

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**

**IMPIANTO VENTILAZIONE/EQUIPEMENT VENTILATION**  
**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 Documenti di riferimento	3
1.4 Referenze normative	4
1.5 Analisi delle fasi del progetto precedente	5
1.6 Contenuto del progetto definitivo	5
2. DATI DI BASE	6
2.1 Stato attuale del traforo	6
2.1.1 Configurazione del traforo stradale	6
2.1.2 Traffico nel traforo stradale	7
2.1.3 Ventilazione del traforo	7
2.2 Galleria di sicurezza	7
2.3 I rifugi	9
2.4 Stazioni tecniche (ST)	10
2.5 By-pass carrabili	12
3. CONCETTO DELLA VENTILAZIONE	13
3.1 Esigenze della ventilazione	13
3.2 Scelta del concetto	14
3.3 Potenza d'incendio	14
3.4 Condizioni meteorologiche e ambientali	14
3.4.1 Differenza di pressione tra i portali	14
3.4.2 Densità	15
3.5 Gestione della ventilazione dei rifugi	15
3.6 Gestione della ventilazione delle stazioni tecniche	16
3.7 Gestione della ventilazione dei by-pass	17

3.8	Funzionamento d'insieme	18
3.8.1	Funzionamento normale	18
3.8.2	Funzionamento in caso di evento nel traforo	19
3.8.3	Funzionamento in caso di evento nel rifugio	22
3.8.4	Funzionamento in caso di evento in una stazione tecnica (ST) o by-pass	23
3.8.5	Funzionamento in caso di evento nella galleria	23
4.	BASI DI DIMENSIONAMENTO	28
4.1	Portata d'aria fresca necessaria	28
4.1.1	Condizioni normali di funzionamento	28
4.1.2	Lavori di manutenzione	29
4.1.3	Incendio nel traforo	29
4.1.4	Incendio nella galleria di sicurezza	31
4.2	Distribuzione di pressione	32
4.2.1	Premessa	32
4.2.2	Pressione nel traforo	32
4.2.3	Pressione e velocità dell'aria nella galleria in modalità d'esercizio normale	36
4.2.4	Necessità di controllo della velocità longitudinale in galleria	38
4.2.5	Differenza di pressione tra galleria e traforo in modalità d'esercizio normale	40
4.2.6	Differenza di pressione tra galleria e traforo in caso d'incendio nel traforo	43
4.2.7	Differenza di pressione tra galleria e traforo in caso di evento nella galleria	46
4.2.8	Ventilazione sanitaria	47
5.	PRINCIPI COSTRUTTIVI	49
5.1	Condizioni di dimensionamento limite	49
5.2	Acceleratori nella galleria di sicurezza	49
5.2.1	Concetti generali	49
5.2.2	Casi di esercizio degli acceleratori	50
5.2.3	Caratteristiche tecniche richieste	53
5.2.4	Alimentazione elettrica	56
5.3	Ventilatori d'estrazione massiva	58
5.3.1	Concetto generale	58
5.3.2	Ridondanza	58
5.3.3	Resistenza termica e raffreddamento dei motori	59
5.3.4	Punti di funzionamento della centrale E	60

5.3.5	Prestazioni di funzionamento della centrale F	62
5.3.6	Regolazione	64
5.3.7	Silenziatori	64
5.3.8	Serranda del ventilatore	65
5.3.9	Equipaggiamento di montaggio e manutenzione	65
5.3.10	Deflettori	65
5.3.11	Equipaggiamento di controllo	66
5.3.12	Collegamento con la centrale B esistente	67
5.3.13	Alimentazione elettrica	68
5.4	Ventilazione dei rifugi	69
5.4.1	Concetto generale	69
5.4.2	Funzione di regolazione automatica	71
5.4.3	Alimentazione elettrica	71
5.5	Ventilazione dei by-pass	72
5.5.1	Concetti generali	72
5.5.2	Funzione e regolazione automatica	73
5.5.3	Alimentazione elettrica	74
5.6	Ventilazione e climatizzazione delle stazioni tecniche (ST)	74
5.6.1	Concetti generali	74
5.6.2	Funzionamento e regolazione automatica	76
5.6.3	Circuiti d'acqua di raffreddamento	78
5.6.4	Alimentazione elettrica	80
5.7	Attrezzatura di misurazione nella galleria di sicurezza	81
6.	PORTE TRA RIFUGI E GALLERIA DI SICUREZZA	82
7.	INTERFACCE CON ALTRI IMPIANTI	83
7.1	Interfacce a livello terreno	83
7.2	Interfacce a livello superiore	84
8.	LIMITI DI FORNITURA E DI INTERVENTO	85
8.1	Limiti di fornitura	85
8.2	Limiti d'intervento	85
9.	CALENDARIO DI REALIZZAZIONE PREVEDIBILE	85
9.1	Generale	85
9.2	Messa in servizio	85

1.	INTRODUCTION	87
1.1	Contexte général	87
1.2	Objectifs généraux	88
1.3	Documentation de référence	89
1.4	Références normatives	90
1.5	Analyse des phases du projet précédent	91
1.6	Contenu du projet définitif	91
2.	DONNEES DE BASE	92
2.1	Rappel de l'existant	92
2.1.1	Configuration du tunnel routier	92
2.1.2	Trafic du tunnel routier	93
2.1.3	Ventilation du tunnel	93
2.2	Galerie de sécurité	94
2.3	Les abris	95
2.4	Stations techniques (ST)	96
2.5	By-pass carrossable	98
3.	CONCEPT DE VENTILATION	99
3.1	Exigences de la ventilation	99
3.2	Choix du concept	100
3.3	Puissance d'incendie	100
3.4	Conditions météorologiques et environnementales	100
3.4.1	Différence de pression entre les têtes	100
3.4.2	Densité	101
3.5	Gestion de la ventilation des abris	101
3.6	Gestion de la ventilation des stations techniques	102
3.7	Gestion de la ventilation des by-pass	103
3.8	Mode de fonctionnement de l'ensemble	104
3.8.1	Fonctionnement normal	104
3.8.2	Fonctionnement en cas d'événement dans le tunnel	105

3.8.3	Fonctionnement en cas d'événement dans un abri	108
3.8.4	Fonctionnement en cas d'événement dans une Station technique (ST) ou by-pass	109
3.8.5	Fonctionnement en cas d'événement dans la galerie	109
4.	<b>BASES DE DIMENSIONNEMENT</b>	<b>114</b>
4.1	Débit d'air frais nécessaire	114
4.1.1	Conditions normales de fonctionnement	114
4.1.2	Travaux d'entretien	116
4.1.3	Événement dans le tunnel	116
4.1.4	Événement dans la galerie de sécurité	117
4.2	Distribution de pression	118
4.2.1	Préambule	118
4.2.2	Pressions dans le tunnel	119
4.2.3	Pression et vitesse d'air dans la galerie en fonctionnement normal	123
4.2.4	Nécessité du contrôle de la vitesse longitudinale en galerie	124
4.2.5	Différence de pression entre galerie et tunnel en exploitation normale	127
4.2.6	Différence de pression entre galerie et tunnel en cas d'événement dans le tunnel	129
4.2.7	Différence de pression entre galerie et tunnel en cas d'événement dans la galerie	133
4.2.8	Ventilation sanitaire	133
5.	<b>PRINCIPES CONSTRUCTIFS</b>	<b>136</b>
5.1	Conditions limites de dimensionnement	136
5.2	Accélérateurs dans la galerie de sécurité	136
5.2.1	Concepts généraux	136
5.2.2	Les cas d'exploitation des accélérateurs	137
5.2.3	Caractéristiques techniques requises	139
5.2.4	Alimentation électrique	143
5.3	Ventilateurs d'extraction massive	145
5.3.1	Concepts généraux	145
5.3.2	Redondance	145
5.3.3	Résistance thermique et refroidissement moteur	146
5.3.4	Points de fonctionnement de la centrale E	147
5.3.5	Points de fonctionnement de la centrale F	150
5.3.6	Réglage	151
5.3.7	Silencieux	152
5.3.8	Registres de ventilateur	152

5.3.9	Equipment de montage et maintenance	153
5.3.10	Défecteurs	153
5.3.11	Equipment de contrôle	154
5.3.12	Raccordement à l'usine B existante	154
5.3.13	Alimentation électrique	156
5.4	Ventilation des abris	157
5.4.1	Concepts généraux	157
5.4.2	Fonction et régulation automatique	159
5.4.3	Alimentation électrique	160
5.5	Ventilation des by-pass	160
5.5.1	Concepts généraux	160
5.5.2	Fonction et régulation automatique	161
5.5.3	Alimentation électrique	162
5.6	Ventilation et climatisation des stations techniques (ST)	162
5.6.1	Concepts généraux	162
5.6.2	Fonction et régulation automatique	164
5.6.3	Circuits d'eau de refroidissement	166
5.6.4	Alimentation électrique	169
5.7	Equipement de mesure dans la galerie de sécurité	169
6.	PORTES ENTRE LES ABRIS ET LA GALERIE DE SECURITE	170
7.	INTERFACES AVEC LES AUTRES EQUIPEMENTS	171
7.1	Interfaces terrain	171
7.2	Interfaces à niveau GTC	172
8.	LIMITE DE FOURNITURE ET D'INTERVENTION	173
8.1	Limites de la fourniture	173
8.2	Limite d'intervention	173
9.	CALENDRIER PREVISIONNEL DE REALISATION PREVISIBLE	173
9.1	En général	173
9.2	Mise en service	174
10.	ABREVIATIONS	175

11. ANNEXE 1: CALCUL DE PERTES DE CHARGE - CENTRALES D'EXTRACTION MASSIVE	176
11.1 Centrale B - Coté France	176
11.2 Centrale C - Coté Italie	182



## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Inquadramento generale

Il Traforo autostradale del Fréjus collega il Piemonte (Bardonecchia, Italia) con la Savoia (Modane, Francia), sull'asse Torino-Lione. Esso é caratterizzato da circolazione bi-direzionale su una larghezza carrabile di 9 metri e una lunghezza di 12'868 metri [10].

Il presente progetto costituisce la messa a punto del Progetto definitivo della galleria di sicurezza [11]. 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, risultanti 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 in volta posati lungo la galleria che garantiscono la sovrappressione. 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 comunque stati modificati, in particolare;

- Le opere esterne ai portali non vengono modificate.
- 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.

- Modifica della GTC secondo le esigenze di coordinamento tra i sistemi di ventilazione del traforo e della galleria di sicurezza.

La galleria di sicurezza sarà realizzata ad una distanza di ca. 50 m dal traforo principale. 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.

L'esercizio della galleria di sicurezza, previsto nel 2013, dovrà essere strettamente coordinato con quello del traforo principale. Un unico sistema di supervisione assicurerà quindi un esercizio unico e coordinato dell'insieme galleria-traforo.

Questo documento descrive in modo dettagliato tutti gli aspetti legati al buon funzionamento della ventilazione della galleria di sicurezza, dei rifugi, delle stazioni tecniche e dei by-pass sia in modalità di servizio che in caso d'incendio.

Inoltre aggiorna il progetto definitivo redatto nel 2005 [11] a seguito della decisione del Committente di allargare la galleria di sicurezza allo scopo di "permettere in ogni ipotesi la circolazione dei veicoli di soccorso in tutta sicurezza e comodità".

## 1.2 Obiettivi generali

Un sistema di ventilazione performante e affidabile è indispensabile per raggiungere gli obiettivi generali di una galleria di sicurezza.

Questo documento riguarda unicamente la ventilazione nella sua fase finale, essendo la ventilazione in fase di cantiere oggetto di un rapporto separato.

La ventilazione della galleria di sicurezza per il traforo del Fréjus risponde ai seguenti obiettivi:

- ventilazione separata e indipendente della galleria rispetto al traforo;
- ventilazione indipendente dei rifugi per garantire una sovrappressione adeguata rispetto al traforo;

- ventilazione e climatizzazione delle stazioni tecniche;
- ventilazione dei locali tecnici esistenti nel traforo (PHT) situati ai fianchi lato Italia -> Francia;
- ventilazione dei by-pass.

Esigenze nuove e supplementari rispetto al progetto definitivo del 2005 [11]:

- Controllo di un incendio ed estrazione fumi nella galleria di sicurezza mediante la realizzazione di una ventilazione longitudinale con estrazione massiva dei fumi.
- Realizzazione della galleria di sicurezza senza SAS ai portali per permettere un accesso rapido, semplice e comodo ai veicoli di soccorso.

### 1.3 Documenti di riferimento

- [1] Circolare interministeriale francese no. 2006-20 del 29 marzo 2006 relativo alla sicurezza dei trafori stradali di lunghezza superiore ai 300 metri.
- [2] Direttive 2004/54/CE del parlamento europeo e del consiglio del 29 aprile 2004 concernente le esigenze di sicurezza minime applicabili ai trafori della rete stradale transeuropea.
- [3] AIPCR/PIARC: Padronanza degli incidenti e dei fumi nelle trafori stradali, 2004.
- [4] Traforo stradale del Fréjus, Costruzione della galleria di sicurezza. Impianto di ventilazione galleria di sicurezza. Documento gs96RT14,, 30.9.2002, MUSI.NET S.p.A.
- [5] Traforo stradale del Fréjus, Definizione dei scenari di estrazione fumi teorica definitiva. SETEC TPI e Studio Associato Ferro e Cerioni, 21.11.03.
- [6] Studio preliminare 2002, MUSI.NET.
- [7] Prima fase del progetto definitivo, in particolare:
  - Rapporto tecnico Ventilazione (6145.0-R-6) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Piano disposizione centrale lato Francia (6145.0-P-40) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Piano disposizione centrale lato Italia (6145.0-P-41) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Piano rifugi tipo - disposiz. ventilazione (6145.0-P-42) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Piano rifugi 6-29 - disposiz. ventilazione (6145.0-P-43) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Piano ST tipo - disposiz. ventilazione (6145.0-P-44) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Piano ST 7-13 - disposiz. ventilazione (6145.0-P-45) 12/07/2004, Lombardi SA
- [8] Il dossier "Trasferimento dei PHT versnelle Stazioni Tecniche della galleria di sicurezza" (6145.0-R-24 e allegati) 30/09/2004, Lombardi SA.

- [9] Observations des sociétés concessionnaires sur l'avant-projet, 20/09/2004, SFTRF e SITAF.
- [10] SITAF S.p.A, Traforo Autostradale del Fréjus, 1990
- [11] Lombardi SA, Rapporto 6145.0-R-39A, Galleria di sicurezza parallela - Equipaggiamento di ventilazione, 17.12.2004
- [12] Lombardi SA, Rapporto 6145.0-R-112, Galleria di sicurezza parallela - Ottimizzazione del diametro interno della galleria per garantire l'accesso ai veicoli di soccorso in sicurezza e comodità, 9.3.2006
- [13] SETEC TPI, Ajustement des scenarios théoriques avec le modèle de calcul Express' air - rapport final, 24.11.2005, Doc. Nr. 20988 S T A 0020 B
- [14] SFTRF-SITAF, Analyse Fonctionnelle Détaillée, Chapitre 4: Exploitation de la Ventilation Niveau 2, 19.12.2005, Réf. FREJ AFD 043 Rév. Z (bis)
- [15] OFROU-directive, projet, Portes et accès dans les tunnels routiers, Edition 2005, Suisse
- [16] OFROU-directive, Ventilation des tunnels routiers, Edition 2004 - V1.2 avec précisions du 31 juillet 2006, Suisse
- [17] Tiefbauamt des Kantons Graubünden: Belüftung von Sicherheits- und Querstollen von Strassentunneln, Bericht US + FZ, Version 3, März 2003
- [18] CETU, Dossier pilotes des tunnels - Ventilation, novembre 2003
- [19] CETU, Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel, Edition avril 2002
- [20] McGrattan, K., "Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, USA, 2005

#### 1.4 Referenze normative

Per gli elementi delle norme base, si osserva che:

- La direttiva europea del 29 aprile 2004 [2] non tratta in dettaglio la ventilazione nei rifugi.
- La circolare interministeriale francese no. 2006-20 del 29 marzo 2006 relativa alla sicurezza nei trafori stradali della rete nazionale [1] contiene delle prescrizioni molto dettagliate concernenti la ventilazione nei rifugi.
- Non esiste alcuna direttiva nazionale italiana applicabile alla ventilazione delle gallerie di sicurezza e dei rifugi.

Il dimensionamento della ventilazione della galleria e dei rifugi si basa dunque sulla circolare interministeriale francese no. 2006-20 del 29 marzo 2006 [1], confor-

memente alla decisione del Comitato di Sicurezza del 12-13 ottobre 2000 rispetto alla versione precedente della Circolare no. 2000-63 del 25 agosto 2000.

### **1.5 Analisi delle fasi del progetto precedente**

A seguito dell'abbandono delle SAS ai portali, le soluzioni proposte nel progetto provvisorio sono parzialmente modificate, soprattutto per quanto riguarda il sistema di ventilazione della galleria di sicurezza. Nella misura della loro applicabilità, le osservazioni fornite dal cliente e riassunte nel documento «Osservazioni delle società concessionarie sull'avant-progetto» pubblicate dalla SFTRF e dalla SITAF il 20/09/2004, sono state integrate in questo rapporto. In sostanza si tratta dei punti seguenti:

- l'equipaggiamento di ventilazione per la galleria di sicurezza e dei rifugi sono completamente ridondanti;
- l'alimentazione dei ventilatori è garantita sia mediante la rete EDF che la ENEL;
- la capacità di raffreddamento delle stazioni tecniche è stata verificata, tenuto conto delle apparecchiature elettriche e dei nuovi trasformatori.

### **1.6 Contenuto del progetto definitivo**

Il progetto definitivo della ventilazione è costituito dai seguenti documenti:

#### **1. Rapporti tecnici:**

6145.2-R-08A	Rapporto tecnico
6145.2-R-26A	Disciplinare descrittivo e prestazionale
6145.2-R-27A	Computo metrico estimativo

#### **2. Piani:**

6145.2-P-200	Schema generale ventilazione galleria di sicurezza
6145.2-P-201	Disposizione delle centrali E/F - Piano e sezioni
6145.2-P-202	Rifugio tipo - Disposizione ventilazione
6145.2-P-203	By-pass 1 e 5 - Disposizione ventilazione
6145.2-P-204	By-pass 2 e 4 - Disposizione ventilazione

6145.2-P-205	Disposizione a destra del rifugi 18 e del by-pass 3
6145.2-P-206	Stazione tecnica tipo - Disposizione ventilazione piano terra
6145.2-P-207	Stazione tecnica tipo - Disposizione ventilazione 1° piano
6145.2-P-208	Stazione tecnica 7-14 e 8-13 - Disposizione ventilazione

## 2. DATI DI BASE

### 2.1 Stato attuale del traforo

#### 2.1.1 Configurazione del traforo stradale

Le caratteristiche principali del traforo del Fréjus sono le seguenti [10]:

– Lunghezza	12'868 m
– Centrale di ventilazione sotterranea B	ca. 4'220 m dal portale francese
– Centrale di ventilazione sotterranea C	ca. 8'890 m dal portale francese
– Pendenza	0.54% (direzione France -> Italia)
– Altezza	4.54 m
– Larghezza carreggiata	9 m
– Diametro idraulico	6.4 m
– Sezione	47 m <sup>2</sup>
– Corsie	2 corsie
– Altezza geografica	1'228 m s.m. portale lato Francia 1'298 m s.m. portale lato Italia

Il sistema di ventilazione è suddiviso in 6 settori, come illustrato nella Fig. 2.1. La nozione di settore sarà ripresa per la galleria di sicurezza.

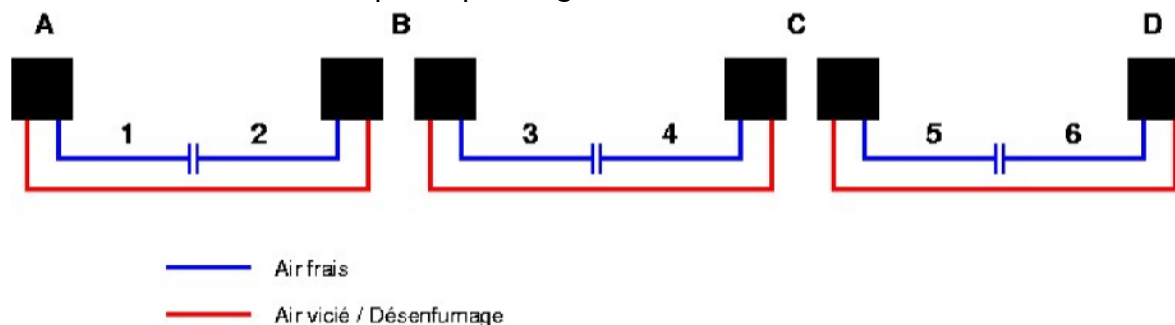


Fig. 2.1: Schema dei canali di ventilazione nei 6 settori.

### 2.1.2 Traffico nel traforo stradale

I dati principali di traffico sono quantificati dalla SITAF ([www.sitaf.it](http://www.sitaf.it)):

- Traffico medio giornaliero 5'448 v/24h (media 2004)
- Ore di punta ca. 850 v/h nelle due direzioni
- Traffico pesante 57% (media 2004)
- Velocità massima 70 km/h
- Intervallo tra i veicoli 150 m (100 m dall'arresto).

Rispetto alla capacità massima di un traforo bidirezionale di due corsie, con 1400-1800 v/h/per corsia [16], il traffico nella galleria del Fréjus è relativamente debole.

### 2.1.3 Ventilazione del traforo

La ventilazione del traforo influenza fortemente quella della galleria di sicurezza. Infatti, essa è basilare per la determinazione del livello di pressione nel traforo, e dunque per le esigenze della ventilazione della galleria e delle installazioni annesse.

Le caratteristiche principali della ventilazione in condizioni normali di funzionamento sono:

- Ventilazione semitrasversale, in generale unicamente con immissione di aria fresca, senza estrazione. La portata di aria fresca varia tra 284 m<sup>3</sup>/s (6 settori al 20% della portata) e 1'420 m<sup>3</sup>/s (6 settori a 100% della portata).
- Estrazione in condizioni normali di funzionamento solo in situazioni particolari.
- Estrazione concentrata in caso d'incendio, con una portata dell'ordine di 210-240 m<sup>3</sup>/s, secondo la localizzazione dell'incendio [13].
- Controllo della velocità longitudinale dell'aria in caso di evento con aspirazione opposta o estrazione opposta applicata in funzione della differenza di pressione barometrica tra i portali come da scenari predefiniti [13].

## 2.2 Galleria di sicurezza

Le caratteristiche principali della galleria di sicurezza del Fréjus sono:

Sezione tipo	Scavatrice meccanica	scavo in tradizionale
Lunghezza	9'680 m	2 x 1'600 m
Pendenza	0.54%	0.54%
Sagoma libera	6.60 x 4.00 m	6.60 x 4.00 m
Diametro	8.0 m	-
Diametro idraulico	7.2 m	6.9 m
Sezione d'aria	45 m <sup>2</sup>	44.5 m <sup>2</sup>

Ci saranno due tipologie di sezione tipo. A partire dal portale fino a ca. 1.6 km la galleria sarà scavata col metodo tradizionale all'esplosivo, mentre per la parte principale lo scavo avverrà mediante scavatrice meccanica.

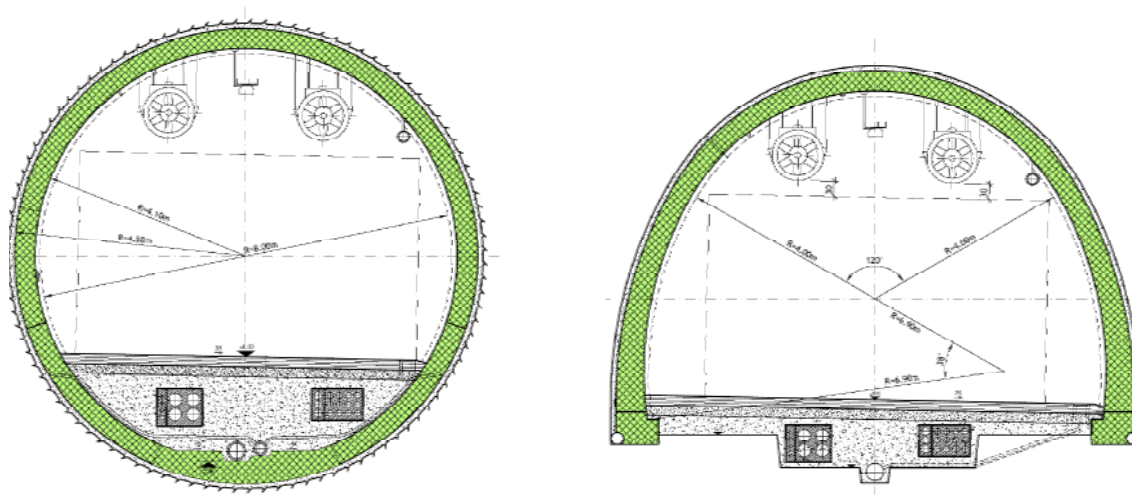


Fig. 2.2: Sezione tipo della galleria di sicurezza con sagoma libera di 6.60 x 4.00 m (scavatrice e in tradizionale).

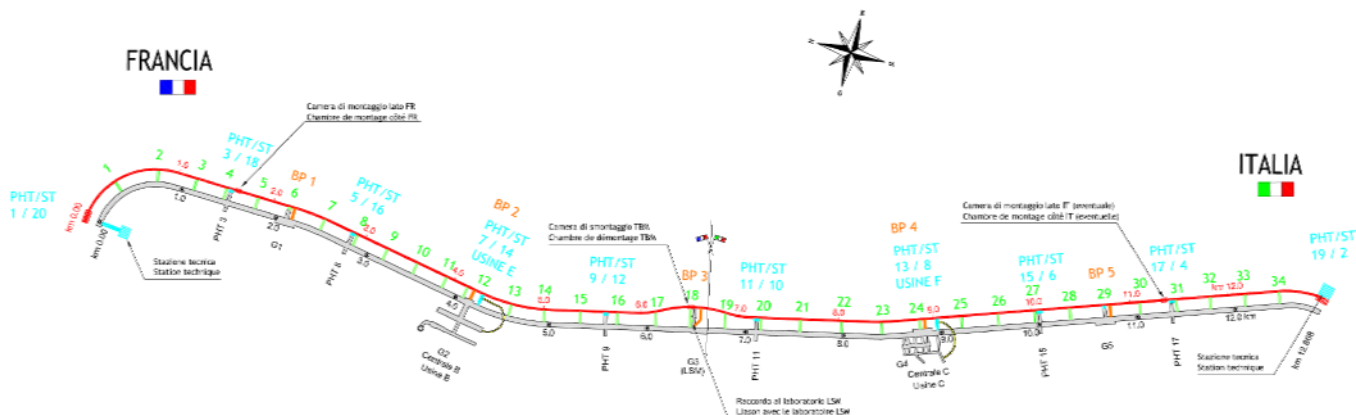


Fig. 2.3: Planimetria della galleria di sicurezza.



## 2.3 I rifugi

Ogni rifugio è composto da una zona filtro (SAS) e dal rifugio vero e proprio: quest'ultimo è collegato con la galleria di sicurezza mediante un accesso proprio. I locali del rifugio sono muniti di porte taglia-fuoco sia dalla parte del traforo che da quella della galleria.

Ci sono due tipi di rifugio. Le caratteristiche geometriche principali dei rifugi tipo sono (Fig. 2.4):

- Superficie rifugio 136.00 m<sup>2</sup> di cui 110 m<sup>2</sup> utilizzabili dall'utente
- Superficie SAS 15 m<sup>2</sup>
- Volume totale ca. 530 m<sup>3</sup>.

mentre il rifugio 18 presso il laboratorio ha le seguenti caratteristiche:

- Superficie rifugio 65.00 m<sup>2</sup> di cui 50 m<sup>2</sup> utilizzabili dall'utente
- Superficie SAS 15 m<sup>2</sup>
- Volume totale ca. 250 m<sup>3</sup>.

