre ammonta a ca. 8 m³/h. Il fabbisogno effettivo d'acqua fresca è invece più elevato per impedire una concentrazione eccessiva di sali e minerali che causerebbero problemi di corrosione e depositi. Questa quantità dipende della configurazione della torre di raffreddamento scelta.

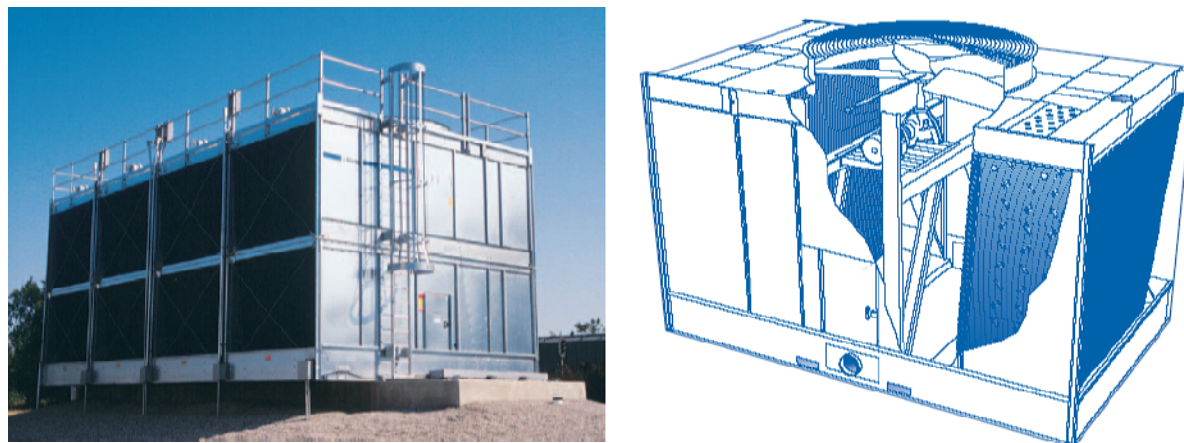


Fig. 4.2 : Esempi di torri di raffreddamento evaporative.

4.3 Ventilazione della galleria di sicurezza in fase di finitura

Si prevede l'installazione di 8 acceleratori con le caratteristiche seguenti:

- Diametro girante 800 mm
- Diametro esterno ca. 1000 mm
- Spinta statica ≥ 750 N
- Potenza assorbita 25 kW

4.4 Ventilazione dei rifugi

Le caratteristiche del sistema di ventilazione dei rifugi e della cabina di sopravvivenza possono essere definite come segue (Tab. 4.5):

- Lunghezza massimo 7'000 m
- Diametro 200 mm
- Pressione aria all'entrata 8 bar
- Perdite di carico 1.77 bar
- Potenza 90 kW

		Evento galleria [m3/h]							
N°	x rifugio [m]	Q rifugio	Q cabina	Q tot	p [bar]	ρ [kg/m3]	v [m/s]	Re _D	λ
0	0	0		7385	8.00	9.20	7.45	7.40E+05	2.49E-02
1	370	160		7385	7.87	9.05	7.58	7.40E+05	2.49E-02
2	740	160		7225	7.74	8.90	7.54	7.24E+05	2.49E-02
3	1110	160		7065	7.61	8.75	7.50	7.08E+05	2.49E-02
4	1480	160		6905	7.48	8.61	7.45	6.92E+05	2.49E-02
5	1850	160		6745	7.36	8.47	7.40	6.76E+05	2.49E-02
6	2220	160		6585	7.24	8.33	7.34	6.60E+05	2.49E-02
7	2590	160		6425	7.13	8.20	7.28	6.44E+05	2.49E-02
8	2960	160		6265	7.02	8.07	7.21	6.28E+05	2.49E-02
9	3330	160		6105	6.91	7.95	7.13	6.11E+05	2.49E-02
10	3700	160		5945	6.81	7.83	7.05	5.95E+05	2.49E-02
11	4070	160		5785	6.71	7.72	6.96	5.79E+05	2.49E-02
12	4440	160		5625	6.61	7.61	6.87	5.63E+05	2.49E-02
13	4810	160		5465	6.52	7.50	6.76	5.47E+05	2.49E-02
14	5180	160		5305	6.43	7.40	6.66	5.31E+05	2.49E-02
15	5550	1590		5145	6.35	7.30	6.54	5.15E+05	2.49E-02
16	5920	1590		3555	6.27	7.21	4.58	3.56E+05	2.49E-02
17	6290	1590		1965	6.23	7.17	2.55	1.97E+05	2.49E-02
	6660	0	375	375					

Tab. 4.5 : Calcolo della perdita di carico nella condotta di aria compressa.

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte général

Le Tunnel routier du Fréjus relie le Piémont à la Savoie (Bardonnèche Modane), sur l'axe Turin - Lyon. La circulation s'y fait de manière bidirectionnelle sur une largeur de la chaussée de 9 mètres et sur une longueur de 12867.814 mètres.

Le présent projet constitue la mise à jour du projet définitif de la galerie de sécurité. Le projet de base, élaboré en 2005 et donc avant l'incendie du 4 juin 2005, qui a provoqué le décès de deux personnes dans le tunnel, a été réévalué quant aux aspects de sécurité par le comité de sécurité, tenant compte de la lettre des ministres concernant la proposition « d'un diamètre adéquat de la galerie de sécurité afin de permettre en toute hypothèse la circulation des véhicules de secours en toute sécurité et commodité ».

Les éléments principaux non compris dans le projet définitif de 2005, mais pris en compte dans le projet définitif présent, sont les suivants :

- Adaptation du diamètre de la galerie de sécurité de 5.50 à 8.00 m.
- Adaptation du système de ventilation : les SAS aux portails pour la mise en surpression de la galerie sont substitués par une série d'accélérateurs en voûte le long de la galerie. En outre des centrales d'extraction massive sont prévues près des usines B & C.
- Réalisation de 5 by-pass pour le passage des véhicules de secours de la galerie au tunnel.

L'ensemble des autres aspects du projet définitif de 2005 n'a pas été modifié, en particulier :

- Les ouvrages externes aux portails.
- Les installations, à part la ventilation, maintiennent le standard prévu dans le projet définitif 2005. Elles sont seulement adaptées pour répondre aux modifications du génie civil.
- Le concept du basculement des installations actuelles des locaux techniques du tunnel (PHT) aux nouvelles stations techniques de la galerie de sécurité.
- La modification de la GTC selon les exigences de coordination entre les systèmes de ventilation du tunnel et de la galerie de sécurité.

Une galerie de sécurité sera réalisée parallèlement à une distance d'environ 50 m du tunnel routier. Des abris, 34 au total, seront aménagés dans les rameaux réalisés environ tous les 367 m entre la galerie et le tunnel routier.

Pendant les travaux de réalisation de la galerie de sécurité, qui commenceront en 2008, l'exploitation du tunnel routier ne devra pas être mise en cause. Tous les travaux, de génie civil comme des équipements, devront donc être réalisés sans mettre en péril le fonctionnement du tunnel routier.

Ce rapport décrit tous les aspects liés au bon fonctionnement de la ventilation en phase de réalisation de la galerie de sécurité et des abris.

1.2 OBJECTIFS GENERAUX

Le système de ventilation comprend les composantes suivantes :

- Ventilation en phase finale.
- Ventilation en phase de chantier, avec mise à disposition en modalité dégradée des abris dès que réalisés.

La ventilation en exercice de la galerie est traitée dans un rapport séparé (voir note technique 6145.2-R-08).

Ce document traite de :

- la ventilation,
- la sécurité du chantier de la galerie
- la sécurité des travailleurs

pendant les travaux de réalisation de la galerie de sécurité .

Pour des raisons de sécurité du tunnel et du chantier, il est prévu de réaliser et d'équiper les rameaux de connexion entre tunnel et galerie au plus tôt. La distance entre le front d'excavation ou le tunnelier et le rameau ouvert le plus proche sera de l'ordre de 500 m.

1.3 Documentation de Référence

- [1] Circulaire interministérielle no. 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 mètres.
- [2] Directive 2004/54/CE du parlement européen et du conseil du 29 avril 2004 concernant les exigences de sécurité minimales applicables aux tunnels du réseau routier transeuropéen.
- [3] Tunnel routier du Fréjus, Construction de la galerie de sécurité. Equipement de ventilation galerie de sécurité. Document gs96RT14, 30.9.2002, MUSI.NET S.p.A.
- [4] Tunnel routier du Fréjus, Construction de la galerie de sécurité. Equipement de ventilation en phase de creusement. Document gs96RT23, 30.9.2002, MUSI.NET S.p.A.
- [5] Tunnel routier du Fréjus, Projet 2006, Galerie de sécurité. Equipement ventilation. Rapport 6145.2-R-08.
- [6] Les documents de l'AVP, en particulier:
Ventilation en phase de chantier, note technique (6145.0-R-7) 12/07/2004, Lombardi SA.
- [7] Le dossier "Basculement des PHT dans les stations techniques de la galerie de sécurité" (6145.0-R-24 et annexes) 30/09/2004, Lombardi SA.
- [8] Observations des sociétés concessionnaires sur l'avant-projet, 20/09/2004, SFTRF e SITAF.
- [9] Decreto del Presidente della Repubblica (DPR) 20 marzo 1956, n. 320, « Norme per la prevenzione degli infortuni e l'igiene del lavoro in sotterraneo »
- [10] Mise en œuvre de dispositifs de ventilation mécanique lors des travaux de creusement en souterrains de galeries, de puits ou de grandes excavations. Recommandation adoptée le 27 juin 1990 par le comité technique national des industries du bâtiment et des travaux publics.
- [11] Caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés, « Mise en œuvre de dispositifs de ventilation mécanique lors des travaux de creusement en souterrains de galeries, de puits, ou de grandes excavations », Recommandation R352 adoptée le 27 juin 1990
- [12] AFTES (France), « Recommandations Relatives à la Ventilation des Ouvrages Souterrains en Cours de Construction », p. 76-106, Tunnels et ouvrages souterrains - N° 176, mars/avril 2003.
- [13] SIA 196, « Ventilation des chantiers souterrains», 1998

[14] SITAF, Traforo Autostradale del Fréjus, Livre de documentation de l'œuvre, réimprimée 1990

1.4 Références normatives

Les normes principales à prendre en considération sont les suivantes:

- D.P.R. del 20.3.56 no 320 [9]
- La recommandation française de la caisse nationale de l'assurance maladie des travailleurs salariés [11]
- AFTES: Recommandations relatives à la ventilation des ouvrages souterrains en phase de construction. [12]

On fera de plus référence à la norme Suisse SIA 196 « Ventilation des chantiers souterrains » [13].

Pour la ventilation des abris en phase chantier il est envisagé de respecter dans la mesure du possible les standards minimaux généralement applicables. Le dimensionnement de la ventilation des abris s'appuiera donc sur la Circulaire interministérielle no. 2006-20 du 29 mars 2006 [1].

La possibilité de fuite vers l'extérieur en cas d'événement devra être garantie à tout moment et depuis l'ensemble des abris accessibles aux usagers du tunnel.

1.5 Analyse des phases du projet précédent

Les observations des concessionnaires depuis la phase AVP précédente sont résumées dans le document "Observations des sociétés concessionnaires sur l'avant-projet" rédigé par SFTRF et SITAF le 20/09/2004 ont été intégrées dans ce rapport.

Les points principaux sont:

- Introduction d'une gaine d'aspiration en cas d'utilisation d'explosif.
- Spécification des modalités de ventilation après la phase de creusement.
- Spécification des hypothèses de calcul de la ventilation.

1.6 Contenu du projet définitif

Le projet définitif de la ventilation en phase de chantier prend en compte les documents suivants :

Note Techniques:

6145.2-R-05	Note technique
6145.2-R-06	Cahier des charges techniques Génie Civil
6145.2-R-07	Estimation des coûts du génie civil

2. PRINCIPES GENERAUX

2.1 Galerie de sécurité

Les caractéristiques principales de la galerie de sécurité du tunnel du Fréjus sont :

- Longueur 12'875 m
- Déclivité 0.54% (France -> Italie)
- Diamètre hydraul. 8.1 m (phase de creusement à l'explosif)
Min. 9.0 m excavé, 8.0 m après revêtement (phase de creusement avec tunnelier)
- Section 70 m² environ (phase de creusement à l'explosif)
70 m² excavé, 53 m² après revêtement (phase de creusement avec tunnelier)
- Elévation 1'228 m s.m. entrée nord
1'298 m s.m. entrée sud

2.2 Exigences de la ventilation

La réalisation de la galerie de sécurité du tunnel du Fréjus est une opération importante dont l'achèvement est prévu en six ans après commencement des travaux. Pendant les travaux il est essentiel non seulement de limiter au minimum les dangers liés au chantier, mais aussi d'utiliser au mieux toutes les options possibles

pour améliorer dès que possible la sécurité du chantier et du tunnel. Pour cette raison, il est prévu de réaliser au plus tôt les rameaux de jonction entre le tunnel et la galerie.

En phase de chantier, les rameaux et la galerie en construction peuvent déjà apporter une certaine amélioration du niveau de sécurité pour les usagers du tunnel. Ils constituent également des lieux sûrs en cas d'accident grave sur le chantier, en particulier en cas d'incendie. Pendant les travaux, la galerie de sécurité peut déjà être utilisée pour intervenir en cas d'urgence dans le tunnel. D'autre part, l'intervention en cas d'urgence sur le chantier peut se faire à travers le tunnel.

En termes de sécurité, il faut en tout cas considérer le potentiel de danger lié au « couplage » d'un tunnel en exploitation avec un grand chantier.

2.3 Le chantier

La phase de chantier peut être divisée en deux phases principales :

- Phase de creusement ;
- Phase de finition, qui comprend en particulier la réalisation des équipements.

Les exigences liées à la ventilation de chantier sont relativement conventionnelles. Le chantier pour la réalisation des abris suivra le front d'excavation à une distance de l'ordre de 500 m. Les abris partiellement réalisés constituent donc une voie d'évacuation optimale pour le personnel du chantier.

La phase de finition de la galerie exige l'adoption de solutions différentes, qui seront traitées séparément.

En termes de sécurité du chantier par rapport au tunnel, l'exigence primaire est d'empêcher qu'en cas d'événement dans le tunnel, des fumées puissent pénétrer dans la galerie via les abris déjà réalisés ou en cours de réalisation.