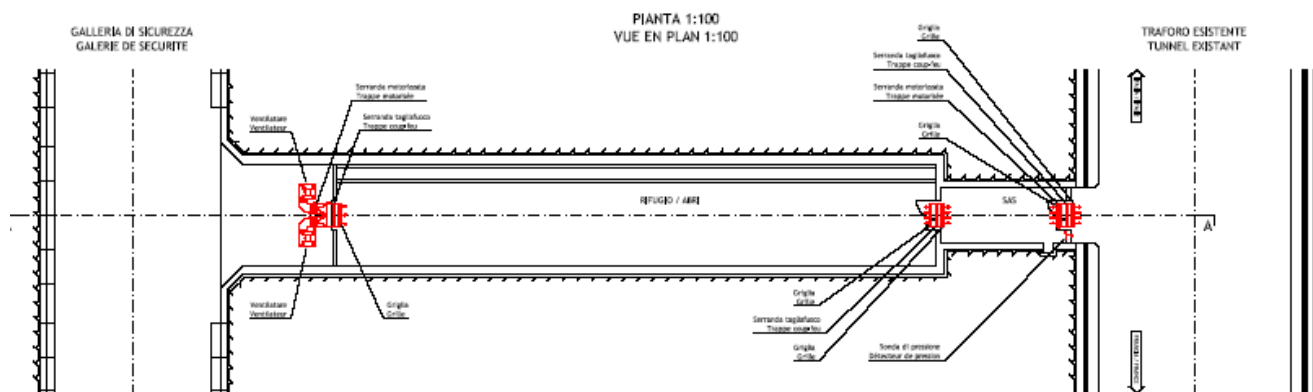


Fig. 2.4: Disegno di un rifugio tipo (6145.2-P-202A).

I rifugi sono realizzati nei seguenti punti:

RIFUGI / ABRIS					
No. RIFUGI No. ABRIS	PM RIFUGI PM ABRIS	DISTANZA DISTANCE	No. RIFUGI No. ABRIS	PM RIFUGI PM ABRIS	DISTANZA DISTANCE
FRANCIA / FRANCE	0.00		18	6505.547	
		377.71			363.86
1	377.707		19	6869.407	
		381.03			348.86
2	758.737		20	7218.267	
		387.15			408.00
3	1145.887		21	7626.267	
		373.49			408.66
4	1519.377		22	8034.927	
		330.50			407.67
5	1849.877		23	8442.597	
		361.01			407.62
6	2210.887		24	8850.217	
		333.38			418.50
7	2544.267		25	9268.717	
		362.85			381.00
8	2907.117		26	9649.717	
		342.50			381.10
9	3249.617		27	10030.817	
		336.00			351.00
10	3585.617		28	10381.817	
		339.50			311.00
11	3925.117		29	10692.817	
		262.50			404.90
12	4187.619		30	11097.717	
		401.53			364.90
13	4589.148		31	11462.617	
		381.91			350.10
14	4971.057		32	11812.717	
		383.71			354.90
15	5354.766		33	12167.617	
		385.50			352.50
16	5740.267		34	12520.117	
		380.38			354.90
17	6120.648		ITALIA / ITALIE	12875.017	
		384.90			

Tab. 2.1: Posizioni dei rifugi.

## 2.4 Stazioni tecniche (ST)

Ci sono quattro tipologie differenti di ST: il tipo standard, le ST combinate con le centrali di ventilazione, le ST integrate negli edifici lato Italia e lato Francia.

- Numero 8 all'interno della galleria, disposte a coppie (pari e dispari);  
2 all'esterno della galleria;
- Potenza installata ca. 2 x 300 kW in ogni ST interna;
- Potenza dissipata ca. 2 x 15 kW in ogni ST interna;

Nelle due stazioni tecniche combinate con le centrali di estrazione massiva la potenza installata dei ventilatori per l'estrazione fumi si aggiunge ai valori sopra indicati. Il dimensionamento della ventilazione permanente delle ST non viene influenzato dai ventilatori per l'estrazione fumi in quanto quest'ultimi entrano in servizio solo in caso di evento nella galleria di sicurezza; ciò comporta un'interruzione della ventilazione delle ST.

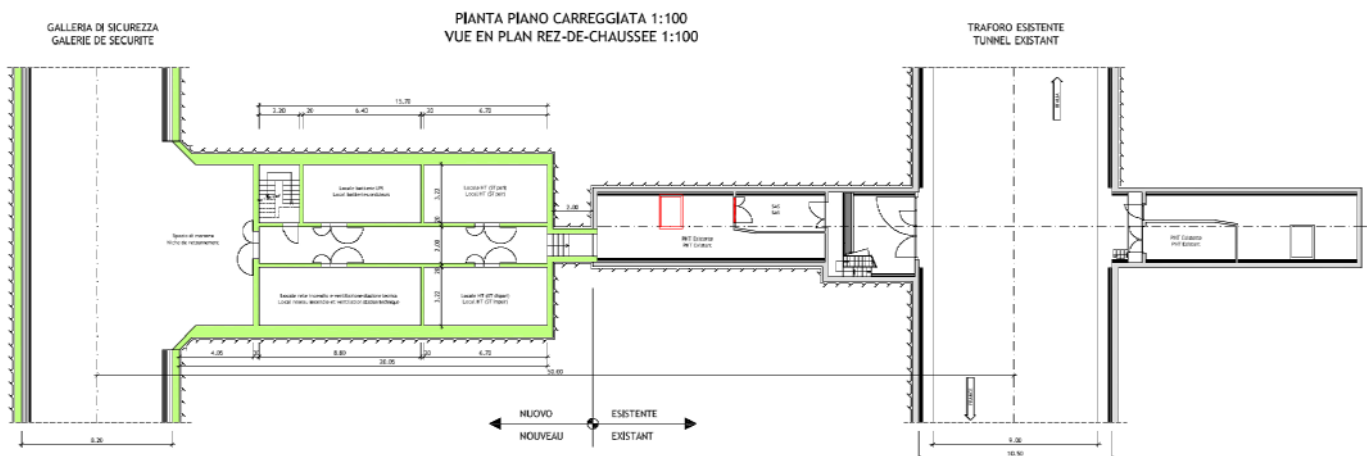


Fig. 2.5: Disegno di una ST standard e dei PHT esistenti, al piano carreggiata.

Le posizioni delle Stazioni Tecniche sono specificate nella tabella seguente.

ST		
No. ST No. ST	PM ST PM ST	DISTANZA DISTANCE
FRANCIA / FRANCE	0.00	
		1559.89
3/18	1559.887	
		1306.73
5/16	2866.617	
		1444.78
7/14	4311.397	
		1328.27
9/12	5639.667	
		1538.10
11/10	7177.767	
		1796.73
13/8	8974.497	
		1096.82
15/6	10071.317	
		1350.80
17/4	11422.117	
		1452.90
ITALIA 19/2 / ITALIE 19/2	12875.017	

Tab. 2.2: Posizione delle Stazioni Tecniche.

## 2.5 By-pass carrabili

Saranno realizzate tre tipologie di by-pass: by-pass 1 e 5 presso le inversioni di marcia, by-pass 2 e 4 di fronte alle centrali di ventilazione sotterranee B e C, by-pass 3 presso il laboratorio.

- Numero totale 5
- Superficie all'interno del by-pass 135 m<sup>2</sup> (22 m x 6.15 m)
- Volume totale del by-pass ca. 550 m<sup>3</sup> (22 m x 25 m<sup>2</sup>)

### 3. CONCETTO DELLA VENTILAZIONE

#### 3.1 Esigenze della ventilazione

Le installazioni devono soddisfare le seguenti esigenze:

- Ventilare la galleria in condizioni di emergenza, in modo da permettere la circolazione dei mezzi di soccorso, assicurare il comfort psicologico del personale preposto ai soccorsi e degli utenti evacuati dal traforo, in caso d'incendio o altra situazione di emergenza nel traforo;
- In caso di evento nel traforo, ventilare i rifugi, le nuove ST e i by-pass con aria dalla galleria per permettere a questi locali e al traforo una sovrappressione sufficiente ad impedire la penetrazione di fumi nei rifugi, nelle ST, nei by-pass e nella galleria stessa.
- Impedire un corto circuito dei fumi in caso di evento tra i portali del traforo e della galleria.
- Ventilare la galleria in condizioni normali di esercizio per permettere la circolazione dei veicoli di servizio incaricati di effettuare i lavori di manutenzione in galleria e nel traforo e allo stesso tempo garantire il comfort psicologico del Personale preposto.
- Estrazione massiva dei fumi in caso di evento nella galleria di sicurezza attraverso i pozzi o i portali più vicini.

I principali parametri che influenzano la ventilazione sono:

- Evento nel traforo e la relativa magnitudo;
- Evento in galleria di sicurezza ed il relativo magnitudo;
- Differenza di pressione barometrica tra i portali;
- Condizioni di emergenza in galleria, nei rifugi, nei rami e nelle ST;
- Condizioni normali in galleria, nei rifugi, nei rami di comunicazione e nelle ST;
- Condizioni termiche nei rifugi, nei rami di comunicazione e nelle ST, a seguito di un incendio nel Traforo;
- Localizzazione degli acceleratori per la ventilazione longitudinale e loro modalità di regolazione e di esercizio;
- Esercizio delle centrali d'estrazione massiva legata ai pozzi delle centrali B e C esistenti;

- Integrazione del controllo degli acceleratori, dei ventilatori della galleria nel sistema di controllo del traforo (G.T.C.).

### 3.2 Scelta del concetto

E' stata scelta la ventilazione longitudinale con gli acceleratori in volta:

- per la pressurizzazione della galleria in caso di evento nel traforo,
- per gestire la velocità longitudinale in caso di evento nella galleria stessa,
- per la ventilazione sanitaria in modalità d'esercizio, quando il livello dell'inquinamento richiede una ventilazione meccanica supplementare.

Per poter gestire pienamente un evento nella galleria, con sufficiente sicurezza per il personale eventualmente presente in galleria e impatto minimo sulle strutture e gli equipaggiamenti, le centrali di estrazione massiva sono previste in prossimità delle due centrali sotterranee esistenti raccordate ai pozzi d'aria viziata.

### 3.3 Potenza d'incendio

La ventilazione della galleria di sicurezza è dimensionata per poter gestire un evento che vede coinvolti i veicoli di soccorso. L'incendio di dimensionamento è dunque il seguente:

- |                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| – Potenza d'incendio | 30 MW                |
| – Portata dei fumi   | 80 m <sup>3</sup> /s |

### 3.4 Condizioni meteorologiche e ambientali

#### 3.4.1 Differenza di pressione tra i portali

La differenza di pressione meteorologica con valori nella percentuale del 95 tra -300 e +500 Pa è considerata in accordo al documento [5] e in conformità con la Circolare [1], che richiede di considerare « gli effetti atmosferici sfavorevoli ma non quelli eccezionali ».

I valori positivi significano che la pressione è più elevata nel lato francese.

### 3.4.2 Densità

La densità (massa volumetrica) dell'aria di dimensionamento calcolata per un'altitudine di 1'250 m e una temperatura media in galleria di 25 °C è:

$$\rho=1.05 \text{ kg/m}^3$$

### 3.5 Gestione della ventilazione dei rifugi

La Circolare Interministeriale francese [1] (capitolo 3.2.3) contiene delle precise prescrizioni per la ventilazione dei rifugi:

- I rifugi dovranno essere dotati di un sistema di ventilazione specifico.
- La qualità dell'aria sarà mantenuta in permanenza tramite tre ricambi orari.
- La ventilazione dovrà essere automaticamente rinforzata durante l'occupazione di un rifugio, per assicurare una portata globale di 2'500 m<sup>3</sup>/h per una superficie al suolo di 50 m<sup>2</sup>.
- 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.
- Durante ogni utilizzazione, il percorso che serve d'accesso ai soccorsi ed all'evacuazione delle persone che hanno trovato riparo nei rifugi, sarà ventilato in modo tale da assicurare la qualità dell'aria.
- In caso di utilizzazione, la temperatura ambiente dell'aria di un rifugio o di un accesso, dovrà essere mantenuta a meno di 40 °C durante almeno 120 minuti. Questa condizione sarà verificata per un incendio di 200 MW, nelle più sfavorevoli condizioni di posizione incendio e di ventilazione del traforo (compreso il mancato funzionamento dell'estrazione fumi).
- La ventilazione dei rifugi e dei loro accessi dovrà essere concepita seguendo il principio della ridondanza delle installazioni: almeno due ventilatori funzionanti in parallelo, o ventilatore di soccorso.

In modalità d'esercizio normale, la differenza di pressione tra rifugio e galleria di sicurezza può raggiungere i 1'100 Pa (capitolo 4.2). Malgrado una porta scorrevole sia prevista tra rifugio e galleria, tale differenza di pressione è comunque troppo

elevata per permettere l'apertura della porta. Se la sua apertura è necessaria, in un primo tempo il ventilatore deve essere messo fuori servizio per ridurre la pressione differenziale ad un valore inferiore di 1000 Pa (differenza di pressione abituale raggiunta ad esempio nel traforo autostradale del San Gottardo tra rifugio e traforo che permette ancora l'apertura delle porte scorrevoli).

In caso d'incendio nel traforo, la differenza di pressione tra traforo e galleria di sicurezza diminuisce rapidamente fintanto che detta porta potrà essere aperta, anche in caso di funzionamento della ventilazione del rifugio.

### **3.6 Gestione della ventilazione delle stazioni tecniche**

La ventilazione delle stazioni tecniche deve essere compatibile con le esigenze legate al funzionamento efficace e durevole degli impianti installati.

Le stazioni tecniche prendono l'aria dalla galleria di sicurezza e la re-immettono per la maggior parte nella galleria stessa, in quanto lo spazio nei PHT - prima del trasferimento degli impianti - non è sufficiente per far passare le condotte di ventilazione verso il traforo.

La presa e l'espulsione dell'aria quasi nello stesso posto nella galleria crea chiaramente il rischio di un corto-circuito tra i due flussi. Tuttavia, un tale corto-circuito non è problematico, in quanto il raffreddamento dell'aria è assicurato da un monoblocco di climatizzazione raffreddato con acqua. E' dunque sufficiente assicurare un apporto di aria fresca tale da soddisfare almeno le esigenze sanitarie.

Prima del trasferimento degli impianti, i PHT sono ventilati con il sistema attualmente in servizio che alimenta i locali di aria proveniente dalla condotta d'aria fresca del traforo. Dopo il ribaltamento, l'aria è presa dalla stazione tecnica, passa dai PHT ed è espulsa verso il traforo. In modalità di servizio, il traforo sarà in sovrappressione rispetto alla galleria di sicurezza (capitolo 4.2). Il locale del PHT accanto al traforo servirà dunque da zona filtro (SAS) e sarà dunque pressurizzato ad un livello di pressione superiore rispetto al traforo stesso per evitare l'infiltrazione di aria viziata e inquinata.

Se è necessario accedere alla condotta d'aria fresca oppure aprire il SAS per un'altra ragione, un sistema di depressurizzazione permette di ridurre la pressione nel SAS fino al livello di pressione della ST/PHT in modo che le persone provenienti



dalla galleria di sicurezza vi possano entrare. In seguito si deve richiudere la porta tra la PHT e il SAS per ristabilire la pressione a livello di traforo. Si tratta dunque di una specie di sistema a chiuse.

In caso di evento all'interno della stazione tecnica, la ventilazione è bloccata per impedire una propagazione dei fumi verso la galleria o il traforo.

### **3.7 Gestione della ventilazione dei by-pass**

La ventilazione dei by-pass deve assicurare la qualità dell'aria con un ricambio del volume del by-pass circa tre volte all'ora e la pressurizzazione del by-pass a livello superiore a quello del traforo per impedire la penetrazione di aria viziata e inquinata.

La circolazione d'aria si effettua nel senso galleria - by-pass - traforo in modo da mantenere l'atmosfera del by-pass in sovrappressione di ca. 80 Pa rispetto al traforo. L'accesso al by-pass dalla galleria di sicurezza avviene secondo le seguenti fasi:

- La serranda d'espulsione direzione traforo si chiude, il ventilatore del by-pass (ubicato lato galleria) è messo fuori servizio.
- La pressione nei by-pass è riportata alla pressione della galleria aprendo una serranda di depressurizzazione tra il by-pass e la galleria.
- La porta lato galleria si apre.
- Il veicolo entra.
- La porta si chiude.
- La serranda di depressurizzazione si chiude, il ventilatore viene messo in servizio.
- Quando la pressione del traforo è raggiunta nel by-pass, la porta verso il traforo si apre e il veicolo può uscire.

In caso di evento all'interno del by-pass, la ventilazione è bloccata e le serrande vengono chiuse per impedire una propagazione dei fumi verso la galleria o verso il traforo.

Queste operazioni si svolgono in automatico e la durata è di ca. 30 secondi.

### 3.8 Funzionamento d'insieme

#### 3.8.1 Funzionamento normale

In condizioni normali di funzionamento, l'introduzione di un flusso d'aria eccessivo nella galleria di sicurezza è impedita, chiudendo una porta al portale con pressione atmosferica più bassa, se si supera una velocità longitudinale di ca. +/- 2 m/s. Questa porta sarebbe immediatamente aperta in caso di evento nel traforo o nella galleria.

Poiché almeno un portale della galleria rimane aperto e la sezione della galleria è tale da poter trascurare la perdita di attrito, l'apporto di aria fresca nei rifugi, by-pass e ST non richiede una ventilazione meccanica specifica, ma si effettua direttamente mediante ventilatori in detti locali.

Ogni locale tra il traforo e la galleria è dunque munito di ventilatori che riprendono l'aria dalla galleria di sicurezza e la respingono nel traforo, oppure, se si tratta delle ST, in parte nella galleria stessa.

Il progetto preliminare [4] prevedeva due soluzioni per la circolazione dell'aria verso i rifugi e verso le ST:

- circolazione d'aria fresca dalla galleria al traforo. In questo caso l'aria utilizzata per la ventilazione dei rifugi e delle ST è respinta nel traforo;
- circolazione di aria fresca dalla galleria ai rifugi o alle ST e respinta nella galleria stessa, senza espulsione di aria verso il traforo.

La seconda soluzione era stata preferita in [4], principalmente per ragioni di stabilizzazione delle pressioni.

Per la ventilazione dei rifugi si ritiene comunque più pertinente la prima soluzione, che offre migliori garanzie contro la penetrazione di fumo ed è la sola che permette di gestire in modo preciso la sovrappressione di un rifugio, rispetto al traforo, mediante riduzione controllata delle portate effluenti.

Analogamente questa soluzione vale anche per i by-pass, perché la loro ubicazione tra galleria di sicurezza e traforo facilita la ventilazione con un flusso d'aria longitudinale e unidirezionale.

Per le ST invece, la maggior parte dell'aria è re-immessa nella galleria semplicemente perché lo spazio nei PHT adiacenti al traforo non è sufficiente a far passare

l'aria viziata dalla ST al traforo. Le PHT saranno equipaggiati di un SAS in direzione traforo dopo il trasferimento degli impianti.

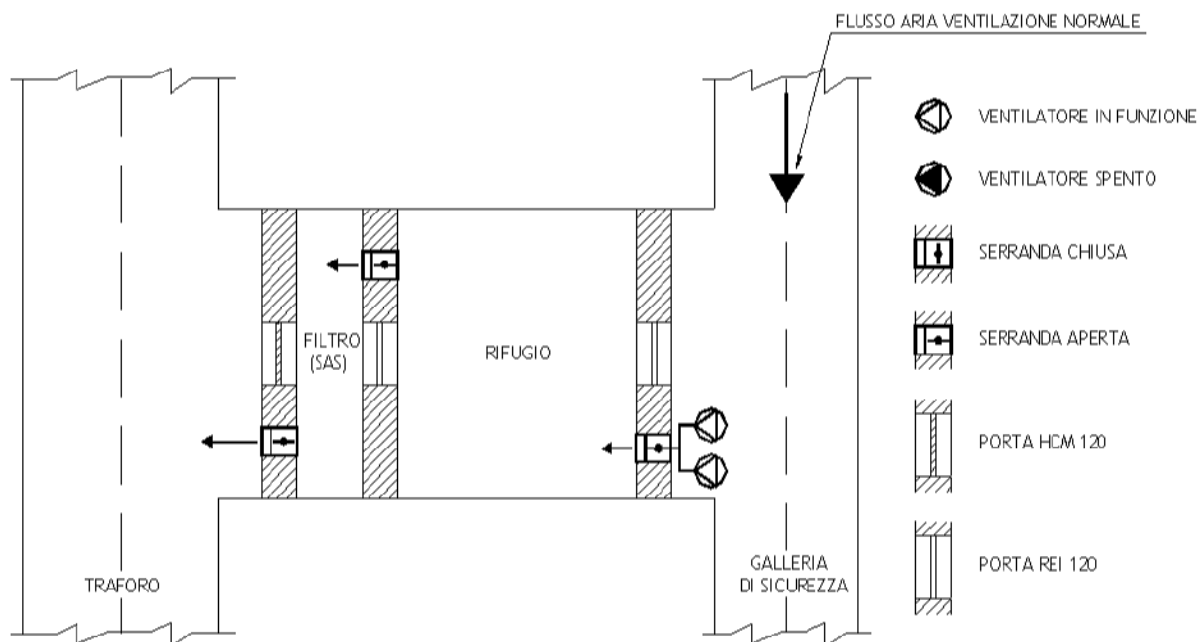


Fig. 3.1: Ventilazione dei rifugi, funzionamento normale.

### 3.8.2 Funzionamento in caso di evento nel traforo

Il caso d'incendio nel traforo stesso costituisce l'eventualità più probabile e anche la più pericolosa per gli utenti.

#### 3.8.2.1 Ventilazione dei rifugi

La ventilazione dei rifugi funziona come nella modalità normale, tuttavia con una portata d'aria fresca aumentata, Fig. 3.2.

Lato traforo sono previste le serrande taglia-fuoco, che restano normalmente in posizione aperta, in quanto la circolazione di aria fresca è sufficiente ad impedire ogni penetrazione di fumi e di calore. Le serrande non vengono utilizzate, se non in caso di un sovra-riscaldamento termico all'interno della condotta di scarico, che può avvenire unicamente nel raro caso di perdita completa di alimentazione d'aria fresca in un rifugio ubicato in prossimità dell'incendio o di un irradiazione termico d'intensità molto alta.

Un sensore di pressione differenziale rileva la sovrappressione nel rifugio rispetto al traforo.

Dei dispositivi di contatto indicano se le due porte del SAS restano aperte. In quel caso, la portata d'aria fresca aumenta per raggiungere una velocità media attraverso le porte aperte di almeno 1 m/s, onde ridurre il rischio di penetrazione di fumo, come consigliato dalla relativa raccomandazione svizzera [17].

Se invece restano aperte 3 porte di un rifugio creando un corto-circuito tra traforo e galleria, il sistema di ventilazione del rifugio stesso non è più in grado di controllare i flussi d'aria. Il sistema di controllo della ventilazione della galleria di sicurezza cerca tuttavia di mantenere una sovrappressione nella galleria, anche vicino al luogo dell'evento, impedendo anche in questo caso la penetrazione del fumo in galleria.

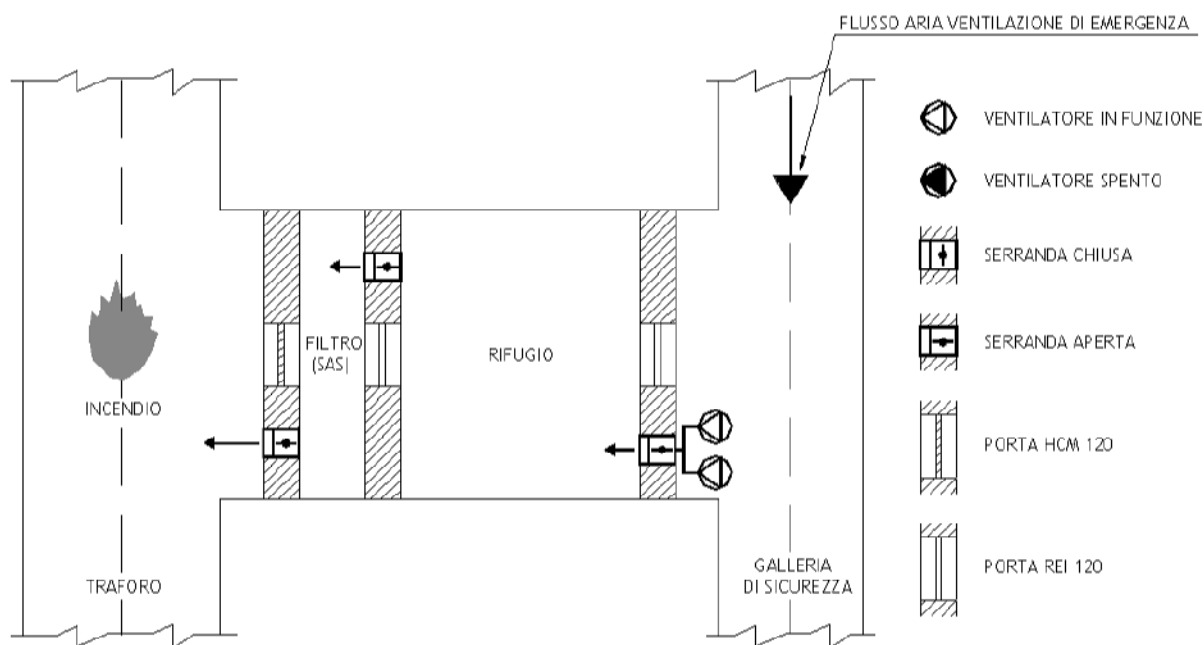


Fig. 3.2: Ventilazione dei rifugi in caso di evento nel traforo.

### 3.8.2.2 Ventilazione dei by-pass

La ventilazione dei by-pass funziona come in modalità di servizio normale.

### 3.8.2.3 Ventilazione delle ST

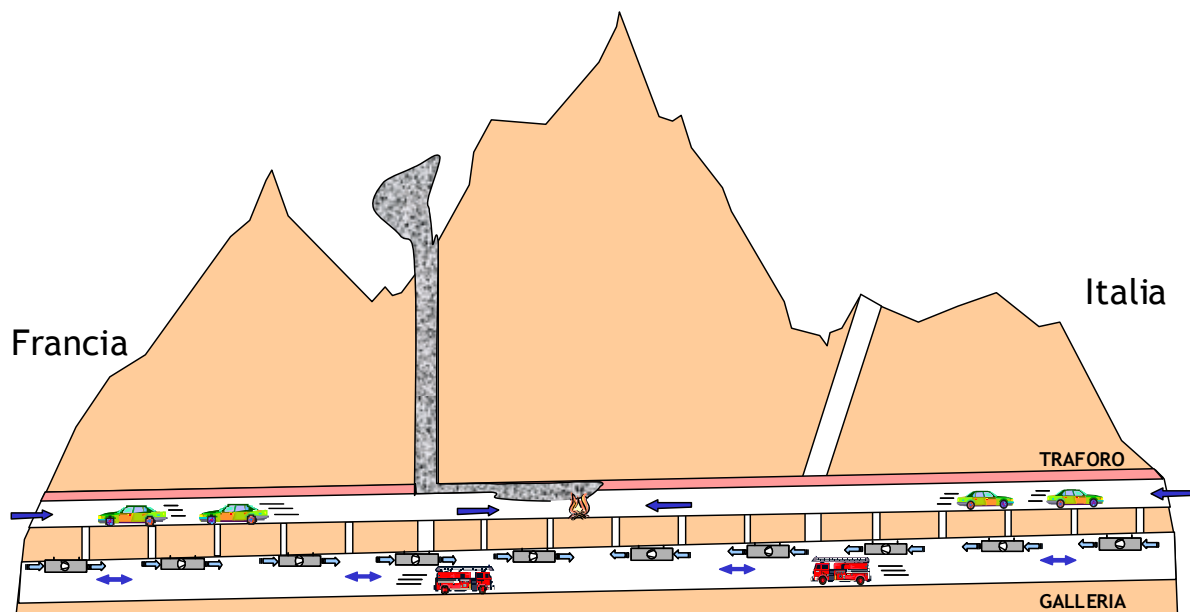
La ventilazione dei ST funziona come in modalità di servizio normale.

#### 3.8.2.4 Ventilazione nella galleria di sicurezza

Se un portale della galleria è chiuso con una porta al momento di un evento, detta porta verrà immediatamente aperta per garantire l'accesso ai soccorsi.