2.4 Le tunnel

Il est nécessaire d'éviter que de l'air provenant du chantier puisse pénétrer dans le tunnel. En outre, un incendie sur le chantier ne doit pas mettre en question le niveau de sécurité du tunnel.

Plus concrètement, pendant la réalisation des rameaux de connexion, il faut limiter au minimum le danger d'accident. Les éléments principaux à prendre en considération sont certainement :

- le trafic de chantier,
- le danger d'accident lié aux limitations de la disponibilité de la chaussée ou à l'éventuelle diminution locale de visibilité à cause des poussières.

2.5 Les abris

La Circulaire Interministérielle Française [1] contient des prescriptions précises pour la ventilation des abris. On se limitera ici à un rappel des points les plus importants pour la galerie de sécurité du Fréjus, traité dans le document [5]:

- Signalisation adéquate.
- Moyens adéquats pour prévenir la pénétration des fumées dans les abris, (par exemple portes).
- La qualité de l'air sera maintenue en permanence par un renouvellement du volume de l'abri trois fois par heure.
- La ventilation devra être automatiquement renforcée pendant l'occupation d'un abri.
- La circulation de l'air se fera dans le sens abri - sas - tunnel de manière à maintenir l'atmosphère de l'abri en surpression d'environ 80 Pa par rapport au tunnel.

2.6 Les Stations Techniques

Les nouveaux locaux techniques ST seront réalisés pendant les travaux de la galerie. Les exigences en termes de ventilation et de sécurité seront donc liées uniquement à un chantier de génie civil de type conventionnel.

2.7 Laboratoire IN2P3

Le laboratoire IN2P3 est ventilé par la gaine d'air frais du tunnel et n'entraîne pas de contraintes particulières en phase de chantier. Une séparation aéraulique adéquate entre laboratoire et galerie en phase de creusement s'impose, ce qui peut être réalisé en utilisant des SAS provisoires.

2.8 Sécurisations

2.8.1 Principes

Les éléments principaux permettant de garantir la sécurité de l'ouvrage pendant la réalisation de la galerie de sécurité seront :

- Fermeture physique entre chantier et abris, ainsi qu'entre abris et tunnel.
- Ventilation de chantier de type conventionnel.
- Ventilation des abris pour générer une surpression à l'intérieur des abris par rapport au tunnel et au chantier de la galerie. L'air frais sera fourni par une conduite d'air comprimé enterrée passant à travers la galerie de sécurité.
- Mise à disposition d'une cabine de survie près du front de travail, alimentée en air frais par la même conduite d'air comprimé.
- Dotation minimale mais fonctionnelle d'équipements de sécurité à l'intérieur des abris.

2.8.2 Sécurité des abris

La sécurité des usagers du tunnel en phase de chantier sera garantie de manière complètement analogue à celle de la phase finale.

Chaque abri, après achèvement de son creusement, sera fermé par trois portes :

- Une porte entre le tunnel et le SAS ;
- Une porte entre le SAS et l'abri ;
- Une porte coulissante entre l'abri et la galerie.

La ventilation sera garantie par une conduite d'air comprimé dédiée.

Les équipements suivants doivent déjà être installés dans tous les abris en service en phase de chantier :

- Signalisation adéquate des voies de secours.
- Éclairage des voies de secours (balisage lumineux de fuite).
- Système de contrôle pour la régulation de la surpression dans l'abri par rapport au tunnel.
- Système d'interruption de l'air comprimé en cas d'ouverture de la porte coulissante vers la galerie afin de réduire la pression entre l'abri et la galerie.
- Système de contrôle pour augmenter le débit d'air frais en cas d'occupation de l'abri.
- Moyens adéquats de communication avec les usagers en fuite dans les abris et au niveau des sorties. Cette exigence peut être satisfaite en utilisant des téléphones de chantier.
- Alimentation électrique d'urgence en mesure d'assurer le fonctionnement des équipements de sûreté indispensables, jusqu'à l'évacuation totale des usagers.

L'évacuation des usagers du tunnel et l'intervention des équipes de secours à travers le chantier de la galerie devront être possibles à tout moment. Les responsables du chantier devront prendre toute disposition à cet effet et mettre à disposition les ressources techniques et humaines nécessaires.

2.8.3 Sécurité du chantier

Toutes les mesures conventionnelles de sécurité pour un chantier de ce type seront mises en place. En plus de la cabine de survie dans le chantier près du front de travail, les abris déjà creusés permettront au personnel d'être protégé temporairement, évacué et secouru si nécessaire.

Afin de permettre l'accès de ces abris depuis la galerie de sécurité même en cas d'une surpression importante dans l'abri par rapport à la galerie, qui peut monter jusqu'à 1'180 Pa [5], un système permettant l'arrêt temporaire (pendant l'ouverture de la porte) de l'alimentation en air frais/comprimé est prévu pour réduire le niveau de surpression. Cette mesure est donc similaire au système défi-

nitif conçu dans ce but, qui prévoit un arrêt du ventilateur d'air frais de l'abri en cas d'accès depuis la galerie.

3. BASES DE DIMENSIONNEMENT

Les dispositions finales pour la ventilation dépendent fortement des caractéristiques du chantier, qui à l'heure actuelle sont encore en cours de définition. On se limitera donc à une description relativement sommaire des moyens mis en place pour garantir la ventilation du chantier.

3.1 Ventilation de la galerie de sécurité en phase de creusement

Le chantier est ventilé de manière conventionnelle, avec une première conduite en voûte pour l'apport d'air frais et une deuxième conduite aspirante pour l'évacuation de l'air vicié et des gaz de tir.

La ventilation du chantier doit tenir compte de deux phases distinctes :

- Creusement conventionnel à l'explosif jusqu'à environ 1'600 m (cas plus contraignant, côté France);
- Creusement avec tunnelier (TBM) jusqu'au milieu de la galerie, d'environ 1'600 à 6'500 m.

Pendant le creusement avec TBM, le revêtement de la galerie sera réalisé par des éléments en béton préfabriqués à l'extérieur et mis en place sous le bouclier, avec des émissions minimales de poussière. Les rameaux seront par contre réalisés à l'explosif.

Le débit d'air frais minimal requis est défini dans la recommandation de l'AFTES [12], qui exige une vitesse de retour d'air en galerie entre 0.5 m/s et 1.5 m/s pour le confort des ateliers.

Les objectifs principaux de la ventilation sont les suivants:

- Dilution et évacuation de toutes les substances polluantes, en particulier les émissions diesel, les poussières, les gaz libérés par les volées, éventuellement les gaz qui pénètrent à travers le terrain (radon, méthane etc.) ;

- Maintien d'un niveau de confort acceptable et conforme aux prescriptions pour les activités demandées (en particulier température et humidité relative suffisamment basses).

Les exigences principales pour la dilution et l'évacuation des substances polluantes peuvent être résumées de la façon suivante :

- Injection d'air frais pour assurer le degré de confort du personnel (environ 1.5 m³/minute, personne) ;
- Dilution des émissions Diesel: injection d'air frais correspondant au moins à 40 l/s par CV ;
- Volées: protection du personnel pendant la phase d'évacuation des gaz de tir.
- Aspiration et évacuation des poussières ;
- Les autres gaz sont moins pénalisants, mais exigent néanmoins un contrôle continu.