Simultaneamente il sistema di controllo degli acceleratori entra in funzione con la seguente sequenza:

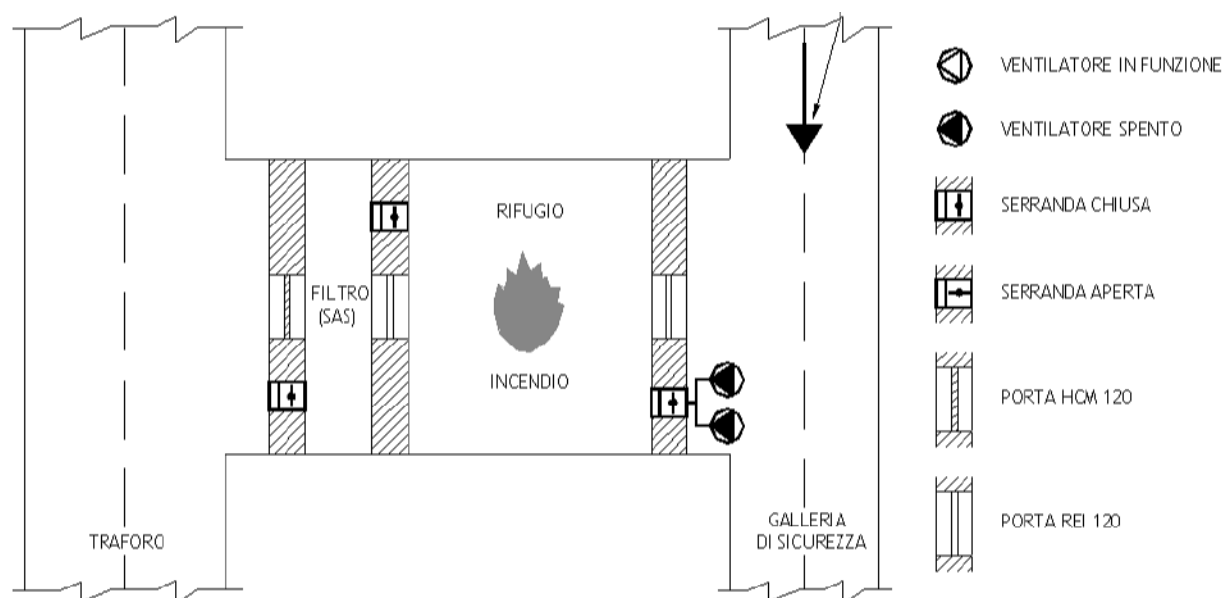
- In presenza di una differenza di pressione atmosferica tra i due portali, viene messo in servizio un numero sufficiente di acceleratori per bilanciare detta differenza e impedire l'induzione di una velocità longitudinale nella galleria al di là del flusso richiesto per il rifugio, le ST e i by-pass. In un primo tempo, il numero di acceleratori messi in servizio è dunque diretto in funzione della differenza di pressione effettivamente misurata, per entrare in seguito in una regolazione ad anello chiuso, basato su misure di velocità d'aria in galleria. Gli acceleratori sono inseriti dal portale con la pressione più bassa per poter ottenere una zona di sovrappressione in prossimità del luogo di evento.
- Se l'estrazione fumi nel traforo avviene mediante una centrale al portale (A o D), il sistema di regolazione degli acceleratori vigila affinché l'aria esca con una velocità longitudinale debole attraverso detto portale (ca. 0.5 m/s) onde evitare un corto-circuito dei fumi dal traforo verso la galleria.
- Gli acceleratori ancora fuori servizio dopo queste manovre essenziali sono poi gestiti in maniera da creare una sovrappressione nella galleria di sicurezza di fronte all'evento, innescandosi per una metà in un senso e rispettivamente l'altra metà nel senso opposto. (Fig. 4.16, Fig. 4.17, Fig. 4.18).



**Fig. 3.3** Gestione di un evento nel traforo: ventilazione della galleria in modo da creare una sovrappressione e di controllare la velocità longitudinale.

### 3.8.3 Funzionamento in caso di evento nel rifugio

In caso di evento all'interno di un rifugio o di un rispettivo SAS, la ventilazione di detto rifugio viene spenta e le aperture verso il traforo e la galleria sono chiuse con delle serrande taglia-fuoco, Fig. 3.4.



**Fig. 3.4:** Ventilazione dei rifugi in caso di evento al suo interno.

La ventilazione del traforo e della galleria passano in modalità emergenza, cioè nel traforo viene attivato lo scenario di estrazione fumi con aspirazione concentrata di fronte al rifugio, mentre la gestione della ventilazione nella galleria avviene secondo la procedura descritta nel paragrafo 3.8.2.

#### *3.8.4 Funzionamento in caso di evento in una stazione tecnica (ST) o by-pass*

In caso d'incendio all'interno di una ST o di un by-pass, la ventilazione del locale viene fermata e le aperture della galleria e del traforo sono chiuse con serrande taglia-fuoco.

La ventilazione del traforo e della galleria passano in modalità emergenza, cioè nel traforo viene attivato lo scenario di estrazione fumi con aspirazione concentrata nel luogo della ST/by-pass e la gestione della ventilazione nella galleria avviene secondo la procedura descritta nel capitolo 3.8.2.

#### *3.8.5 Funzionamento in caso di evento nella galleria*

La galleria è un elemento fondamentale per la sicurezza degli utenti nel traforo. Come descritto nel capitolo 1, ogni altra funzione, in particolare il transito del personale di servizio, è subordinata a detta funzione principale. La possibilità che un evento si verifica è debole, ma va tuttavia considerato. La scelta della filosofia di gestione in caso d'incendio nella galleria si basa sui seguenti elementi:

- priorità alla sicurezza degli utenti
- interazione minima tra galleria e traforo
- disponibilità massima dei rifugi
- semplicità di configurazione e di gestione.

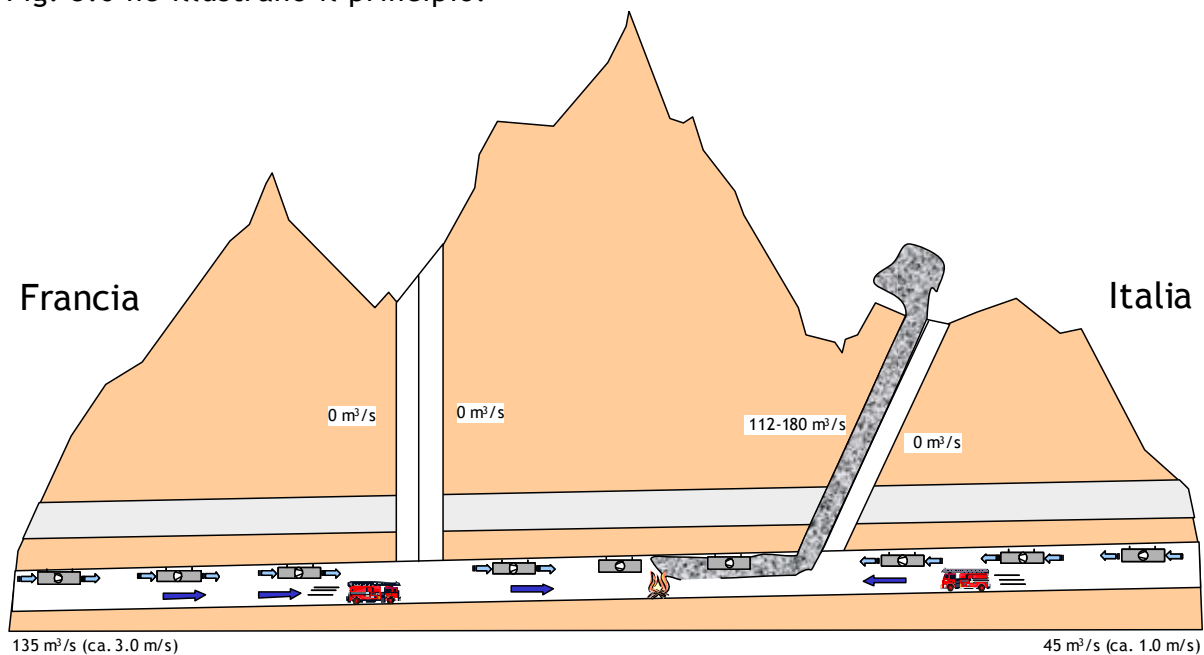
L'estrazione dei fumi nella galleria può in linea di principio essere garantito in tre modi:

1. Espulsione dei fumi verso il traforo mediante i rifugi/by-pass, con estrazione concentrata.
2. Gestione dei fumi all'interno della galleria unicamente in modalità longitudinale.
3. Gestione dei fumi all'interno della galleria in modalità longitudinale con estrazione massiva.

La **prima alternativa** comporta una forte interazione tra traforo e galleria di sicurezza. Sarebbe ottima dal punto di vista della sicurezza della galleria. Tuttavia, ogni inizio di evento nella galleria avrebbe un importante impatto sul traforo, con effetti simili a quelli di un evento nel traforo stesso, dal momento che i fumi entrerebbero in quest'ultimo e ne dovrebbero poi essere estratti. Quest'opzione è dunque da scartare.

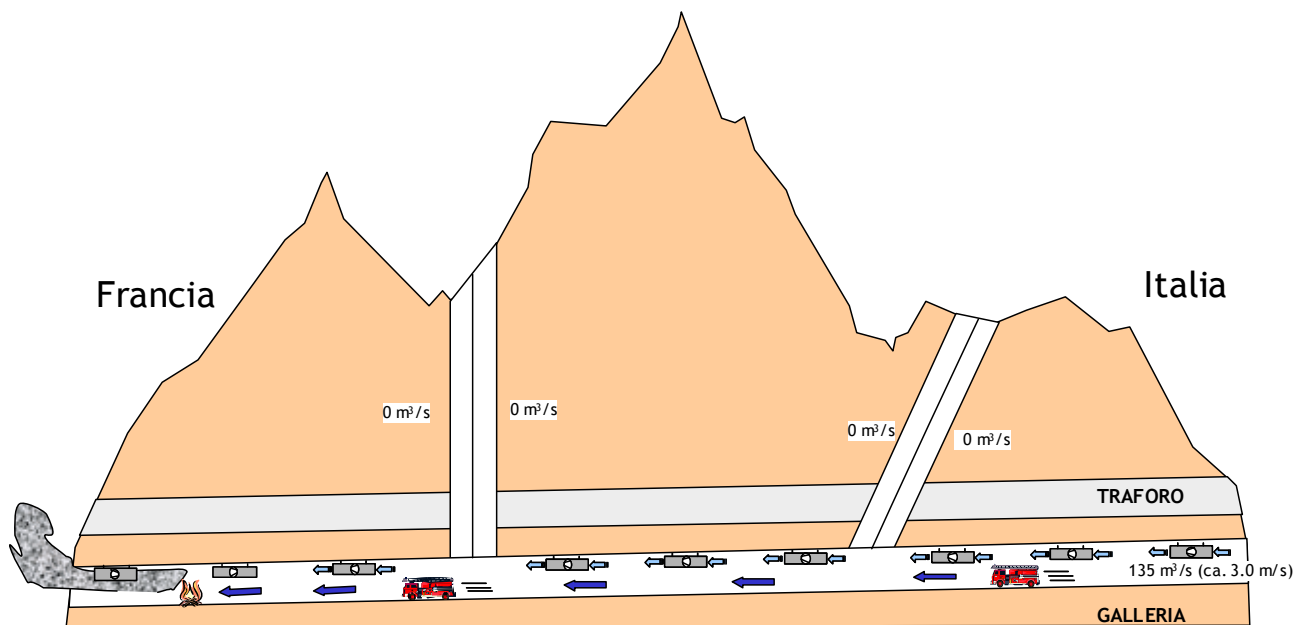
La **seconda alternativa** è quella adottata e sviluppata nel progetto definitivo precedente [11]. Benché semplice, economica e compatta, questa soluzione permetterebbe solamente una stabilizzazione dell'aria per limitare la lunghezza di propagazione dei fumi e limitarne - nella misura del possibile - la destratificazione, oppure l'espulsione dei fumi in una direzione su una lunghezza fino a metà della galleria.

La **terza alternativa** adottata ora consiste in un sistema di ventilazione longitudinale combinata con le centrali d'estrazione massiva dei fumi E ed F situate in prossimità delle centrali sotterranee B e C di ventilazione del traforo. Il principio del funzionamento generale è simile a quello della seconda alternativa ma ottimizzato in maniera da poter limitare le zone con fumo ad una distanza massima di ca. 2.2 km, la semi-distanza tra due punti di estrazione oppure un portale. Le Fig. 3.5 e Fig. 3.6 ne illustrano il principio.



**Fig. 3.5:** Gestione di un evento nella galleria di sicurezza: ventilazione longitudinale ed estrazione massiva dei fumi.





**Fig. 3.6:** Gestione di un evento nella galleria di sicurezza vicino ad un portale: ventilazione longitudinale ed estrazione dei fumi attraverso il portale.

La gestione di un evento nella galleria avverrà in una fase iniziale in modalità automatica, basata sui dati dell'installazione del rilevatore d'incendio (rilevatori di fumo ogni 100 m) per garantire una risposta rapida.

Questa prima reazione, priva di informazioni sulla presenza di persone nella galleria di sicurezza, è prudente e non implica l'inversione del senso di corrente dell'aria iniziale onde mantenere il più possibile la stratificazione dei fumi e permettere la fuga degli utenti. La velocità iniziale d'aria massima adottata in automatico sarà dunque limitata a 1.5 m/s, tollerando un'eventuale propagazione dei fumi nel senso opposto (« backlayering »).

Se nella fase successiva gli operatori verificano l'assenza di persone nella zona di espulsione dei fumi, la velocità di espulsione può essere incrementata a 3 m/s in modalità manuale tramite scelta del relativo scenario di estrazione fumi adatto.

Quando un portale della galleria è chiuso con una porta all'inizio di un evento, questa sarà immediatamente aperta per garantire l'accesso ai soccorsi e per commutare la messa in servizio dell'estrazione fumi.

La gestione automatica di quest'ultima avviene nel modo seguente in funzione del settore interessato:

INCENDIO NEI SETTORI 1 O 2		
Settore d'incendio	Senso della velocità iniziale della corrente d'aria	Azione
Settore 1 o 2	direzione Francia, < -0.5 m/s	Espulsione attraverso il portale francese con -1.5 m/s
Settore 1 o 2	direzione Italia, > +0.5 m/s	Velocità longitudinale di 1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la centrale B, velocità nel senso opposto a valle -1 m/s
Settore 1	> -0.5 m/s e < +0.5 m/s	Espulsione attraverso il portale francese con -1.5 m/s
Settore 2	> -0.5 m/s e < +0.5 m/s	Velocità longitudinale di 1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la centrale B, velocità nel senso opposto a valle -1 m/s

**Tab. 3.1:** Scenario automatico di estrazione fumi nei settori 1 e 2.

INCENDIO NEI SETTORI 3 O 4		
Settore d'incendio	Senso della velocità iniziale della corrente d'aria	Azione
Settore 3 o 4	Direzione Francia, < -0.5 m/s	Velocità longitudinale di -1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la centrale B, velocità nel senso inverso a valle 1 m/s
Settore 3 o 4	Direzione Italia, > +0.5 m/s	Velocità longitudinale di 1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la C, velocità nel senso inverso a valle -1 m/s
Settore 3	> -0.5 m/s e < +0.5 m/s	Velocità longitudinale di -1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la centrale B, velocità nel senso inverso a valle 1 m/s
Settore 4	> -0.5 m/s e < +0.5 m/s	Velocità longitudinale di 1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la centrale C, velocità nel senso inverso a valle -1 m/s

**Tab. 3.2:** Scenario automatico di estrazione fumi nei settori 3 e 4

INCENDIO NEI SETTORI 5 O 6		
Settore d'incendio	Senso della velocità iniziale della corrente d'aria	Azione
Settore 5 ou 6	Direzione Francia, < -0.5 m/s	Velocità longitudinale di -1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la centrale C, velocità nel senso inverso a valle 1 m/s
Settore 5 ou 6	Direzione Italia, > +0.5 m/s	Espulsione attraverso il portale italiano con -1.5 m/s
Settore 5	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Velocità longitudinale di -1.5 m/s ed estrazione massiva attraverso la centrale C, velocità nel senso inverso a valle 1 m/s
Settore 6	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Espulsione attraverso il portale italiano con -1.5 m/s

Tab. 3.3: Scenario automatico di estrazione fumi nei settori 5 e 6

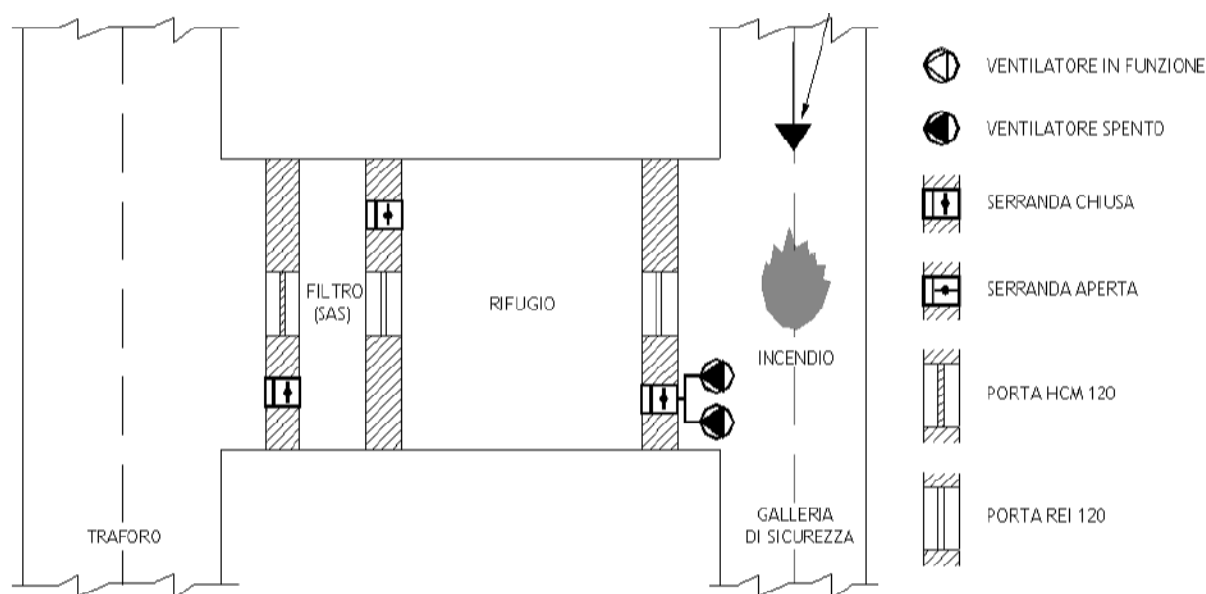


Fig. 3.7: Ventilazione dei rifugi in caso di evento nella galleria.

La GTC metterà in atto alcune misure fondamentali complementari in modalità automatica:

- chiusura del traforo
- arresto dell'introduzione di aria fresca nei rifugi, Fig. 3.7
- arresto della ventilazione nelle stazioni tecniche e by-pass

- portata massima d'aria fresca nel traforo per pressurizzarlo e impedire così la penetrazione dei fumi (AF 65% per limitare la velocità attraverso i portali del traforo a 10 m/s).

## 4. BASI DI DIMENSIONAMENTO

### 4.1 Portata d'aria fresca necessaria

#### 4.1.1 Condizioni normali di funzionamento

In condizioni di funzionamento normale la portata d'aria fresca è la seguente:

##### 4.1.1.1 Galleria

Il ricambio della galleria è garantita dall'aria fresca richiesta per ventilare i rifugi, i by-pass e le stazioni tecniche.

##### 4.1.1.2 Rifugi

Specificata in [1]: 3 ricambi/h  $\approx 3^{1/h} * 530 \text{ m}^3 = 1590 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0.44 \text{ m}^3/\text{s}$ .

##### 4.1.1.3 Stazioni tecniche (ST)

La portata d'aria fresca necessaria per togliere il calore dissipato dagli apparecchi presenti nei locali ST si calcola (se la climatizzazione non è utilizzata) sulla base della formula di trasporto calorico:

$$\dot{V}^* = \frac{P}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T}$$

con

- $\dot{V}^*$  portata d'aria fresca necessaria
- P potenza termica dissipata
- $\rho$  densità dell'aria
- $C_p$  capacità termica dell'aria
- $\Delta T$  differenza di temperatura dell'aria

Tenendo presenti i valori seguenti:

$$\Delta T = 10^\circ\text{C}$$

P = 30 kW per le due ST raggruppate

risulta una portata d'aria fresca di 2.8 m<sup>3</sup>/s per ogni ST. La portata necessaria raddoppia in caso di riduzione del  $\Delta T$  a 5°C. Si utilizzerà qui un valore intermedio di 3.3 m<sup>3</sup>/s per ogni ST.

Un flusso parziale di ca. 0.85 m<sup>3</sup>/s di detta portata può essere convogliata nel traforo secondo lo spazio a disposizione nei PHT, mentre 2.45 m<sup>3</sup>/s sono re-immessi nella galleria.

#### 4.1.1.4 By-pass carrabili

Analogamente ai rifugi: 3 ricambi/h  $\approx 3 \text{ }^1/\text{h} * 550 \text{ m}^3 = 1650 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.1.1.5 Portata d'aria totale verso il traforo in condizioni di funzionamento normale

Elemento	Portata AF	Numero	Portata AF totale
Rifugio	0.44 m <sup>3</sup> /s	34	15.0 m <sup>3</sup> /s
ST	0.85 m <sup>3</sup> /s	8	6.8 m <sup>3</sup> /s
By-pass	0.46 m <sup>3</sup> /s	5	2.3 m <sup>3</sup> /s
TOTALE			24.1 m <sup>3</sup> /s

**Tab. 4.1:** Portata d'aria verso il traforo in condizioni di funzionamento normali.

#### 4.1.2 Lavori di manutenzione

In caso di lavori nella galleria o nei locali, la portata d'aria fresca può essere aumentata per ridurre la temperatura o le concentrazioni di inquinanti tramite la messa in servizio di un numero sufficiente di acceleratori con i due portali aperti.

#### 4.1.3 Incendio nel traforo

In caso d'incendio la portata d'aria fresca sarà la seguente:

##### 4.1.3.1 Galleria di sicurezza

La ventilazione della galleria è garantita dall'aria fresca utilizzata per ventilare i rifugi, i by-pass e le ST.

#### 4.1.3.2 Rifugi

Il bisogno d'aria fresca di una persona per l'approvvigionamento d'ossigeno può variare da 1 a 5 m<sup>3</sup>/h. Sono richiesti 10-25 m<sup>3</sup>/h per persona per eliminare anche gli odori e gli inquinanti. La Circolare francese [1] esige una portata di 2'500 m<sup>3</sup>/h per rifugio in caso di occupazione, basata su una superficie minima di 50 m<sup>2</sup>. Detta quantità d'aria è sufficiente per un massimo di 250 persone. Considerando la superficie utile di un rifugio di 110 m<sup>2</sup>, un'occupazione più elevata non è considerata, ragione per cui la portata di 2'500 m<sup>3</sup>/h non necessita essere adattata alla superficie reale.

Di conseguenza, la specifica in [1]: 2'500 m<sup>3</sup>/h  $\approx$  0.7 m<sup>3</sup>/s vale per ogni rifugio occupato.

Va notato che la Circolare [1] richiede che una portata di 2'500 m<sup>3</sup>/h sia mantenuta simultaneamente in almeno 3 rifugi. La portata minima deve dunque essere di  $3 \times 2'500 \text{ m}^3/\text{h} + 31 \times 1'590 \text{ m}^3/\text{h} \approx 56'800 \text{ m}^3/\text{h} \approx 16 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Quest'esigenza minima è stimata troppo bassa per il traforo del Fréjus. Il dimensionamento è condizionato dalla necessità di poter ventilare l'insieme dei rifugi in modalità incendio, con una portata di  $34 \times 2'500 \text{ m}^3/\text{h} \approx 85'000 \text{ m}^3/\text{h} \approx 24 \text{ m}^3/\text{s}$ .

In caso che le due porte della SAS di un rifugio restano aperte, la portata d'aria fresca di detto rifugio viene aumentata per raggiungere 1 m/s attraverso le porte. Questa condizione corrisponde ad una portata di  $1.4 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m/s} = 2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.1.3.3 Stazioni tecniche (ST)

La portata d'aria fresca necessaria per la dissipazione del calore generato dagli impianti presenti nelle ST è la stessa come in modalità d'esercizio normale.

#### 4.1.3.4 By-pass carrozzabili

La ventilazione è uguale al funzionamento in modalità normale.

#### 4.1.3.5 Portata verso il traforo in caso di evento nel traforo

Elemento	Portata AF	Numero	Portata AF totale
Rifugio	0.70 m <sup>3</sup> /s	34	23.8 m <sup>3</sup> /s
ST	0.85 m <sup>3</sup> /s	8	6.8 m <sup>3</sup> /s
By-pass	0.46 m <sup>3</sup> /s	5	2.3 m <sup>3</sup> /s
<b>TOTALE</b>			<b>32.9 m<sup>3</sup>/s</b>

Tab. 4.2: Portata d'aria verso il traforo in caso di evento.

Le verifiche fatte durante il progetto preliminare (Allegato 1 di [4]) hanno permesso di dimostrare che la temperatura all'interno dei rifugi non supera i 40°C previsti dalla Circolare Interministeriale Francese [1] anche in caso d'incendio nel traforo nell'immediata prossimità di un rifugio.

#### 4.1.4 Incendio nella galleria di sicurezza

In caso d'incendio nella galleria, la portata d'aria fresca necessaria è determinata dalla necessità di raggiungere la velocità critica nella galleria. Una velocità longitudinale dell'aria superiore alla velocità critica rappresenta la condizione necessaria e sufficiente per impedire la propagazione dei fumi a monte dell'incendio, al contrario della direzione di ventilazione [3].

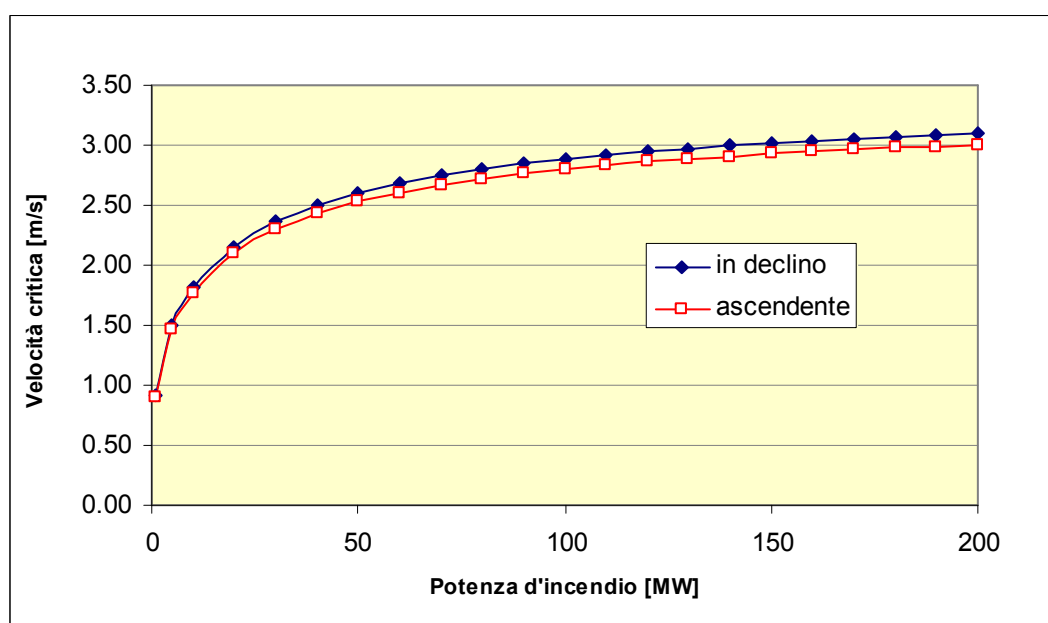


Fig. 4.1: Velocità critica all'interno della galleria di sicurezza [3].

In assenza di norme di prescrizione riguardanti la modalità della ventilazione nella galleria di sicurezza, il sistema di ventilazione è dimensionato con una potenza massima in caso d'incendio di 30 MW (secondo capitolo 3.3). La velocità critica nella galleria è dunque dell'ordine di 2.3 m/s secondo la Fig. 4.1, mentre la circolare Interministeriale Francese ([1], capitolo 3.2.2a) richiede una velocità minima di 3 m/s in caso di traffico unidirezionale. La portata minima da raggiungere in caso di evento, se lo scopo è quello di indirizzare i fumi in una sola direzione, è dunque dell'ordine di  $3 \times 45 \text{ m}^2 = 135 \text{ m}^3/\text{s}$ .

E' dunque questa la condizione più esigente per la ventilazione longitudinale che determinerà il numero e la potenza degli acceleratori richiesti.

## 4.2 Distribuzione di pressione

### 4.2.1 Premessa

La distribuzione di pressione nel traforo e nella galleria sono determinanti per il dimensionamento dei ventilatori e per garantire il buon funzionamento del sistema. Le due distribuzioni sono dapprima calcolate separatamente, poiché l'influenza della galleria sulla pressione del traforo è trascurabile.

### 4.2.2 Pressione nel traforo

#### 4.2.2.1 Introduzione

La pressione dipende da numerosi parametri. I più importanti sono:

- Modalità di ventilazione;
- Traffico;
- Differenza di pressione meteorologica.

Le pressioni più elevate sono raggiunte in caso di regime di ventilazione semi-trasversale associato a traffico intenso. Tenendo conto delle caratteristiche del traforo e del suo sistema di ventilazione (capitolo 2.1), la portata in semi-trasversale può raggiungere un massimo di 65% della capacità dell'aria fresca, a cui corrisponde a una velocità d'aria attraverso i portali di 10 m/s, valore considerato come soglia ammissibile per la sicurezza degli utenti.



Il traffico più elevato considerato ammonta a 500 veicoli/ora per direzione, corrispondente a circa la capacità massima del traforo del Fréjus, tenendo conto del limite di velocità a 70 km/h e della distanza minima di 150 m.

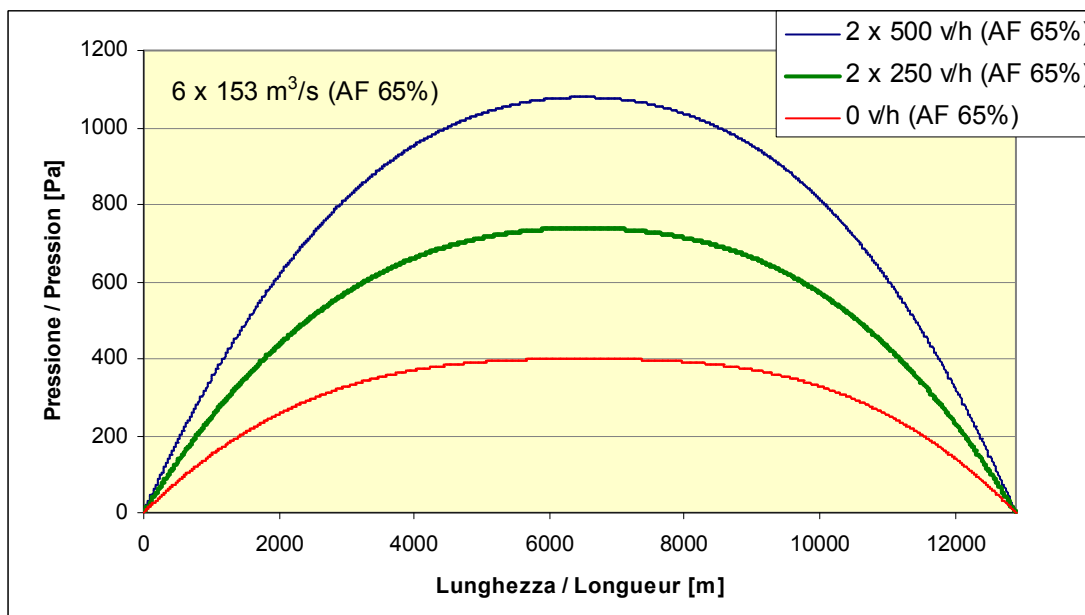


Fig. 4.2: Distribuzione della pressione nel traforo in condizioni normali di funzionamento con ventilazione semi-trasversale e portata d'aria fresca di 65% (70 km/h, 60% de PL,  $\lambda=0.016$  secondo [13]).

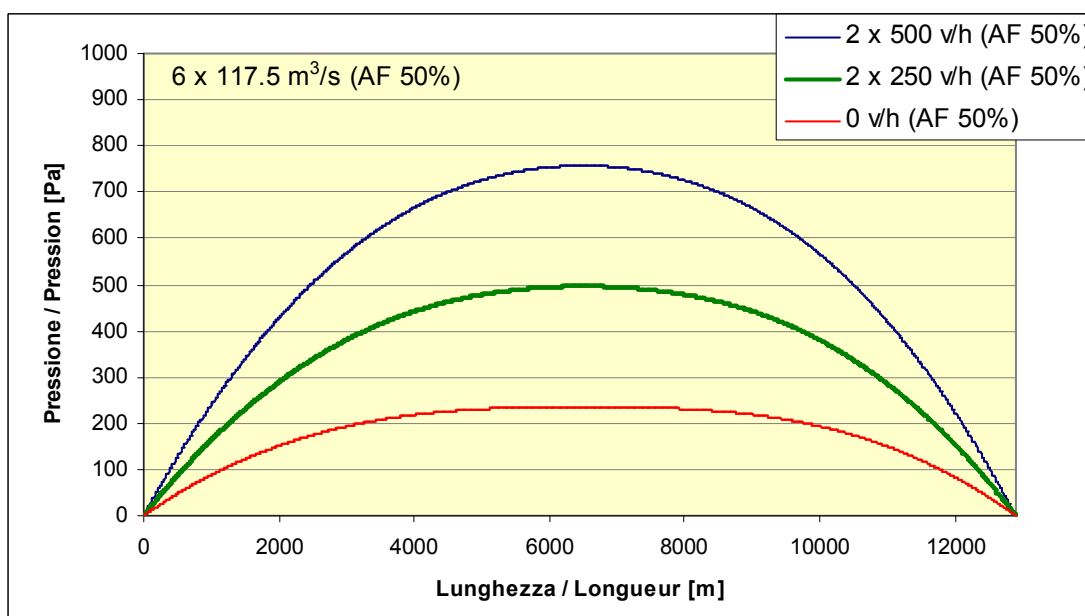
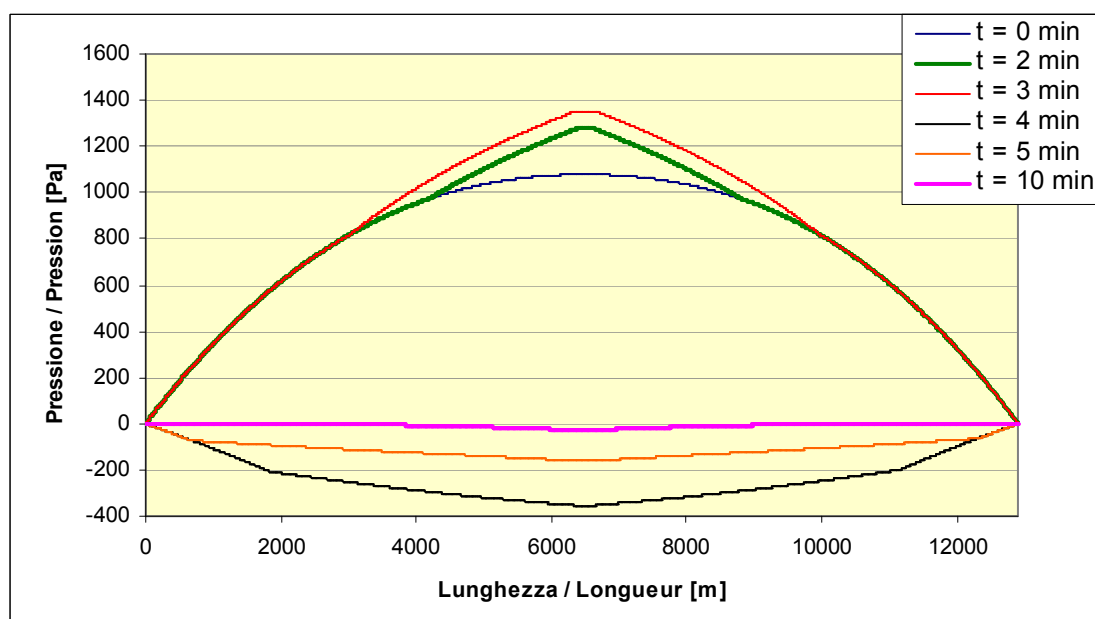


Fig. 4.3: Distribuzione della pressione nel traforo in condizioni normali di funzionamento con ventilazione semi-trasversale e portata d'aria fresca del 50% (70 km/h, 60% de PL,  $\lambda=0.016$  secondo [13]).

L'analisi è stata effettuata utilizzando il programma TunSim. L'evoluzione della pressione nella galleria con ventilazione semi-transversale presenta un massimo al centro, che cresce con la portata di ventilazione e con il volume di traffico (vedi Fig. 4.2 e Fig. 4.3). La sovrappressione è fortemente ridotta in caso di arresto del traffico senza l'effetto pistone dei veicoli.

Quest'analisi dimostra dunque che la pressione al centro della galleria può raggiungere dei valori di 1'100 Pa in condizioni normali di funzionamento al 65% dell'aria fresca.

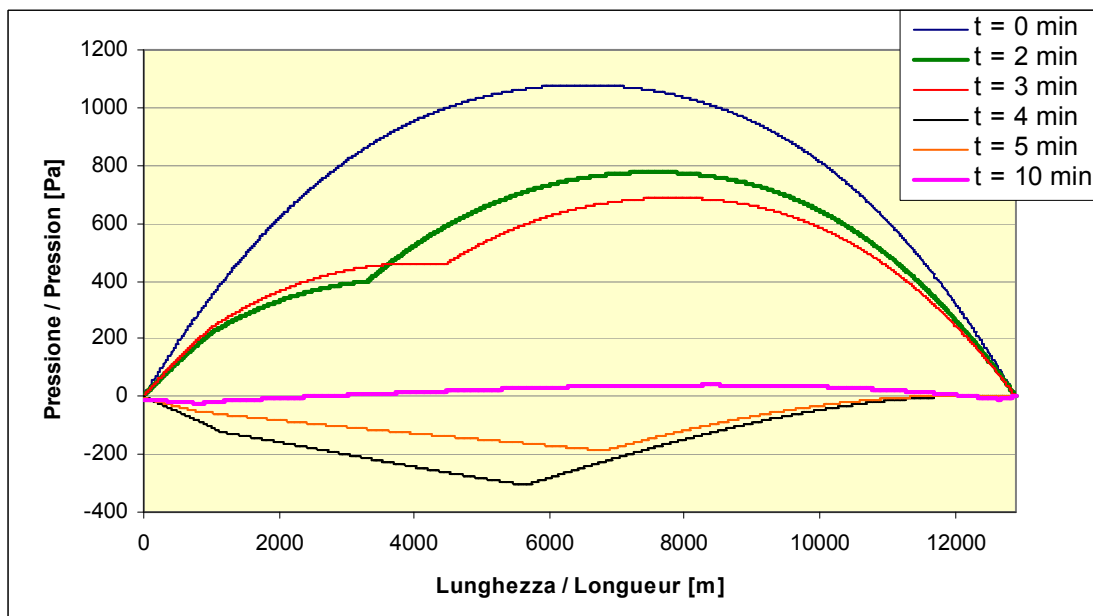


**Fig. 4.4:** Evoluzione temporale della pressione nel traforo in caso d'incendio al centro (2 x 500 v/h, 60% PL, ventilazione iniziale al 65% AF). Nel calcolo si ipotizza che la ventilazione in caso d'incendio parta 3 minuti dopo l'inizio dell'evento.

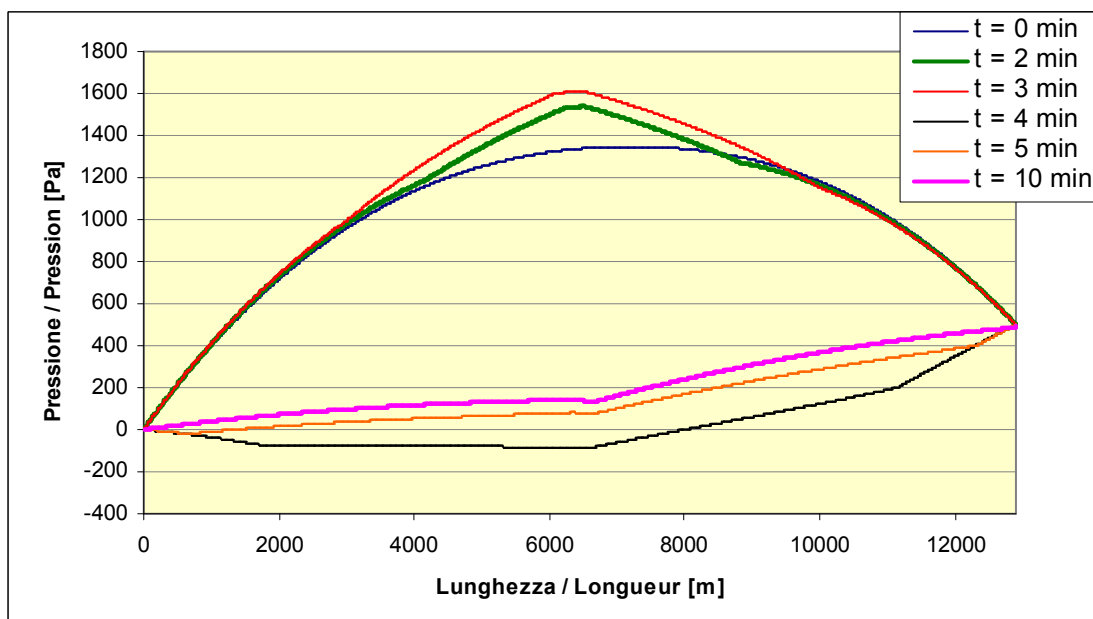
In caso d'incendio a metà del traforo con traffico intenso equilibrato, la pressione in un primo tempo cresce al centro, prima della messa in servizio dell'estrazione fumi, in quanto i veicoli che si dirigono verso il centro del traforo sono obbligati ad arrestarsi davanti al luogo dell'evento e non possono dunque più sviluppare un effetto di pistonamento in uscita. Solo dopo l'inizio dell'estrazione fumi la pressione cala rapidamente, Fig. 4.4, per raggiungere dei valori di depressurizzazione qualche minuto dopo l'irruzione dell'incendio.

In caso d'incendio in prossimità di un portale, la distribuzione della pressione risultante è modificata, senza effetto determinante sui livelli di pressione nel trafo-

ro, Fig. 4.5. L'aumento della pressione nel traforo che ne risulta è modesta (dopo 10 minuti).



**Fig. 4.5:** Evoluzione temporale della pressione nel traforo in caso d'incendio a 1000 m dal portale francese (2 x 500 v/h, 60% PL, ventilazione iniziale al 65% AF). Nel calcolo si ipotizza che la ventilazione in caso d'incendio parta 3 minuti dopo l'inizio dell'evento.



**Fig. 4.6:** Evoluzione temporale della pressione in caso di forte differenza di pressione tra i portali con  $\Delta p = -500$  Pa per un incendio al centro del traforo (2 x 500 v/h, 60% PL, ventilazione iniziale a 65% AF). Nel calcolo si ipotizza che la ventilazione in caso d'incendio parta 3 minuti dopo l'inizio dell'evento.

#### 4.2.2.2 Differenza di pressione tra i portali

La distribuzione delle pressioni risultanti in caso di grande differenza di pressione atmosferica fra i due portali è rappresentata dalla Fig. 4.6, senza controllo della velocità longitudinale come nel caso base.

Tuttavia oggi il traforo del Fréjus è dotato di un sistema di controllo della velocità longitudinale in caso d'incendio basato su un dosaggio delle portate d'aria fresca e viziata [5], [14]. I risultati delle simulazioni di detti algoritmi di controllo disponibili [5] per il caso di pressione stazionaria dimostrano dopo qualche minuto che la distribuzione di pressione indotta dalla procedura di gestione della velocità longitudinale può essere differente dalla distribuzione di base e deve dunque essere considerata in maniera adeguata (confronto Fig. 4.6 e Fig. 4.7).

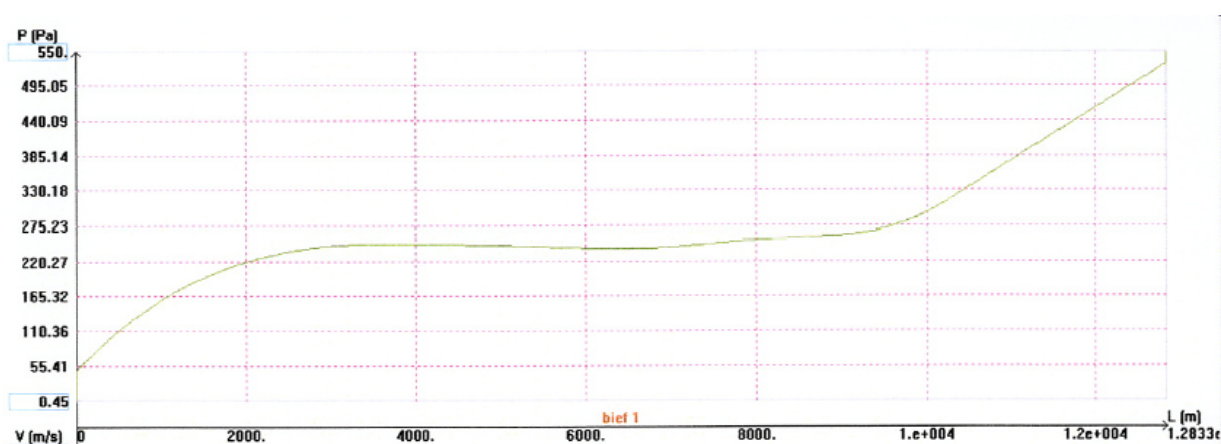


Fig. 4.7: Evento al centro del traforo (posizione 5): distribuzione di pressione in caso di forte differenza di pressione ( $\Delta p = -500$  Pa) con procedura di controllo della velocità longitudinale [5].

#### 4.2.3 Pressione e velocità dell'aria nella galleria in modalità d'esercizio normale

I flussi d'aria necessari alla ventilazione dei rifugi, dei by-pass e delle stazioni tecniche (ST) sono diretti attraverso la galleria di sicurezza. In conformità alla descrizione del paragrafo 3.8, la ventilazione dei rifugi e dei by-pass come pure parzialmente delle ST avviene per espulsione di aria viziata verso il traforo. Le portate totali richieste variano tra  $24.1 \text{ m}^3/\text{s}$  in modalità d'esercizio normale e  $32.9 \text{ m}^3/\text{s}$  in caso di evento (capitolo 4.1).

A causa dell'importante sezione d'aria della galleria di sicurezza, la perdita di carico legata al bisogno d'aria nei locali è molto debole ( $< 3$  Pa) sia in modalità d'esercizio normale che in caso di evento, in quanto la velocità d'aria nella galleria è solamente dell'ordine di 0.3-0.75 m/s, Fig. 4.8.

La pressione nella galleria di sicurezza corrisponde dunque alla pressione atmosferica dell'esterno. In caso di gradiente di pressione atmosferica tra i due portali e senza alcun aiuto della ventilazione, la pressione nella galleria varia linearmente tra i due valori e induce una velocità longitudinale dal portale a più alta pressione in direzione di quello a più bassa pressione (vedi anche Fig. 4.10).

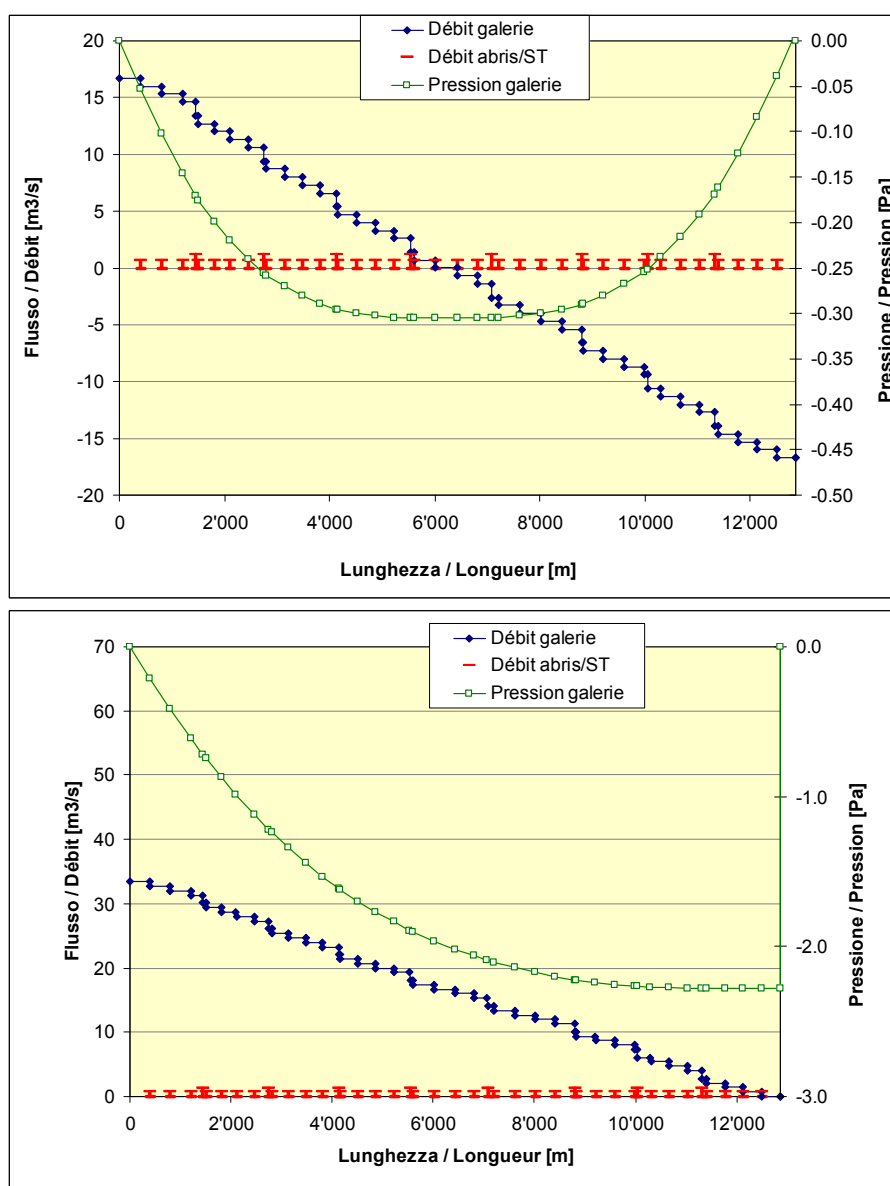
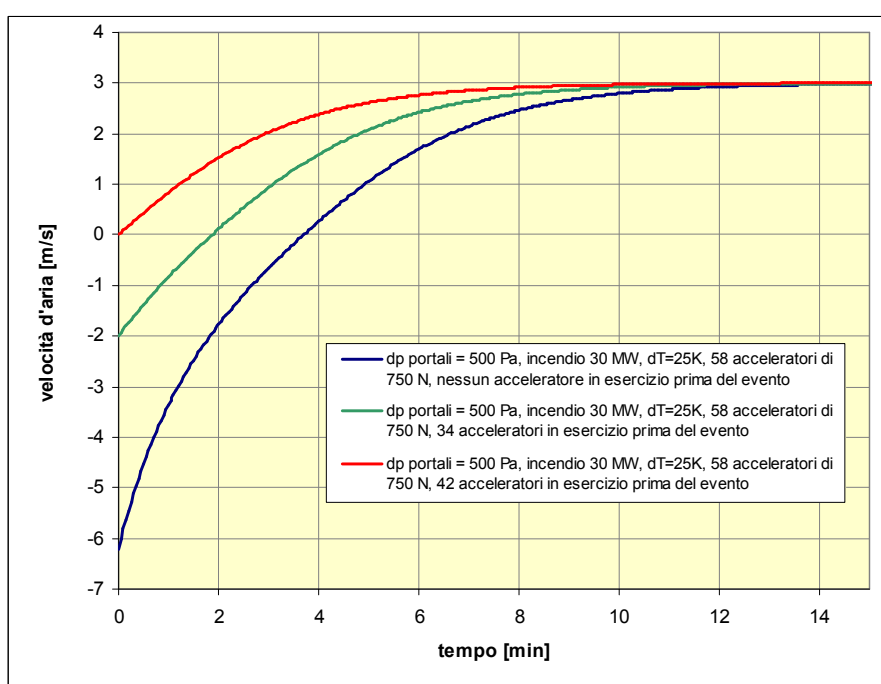


Fig. 4.8: Distribuzione di pressione e di portata nella galleria per entrata simmetrica e asimmetrica dell'aria distribuita ai rifugi/by-pass/ST in caso di evento.

#### 4.2.4 Necessità di controllo della velocità longitudinale in galleria

In presenza di un gradiente di pressione atmosferica tra i due portali che porta la velocità dell'aria longitudinale ad un valore superiore a +/- 2 m/s nella galleria di sicurezza, la porta al portale a più bassa pressione atmosferica è chiusa.

Questa misura è necessaria per garantire un tempo di reazione sufficientemente breve in caso di evento nella galleria stessa, perché la regolazione della velocità d'aria è molto lenta a causa dell'importante inerzia della colonna d'aria.



**Fig. 4.9:** Tempo di reazione per raggiungere 3 m/s in caso di evento nella galleria e con una differenza di pressione 500 Pa tra i portali.

Il caso più restrittivo è quello di un incendio nella galleria di sicurezza presso il portale francese (1° settore) in presenza di una differenza di pressione massima considerata di 500 Pa e di una pressione termica di 65 Pa dovuta alla differenza di temperatura tra la galleria e l'esterno di 25°C in inverno. La reazione del sistema di ventilazione sarà allora di mandar via il fumo con una velocità che raggiunge i 3 m/s ([1], capitolo 3.2.2a) attraverso il portale, mettendo necessariamente in moto l'aria in tutta la galleria a detta velocità. Senza il controllo della velocità dell'aria prima dell'inizio d'incendio (dunque con i portali aperti) la velocità dovuta alla differenza di pressione sarebbe di 6 m/s nel senso opposto (Fig. 4.10). Come

illustrato nella Fig. 4.9, il sistema necessita dunque di 4 minuti per cambiare la direzione di flusso d'aria e in tutto 10 minuti per raggiungere 3 m/s nella direzione desiderata. Questo tempo di reazione è decisamente troppo lungo e non è in conformità con la circolare francese, che tollera solamente un tempo di « qualche minuto dopo il comando » ([1], capitolo 3.2.2c).

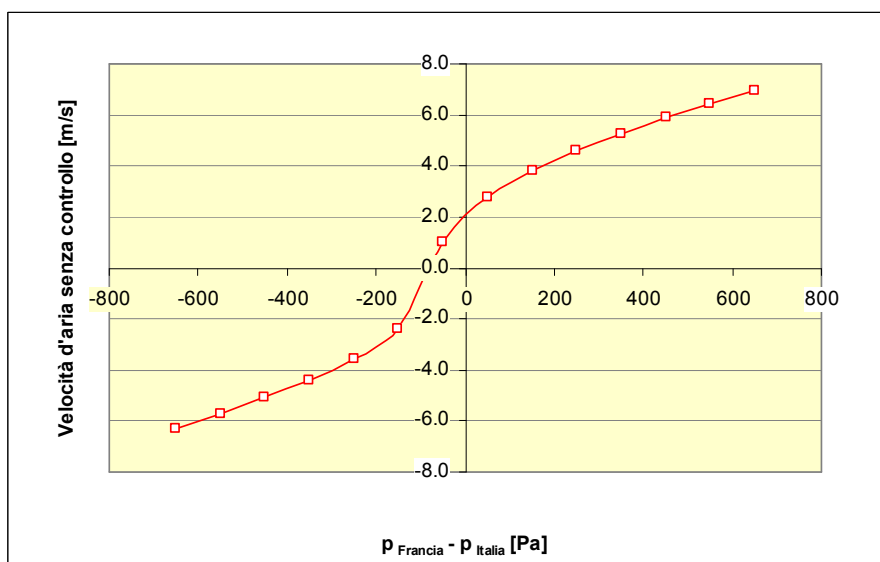


Fig. 4.10: Velocità d'aria nella galleria di sicurezza in inverno ( $dT=25^{\circ}C$ ) senza controllo della velocità longitudinale in funzione della pressione motrice.

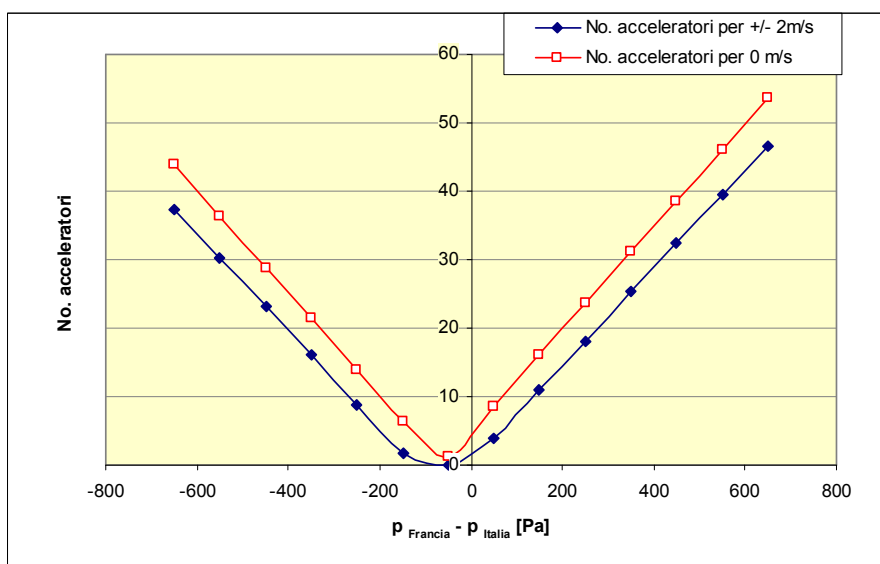


Fig. 4.11: Numero di acceleratori richiesti per il controllo della velocità longitudinale nella galleria di sicurezza in modalità d'esercizio normale con i due portali aperti (inverno,  $dT=25^{\circ}C$ ).