Les critères minimaux de confort peuvent être résumés de la façon suivante:

- température:
 - Zone de travail (en particulier le front d'attaque): 26 °C [12]
 - Zone de passage: 35 °C
- humidité relative:
 - jusqu'à 100%
- vitesse de l'air:
 - minimum 0.5 m/s
 - maximum 1.5 m/s.

Le concept est basé sur les hypothèses suivantes:

- Marinage avec bandes transporteuses;
- Engins équipés de moteur diesel munis de filtres à particules;
- Assomption d'utilisation d'engins standards (à vérifier la compatibilité avec l'équipement du chantier proposé par l'entrepreneur)

Besoin d'air par kW 4.08 m ³ /min (selon AFTES 2003)									
Secteur du Tunnel	Chantier	Equipment	N°	Moteur	Puissance [kW]	Facteur de charge	facteur temps	Besoin en air frais et aspiration [m ³ /s]	
								Diesel	Poussière
Attaque traditionnel	Marinage	Appareil chargeur	1	Diesel	235	0.7	100%	11.18	
	Marinage	Boulonneuse, Jumbo	1	Diesel	135	0.7	100%	6.42	
	Béton projeté	Projecteur beton	1	Diesel	85	0.7		4.04	10
	Béton projeté	Autobetoneuse	1	Diesel	80	0.7		3.81	
	Revetement définitif	Autobetoneuse	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Revetement définitif	Autopompe	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Finitions	Autobetoneuse	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Finitions	Autopompe	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Transport	Camion	2	Diesel	160	0.7	100%	7.61	
									48.3
Attaque tunnelier	Tunnelier	TBM	1	elect.			100%		10
	Finitions	Autobetoneuse	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Finitions	Autopompe	1	Diesel	80	0.7	100%	3.81	
	Transport	Camion	4	Diesel	320	0.7	100%	15.23	
								22.8	10

Tab. 3.1 : Besoin d'air frais et d'aspiration minimale selon les engins dans la galerie.

La prescription française [12] recommande de capter et d'évacuer les poussières, les gaz de tirs et les gaz contenus dans le terrain par un conduit d'aspiration vers l'extérieur. Ce débit de captage et d'évacuation devrait correspondre à 300 l/s par m² de section excavée.

Concrètement pour le creusement en traditionnel, une aspiration de 20 m³/s (70 m² x 0.3 m/s) est alors nécessaire au front de travail. En même temps un courant de retour de 35 m³/s (70 m² x 0.5 m/s) est requis pour le confort des ateliers.

Le débit d'air frais à convoyer jusqu'au front de travail traditionnel par la conduite soufflante se monte donc à 55 m³/s (35 m³/s + 20 m³/s). Ce débit suffit pour diluer les gaz d'échappement des moteurs Diesel d'une puissance totale de 700 CV (515 kW) effectivement développée [12]. Selon une estimation du nombre et du type des engins travaillant simultanément dans le chantier, le besoin d'air frais réel se monte à 48.3 m³/s pour l'attaque en traditionnel et sera donc satisfait par le débit mis à disposition (Tab. 3.1).

Pour le creusement avec TBM, la section de la galerie en aval du tunnelier est moindre (53 m²), parce-que le revêtement définitif sera tout de suite mis en place, constitué de voussoirs préfabriqués. Les débits et puissances se montent donc aux valeurs suivantes :

	Avancement en traditionnel	tunnelier
Aspiration	20 m ³ /s	16 m ³ /s
Air de retour	35 m ³ /s	27 m ³ /s
Soufflage	55 m ³ /s	43 m ³ /s
Puissance Diesel admissible	1100 CV (810 kW)	860 CV (630 kW)
Puissance Diesel requise (Tab. 3.1)	710 kW	336 kW

Tab. 3.2 : Caractéristiques de la ventilation.

Pour le creusement des rameaux, le même système de conduite de la galerie sera utilisé. Durant la phase de tir et évacuation du gaz dans le rameau, les activités au front d'attaque de la galerie même doivent donc cesser et l'air frais est porté par une bifurcation dans le rameau. De même, l'air vicié est aspiré par un élément de bifurcation.

L'utilisation d'explosif pose des contraintes liées à l'évacuation des gaz toxiques et à la protection du personnel, qui peuvent être résolues de la manière suivante:

- Pendant une volée et durant les 15 min suivants, arrêt du soufflage d'air frais et donc uniquement aspiration des gaz de tir par la conduite d'extraction.
- Utilisation de la cabine de survie et des abris pour la protection du personnel durant la volée.

L'analyse montre (Tab. 4.1 et Tab. 4.2) qu'une gaine soufflante d'un diamètre de 2.2 m ainsi qu'une gaine aspirante d'un diamètre de 1.5 m de bonne qualité (type S) suffisent pour maintenir les débits requis dans les deux phases de construction de la galerie de sécurité. En outre, une dégradation de la qualité des gaines jusqu'au niveau d'un type A est également acceptable, mais implique une puissance élevée pour le soufflage de l'air frais sur la distance maximale de 6500 m et de même qu'une perte de plus de 50% de l'air vicié aspiré au front par fuite dans la galerie. Dans ce cas, l'air retournant vers le portail à pleine section accumulerait cet air vicié et viendrait donc se charger avec son contenu de poussière.

3.2 Refroidissement de la galerie de sécurité en phase de creusement

La température du massif dépasse le 30°C [14] sous le pic du Fréjus et la dissipation de chaleur des engins du chantier est très importante, raisons pour lesquelles on considère nécessaire un refroidissement de l'air.

3.2.1 Définition de la puissance requise pour le refroidissement du chantier

Chaleur du massif

La température du rocher le long l'axe du tunnel arrive jusqu'à environ 30-35°C. Le calcul de la chaleur transmise de la roche à l'air est complexe, parce qu'elle dépend à chaque point du tunnel du temps passé depuis l'excavation et diminue alors du front d'attaque le long le tracé du tunnel. La chaleur résultante est donc déterminée en fonction des paramètres suivants :

- Coefficient de convection locale (dépendant du nombre de Reynolds, de la rugosité de la paroi et du diamètre)
- Température initiale de la paroi (température du massif)
- Température désirée de l'air
- L'âge du tunnel, en fonction de la vitesse et de la distance du front de taille.

Les propriétés physiques moyennes considérées de la roche sont:

- Capacité thermique : 900 J/(kg K)
- Conductivité: 2.3 W/(m K)
- Densité: 2600 kg/m³

Afin de tenir en compte d'un possible afflux d'eau chaude à travers le rocher, une conductivité effective trois fois plus élevée de 6.9 W/(m K) est utilisée lors des calculs instationnaires de l'échange de chaleur.

Chaleur dissipée par les appareils motorisés

Dans le cas de l'excavation avec tunnelier (TBM), ce dernier représente une source de chaleur très importante (Fig. 3.1). Environ 60% de la puissance absorbée sert à

détacher des morceaux du rocher, les réchauffant de cette manière environ 40°C au-dessus de la température de la roche. Les 40% restants couvrent les pertes secondaires qui doivent être dissipées directement du tunnelier. Ces pertes se développent dans les moteurs et dans le système hydraulique ou dans l'entraînement contrôlé à modulation de la fréquence.

L'utilisation temporelle typique d'un tunnelier pour l'excavation même oscille entre 30% et 50%. Le temps résiduel sert entre autre pour le déplacement, l'approvisionnement du matériel nécessaire et pour l'entretien. Tenant compte de ces périodes d'inactivité, le refroidissement requis pour un tunnelier peut être adapté à la puissance du tunnelier réduite de 50%. Le refroidissement est donc dimensionné pour la puissance moyenne consommée à la place de la puissance installée. Cette approche est justifiée à cause de l'accumulation temporelle de la chaleur dissipée dans le rocher, qui est seulement peu à peu transmise à l'air dans le tunnel.

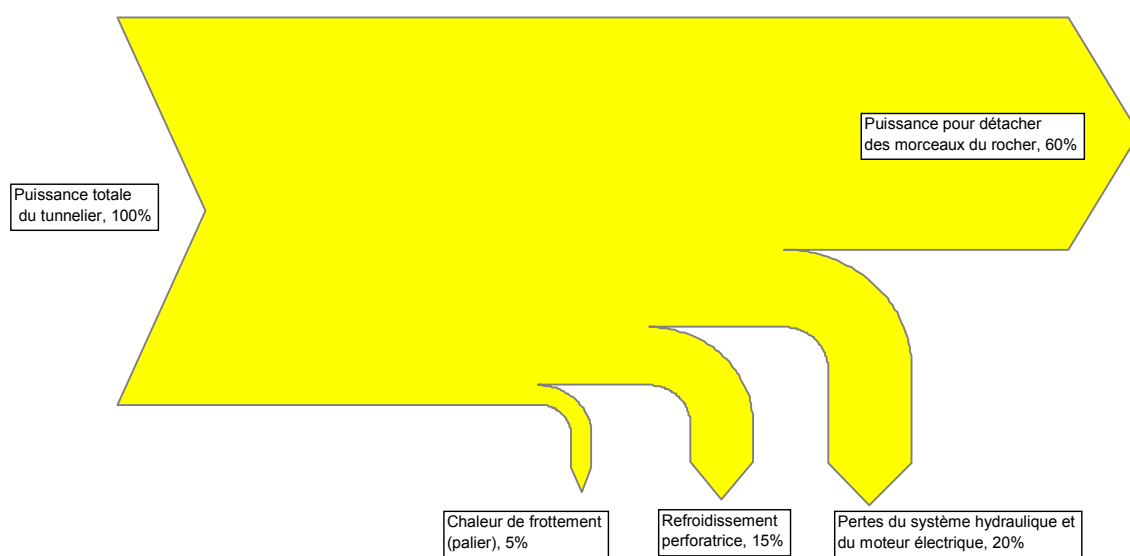


Fig. 3.1 : Bilan énergétique du tunnelier.

La chaleur dissipée par les autres engins est plus limitée. Pour les véhicules dotés d'un moteur Diesel, les valeurs de la puissance mécanique requises listées dans la Tab. 3.2 sont valables, qui doivent être corrigées avec un rendement d'environ 30% afin d'obtenir la puissance thermique totale effectivement dissipée.

Chaleur d'hydratation du ciment

Quand le béton durcit, il libère la chaleur d'hydratation. Une fraction de ciment de 400 kg par m³ de béton est prise en considération dans le calcul du refroidissement. Chaque kg de ciment libère 380 kJ de chaleur.

Puisque le revêtement de la galerie même se fait avec des voussoirs préfabriqués, la seule contribution du ciment à l'échauffement dans la phase avec tunnelier vient du rameau en phase de revêtement.

Chaleur libérée pendant le marinage

La température du matériel excavé est d'environ 40°C au-dessus de la température du rocher. Le dernier se refroidit partiellement pendant le marinage. Ici un refroidissement jusqu'à la température d'air dans le tunnel est pris en considération comme approche conservative.

3.2.2 Condition de l'environnement

L'état suivant de l'air prélevé à l'extérieur est considéré :

- Température externe: 20°C
- Humidité initiale: 100% (aucun effet de refroidissement par évaporation est considéré)

A ces conditions, l'effet de refroidissement dû purement à la ventilation est marginal (avec 43 m³/s d'air frais, la puissance thermique de refroidissement se monte seulement à 215 kW). Il s'agit donc d'une hypothèse conservative pour le dimensionnement du système de refroidissement.

3.2.3 Concept Générique du Refroidissement

Le refroidissement doit garantir une température maximale de 26°C au niveau des ateliers de travail dans le tunnel, comme le prescrit la recommandation française [12].

Un système flexible avec des appareils frigorifiques combinés avec des radiateurs et distribués dans les zones du tunnel, où un refroidissement s'avère nécessaire, est prévu pour la climatisation (Fig. 3.2).

Les appareils sont munis d'un groupe frigorifique avec un réfrigérant, qui refroidit un circuit d'eau dans l'évaporateur. Cette eau froide alimente à son tour le radia-

teur équipé d'un ventilateur afin de refroidir l'air du tunnel. La chaleur produite par le groupe frigorifique est transmise dans le condensateur à un circuit d'eau de refroidissement externe, ayant une température d'entrée d'environ 25°C et une température de sortie de 35°C. Ce circuit d'eau est refroidi à l'extérieur du tunnel dans une tour de refroidissement.