La reazione può essere sensibilmente accelerata se la velocità d'aria iniziale è mantenuta tra +/-2 m/s oppure ancora meglio se è 0 m/s (Fig. 4.9).

Se questo controllo di velocità venisse effettuato con acceleratori anziché con una porta chiusa, il numero di acceleratori richiesti in funzione della pressione motrice sarebbe quello indicato nella Fig. 4.11. Il consumo di energia richiesto da questa soluzione è molto elevato e dunque viene considerata la soluzione con la porta, che permette di evitare l'uso continuo degli acceleratori in modalità d'esercizio normale. Inoltre, per la chiusura del portale con più bassa pressione atmosferica, la differenza di pressione naturale supporta la ventilazione dei rifugi, dei by-pass e delle ST riducendo anche il consumo elettrico della ventilazione in questi locali.

#### *4.2.5 Differenza di pressione tra galleria e traforo in modalità d'esercizio normale*

La differenza di pressione massima tra galleria e traforo in esercizio normale senza differenza di pressione tra i portali è illustrato in Fig. 4.12. Siccome in queste condizioni la pressione della galleria resta a livello della pressione atmosferica, una differenza massima nel centro del traforo di ca. 1100 Pa può essere raggiunta con traffico intenso e bilanciato e con apporto d'aria fresca al 65%.

In presenza di un gradiente di pressione massima considerata tra i portali di 500 Pa, l'evoluzione delle pressioni in galleria e in traforo è illustrata nella Fig. 4.13, senza chiusura di un portale, e in Fig. 4.14 in caso di chiusura del portale a più bassa pressione atmosferica.

La maggior differenza di pressione inversa con sovrappressione nella galleria di sicurezza rispetto al traforo è rappresentata nella Fig. 4.15, valida in una situazione senza traffico nel traforo e con ventilazione fuori servizio, in presenza di un gradiente di pressione tra i due portali e con un portale della galleria chiuso.



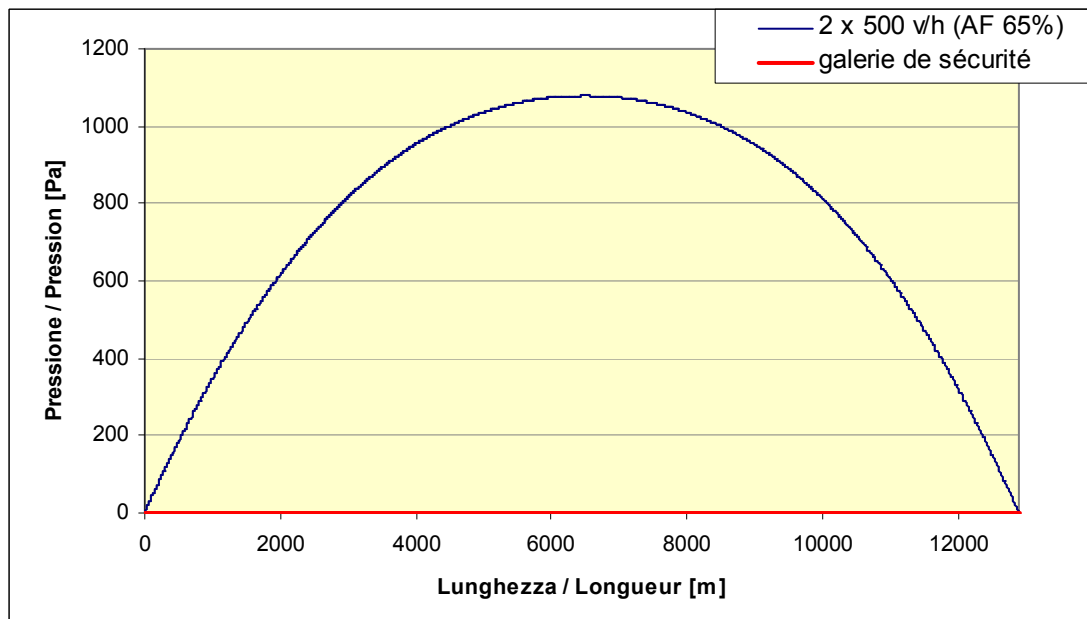


Fig. 4.12: Esercizio normale: differenza di pressione massima considerata tra la galleria e il traforo in assenza di gradiente atmosferico.

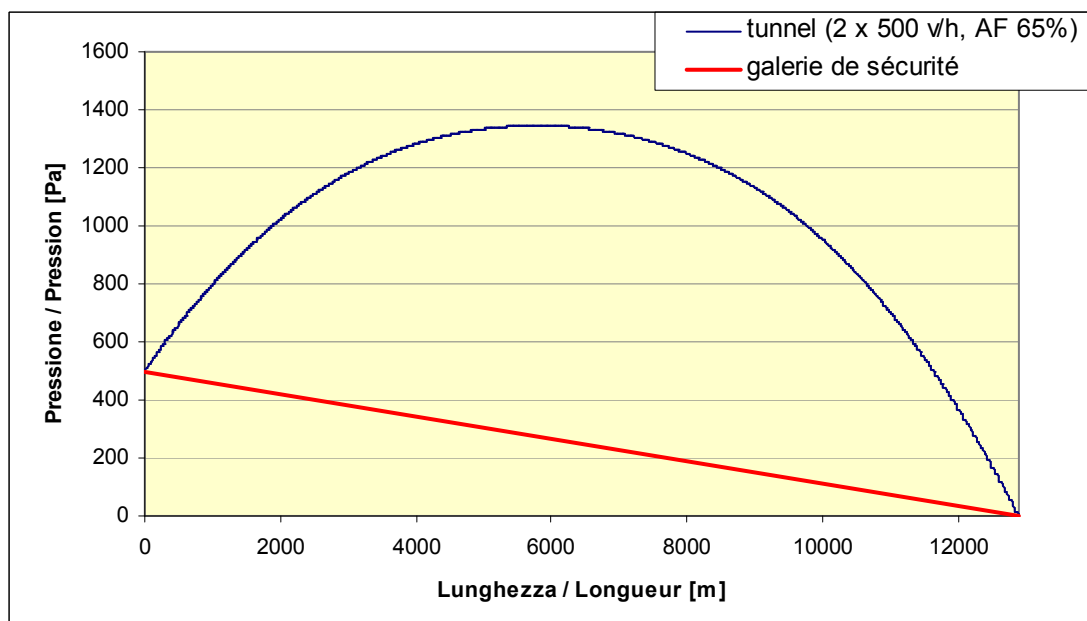


Fig. 4.13: Esercizio normale: differenza di pressione massima considerata tra la galleria e il traforo in presenza di un gradiente atmosferico di 500 Pa.

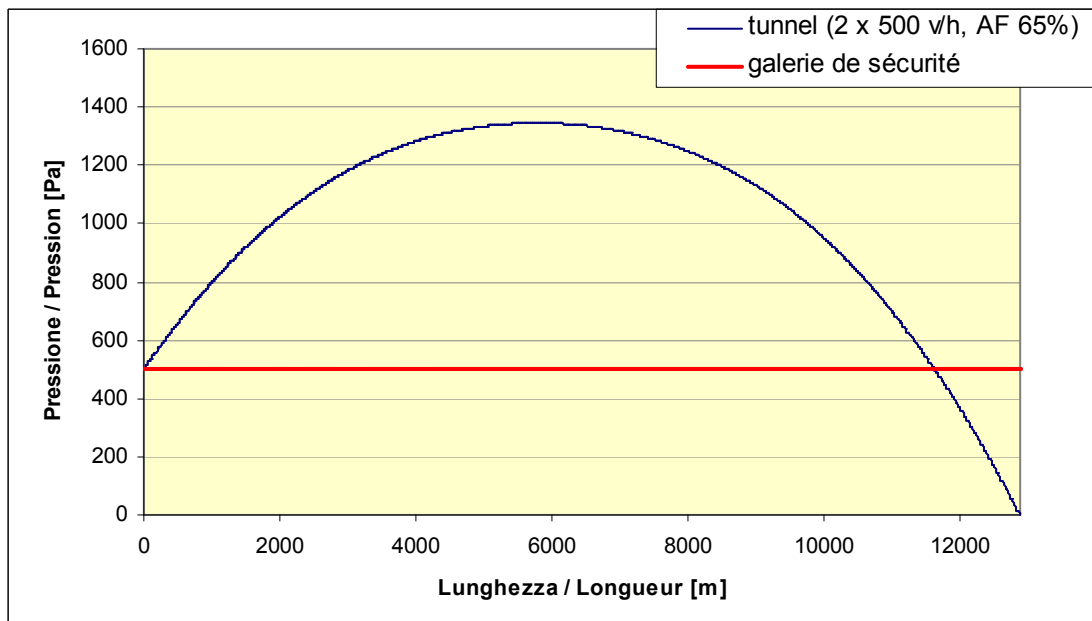


Fig. 4.14: Esercizio normale: differenza di pressione massima considerata tra la galleria e il traforo in presenza di un gradiente atmosferico di 500 Pa e una porta chiusa al portale italiano della galleria.

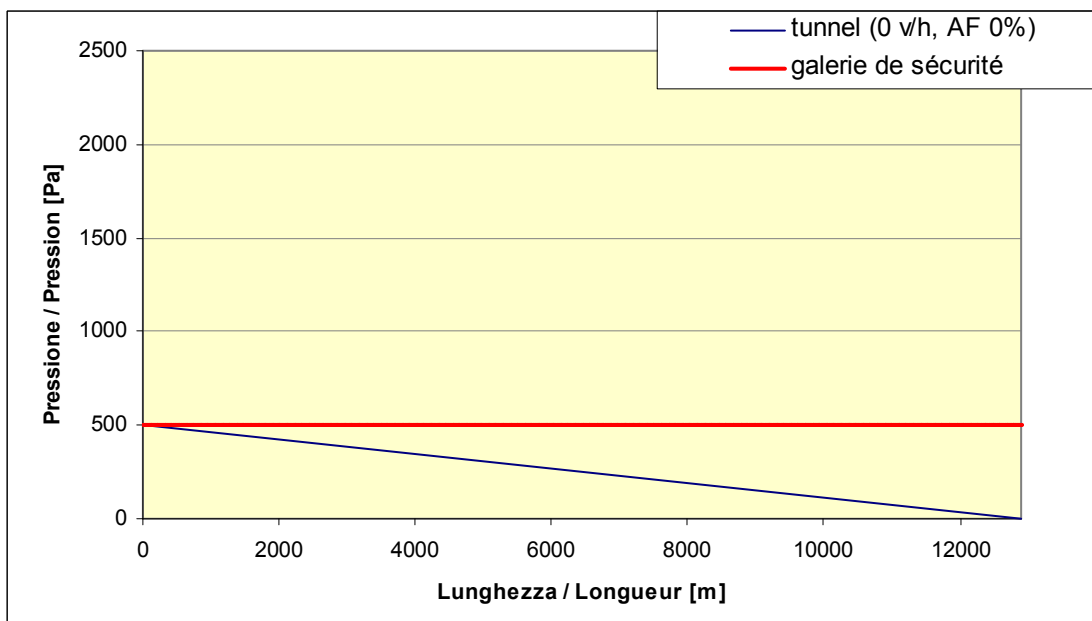


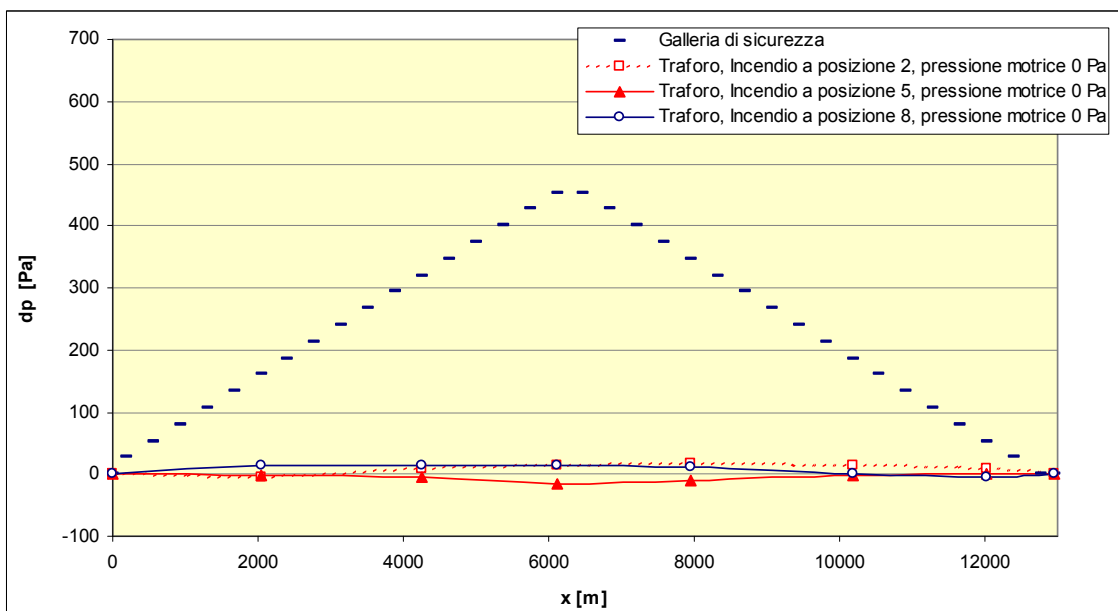
Fig. 4.15: Esercizio senza traffico e ventilazione del traforo fuori servizio: differenza di pressione massima considerata tra la galleria e il traforo in presenza di un gradiente atmosferico di 500 Pa e una porta chiusa al portale italiano della galleria.

#### 4.2.6 Differenza di pressione tra galleria e traforo in caso d'incendio nel traforo

La differenza di pressione tra la galleria e il traforo è stata studiata in dettaglio per le tre posizioni rappresentative nel caso di evento nel traforo:

- metà distanza tra portale francese e centrale di ventilazione sotterranea lato francese, ca. PM 2'110 m (Posizione 2 secondo [13])
- al centro del traforo, ca. PM 6'555 m (Posizione 5 secondo [13])
- metà distanza tra il portale italiano e la centrale di ventilazione sotterranea lato italiano, ca. PM 10'890 m (Posizione 8 secondo [13])

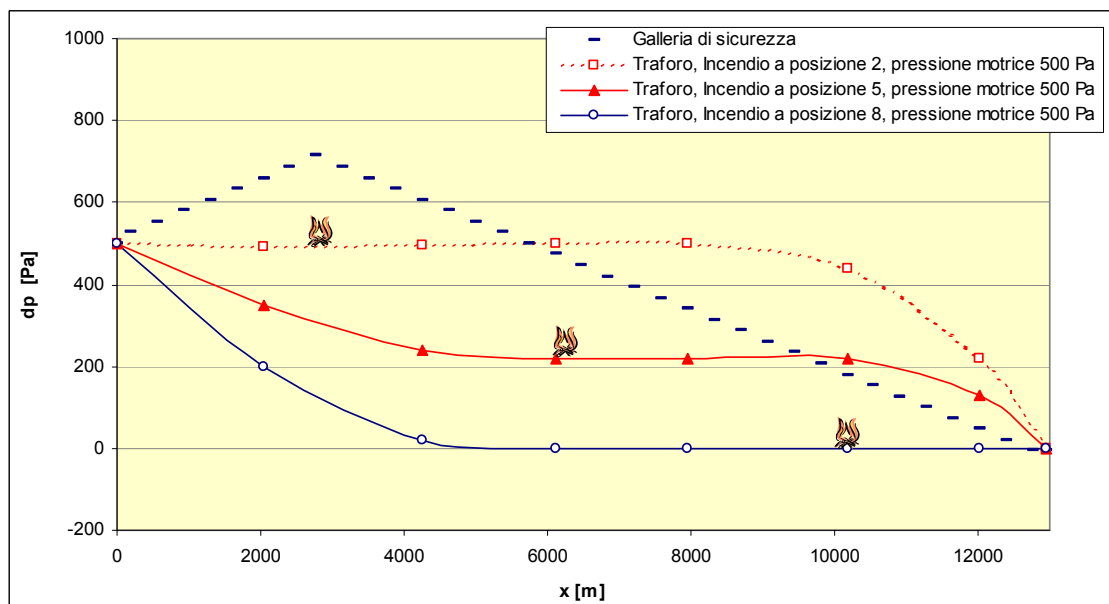
I risultati numerici in assenza di un gradiente di pressione atmosferica tra i portali sono illustrati nella Fig. 4.16. Tutti i 70 acceleratori sono gestiti in modo da creare una sovrappressione nella galleria di sicurezza per la messa in servizio verso il centro della galleria. Ne risulta una pressione massima di ca. 450 Pa al centro. L'evoluzione della pressione nel traforo per i casi di evento considerati è stata ripresa dal documento [5], valide per le condizioni di controllo con gestione della velocità longitudinale.



**Fig. 4.16:** Evento nel traforo: differenza di pressione tra la galleria e il traforo in assenza di gradiente atmosferico (Pressione nel traforo secondo [5]).

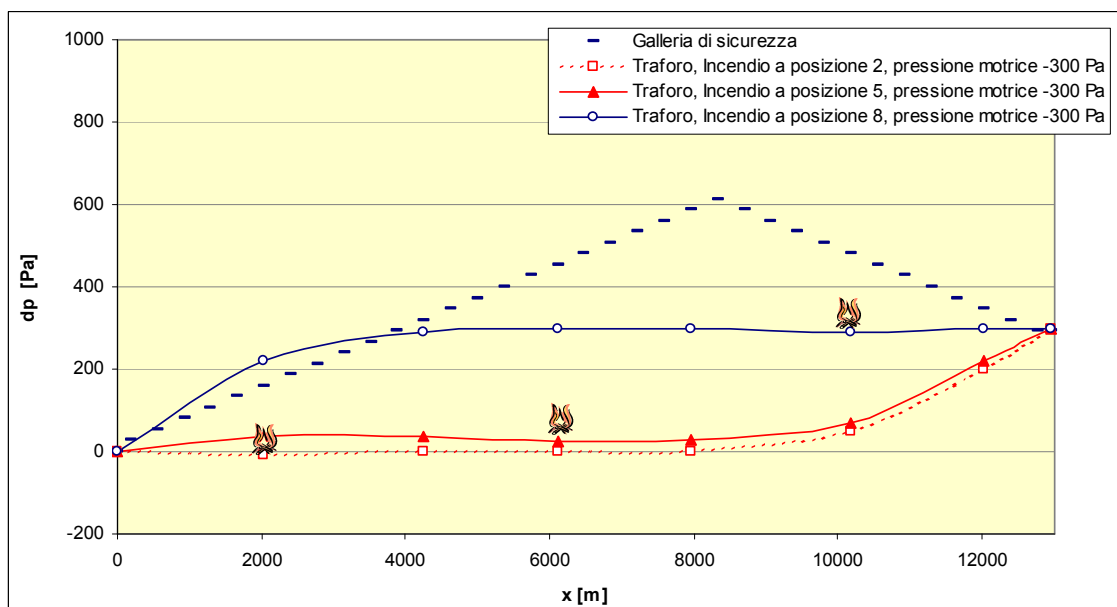
Per tutti i casi di evento considerati la pressione nella galleria di sicurezza sarà superiore alla pressione nel traforo assicurando dunque che da nessuna parte l'aria del traforo o il fumo possa penetrare nella galleria.

(Questo regime di funzionamento, quasi senza ricambio d'aria con l'esterno, riscalda l'aria della galleria di sicurezza per miscelazione/dissipazione. In caso pessimistico, in condizioni adiabatiche, questo riscaldamento potrebbe essere dell'ordine di 10°C in un'ora.)



**Fig. 4.17:** Evento nel traforo: differenza di pressione tra la galleria e i traforo in presenza di un gradiente atmosferico di 500 Pa (Pressione nel traforo secondo [5]).

La Fig. 4.17 rappresenta la situazione presa in considerazione con presenza del gradiente di pressione atmosferica più alta di 500 Pa (capitolo 3.4). Vengono utilizzati ca. 40 acceleratori per bilanciare questa differenza di pressione statica, mentre gli altri sono in servizio in modo da creare una sovrappressione in direzione del portale francese. Solamente in caso di evento vicino al portale italiano, posizione 8, la pressione nella galleria sarà sempre superiore a quella nel traforo. Per le altre posizioni, se per es. il luogo dell'evento si trova al centro del traforo, la sovrappressione della galleria è garantita fino al portale francese e per una distanza di ca. 3'000 m dal luogo in direzione del portale italiano. Se invece il luogo d'incendio si trova verso il portale francese (posizione 2), la sovrappressione della galleria è garantita per una distanza di ca. 3'500 m dal luogo in direzione del portale italiano.



**Fig. 4.18:** Evento nel traforo: differenza di pressione tra la galleria e il traforo in presenza del gradiente atmosferica di -300 Pa (Pressione nel traforo secondo [5]).

La situazione per il gradiente di pressione massima considerata nel senso contrario di -300 Pa (capitolo 4.2.2) è illustrata nella Fig. 4.18. La gestione degli acceleratori come pure l'evoluzione della pressione in galleria e nel traforo sono analoghi al caso precedente. A causa del limite minimo di differenza di pressione atmosferica, le zone in sovrappressione si estendono ancora più lontano che precedentemente per il caso più ristretto con luogo d'incendio alla posizione 8, mentre che per le altre posizioni la sovrappressione è garantita su tutta la lunghezza.

Questa valutazione dimostra che il numero di acceleratori previsti o rispettivamente la loro portata totale è sufficiente per garantire un'elevata sicurezza ai soccorsi caso d'incendio.

La differenza di pressione sulle porte tra i rifugi e la galleria di sicurezza può raggiungere valori dell'ordine di 600-700 Pa (Fig. 4.17) in caso d'incendio nel traforo. Queste porte sono di tipo scorrevole, utilizzate per esempio nella galleria del San Gottardo con differenze di pressione simili. Dettagli maggiori sono dati nel capitolo 6.

#### 4.2.7 Differenza di pressione tra galleria e traforo in caso di evento nella galleria

In caso di evento nella galleria di sicurezza, il traforo è pressurizzato per impedire la penetrazione di fumi nel traforo stesso (capitolo 3.8.5). Il livello di pressurizzazione massimo raggiungibile ad una portata d'aria fresca di 65% è illustrato nella Fig. 4.19 e raggiunge dunque ca. 400 Pa senza differenza di pressione tra i portali.

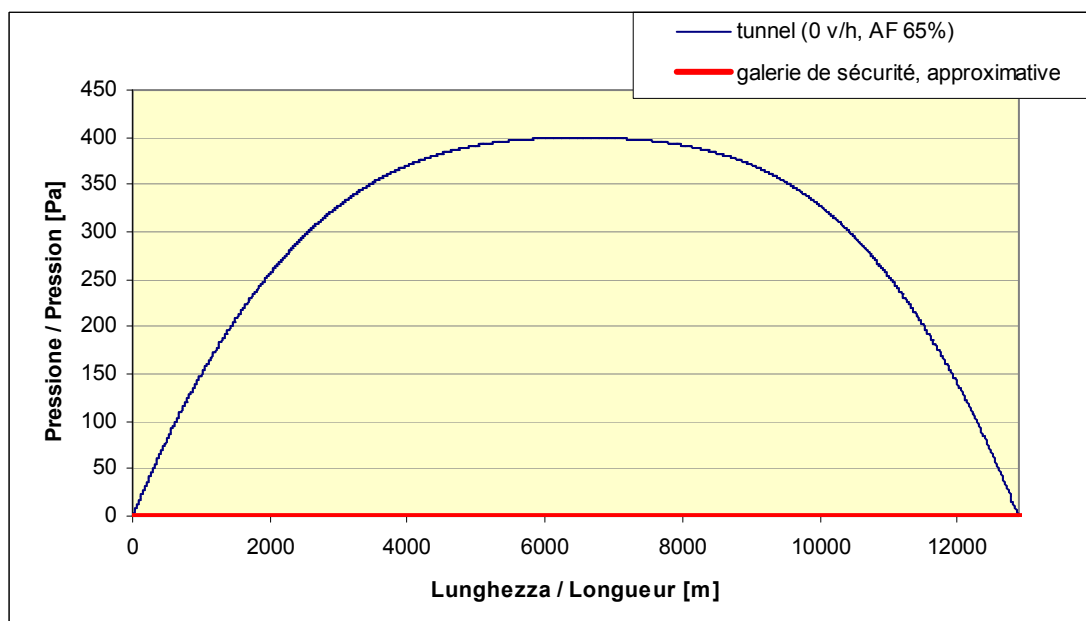


Fig. 4.19: Evento in galleria: differenza di pressione tra la galleria e il traforo in assenza di gradiente atmosferico.

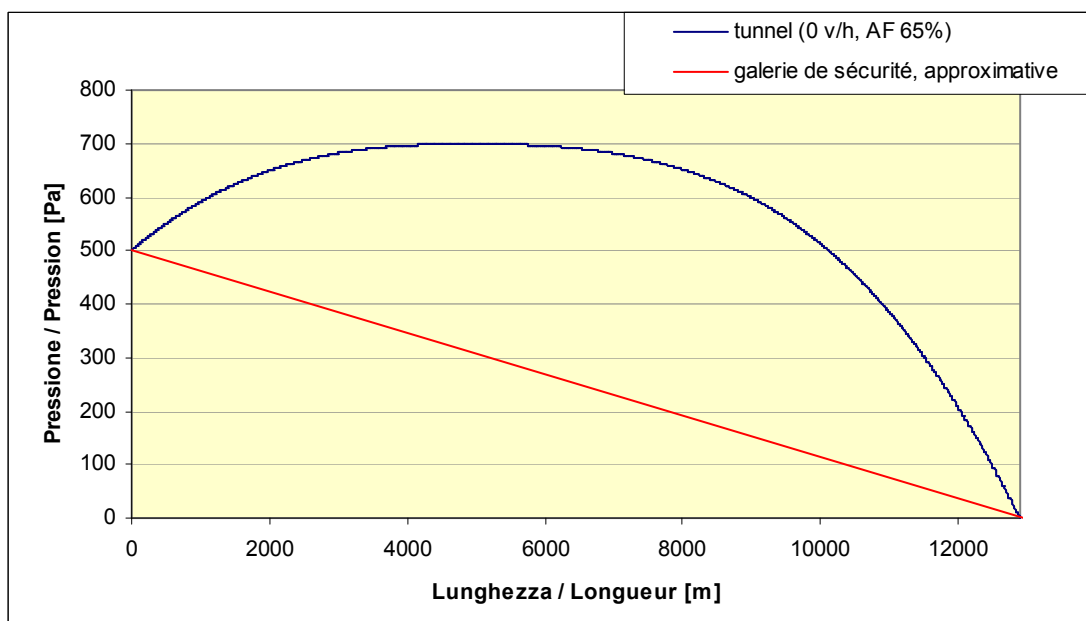


Fig. 4.20: Evento in galleria: differenza di pressione tra la galleria e il traforo in assenza di gradiente atmosferico di 500 Pa.

Con una differenza di pressione atmosferica tra i due portali di 500 Pa, l'evoluzione di pressione diventa asimmetrica, come illustrato nella Fig. 4.20. La differenza massima tra galleria e traforo resta tuttavia di ca. 400 Pa al centro del traforo.

#### 4.2.8 Ventilazione sanitaria

Una qualità sufficiente d'aria nella galleria e nell'insieme delle stazioni tecniche deve essere garantita anche in caso di circolazione di veicoli all'interno della galleria. I valori limite sono quelli secondo [18]:

- CO 50 ppm
- NO<sub>2</sub> 0.4 ppm
- Opacità  $5 \times 10^{-3}$  / m

Inoltre, è considerato il seguente inquinamento di base dell'aria fresca [18]:

- CO 2 ppm
- NO<sub>2</sub> 0.05 ppm
- Opacità  $0.15 \times 10^{-3}$  / m

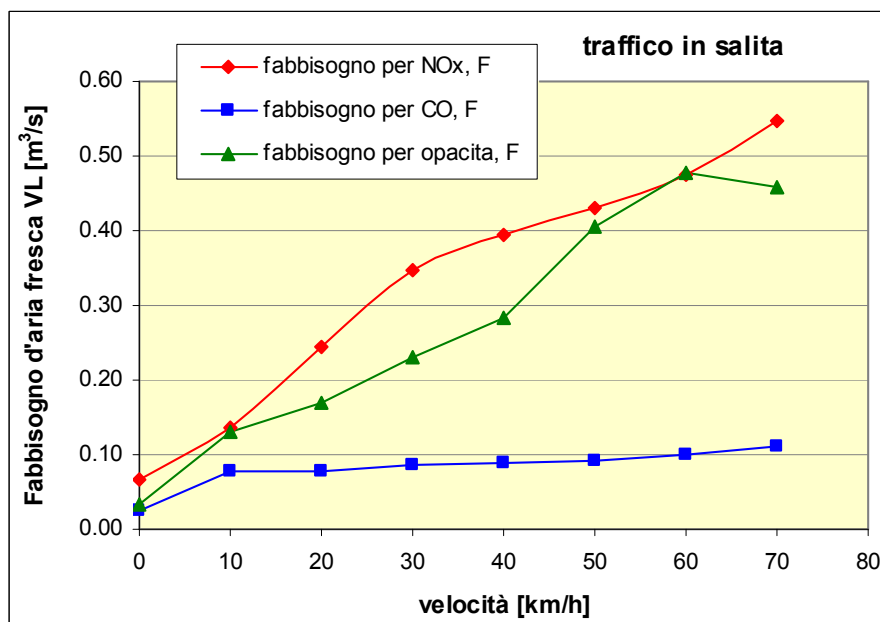


Fig. 4.21: Bisogno d'aria fresca per un VL nel 2015 direzione Francia -> Italia secondo [18] e [19], tasso di Diesel ca. 60%.