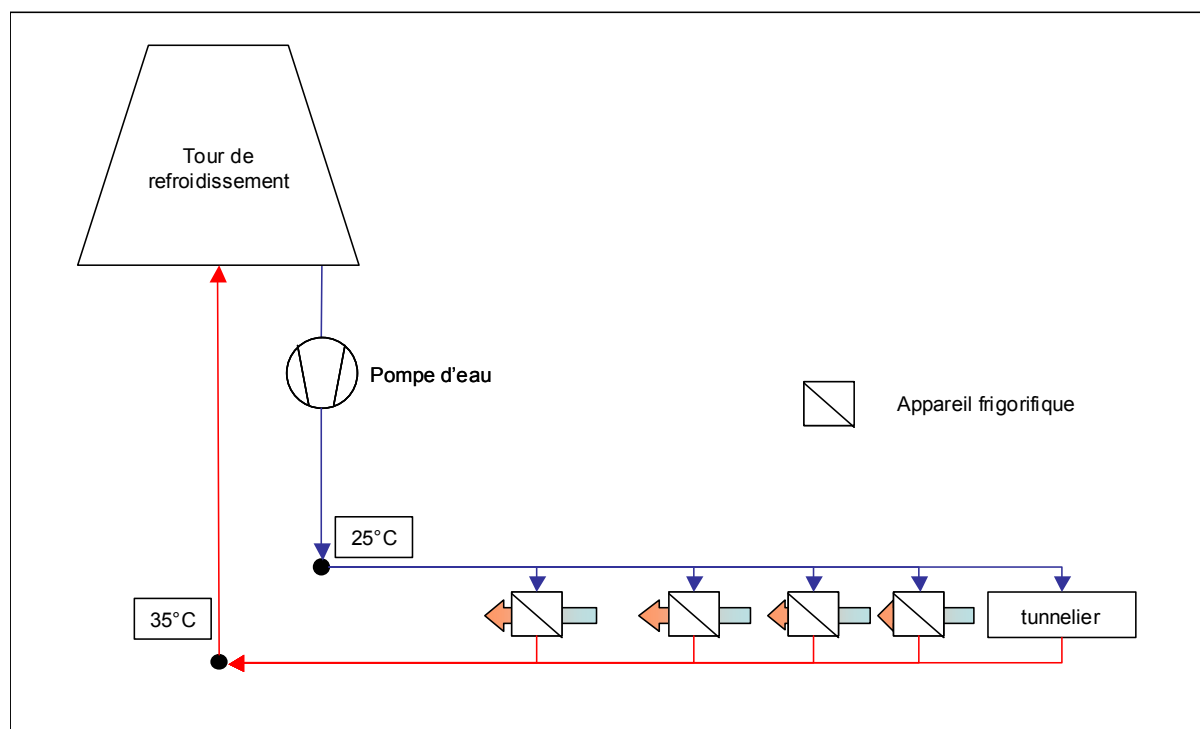


Fig. 3.2 : Concept de refroidissement

Les dimensions limitées de ces unités frigorifiques permettent leur installation directement dans la galerie ou dans les rameaux. Pour emmener la chaleur importante relâchée d'un tunnelier, un nombre adéquat des appareils frigorifiques est installé directement sur son train suiveur.

3.3 Ventilation de la galerie de sécurité en phase de finition

Pendant la phase de l'installation des équipements dans la galerie de sécurité, il faut prévoir une ventilation entièrement différente, sans gaines. A cette phase une partie des accélérateurs de la ventilation définitive sera déjà mise en place dans la galerie.

Le besoin d'air frais en phase de finition peut être estimé à 20-30 m³/s, correspondant à environ 0.5 - 0.7 m/s dans la galerie.

Il est estimé que la ventilation naturelle, liée en particulier à la différence de pression météorologique entre les têtes, sera suffisante pendant environ 75% du temps (estimation basées sur les données du tunnel du Mont Blanc, Fig. 3.3 et Fig. 3.4).

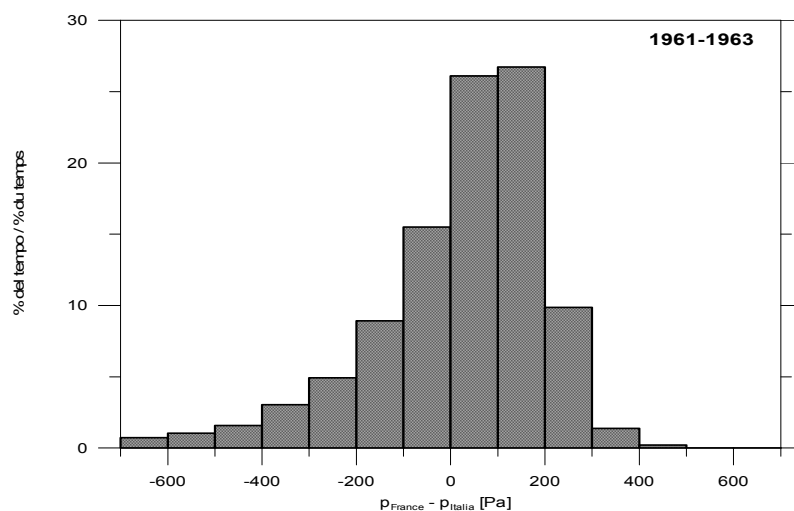


Fig. 3.3 : Pression motrice Mont-Blanc.

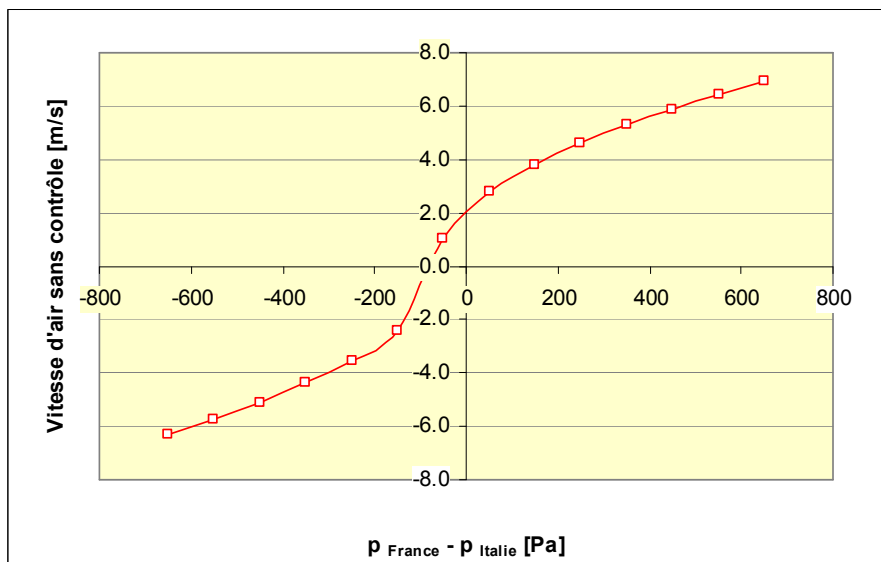


Fig. 3.4 : Vitesse d'air dans la galerie de sécurité en hiver (dT=25°C intérieur-extérieur) en fonction de la pression motrice.

En cas de circulation naturelle trop faible, la mise en service d'un accélérateur avec une poussée statique de 750 N serait - en régime purement stationnaire - dé-

jà suffisante pour assurer la ventilation. Pourtant, afin de pouvoir changer le régime de fonctionnement aisément, rapidement et pour garantir une certaine redondance, on prévoit un total de 2 couples d'accélérateurs sur chaque tête. L'alimentation électrique peut être faite en utilisant l'alimentation de chantier.

Après la réalisation de la ventilation définitive complète, la ventilation se fera comme en conditions normales de fonctionnement.

3.4 Ventilation des abris et de la cabine de survie

La ventilation des abris en phase de construction sera garantie par une conduite sous pression dédiée, qui assurera en même temps l'approvisionnement d'air frais nécessaire pour la sécurité du personnel du tunnelier et donc l'alimentation de la cabine de survie.

La configuration côté tunnel des abris sera identique à la configuration finale, avec une porte HCM 120, une trappe de régulation motorisée et une trappe coupe-feu.

Le besoin d'air frais pour au maximum 17 abris et une cabine de survie par chantier peut être estimé de la façon suivante :

- Abris (ventilation sanitaire) max. 14 x 160 m³/h (renouvellement du volume de l'abri 0.3 fois par heure)
- Abris (ventilation incendie) max. 3 x 1'590 m³/h (renouvellement du volume de l'abri 3 fois par heure)
- Cabine de survie max. 1 x 375 m³/h

Afin de limiter les dimensions du système d'air comprimé à un niveau raisonnable tout en maintenant un degré de sécurité élevé il est nécessaire accepter une réduction des standards exigés par la Circulaire Française [1] par rapport à la ventilation des abris en phase de chantier.

La ventilation sanitaire est prévue avec un renouvellement de 0.3 fois du volume au lieu de 3 fois et la ventilation en cas d'événement est prévue avec 1'590 m³/h

(3 renouvellements) au lieu de 2'500 m³/h pour les trois abris les plus proches du foyer.

	Exploitation normale	Événement galerie de sécurité (chantier)	Événement tunnel
Abris (ventilation sanitaire)	17 x 160 Nm ³ /h	14 x 160 Nm ³ /h	14 x 160 Nm ³ /h
Abris (ventilation incendie)	-	3 x 1'590 Nm ³ /h	3 x 1'590 Nm ³ /h
Cabine de survie	1 x 375 Nm ³ /h	1 x 375 Nm ³ /h	-
Total	4'970 Nm ³ /h	7'385 Nm ³ /h	7'010 Nm ³ /h

Tab. 3.3 : Besoin d'air comprimé.

La ventilation des abris en phase de chantier se fera à travers la galerie de sécurité, comme en phase finale. La conduite de l'air comprimé sera enterrée afin de garantir une résistance thermique et mécanique élevée. Il résulte de l'analyse (Tab. 4.5), qu'un tube d'un diamètre intérieur de 200 mm est requis sous une pression d'alimentation de 8 bar.

La pressurisation des abris à 80 Pa de surpression par rapport au tunnel sera faite avec la trappe de régulation et son système de commande prévu pour la ventilation définitive.

4. PRINCIPES CONSTRUCTIFS

4.1 Ventilation de la galerie de sécurité en phase de creusement

Tant pendant la phase d'avancement en traditionnel que pendant la phase suivante avec tunnelier, des gaines de soufflage et d'aspiration avec des diamètres constants sont utilisées.

La puissance maximale absorbée de soufflage se montera à 575 kW (Tab. 4.2), tandis que la puissance maximale du ventilateur d'aspiration près du front de travail sera de 41 kW.

En fonction de la configuration précise des chantiers, il faudra prévoir en plus une ventilation secondaire des chantiers pour la réalisation des rameaux latéraux, à

réaliser par des éléments de bifurcation sur les deux gaines principales. Afin de disposer de la possibilité de ventiler ou bien le front d'attaque principale ou bien un chantier de rameau, des registres doivent être prévus en correspondance aux bifurcations dans les deux branches.

		SOUFFLANTE		ASPIRANTE	
Longueur	[m]	1600	1600	1600	1600
Débit au front [m³/s]		55.0	55.0	20.0	20.0
Puissance Diesel admiss.	[CV]	1100	1100		
Classe de conduite		S	A	S	A
No. conduite		1	1	1	1
No. Segment		1	1	1	1
Diametre conduite [m]		2.2	2.2	1.5	1.5
Coeff. de frottement λ		0.015	0.018	0.015	0.018
Surface de fuite active f*	[m ² /m ²]	5.0E-06	1.0E-05	5.0E-06	1.0E-05
Π_0		0.01	0.01	0.01	0.00
Facteur K		1.2E-03	5.5E-03	3.6E-03	1.7E-02
Facteur $t_{travers}$		0.01	0.02	0.01	0.00
Facteur t		0.44915	0.57134	0.53673	0.67141
A1 53 gauche		-0.20	-0.13	-0.15	-0.04
A1 53 droite		-0.20	-0.13	-0.15	-0.04
diff gauche-droite		0.00	0.00	0.00	0.00
ω		1.03	1.07	1.06	1.13
Débit au portail	[m ³ /s]	56.8	58.9	18.9	17.7
vitesse fin conduite	[m/s]	14.47	14.47	10.70	10.02
vitesse debut conduite	[m/s]	14.93	15.50	11.31	11.30
Π_1		11	14	17	21
dp	[Pa]	1228	1523	1006	1117
Rendement venti. globale		70%	70%	70%	70%
Puissance	[kW]	100	128	29	32

Tab. 4.1 : Dimensionnement de la ventilation pour le creusement en traditionnel.

		SOUFFLANTE		ASPIRANTE	
Longueur	[m]	6500	6500	6500	6500
Débit au front [m³/s]		43.0	43.0	16.0	16.0
Puissance Diesel admiss.	[CV]	860	860		
Classe de conduite		S	A	S	A
No. conduite		1	1	1	1
No. Segment		1	1	1	1
Diametre conduite [m]		2.2	2.2	1.5	1.5
Coeff. de frottement λ		0.015	0.018	0.015	0.018
Surface de fuite active f*	[m ² /m ²]	5.0E-06	1.0E-05	5.0E-06	1.0E-05
Π_0		0.01	0.01	0.01	0.00
Facteur K		7.7E-02	3.7E-01	2.4E-01	1.2E+00
Facteur $t_{travers}$		0.01	0.02	0.01	0.00
Facteur t		0.80334	0.91889	0.89252	0.97037
A1 53 gauche		0.12	0.42	0.32	0.75
A1 53 droite		0.12	0.42	0.32	0.75
diff gauche-droite		0.00	0.00	0.00	0.00
ω		1.28	1.65	1.51	2.26
Débit au portail	[m ³ /s]	54.9	70.8	10.6	7.1
vitesse fin conduite	[m/s]	11.31	11.31	6.00	3.99
vitesse debut conduite	[m/s]	14.43	18.62	9.07	9.03
Π_1		55	85	95	178
dp	[Pa]	3669	5687	1790	1491
Rendement venti. globale		70%	70%	70%	70%
Puissance	[kW]	288	575	41	34

Tab. 4.2 : Dimensionnement de la ventilation pour le creusement à tunnelier.

4.2 Refroidissement de la galerie de sécurité en phase de creusement

L'évolution des différentes températures dans la galerie en phase de construction est illustrée en Fig. 4.1. En proximité du front de travail, la température de l'air en galerie est maintenue à 26°C par des unités de refroidissement placées dans la zone des ateliers de travail et d'une manière concentrée directement en aval du tunnelier. L'air frais pris de l'extérieur à 20°C est réchauffé par le ventilateur de la gaine soufflante d'environ 5°C à 25°C. La paroi du tube est refroidie ou respectivement réchauffée par l'air en galerie d'une manière instationnaire à cause de la conduction radiale de chaleur dans le rocher.

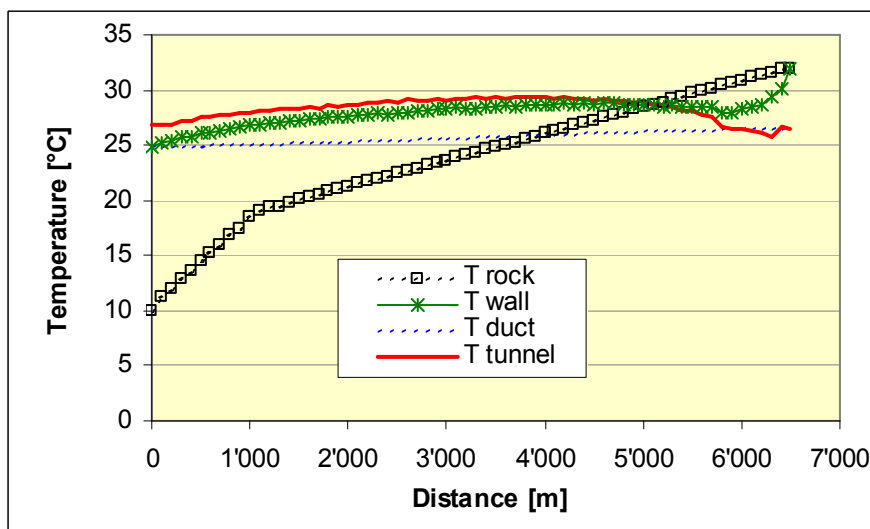


Fig. 4.1 : Températures pour l'avancement maximal de l'excavation avec tunnelier.