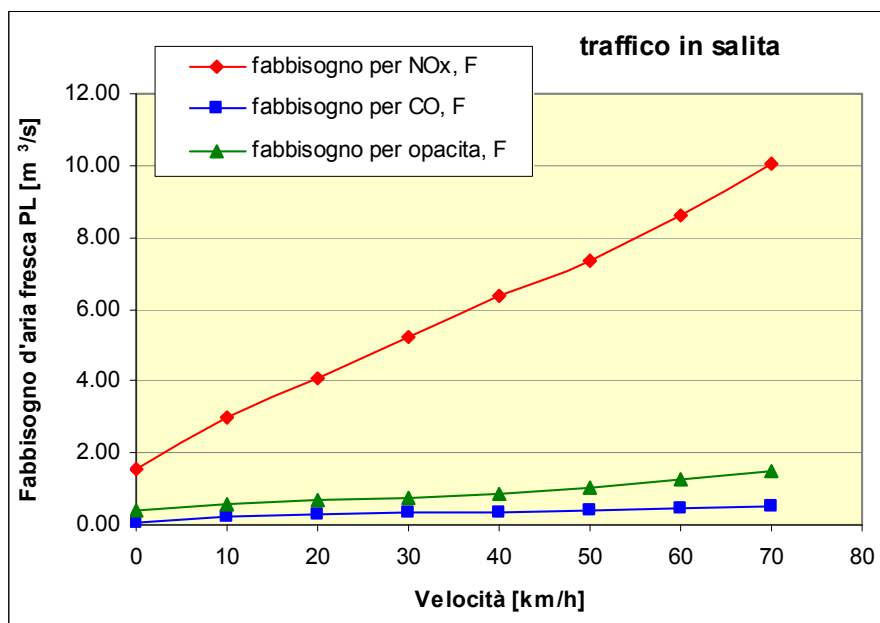


Fig. 4.22: Bisogno d'aria fresca per un (VP) di 10 t nel 2015 direzione Francia-> Italia secondo [18] e [19].

I calcoli del fabbisogno d'aria sono stati effettuati secondo la procedura descritta in [19] e i risultati per i veicoli sia leggeri che pesanti sono illustrati nelle Fig. 4.21 e Fig. 4.22. Generalmente è determinante il bisogno d'aria per la diluizione di NOx. Ad una velocità di 60 km/h, un veicolo leggero (VL) necessita di ca. 0.5 m³/s, mentre un veicolo pesante (VP) di 10 ton richiede 9 m³/s.

Senza rinforzo della ventilazione nella galleria con acceleratori, o nel caso un portale della galleria è chiuso, la portata d'aria fresca in modalità d'esercizio normale di 24.1 m³/s (capitolo 4.1) permette la presenza di ca. 50 VL o 3 VP in condizioni sfavorevoli (60 km/h).

Diversamente, con i due portali aperti, la potenza e il numero di acceleratori installati consentono - in funzione del gradiente di pressione atmosferica tra i portali - di raggiungere una velocità dell'aria longitudinale nella galleria di sicurezza di ca. 4-9 m/s (Fig. 4.23), a cui corrisponde a una portata d'aria fresca di 180-400 m³/s.

In caso di presenza di veicoli nella galleria, il sistema di gestione centralizzata (GTC) deve tuttavia assicurare un regime sufficientemente elevato di ventilazione, sia in modalità automatica basata su misure di grado d'inquinamento, sia in modalità manuale.

La qualità dell'aria è dunque sorvegliata con un sensore di CO e di opacità al centro di ogni settore e quindi in 6 posizioni ripartite lungo la galleria.



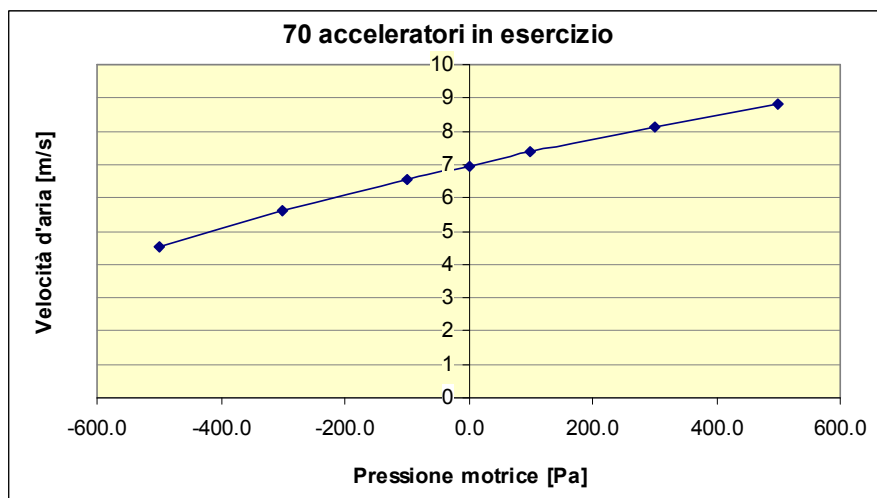


Fig. 4.23: Velocità d'aria massima nella galleria di sicurezza con tutti gli acceleratori in servizio.

## 5. PRINCIPI COSTRUTTIVI

### 5.1 Condizioni di dimensionamento limite

Le condizioni e i parametri considerati per il dimensionamento delle apparecchiature sono:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| - coefficiente di attrito in galleria          | $\lambda=0.015$              |
| - coefficiente di perdita singola all'entrata  | $\zeta_i=0.6$                |
| - coefficiente di perdita singola all'uscita   | $\zeta_o=1.0$                |
| - velocità del getto d'aria degli acceleratori | $u_{jet}=35 \text{ m/s}$     |
| - densità dell'aria in galleria                | $\rho_i=1.05 \text{ kg/m}^3$ |

### 5.2 Acceleratori nella galleria di sicurezza

#### 5.2.1 Concetti generali

Gli acceleratori nella galleria di sicurezza hanno le seguenti funzioni:

1. Controllo della velocità longitudinale in modalità d'esercizio normale, con i due portali aperti.
2. Apporto d'aria fresca in caso di elevata presenza di veicoli nella galleria.

3. In caso di evento nel traforo, formazione di una sovrappressione nella galleria, controllo della velocità longitudinale e blocco di un corto-circuito dei fumi tra i portali.
4. In caso di evento nella galleria di sicurezza nei settori 1/2 o 5/6, espulsione dei fumi attraverso il portale più vicino ad una velocità fino a 3 m/s (regime di ventilazione e velocità d'aria in funzione della presenza di persone in quella tratta).
5. In caso di evento nella galleria di sicurezza nei settori dal 2 al 5, apporto dei fumi al pozzo più vicino ad una velocità fino a 3 m/s a monte del pozzo e -1 m/s a valle del pozzo.

### 5.2.2 Casi di esercizio degli acceleratori

#### 5.2.2.1 Esercizio normale, equilibrio di un gradiente di pressione ai portali

Per gli acceleratori in modalità di servizio normale, il sistema di ventilazione è dimensionato in modo da gestire una differenza di pressione meteorologica tra -300 e 500 Pa (capitolo 3.4). Tenuto conto che gli acceleratori sono reversibili, il valore considerato corrisponde a quello più elevato, pari a 500 Pa.

La spinta dinamica totale richiesta è dunque:

$$F_{\text{tot},\Delta p}^{\text{dyn}} = \Delta p_{\text{atmos}} \cdot A = 500 \text{ Pa} \cdot 45 \text{ m}^2 = 22'500 \text{ N} \quad \text{val. 5.1}$$

e la spinta statica, tenendo conto di un rendimento d'installazione dell' 80%:

$$F_{\text{tot},\Delta p}^{\text{stat}} = \frac{F_{\text{tot},\Delta p}^{\text{dyn}}}{\eta_{\text{install}}} = 28'100 \text{ N} \quad \text{val. 5.2}$$

#### 5.2.2.2 Apporto d'aria fresca per i veicoli

I calcoli esposti nel capitolo 4.2.8 hanno dimostrato che la portata d'aria in modalità d'esercizio normale con acceleratori fuori servizio, è sufficiente a garantire la qualità dell'aria durante gli interventi di manutenzione, di controllo e di sorveglianza. Un dimensionamento specifico degli acceleratori per questo compito non è dunque richiesto.

#### 5.2.2.3 Evento nel traforo

Nel caso di evento, la funzione principale degli acceleratori consiste nell'equilibrare una differenza di pressione meteorologica tra i portali onde impedire una velo-

cità longitudinale importante nella galleria e - in caso di rischio di corto-circuito dei fumi tra galleria e traforo - di poter stabilire un flusso d'uscita dal portale in questione. Inoltre gli acceleratori sono utilizzati per la creazione di una sovrappressione di fronte al luogo d'incendio.

Con una velocità attraverso il portale di ca.  $u=0.5$  m/s, le spinte minime senza riserva per la formazione di una sovrappressione sono:

$$F_{\text{tot,cc}}^{\text{dyn}} = \left[ \Delta p_{\text{atmos}} + \frac{\rho}{2} u^2 \left( \zeta_i + \frac{\lambda L}{D_H} + \zeta_o \right) \right] \cdot A = 22'600 \text{ N} \quad \text{val. 5.3}$$

$$F_{\text{tot,cc}}^{\text{stat}} = \frac{F_{\text{tot,cc}}^{\text{dyn}}}{\eta_{\text{install}} \frac{u_{\text{jet}} - u}{u_{\text{jet}}}} = 28'700 \text{ N} \quad \text{val. 5.4}$$

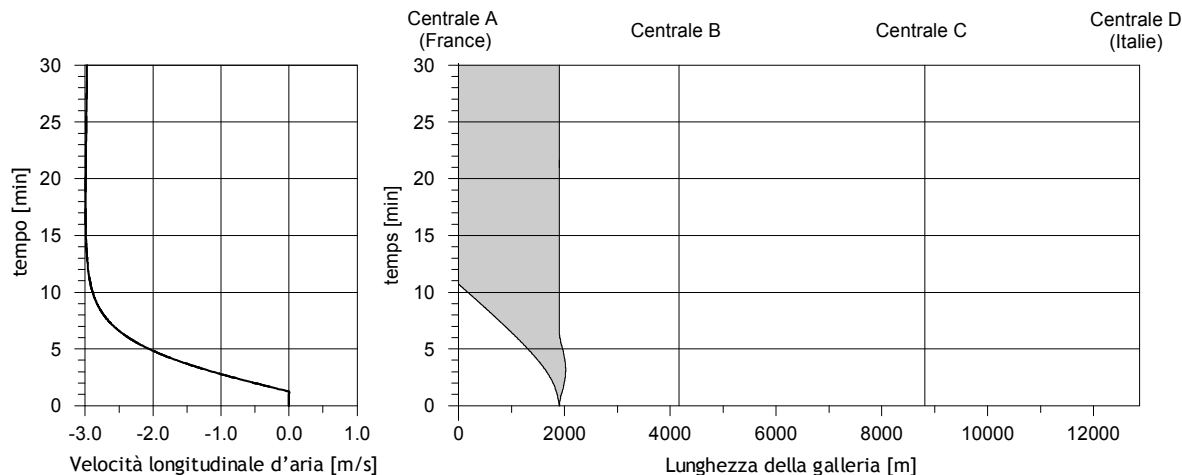
#### 5.2.2.4 Evento in galleria vicino ad un portale, espulsione dei fumi

La velocità d'espulsione massima richiesta è di  $u=3$  m/s (capitolo 4.1.4). Tenendo conto di una differenza di pressione atmosferica di 500 Pa, di una differenza di temperatura tra galleria e esterno in inverno di  $dT=25^\circ\text{C}$  e di un effetto camino causato da un incendio di 30 MW, in direzione dalla Francia all'Italia (a causa della pendenza), le spinte dinamiche e statiche necessarie risultano:

$$F_{\text{tot,expul}}^{\text{dyn}} = \left[ \Delta p_{\text{atmos}} + \Delta p_{dT} + \Delta p_{\text{incendie}} + \frac{\rho}{2} u^2 \left( \zeta_i + \frac{\lambda L}{D_H} + \zeta_o \right) \right] \cdot A = 31'800 \text{ N} \quad \text{val. 5.5}$$

$$F_{\text{tot,expul}}^{\text{stat}} = \frac{F_{\text{tot,expul}}^{\text{dyn}}}{\eta_{\text{install}} \frac{u_{\text{jet}} - u}{u_{\text{jet}}}} = 43'500 \text{ N} \quad \text{val. 5.6}$$

Per tale scenario l'evoluzione della velocità longitudinale e del fumo in funzione del tempo è rappresentata nella Fig. 5.1. In ragione dell'importante inerzia della colonna d'aria nella galleria, una velocità di 2 m/s è raggiunta 4 minuti dopo la messa in servizio degli acceleratori e la velocità di 3 m/s dopo ca. 10 minuti.

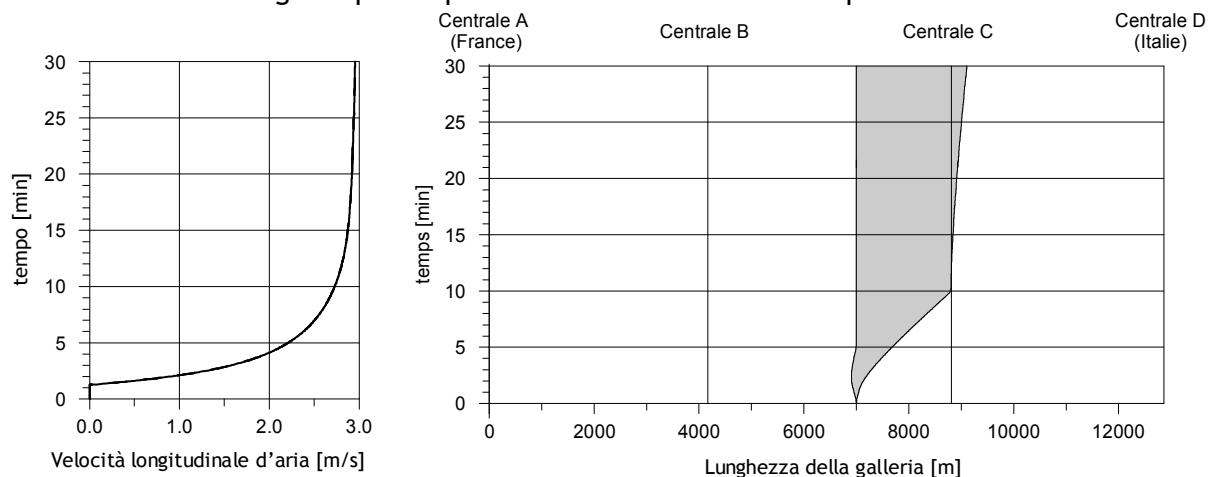


- Incendii di 30 MW a 1900 m del portale francese
- Tempo di rilevazione: 60 secondi
- Espulsione con 3 m/s

**Fig. 5.1:** Gestione di un evento ed estrazione per espulsione attraverso il portale, evoluzione del fumo e velocità longitudinale (calcolo TunSim 1.5).

#### 5.2.2.5 Evento in galleria con estrazione massiva

La velocità d'aria massima da raggiungere è di 3 m/s a monte del luogo dell'incendio. Il caso è analogo a quello precedente descritto nel capitolo 5.2.2.4.



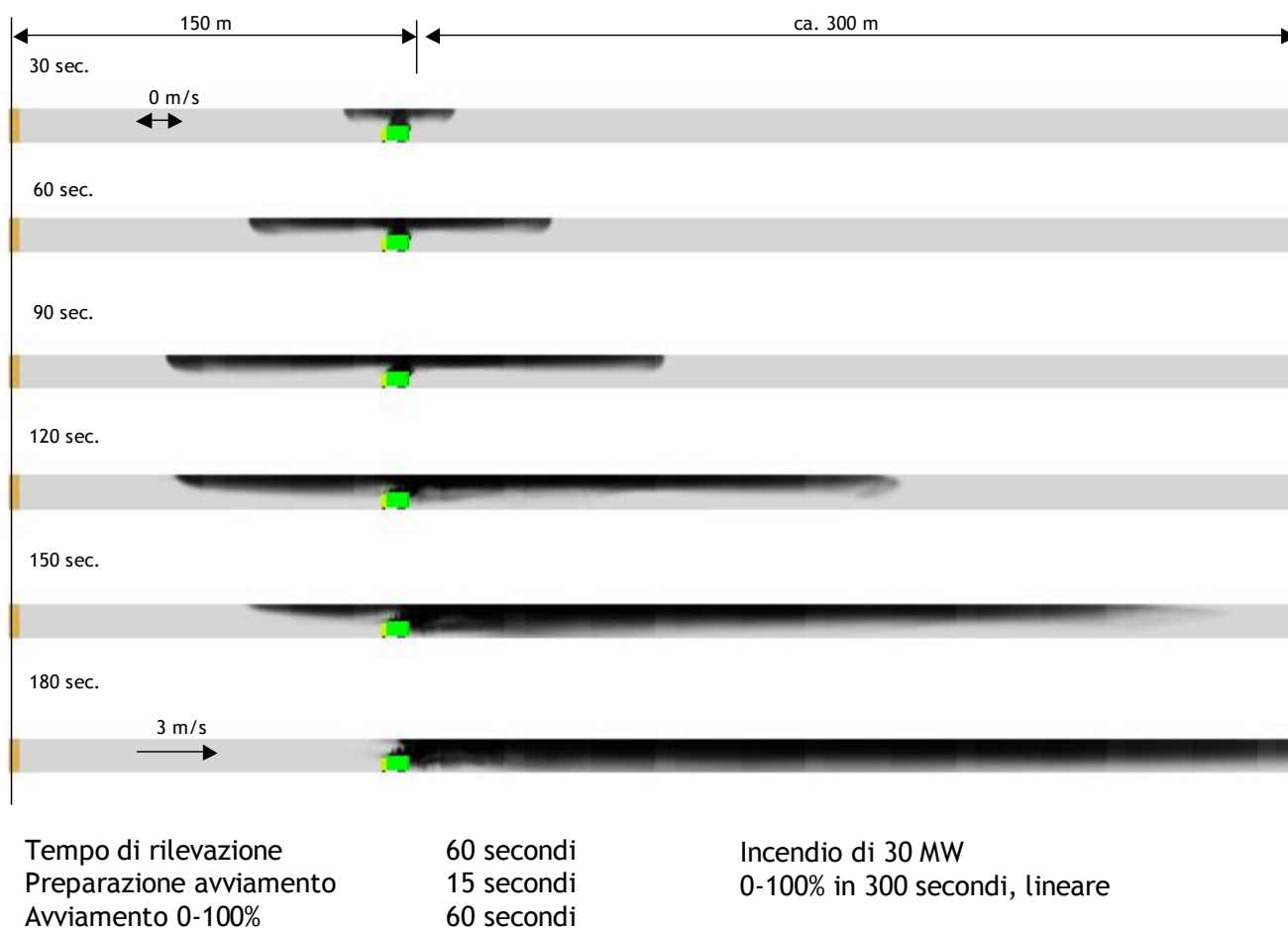
- Incendio di 30 MW a 7000 m del portale francese
- Tempo di rilevazione: 60 secondi
- Estrazione massiva di 180 m<sup>3</sup>/s
- Velocità 3 m/s a monte et -1 m/s a valle

**Fig. 5.2:** Gestione di un evento ed estrazione per espulsione massiva, evoluzione del fumo e velocità longitudinale (calcolo TunSim 1.5).

Per tale scenario l'evoluzione della velocità longitudinale e del fumo in funzione del tempo è rappresentata nella Fig. 5.2.

### 5.2.3 Caratteristiche tecniche richieste

La spinta statica più alta ottenuta durante gli studi dei casi d'esercizio è di 43'500 N (val. 5.6). (Questa spinta è necessaria per l'espulsione del fumo attraverso il portale francese nelle condizioni più sfavorevoli, senza considerare alcuna ridondanza.)

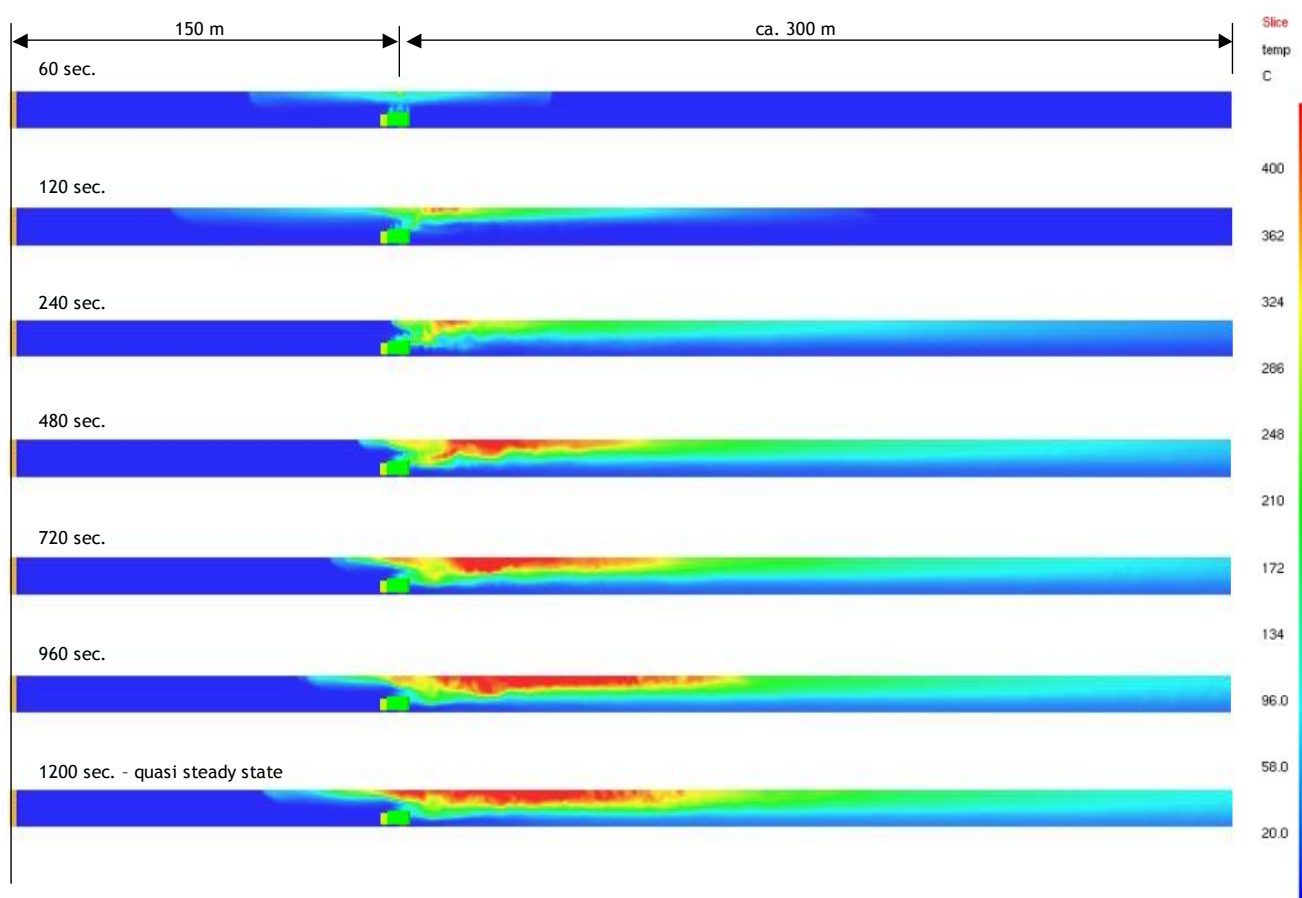


**Fig. 5.3:** Simulazione 3D di un incendio da 30 MW nella galleria di sicurezza con FDS versione 4.07 [20]: evoluzione del fumo (rapporto altezza/larghezza x 2 per la visualizzazione).

Tuttavia devono essere presi in considerazione due aspetti:

- La stratificazione dei fumi sotto il soffitto resta inalterata a valle dell'incendio durante un certo tempo anche in caso di spinta in una direzione, Fig. 5.3. La messa in servizio degli acceleratori in questa zona di fumo distruggerebbe d'altronde immediatamente la stratificazione, rendendo la fuga degli utenti e il soccorso più difficoltosi.
- La temperatura dell'aria direttamente a valle dell'incendio può raggiungere i 400°C, mentre una zona con più di 200°C persiste su diverse centinaia di metri, Fig. 5.4. Gli acceleratori (con resistenza convenzionale a 200°C) in questa zona sarebbero dunque distrutti dalla temperatura.

Da qui risulta che nella zona considerata dall'evento gli acceleratori non devono essere attivati. La spinta richiesta deve dunque essere ottenuta mediante gli acceleratori installati in solo 5 dei 6 settori, da cui deriva un fattore di ridondanza di  $6/5 = 1.2$ .



**Fig. 5.4:** Simulazione 3D di un incendio da 30 MW nella galleria di sicurezza con FDS versione 4.07 [20]: evoluzione della temperatura (rapporto altezza/larghezza x 2 per la visualizzazione).

La spinta statica richiesta di 43'500 N può essere ottenuta con differenti configurazioni degli acceleratori, per esempio:

Diametro esterno	Spinta statica unitaria	Numero per 43'500 N	Numero con ridondanza
800 mm	450 N	97	116
1000 mm	750 N	58	70
1200 mm	1000 N	44	53
1500 mm	1500 N	29	35

**Tab. 5.1:** Configurazione degli acceleratori

Secondo la geometria della galleria di sicurezza, Fig. 2.2, due acceleratori con diametro esterno di 1'000 mm potrebbero essere montati in una sezione tipo rispettando le distanze raccomandate sul soffitto, tra i due apparecchi e la sagoma libera [16]. Le caratteristiche tecniche di detti apparecchi sono riassunti nella Tab. 5.2. Sarebbe richiesto un totale di 70 acceleratori, che installati a coppie, (per un totale di 35 coppie) potrebbero essere disposti a metà distanza tra i 34 rifugi. La scelta del montaggio a metà distanza non comporta una pressione significativa sulle porte tra i rifugi e la galleria e non disturba l'intervento dei servizi di soccorso.

Un diametro inferiore richiederebbe un numero d'apparecchi sensibilmente più importante (116 pezzi), e necessiterebbe per questo motivo di maggiori risorse per la loro installazione (cablaggio, connettori, PLC).

Per contro, un diametro esterno di 1'200 mm comporterebbe l'installazione di un solo acceleratore alla volta. La quantità di acceleratori (53 pezzi) risulterebbe di gran lunga più elevata rispetto alla soluzione con 35 coppie di diametro 1'000 mm. Il numero ideale di apparecchi sarebbe di 35 acceleratori con un diametro esterno di 1'500 mm. Questa grande dimensione non si integra tuttavia nella sezione della galleria di sicurezza poiché non rispetterebbe le distanze minime dalla sagoma libera e dal soffitto.

Si prevede dunque la scelta della soluzione con 35 coppie di acceleratori di diametro esterno di 1'000 mm.

Gli acceleratori dispongono di sensori che comprendono in particolare:

- misure di vibrazione;

- rilevamento di cadute e interruttori automatici di alimentazione elettrica;
- misura della temperatura, tensione e corrente dei motori.

Dalla GTC sarà possibile vedere tutti i parametri degli acceleratori, di avviarli in un senso di rotazione o nell'altro o di spengerli.

Numero richiesto	58
- con ridondanza ([1] capitolo 3.2.2a)	70 (6 coppie per 2 km)
Direzione di spinta	reversibile
Distanza tra le coppie	370 m
Spinta statica	750 N
Tensione	400 V
Potenza	25 kW
Diametro esterno	1000 mm
Diametro ruota	800 mm
Lunghezza (75 dB (A) 10 45°)	3800 mm
Resistenza termica a 200°C	120 min
Protezione contro la caduta 450°C	120 min

**Tab. 5.2:** Caratteristiche tecniche degli acceleratori, prescrizioni termiche secondo [1], capitolo 4.4.2a.

#### 5.2.4 Alimentazione elettrica

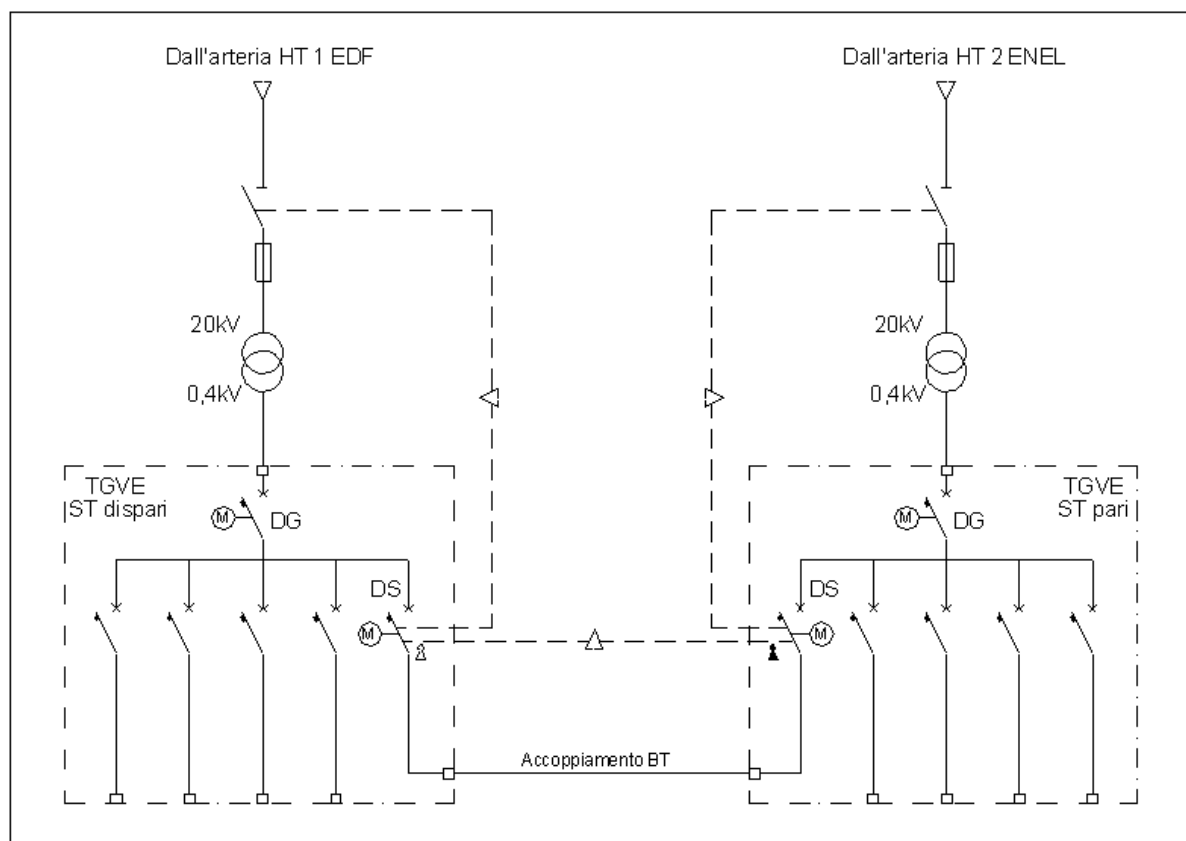
L'alimentazione elettrica proviene dalla rete normale con connessioni al quadro generale di bassa tensione TGBT delle ST, prevista dall'impianto di alimentazione elettrica (vedi rapporto 6145.2-R-14A).

Il sistema di distribuzione elettrica prevede l'alimentazione degli acceleratori dispari della rete HT 20kV EDF, nelle stazioni tecniche dispari, mentre gli acceleratori pari saranno alimentati dalla rete HT 20kV ENEL, nelle stazioni tecniche pari. Una ridondanza completa dell'alimentazione elettrica è assicurata sia in caso di guasto su una delle due reti HT che in caso di guasto a livello di bassa tensione, da un sistema di connessione prevista tra il TGBT della ST pari e il TGBT delle ST dispari.

Questa soluzione prevede, per ogni TGBT, due interruttori generali, di cui uno normalmente chiuso sulle barre di distribuzione (DG) e uno supplementare aperto (DS) predisposto per l'accoppiamento con il TGBT della stazione tecnica adiacente. L'interruttore supplementare del TGBT installato nella ST dispari sarà collegato a quello del TGBT installato nella ST corrispondente pari. In caso di fuori servizio di un trasformatore, è prevista la chiusura manuale e/o a distanza dei due DS, secondo conferma data per l'apertura del dispositivo di protezione installato a monte



del trasformatore fuori servizio. Questa modalità permette di alimentare i TGBT delle due ST dal trasformatore rimasto in servizio limitando l'assenza di alimentazione elettrica dell'impianto a qualche secondo.



**Fig. 5.5 :** Accoppiamento a livello di BT - Schema monofilare

I DS saranno interbloccati elettricamente con i dispositivi di protezione lato HT corrispondente installati immediatamente a monte, allo scopo di evitare la chiusura in corto circuito tra i secondari dei trasformatori HT/BT.

Un comando manuale degli interruttori supplementari sarà possibile solamente per un sistema di manovre con interblocchi a chiavi, necessari ad evitare la chiusura simultanea dei DS durante il funzionamento in configurazione normale.

## 5.3 Ventilatori d'estrazione massiva

### 5.3.1 Concetto generale

In caso d'incendio nella galleria di sicurezza (capitolo 3.8.5), l'estrazione dei fumi dalla galleria può essere effettuata per estrazione massiva. A tale scopo sono previste due nuove centrali di ventilazione (E ed F) in prossimità delle centrali sotterranee esistenti B e C, utilizzandone gli stessi pozzi (Fig. 5.6 e Fig. 5.7).

La portata d'estrazione massima ammonta a  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  che corrisponde ad una velocità dell'aria della portata affluente dal luogo d'incendio di  $3 \text{ m/s}$  e di  $1 \text{ m/s}$  nella direzione opposta.

E' stata studiata una variante con raccordo dalla galleria di sicurezza ai ventilatori esistenti nelle centrali di ventilazione B e C. Tuttavia questa soluzione non è stata considerata, in quanto avrebbe provocato un impatto importante sull'esercizio del traforo durante la fase di costruzione per una durata prolungata. In effetti, il collegamento tra la galleria di raccordo ai canali a monte dei ventilatori o dei canali d'aria viziata nel traforo è un'operazione molto delicata, anche perché gli ancoraggi esistenti devono essere parzialmente tolti e i fori devono essere preparati e messi in sicurezza con grande attenzione.

In seguito alla mancata disponibilità delle centrali di estrazione durante la fase di raccordo, sarebbe risultato necessario chiudere il traforo al traffico per un certo periodo. Tale misura è stata considerata inaccettabile da parte del Committente.

### 5.3.2 Ridondanza

Ogni centrale sarà dotata di due ventilatori per garantire una ridondanza in caso di guasto di un apparecchio e per facilitare il servizio e la manutenzione, senza rinunciare in questi periodi della possibilità di estrazione fumi in caso d'incendio. In assenza di un criterio di ridondanza regolamentare in Francia, è stata considerata la raccomandazione della direttiva svizzera [16], che richiede in caso di funzionamento di un solo ventilatore l'ottenimento della portata d'aspirazione del 65%. Questo valore corrisponde a  $117 \text{ m}^3/\text{s}$  della portata per un ventilatore isolato.

Per garantire un'elevata sicurezza di funzionamento, è prevista anche la ridondanza di alimentazione elettrica dei ventilatori. In ogni centrale i ventilatori possono dunque essere alimentati dalla rete EDF e/o dalla rete ENEL.

### 5.3.3 Resistenza termica e raffreddamento dei motori

Per ragioni di spazio limitato e per consentire una manutenzione agevole, i ventilatori saranno installati in prossimità della galleria di sicurezza e dunque presso i punti di estrazione. In caso d'incendio presso una centrale, i ventilatori rischiano di essere esposti a delle temperature elevate (Fig. 5.4). In una tale situazione, la Circolare francese ([1], capitolo 4.4.2b) richiede una resistenza termica particolare, che garantisce il buon funzionamento della ventilazione per 120 minuti a 400°C.

Evidentemente i ventilatori che rispondono a tale esigenza dispongono di un sistema di raffreddamento ad aria. Non sono attualmente disponibili sul mercato ventilatori con raffreddamento ad acqua certificati per 400°C.

Per il raffreddamento ad aria, un ventilatore ausiliario fa circolare l'aria fresca attraverso la cassa e la gabbia del motore del ventilatore. Poiché l'aspirazione dell'aria fresca e pulita dall'esterno in caso d'incendio nella galleria non è possibile nelle nuove centrali sotterranee di estrazione massiva (impossibile dalla galleria a causa dell'incendio; l'aria del traforo non è pulita; la presa d'aria dal canale d'aria fresca del traforo è problematica), è stato adottato un sistema combinato con raffreddamento secondario ad acqua del circuito d'aria in un radiatore.

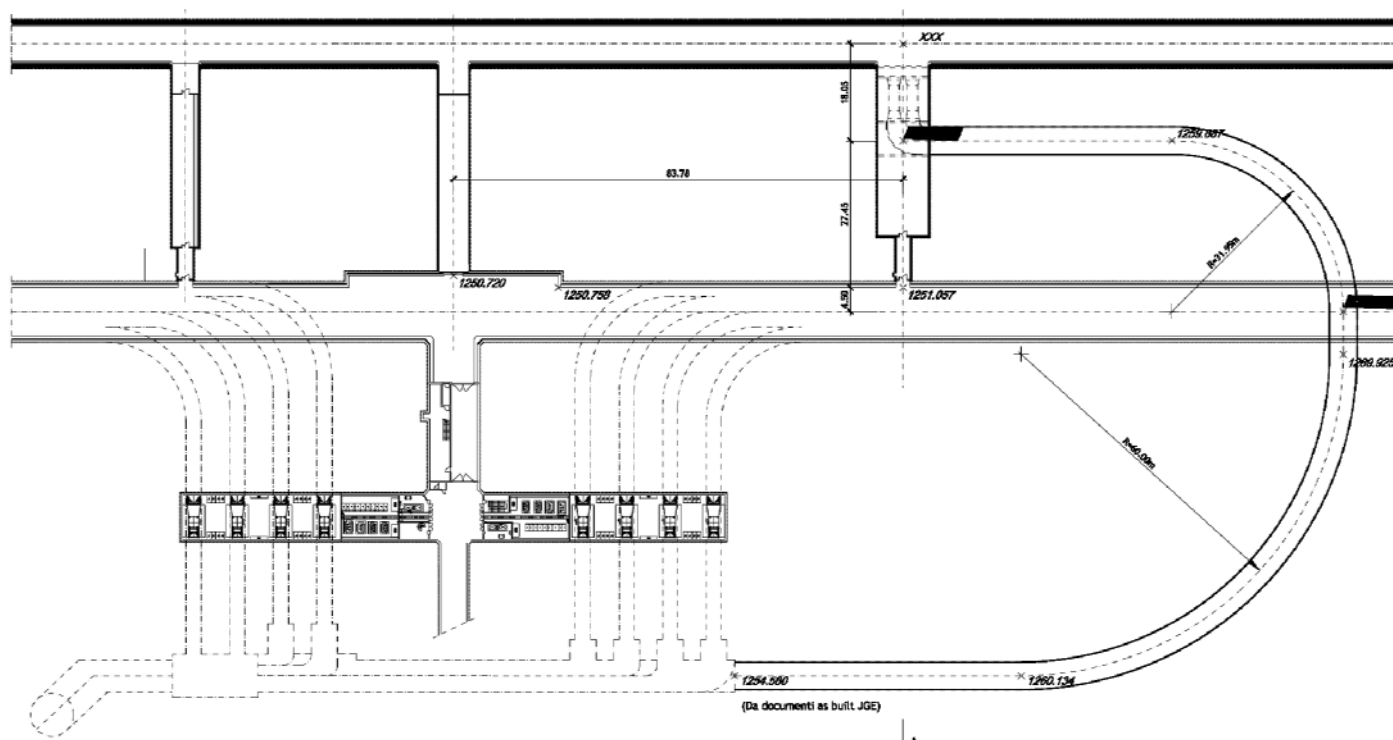
Per un ventilatore d'estrazione massiva con motore elettrico di 650 kW, il ventilatore ausiliario avrà una portata di 2 m<sup>3</sup>/s e assorbirà una potenza elettrica di ca. 4 kW.

Un motore di 650 kW ha un rendimento elettrico di ca. il 95%, cioè ca. 30 kW sono dissipati e necessitano un raffreddamento. L'aria di raffreddamento si riscalda dunque ca.  $dT=15^{\circ}\text{C}$ . Lo scambiatore di calore aria/acqua è alimentato con acqua dal circuito d'acqua di raffreddamento (capitolo 5.6.3).

L'alimentazione elettrica del motore del ventilatore d'estrazione massiva dipende indirettamente anche dalle esigenze termiche. In effetti, un motore della potenza richiesta può essere alimentato a 690 V oppure a 6 kV. In ogni caso, i motori già certificati per 400°C per 120 minuti sono attualmente disponibili solo con alimentazione a 690 V.

### 5.3.4 Punti di funzionamento della centrale E

I due ventilatori della centrale di estrazione E devono poter raggiungere i punti di funzionamento elencati nella Tab. 5.3. Le schede di calcolo corrispondenti si trovano nell'allegato (capitolo 11).



**Fig. 5.6:** Disegno della centrale B e della nuova centrale d'estrazione massiva E.

Poiché la temperatura dei fumi può salire a ca. 400°C con i ventilatori in servizio, quest'ultimi devono essere scelti in modo da garantire delle prestazioni ancora sufficienti a delle temperature così elevate.

In effetti, un ventilatore lavora sempre con una portata volumetrica costante, indipendentemente dalla temperatura dell'aria. La portata di massa diminuisce a temperature più elevate in ragione della densità ridotta, come pure del rapporto di pressione. Le esigenze di sicurezza formulate in [1] invece, riguardo alla velocità dell'aria a monte e a valle di un evento, esigono l'estrazione della portata volumetrica a temperatura ambiente e dunque effettivamente di una portata di massa fissa.

La temperatura media a livello dei ventilatori è stimata a partire dalla potenza d'incendio di 30 MW (capitolo 3.3) e considerando che 1/3 della potenza è tra-

smessa direttamente alle pareti per irradiazione. Il riscaldamento dell'aria a poca distanza dal luogo d'incendio é determinato dalla capacità convettiva del calore:

$$\frac{2}{3} Q_{\text{incendio}} = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot dT$$

$$dT \approx 100^\circ\text{C} \text{ e dunque } T \approx 125^\circ\text{C}$$

La densità a una temperatura di ca.  $125^\circ\text{C}$  decresce a  $0.79 \text{ kg/m}^3$  ( $1.05 \text{ kg/m}^3$  a  $25^\circ\text{C}$ ), a cui corrisponde un aumento della portata volumetrica dei ventilatori di  $1/3$  per permettere di mantenere la portata di massa richiesta.

La diminuzione di funzionamento a temperatura elevata è d'altra parte in conformità con la direttiva svizzera, che impone un aumento della portata volumetrica a freddo per un fattore di 1.3 per il dimensionamento di un ventilatore fino a  $400^\circ\text{C}$  [16].

La temperatura influisce sulla perdita di carico globale nel sistema delle gallerie, con portate di massa costanti, poiché la velocità aumenta in modo quadratico mentre la densità diminuisce solamente in maniera lineare. Tuttavia l'impatto della temperatura è generalmente limitata alla zona immediatamente a valle del luogo d'incendio, a causa al raffreddamento rapido dell'aria per scambio di calore con le pareti (vedi anche Fig. 5.4), limitando dunque l'aumento della resistenza aerodinamica.

Il funzionamento parallelo della centrale di ventilazione esistente con la nuova centrale è considerato per permettere la gestione della velocità longitudinale nel traforo per l'estrazione d'aria durante un evento nella galleria e per poter gestire in futuro simultaneamente degli eventi sia nel traforo che nella galleria.

L'impatto sulla perdita di carico è importante in quanto le due centrali condividono un pozzo in comune che provoca una importante resistenza aerodinamica in caso di funzionamento simultaneo. Si considera al massimo un ventilatore in servizio per settore nella centrale esistente con una portata massima unitaria di  $130 \text{ m}^3/\text{s}$ , come esposto in [13]. La portata totale della centrale esistente è dunque di  $260 \text{ m}^3/\text{s}$  con due ventilatori in servizio.

Ben inteso, i ventilatori esistenti nelle centrali B e C non sono al momento in grado di operare insieme a pieno regime con le nuove centrali d'estrazione massiva. Un funzionamento in parallelo ad alta portata è quindi possibile in futuro dopo un potenziamento delle centrali esistenti.

Secondo la Tab. 5.3 la potenza più elevata richiesta per ventilatore è di 586 kW senza riserve. Considerando una riserva di ca. il 10%, la potenza installata per ciascun ventilatore nella centrale E risulta di 650 kW.

Le dimensioni e i dati tecnici approssimativi dei ventilatori sono:

Diametro della girante:	1'800 mm
Diametro del mozzo:	1'250 mm
Diametro del diffusore:	2'300 mm
Lunghezza tra ugello d'entrata e diffusore:	7'000 mm
Peso:	15'000 kg
Numero di giri:	1'470 1/min
Potenza elettrica:	650 kW

Regime di esercizio (velocità d'aria in galleria in caso d'estrazione massiva)	Portata volumetrica d'estrazione massiva a 1.05 kg/m <sup>3</sup>	Portata volumetrica d'estrazione massiva a 0.79 kg/m <sup>3</sup>	Portata centrale B esistente	Rapporto della pressione totale	Spinta (rendimento elettrico/aerodinamico 75%)	Scheda del calcolo in allegato
2 ventilatori (3 m/s e 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	3'664 Pa	2 x 586 kW	Tab. 11.1
2 ventilatori (3 m/s e 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	1'300 Pa	2 x 208 kW	Tab. 11.2
2 ventilatori (1.5 m/s e 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	2'306 Pa	2 x 230 kW	Tab. 11.3
2 ventilatori (1.5 m/s e 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	508 Pa	2 x 51 kW	Tab. 11.4
1 ventilatore (3 m/s e 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	2'542 Pa	1 x 529 kW	Tab. 11.5
1 ventilatore (3 m/s e 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	707 Pa	1 x 147 kW	Tab. 11.6

**Tab. 5.3:** Punti di funzionamento per i ventilatori d'estrazione massiva della nuova centrale E.

### 5.3.5 Prestazioni di funzionamento della centrale F

I due ventilatori della centrale di estrazione F devono poter raggiungere le prestazioni di funzionamento elencate in Tab. 5.4. Le schede di calcolo corrispondenti si trovano in allegato al capitolo 11. Il collegamento tra la centrale esistente C è differente rispetto alla centrale B per cui anche le prestazioni di funzionamento sono diverse.

Secondo la Tab. 5.4, la potenza più elevata richiesta per ventilatore è di 341 kW senza riserva. Considerando una riserva di ca. il 10%, la potenza installata per ciascun ventilatore nella centrale F risulta di 375 kW. Questo valore è nettamente inferiore alla potenza richiesta per ventilatore della centrale E (650 kW).

Tuttavia, per ragioni di gestione, manutenzione e servizio, è raccomandabile prevedere lo stesso tipo di ventilatore per le due centrali, dunque anche per la centrale F sono previsti due ventilatori con una potenza elettrica unitaria di 650 kW.

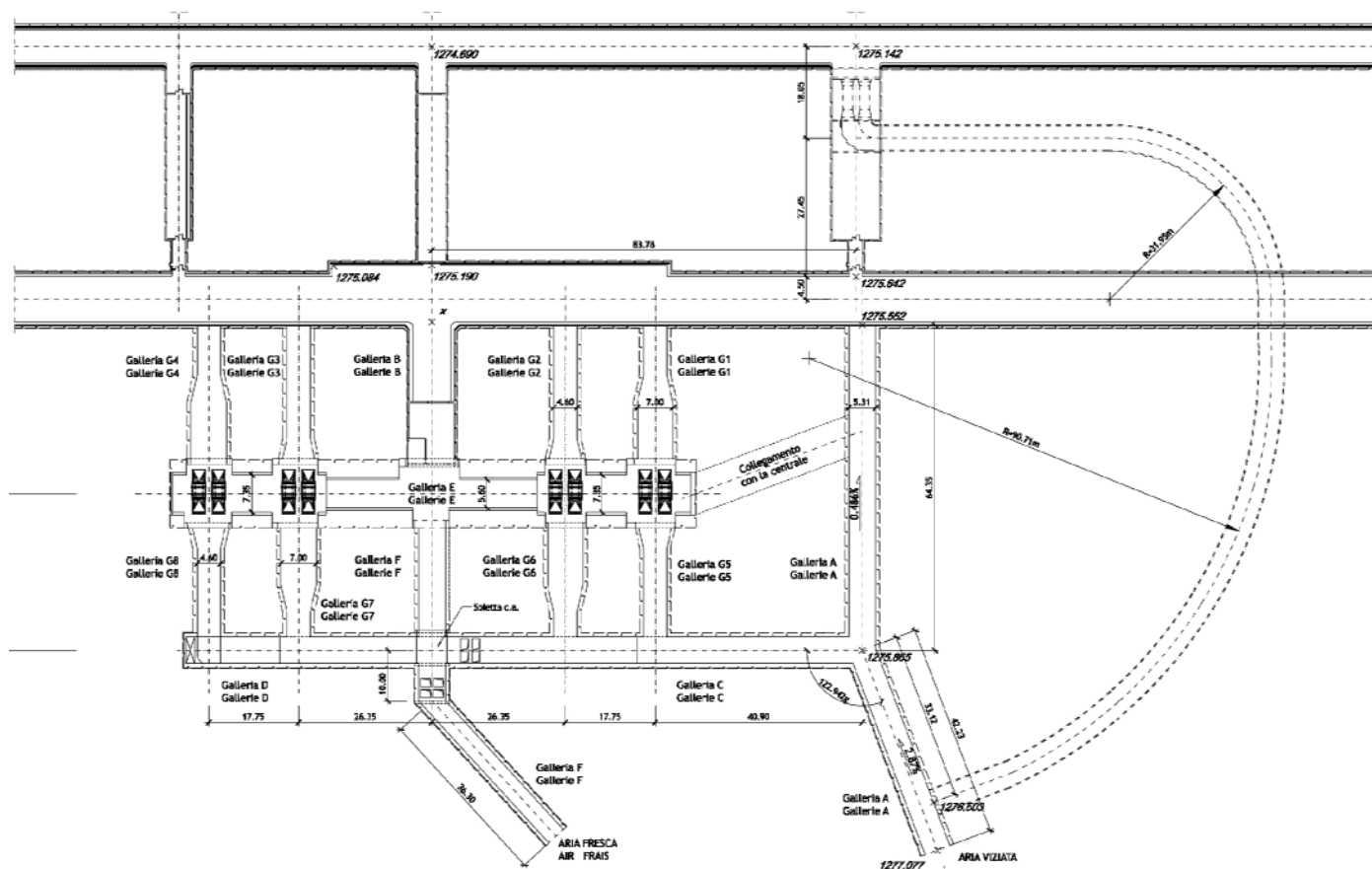


Fig. 5.7: Disegno della centrale C e della nuova centrale d'estrazione massiva F.

Le dimensioni e dati tecnici approssimati sono:

Diametro della girante:	1'800 mm
Diametro del mozzo:	1'250 mm
Diametro del diffusore:	2'300 mm
Lunghezza tra ugello d'entrata e diffusore:	7'000 mm
Peso:	15'000 kg
Numero di giri:	1'470 1/min
Potenza elettrica:	650 kW

Regime di esercizio (velocità d'aria in galleria in caso d'estrazione massiva)	Portata volumetrica d'estrazione massiva a 1.05 kg/m <sup>3</sup>	Portata volumetrica d'estrazione massiva a 0.79 kg/m <sup>3</sup>	Portata centrale C esistente	Rapporto della pressione totale	Spinta (rendimento elettrico/aerodinamico 75%)	Scheda del calcolo in allegato
2 ventilatori (3 m/s e 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	2'130 Pa	2 x 341 kW	Tab. 11.7
2 ventilatori (3 m/s e 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	1'036 Pa	2 x 166 kW	Tab. 11.8
2 ventilatori (1.5 m/s e 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	1'291 Pa	2 x 129 kW	Tab. 11.9
2 ventilatori (1.5 m/s e 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	390 Pa	2 x 39 kW	Tab. 11.10
1 ventilatore (3 m/s e 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	1'496 Pa	1 x 311 kW	Tab. 11.11
1 ventilatore (3 m/s e 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	579 Pa	1 x 120 kW	Tab. 11.12

**Tab. 5.4:** Punti di funzionamento per i ventilatori d'estrazione massiva della nuova centrale F.

### 5.3.6 Regolazione

La variazione del regime di funzionamento dei ventilatori si effettua con delle pale regolabili in marcia che permettono un avvio di un ventilatore anche in presenza di una contro-pressione statica già esistente. Questa condizione può verificarsi in diverse situazioni:

- uno o due ventilatori della centrale esistente sono in servizio creando una sovrappressione nella galleria al piede del pozzo.
- Il ventilatore gemello è già in servizio.
- In estate, quando è più caldo in testa al pozzo che nella galleria, un effetto camino invertito provoca una pressione statica al piede del pozzo.

Inoltre, i ventilatori saranno dotati di motori a doppia velocità di rotazione per ottenere tutte le prestazioni di funzionamento con un rendimento ragionevole. La scelta di queste due velocità è fatta in modo che ca. il 50% della portata massima possa essere raggiunta a velocità ridotta, assicurando così uno spettro di funzionamento abbastanza ampio e con rendimento elevato.

### 5.3.7 Silenziatori

Come esposto nel capitolo precedente, i ventilatori sono stati installati presso la galleria di sicurezza. In assenza di contromisure, l'esposizione ai rumori nella galleria sarà dunque molto elevata, perciò è previsto un silenziatore a monte di ogni



ventilatore, riducendo così il livello sonoro a livello ancora sopportabile senza protezione specifica di ca. 75-80 dB(A).

La resistenza termica di 120 minuti a 400°C per il silenziatore è pari a quella del ventilatore, considerato che un guasto al silenziatore lo danneggerebbe o metterebbe fuori servizio.

#### *5.3.8 Serranda del ventilatore*

Ogni ventilatore è equipaggiato con due serrande motorizzate, una a monte e una a valle.

L'installazione di due serrande di ventilazione garantisce un'elevata sicurezza alla separazione dei due flussi d'aria tra la centrale esistente e la nuova centrale d'estrazione massiva, che hanno come tronco comune il pozzo d'aria viziata.

Analogamente ai ventilatori e silenziatori anche le serrande sono dimensionate per 120 minuti a 400°C.

#### *5.3.9 Equipaggiamento di montaggio e manutenzione*

##### *5.3.9.1 Carroponte*

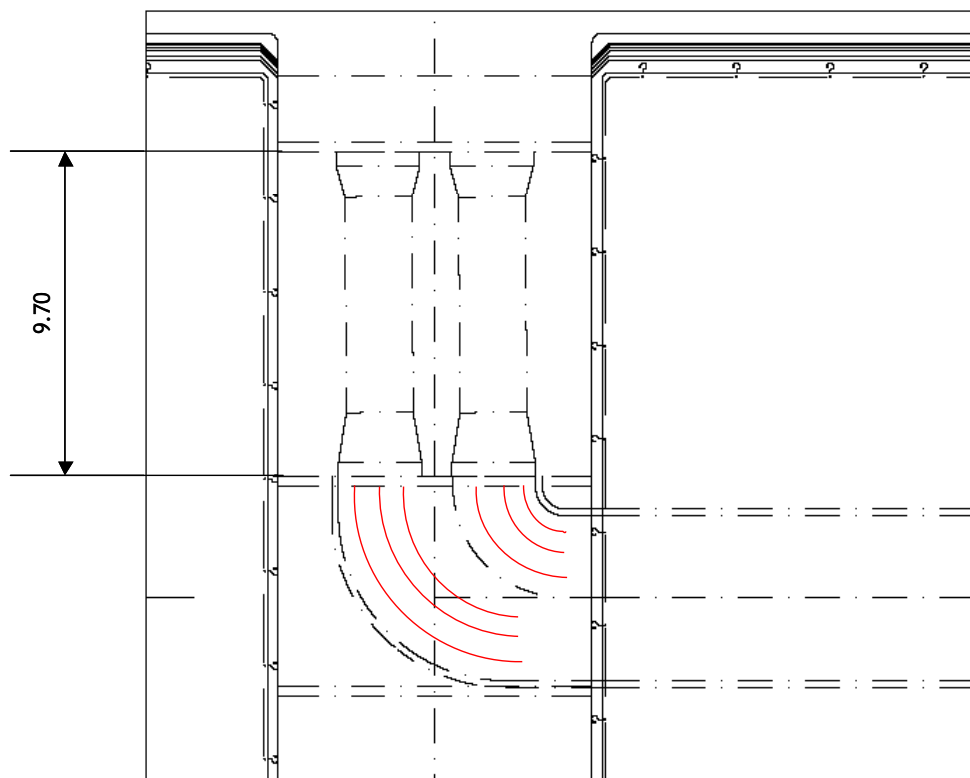
In ogni centrale di ventilazione è previsto un carroponte montato in volta che permette il montaggio/smontaggio del ventilatore e degli accessori (serrande, sistema idraulico, ecc).