Données thermiques:

Chaleur transmise du rocher, globale:	0.02	MW	(calcul instationnaire)
Chaleur dissipée par les véhicules:	1.33	MW	(400 kW _{mech} , 30% rendement)
Chaleur dissipée par le ciment:	0.09	MW	(environ 50 m ³ béton par jour)
Chaleur dissipée par le tunnelier:	2.30	MW	(80% de la puissance de 5.7 MW a 50% du temps)
Besoin de refroidissement:	3.72	MW	

4.2.1 Unités frigorifiques

Ces appareils sont disponibles avec une puissance frigorifique comprise entre environ 150 et 400 kW. Des appareils avec une puissance relativement élevée sont pris en considération dans le présent projet, avec les caractéristiques suivantes :

- Puissance frigorifique unitaire 300 kW
- Facteur de rendement 4
- Puissance électrique 75 kW
- Température d'entrée de l'eau (condensateur) 25 °C
- Température de sortie de l'eau (condensateur) 35 °C

- Débit d'eau de refroidissement 9 l/s
- Dimensions globales ventilateur/évaporateur ca. 7.0 x 1.0 x 1.0 m
- Dimensions globales unité frigorifique ca. 3.5 x 1.0 x 1.0 m

Les exigences pour chaque chantier sont donc :

- N° appareils frigorifiques de 300 kW: 12
- Débit d'eau de refroidissement
pour les appareils frigorifiques: 108 l/s

4.2.2 Refroidissement direct du tunnelier

Débit d'eau de refroidissement
pour le système hydraulique et le moteur
du tunnelier (20% de la puissance) environ 25 l/s

4.2.3 Tour de refroidissement

Les tours de refroidissement requises à l'extérieur sont disponibles sur le marché en dimensions standardisées. Le type considéré ici est évaporatoire. Leurs dimensions dépendent de la puissance à dissiper, de la température d'entrée et de sortie aussi bien que de la température ambiante à boue humide. Cette dernière ne dépasse pas les 20°C pendant 95% du temps dans la région du projet. Une température d'eau d'environ 25°C après son refroidissement peut donc être obtenue. Une tour avec une capacité de refroidissement d'environ 5 MW pour 420 m³/h d'eau et les paramètres listés ci-dessus consomme environ 55 kW d'électricité pour son ventilateur et mesure ca. 6 x 6 m. Une telle tour peut desservir 13 unités frigorifiques. Le flux d'eau évaporée dans la tour est d'environ 8 m³/h. La consommation effective de l'eau fraîche est cependant plus élevée afin d'éviter une concentration excessive des sels et minéraux, qui pourraient être cause de corrosion et de dépôts. Cette quantité de dilution dépend de la configuration des tours de refroidissement choisies et de la qualité de l'eau à disposition.

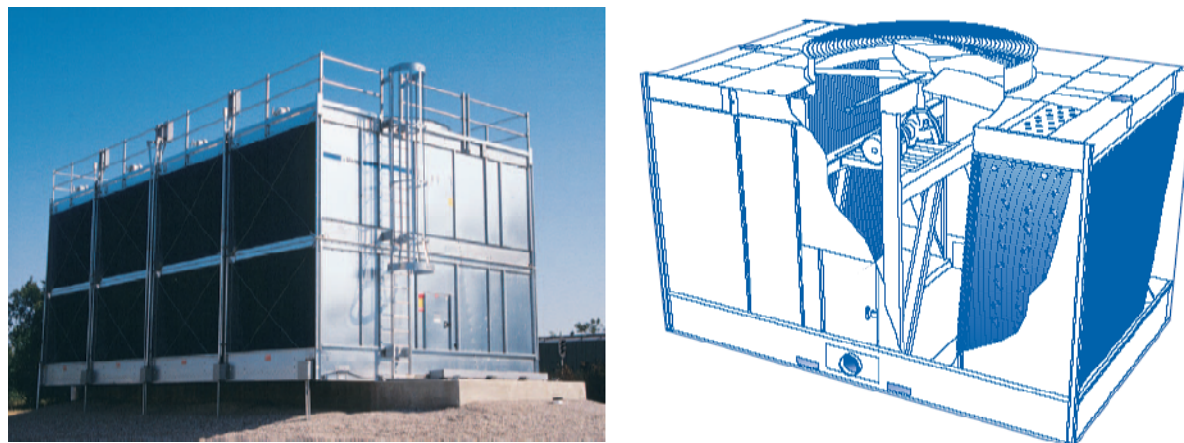


Fig. 4.2 : Exemple des tours de refroidissement évaporatoires.

4.3 Ventilation de la galerie de sécurité en phase de finition

Il est prévu de mettre en place 8 accélérateurs avec les caractéristiques suivantes:

- Diamètre roue 800 mm
- Diamètre externe env. 1000 mm
- Poussée statique ≥ 750 N
- Puissance électrique 25 kW

4.4 Ventilation des abris

Les caractéristiques du système de ventilation des abris et de la cabine de survie près du front de travail peuvent être définies de la façon suivante (Tab. 4.5):

- Longueur max. 7'000 m
- Diamètre intérieur 200 mm
- Pression d'air comprimé à l'entrée 8 bar
- Perte de charge maximale 1.77 bar
- Puissance 90 kW

		Evénement galerie [m3/h]							
N°	x abri [m]	Q abri	Q cabine	Q tot	p [bar]	ρ [kg/m3]	v [m/s]	Re _D	λ
0	0	0		7385	8.00	9.20	7.45	7.40E+05	2.49E-02
1	370	160		7385	7.87	9.05	7.58	7.40E+05	2.49E-02
2	740	160		7225	7.74	8.90	7.54	7.24E+05	2.49E-02
3	1110	160		7065	7.61	8.75	7.50	7.08E+05	2.49E-02
4	1480	160		6905	7.48	8.61	7.45	6.92E+05	2.49E-02
5	1850	160		6745	7.36	8.47	7.40	6.76E+05	2.49E-02
6	2220	160		6585	7.24	8.33	7.34	6.60E+05	2.49E-02
7	2590	160		6425	7.13	8.20	7.28	6.44E+05	2.49E-02
8	2960	160		6265	7.02	8.07	7.21	6.28E+05	2.49E-02
9	3330	160		6105	6.91	7.95	7.13	6.11E+05	2.49E-02
10	3700	160		5945	6.81	7.83	7.05	5.95E+05	2.49E-02
11	4070	160		5785	6.71	7.72	6.96	5.79E+05	2.49E-02
12	4440	160		5625	6.61	7.61	6.87	5.63E+05	2.49E-02
13	4810	160		5465	6.52	7.50	6.76	5.47E+05	2.49E-02
14	5180	160		5305	6.43	7.40	6.66	5.31E+05	2.49E-02
15	5550	1590		5145	6.35	7.30	6.54	5.15E+05	2.49E-02
16	5920	1590		3555	6.27	7.21	4.58	3.56E+05	2.49E-02
17	6290	1590		1965	6.23	7.17	2.55	1.97E+05	2.49E-02
	6660	0	375	375					

Tab. 4.5 : Calcul de perte de charge dans la conduite d'air comprimé.