##### *5.3.9.2 Botole di chiusura sotto i ventilatori*

Ogni ventilatore è alzato dal livello del pavimento alla sua posizione di montaggio mediante un'apertura nel doppio soffitto. Quest'apertura è chiusa con una botola metallica, sistemata in posizione di chiusura mediante il carroponte.

##### *5.3.10 Deflettori*

A valle di ogni ventilatore, la corrente d'aria deve seguire un angolo di 90° prima di entrare nella galleria di raccordo. Per limitare la perdita di carico in questo punto, sono previsti dei deflettori metallici.



**Fig. 5.8:** Deflettori a valle dei ventilatori.

### 5.3.11 Equipaggiamento di controllo

I ventilatori disporranno di sensori standard, comprendenti in particolare:

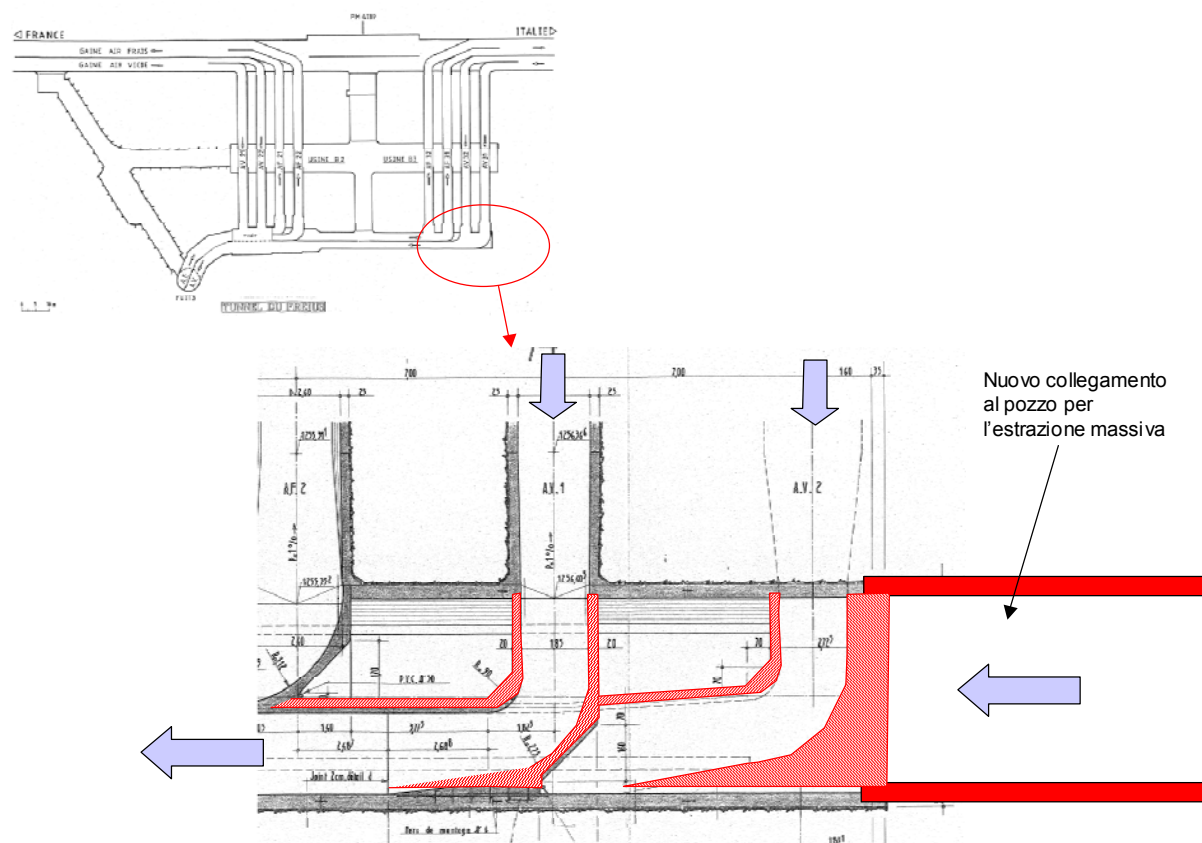
- misure di portata, pressione e temperatura dell'aria;
- misure di vibrazione;
- rilevatori d'instabilità aerodinamica;
- misure di temperatura, tensione e corrente dei motori.

Dalla GTC sarà possibile visualizzare tutti i parametri dei ventilatori e di comando:

- la portata dei ventilatori;
- la velocità dei ventilatori;
- l'angolo delle pale dei ventilatori;
- l'apertura e la chiusura delle serrande.

### 5.3.12 Collegamento con la centrale B esistente

Come illustrato nella Fig. 5.6, la nuova centrale d'estrazione massiva E sarà collegata al pozzo della centrale B esistente.



**Fig. 5.9:** Dettaglio di collegamento dell'estrazione massiva nella galleria ai piedi del pozzo della centrale B.

Il collegamento richiede la demolizione dei canali e delle curve che attualmente collegano i due ventilatori d'aria viziata dal lato est della centrale e della galleria al piede del pozzo. La Fig. 5.9 mostra le pareti da eliminare (parti in rosso tratteggiate). Va da se che questa modifica aumenta la perdita di carico dei ventilatori della centrale B esistente. Secondo una prima stima, la resistenza aerodinamica aumenterà al pieno regime del ventilatore ( $130 \text{ m}^3/\text{s}$ ) di ca. 300-400 Pa, quando la centrale d'estrazione massiva è fuori servizio.

In dipendenza della riserva di potenza ancora disponibile per questi ventilatori esistenti, ne potrebbe conseguire una riduzione della portata per gli scenari di estrazione nel traforo.

Un intervento di tale entità non è richiesto per la centrale C, perché il collegamento può essere realizzato direttamente a monte del pozzo d'aria viziata. Fig. 5.7.

### 5.3.13 Alimentazione elettrica

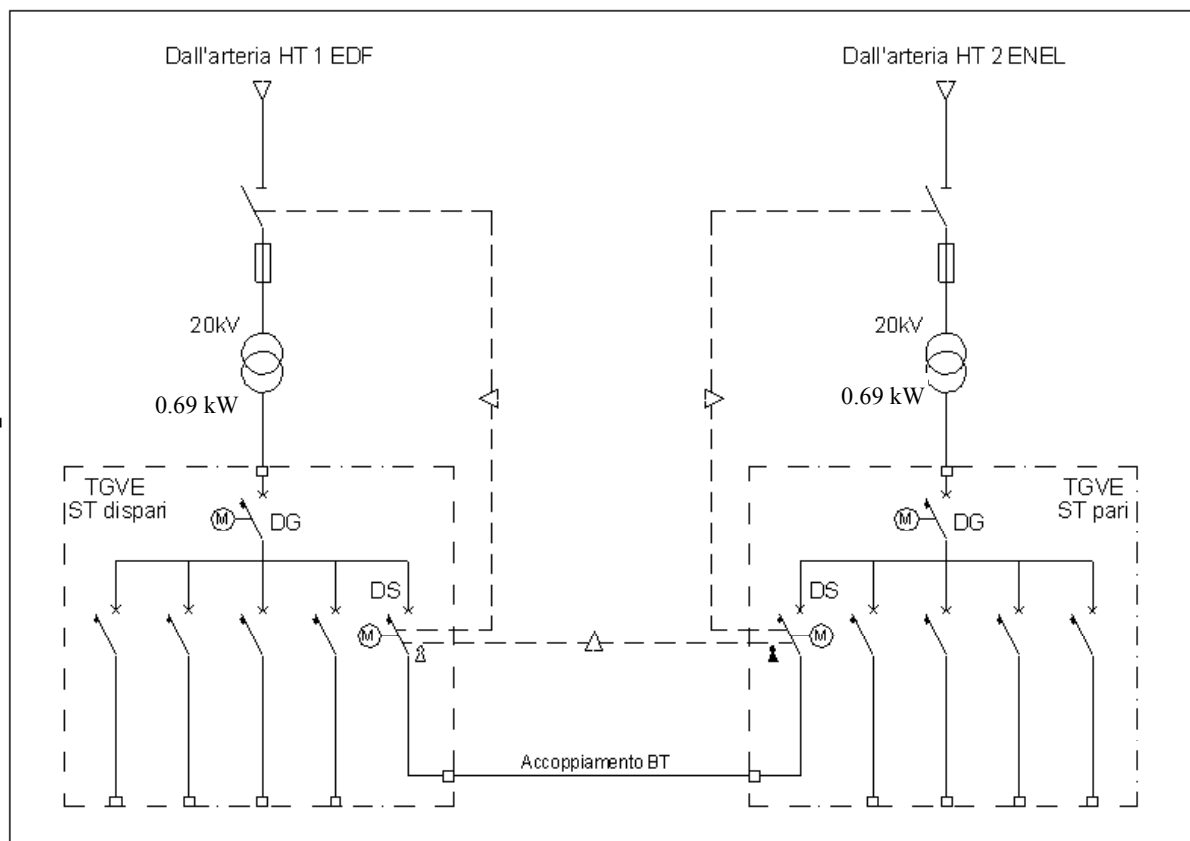
Per l'alimentazione e la protezione elettrica di ogni ventilatore, sarà installata un quadro di ventilazione TGVE associato a un variatore di frequenza (inverter) necessario alla regolazione della velocità di rotazione del ventilatore.

Il sistema di distribuzione elettrica prevede l'alimentazione di un ventilatore dalla rete HT 20kV EDF, nella stazione tecnica dispari (ST07 della centrale E e ST13 della centrale F), mentre l'altro ventilatore sarà alimentato dalla rete HT 20kV ENEL, nella stazione tecnica pari (ST14 della centrale E e ST08 nella centrale F).

Una ridondanza completa dell'alimentazione elettrica è assicurata sia in caso di guasto su una delle due reti HT, sia in caso di guasto a livello di bassa tensione, mediante un sistema di connessione previsto tra i quadri TGVE dei due ventilatori situati nella stessa centrale.

Questa soluzione prevede, per ogni TGVE, due interruttori generali, di cui uno normalmente chiuso su delle barre di distribuzione (DG) e uno supplementare normalmente aperto (DS), predisposto all'accoppiamento con il TGVE della ST adiacente.

L'interruttore supplementare del TGVE installato nelle ST dispari sarà collegato a quello del TGVE ubicato nella corrispondente ST pari. In caso di fuori servizio di un trasformatore, è prevista la chiusura manuale locale e/o a distanza dei due DS, secondo conferma data per l'apertura del dispositivo di protezione installato a monte del trasformatore fuori servizio. Questa manovra permette di alimentare il TGVE delle due ST mediante il trasformatore rimasto in servizio, limitando al contempo la mancata alimentazione delle installazioni di pochi secondi.



**Fig. 5.10:** Accoppiamento a livello BT - Schema unifilare

I DS saranno interbloccati elettricamente con dispositivi di protezione nel corrispondente lato HT installato immediatamente a monte, allo scopo di evitare la chiusura in corto-circuito tra i secondari dei trasformatori HT/BT.

Un comando manuale supplementare degli interruttori sarà possibile solamente mediante un sistema di manovra con interblocchi a chiave, necessari ad evitare la chiusura simultanea dei DS durante l'esercizio in configurazione normale.

## 5.4 Ventilazione dei rifugi

### 5.4.1 Concetto generale

La ventilazione dei rifugi si svolge come segue:

- Aspirazione dell'aria dalla galleria di sicurezza mediante un ventilatore ad alto rendimento. Un secondo ventilatore di riserva, con le stesse caratteristiche tecniche, sarà collegato automaticamente in caso di guasto al primo ventilatore. Il funzionamento sarà controllato da un dispositivo di regola-

zione automatico. I ventilatori sono installati all'esterno dei rifugi lato galleria;

- Immissione d'aria nei rifugi, mediante serrande motorizzate a valle di ogni ventilatore ed una serranda taglia-fuoco installata sulla parete di separazione tra galleria e rifugio;
- Passaggio verso SAS mediante serranda taglia-fuoco;
- Espulsione dell'aria verso il traforo mediante una serranda di regolazione della pressione e una serranda taglia-fuoco.

Le principali componenti sono (Fig. 3.1):

- 2 ventilatori a velocità variabile;
- 2 serrande motorizzate (una per ogni ventilatore);
- 3 serrande taglia-fuoco tra galleria e rifugio, tra rifugio e SAS e tra SAS e traforo;
- 1 serranda di regolazione della pressione;
- 1 sensore della differenza di pressione tra traforo e rifugio;
- 1 dispositivo di regolazione.

Due ventilatori elettrici radiali ad alto rendimento sono previsti per ogni rifugio con le seguenti caratteristiche:

- |  |   |
|--|---|
| - Portata d'aria in caso d'incendio    | 0.70 m <sup>3</sup> /s (capitolo 4.1.3.2)                         |
| - Portata d'aria con esercizio normale | 0.44 m <sup>3</sup> /s (capitolo 4.1.1.2)                         |
| - Rapporto della pressione statica     | 1'400 Pa (fino a 1'100 Pa tra traforo e galleria, capitolo 4.2.5) |
| - Velocità di rotazione                | variabile   |
| - Potenza motore                       | 3.0 kW  |

Se le due porte del SAS di un rifugio restano aperte, la portata d'aria fresca aumenta a 2.8 m<sup>3</sup>/s (capitolo 4.1.3.2). Questo flusso deve tuttavia essere raggiunto solamente in caso d'incendio con sovrappressione nel rifugio rispetto alla galleria dell'ordine di 600-700 Pa (Fig. 4.17). Per limitare le dimensioni dei ventilatori, questa modalità di funzionamento deve essere garantita solamente con azione parallela dei due ventilatori.

Nonostante la pressione massima sia variabile lungo la galleria con valore più elevato al centro del traforo (capitolo 4.2.5), è prevista la posa della stessa apparecchiatura per tutti i rifugi (e in particolare gli stessi ventilatori) in modo da poter

avvalersi degli stessi materiali per l'esercizio e la manutenzione. Quest'osservazione vale anche per il rifugio 18 che dispone, in effetti, di una superficie ridotta e avrebbe dunque teoricamente esigenze d'aria fresca più basse (capitolo 2.3).

#### 5.4.2 Funzione di regolazione automatica

Una differenza di pressione di ca. 80 Pa sarà mantenuta tra il rifugio e il traforo secondo la prescrizione [1] mediante una serranda di regolazione motorizzata, regolata sulla base della misura della differenza di pressione. Questa serranda adatta dunque le caratteristiche di resistenza aerodinamica del rifugio per mantenere la sovrappressione indipendente dalla portata data. La portata è regolata dalla velocità di rotazione del ventilatore. L'anello di controllo della serranda è nettamente più rapido di quello della portata, per evitare instabilità e interdipendenze tra i due sistemi.

In caso di sovrappressione importante nella galleria di sicurezza rispetto al traforo, che può raggiungere fino a 500 Pa (capitolo 4.2.5 e 4.2.6), l'anello di controllo della portata spegne il ventilatore non appena la sua portata resta sopra il valore di consegna, lasciando tuttavia la serranda del ventilatore aperta. Il ventilatore funziona quindi come un riduttore di pressione al livello desiderato nel rifugio di 80 Pa rispetto al traforo. Secondo le caratteristiche del ventilatore installato, la portata d'aria attraverso il rifugio può essere considerevolmente aumentata rispetto al valore di consegna in detto regime di funzionamento.

- |  |   |
|--|---|
| – pressione d'esercizio nella galleria | ambiente, situato tra i valori dei due portali in esercizio, fino a 500 Pa sovrappressione in caso d'incendio nel traforo |
| – Pressione d'esercizio nel rifugio    | +80 Pa rispetto alla pressione locale nel traforo   |
| – Pressione d'esercizio nel traforo    | 0 - 1'100 Pa  |

#### 5.4.3 Alimentazione elettrica

Per ogni rifugio è previsto un quadro elettrico d'alimentazione e di regolazione degli apparecchi della ventilazione (ventilatori, serrande, sensori differenza di pressione, dispositivi di regolazione).

Il quadro è installato presso il gruppo di ventilazione ed equipaggiato con regolatori di frequenza (inverter) per la variazione della velocità dei ventilatori.

L'alimentazione elettrica proviene dalla rete di soccorso, con connessioni al quadro di bassa tensione TSR del rifugio stesso, previsto dall'impianto d'alimentazione elettrica (vedere anche rapporto 6145.2-R-14A).

## 5.5 Ventilazione dei by-pass

### 5.5.1 Concetti generali

La ventilazione dei by-pass opera come segue:

- Aspirazione dell'aria dalla galleria di sicurezza mediante un ventilatore ad alto rendimento. Il funzionamento sarà controllato dall'apparecchio di regolazione automatica. Il ventilatore è installato all'esterno del by-pass, lato galleria;
- Immissione d'aria nel by-pass mediante una serranda motorizzata a valle di ogni ventilatore e una serranda taglia-fuoco installata sulla parete di separazione tra la galleria e il by-pass;
- Espulsione dell'aria verso il traforo mediante una serranda di regolazione di pressione e una serranda taglia-fuoco;
- Depressurizzazione del by-pass mediante una serranda per permettere l'accesso attraverso il portone lato galleria.

Le componenti principali sono:

- 1 ventilatore a velocità variabile;
- 1 serranda motorizzata (per il ventilatore);
- 1 serranda di regolazione della pressione;
- 1 serranda di depressurizzazione lato galleria di sicurezza;
- 3 serrande taglia-fuoco, tra galleria e by-pass e tra by-pass e traforo;
- 1 sensore di differenza di pressione;
- 1 dispositivo di regolazione.

Due ventilatori elettrici radiali ad alto rendimento sono previsti per ogni by-pass con le seguenti caratteristiche:

- Portata d'aria 0.46 m<sup>3</sup>/s (capitolo 4.1.1.4)



- Rapporto di pressione statica 1'400 Pa (fino a 1'100 Pa tra traforo e galleria, capitolo 4.2.5)
- Velocità di regolazione variabile
- Potenza del motore 1.5 kW

Nonostante la pressione massima sia variabile lungo la galleria con valore più elevato al centro (capitolo 4.2.5), è prevista la posa della stessa apparecchiatura per tutti i by-pass (e in particolare gli stessi ventilatori) in modo da agevolare l'esercizio e la manutenzione.

### 5.5.2 Funzione e regolazione automatica

Una differenza di pressione di ca. 80 Pa sarà mantenuta tra i by-pass e il traforo come per i rifugi mediante una serranda di regolazione motorizzata, regolata sulla base di misure di differenza di pressione. Questa serranda adatta dunque le caratteristiche della resistenza aerodinamica al by-pass, mantenendo la sovrappressione indipendente dalla portata data. La portata a sua volta è regolata dalla velocità di rotazione del ventilatore. L'anello di controllo della serranda è nettamente più rapido di quella della portata, per evitare instabilità e interdipendenze tra i due sistemi.

In caso di sovrappressione importante nella galleria di sicurezza rispetto al traforo, che può raggiungere fino a 500 Pa (capitolo 4.2.5 e 4.2.6), l'anello di controllo della portata spegne il ventilatore non appena la sua portata resta sopra il valore di consegna, lasciando tuttavia la serranda del ventilatore aperta. Il ventilatore funziona quindi come un riduttore di pressione al livello desiderato nel rifugio di 80 Pa rispetto al traforo. Secondo le caratteristiche del ventilatore installato, la portata d'aria attraverso il by-pass può superare considerevolmente il valore di consegna in regime d'esercizio.

- pressione d'esercizio nella galleria ambiente, situato tra i valori dei due portali in esercizio, fino a 500 Pa sovrappressione in caso d'incendio nel traforo
- Pressione d'esercizio nel by-pass +80 Pa rispetto alla pressione locale nel traforo
- Pressione d'esercizio nel traforo 0 - 1'100 Pa

### 5.5.3 Alimentazione elettrica

Per ogni rifugio è previsto un quadro elettrico d'alimentazione e di regolazione degli apparecchi della ventilazione (ventilatori, serrande, sensori differenza di pressione, dispositivi di regolazione).

Il quadro è installato presso il gruppo di ventilazione ed equipaggiato con regolatori di frequenza (convertitori) per la variazione della velocità dei ventilatori.

L'alimentazione elettrica proviene dalla rete di soccorso, con connessioni al quadro di bassa tensione TSR dal rifugio più vicino (per i by-pass 1, 3 e 5), o dal quadro di bassa tensione TGBTS della ST 07-14 (per il by-pass 2) e della ST 13-08 (per i by-pass 4), previsti dall'impianto d'alimentazione elettrica (vedi rapporto 6145.2-R-14A).

## 5.6 Ventilazione e climatizzazione delle stazioni tecniche (ST)

### 5.6.1 Concetti generali

Le nuove stazioni tecniche sono collegate con il traforo attraverso i PHT. L'aria necessaria alla ventilazione delle ST proviene dalla galleria ed è anche re-immessa per la maggior parte in galleria. Viene utilizzata solo una parte della portata per la ventilazione dei relativi PHT e in seguito è espulsa verso il traforo.

E' prevista la realizzazione di una combinazione di ventilazione e climatizzazione, in quanto la sola ventilazione non è in grado di garantire una temperatura accettabile in ogni ST in tutte le situazioni. Il sistema sarà dimensionato allo scopo di garantire con la sola ventilazione (in caso di guasto o di manutenzione della climatizzazione) delle temperature inferiori a 35-40°C.

Le principali componenti del sistema di ventilazione e climatizzazione per ogni coppia di ST (ST pari + ST dispari) sono:

- Un monoblocco di trattamento dell'aria per il prelievo dell'aria dalla galleria e il convogliamento nei locali ST composto da ventilatore a velocità variabile, una macchina frigorifera raffreddata ad acqua, una batteria elettrica di riscaldamento e un filtro d'aria;
- Delle condotte di convogliamento d'aria;

- 1 ventilatore a regime variabile tra PHT e il traforo per l'estrazione dell'aria dal PHT, essendo la pressurizzazione nel locale filtro tra PHT e il traforo superiore alla pressione nel traforo;
- 2 ventilatori a regime variabile tra la ST e la galleria per l'espulsione dell'aria riscaldata;
- 3 serrande taglia-fuoco tra la galleria e la ST (1 per l'aria fresca, 2 per l'aria viziata);
- 1 serranda taglia-fuoco tra PHT e il traforo;
- 1 serranda di regolazione della pressione tra il SAS e il traforo;
- 1 serranda di depressurizzazione tra SAS e il PHT;
- 1 serranda motorizzata (per il ventilatore d'espulsione);
- 1 sensore della pressione tra SAS e traforo;
- dei dispositivi di regolazione e dei sensori di temperatura, umidità e pressione.

Il monoblocco d'immissione e di trattamento dell'aria previsto avrà le seguenti caratteristiche:

- portata d'aria massima	3.3 m <sup>3</sup> /s
- pressione statica	1'000 Pa
- velocità di rotazione	variabile
- potenza ventilatore	5.5 kW
- Potenza compressore	25 kW
- Potenza pompa d'acqua	0.5 kW
- Potenza termica di raffreddamento	40 kW
- Temperatura dell'aria in entrata	30° C (60% umidità relativa)
- Temperatura dell'aria in uscita	23° C (82% umidità relativa)
- Potenza termica da dissipare	60 kW
- Temperatura dell'acqua in entrata	25° C
- Temperatura dell'acqua in uscita	35° C
- Portata d'acqua	da 0 a 5.2 m <sup>3</sup> /h
- Temperatura dell'aria in entrata	15° C
- Temperatura dell'aria in uscita	20° C
- Potenza elettrica	da 0 a 19 kW

I due ventilatori tra la ST e la galleria avranno le seguenti caratteristiche:

- |                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| - Portata               | 2 x 1.3 m <sup>3</sup> /s |
| - Pressione             | 150 Pa                    |
| - Potenza               | 1.0 kW                    |
| - Velocità di rotazione | variabile                 |

Il ventilatore tra il PHT e il SAS avrà le seguenti caratteristiche:

- |                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| - portata d'aria        | 0.85 m <sup>3</sup> /s |
| - pressione statica     | 1'400 Pa               |
| - velocità di rotazione | variable               |
| - potenza motore        | 2.2 kW                 |

Nonostante la pressione massima sia variabile lungo la galleria con valore più elevato al centro del traforo (capitolo 4.2.5), è prevista la posa della stessa apparecchiatura per tutte le ST (e in particolare i ventilatori tra PHT e SAS) in modo da agevolare l'esercizio e la manutenzione.

#### *5.6.2 Funzionamento e regolazione automatica*

Una differenza di pressione di ca. 80 Pa sarà mantenuta tra il SAS e il traforo in analogia ai rifugi mediante una serranda di regolazione motorizzata nella parete lato traforo, regolata sulla base di misure di differenza di pressione. Questa serranda adatta dunque le caratteristiche di resistenza aerodinamica, mantenendo la sovrappressione nel locale indipendentemente dalla portata data. La portata a sua volta è regolata dalla velocità di rotazione del ventilatore. L'anello di controllo della serranda è nettamente più rapido di quello della portata, per evitare instabilità e interdipendenze tra i due sistemi.

In caso di sovrappressione importante nella galleria di sicurezza rispetto al traforo, che può raggiungere fino a 500 Pa (capitolo 4.2.5 e 4.2.6), l'anello di controllo della portata spegne il ventilatore non appena la sua portata resta sopra il valore di consegna, lasciando tuttavia la serranda del ventilatore aperta. Il ventilatore funziona quindi come un riduttore di pressione al livello desiderato nel rifugio di 80 Pa rispetto al traforo. Secondo le caratteristiche del ventilatore installato, la

portata d'aria attraverso il by-pass può superare considerevolmente il valore di consegna in regime d'esercizio.

La pressione nella ST sarà peraltro simile a quella nella galleria per permettere un facile accesso al personale. In caso di differenza di pressione importante tra galleria e traforo, è il ventilatore tra PHT e il locale filtro ad assicurare la pressurizzazione richiesta per impedire l'infiltrazione d'aria viziata e inquinata dal traforo.

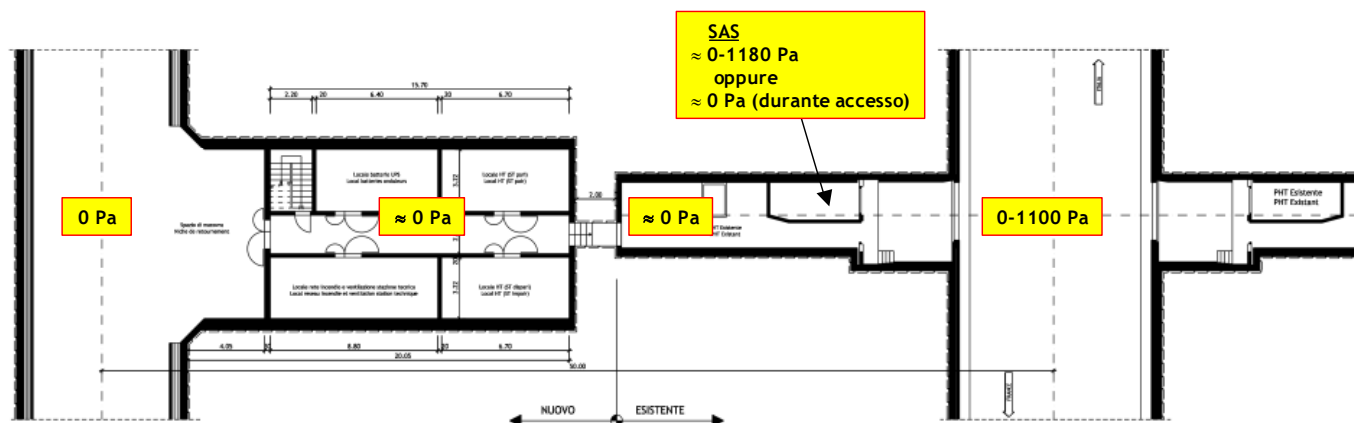


Fig. 5.11: Disegno di una ST e dei PHT, piano carreggiata, con livelli di pressione.

- pressione d'esercizio nella galleria ambiente, situato tra i valori dei due portali in esercizio normale, fino a 500 Pa sovrappressione in caso d'incendio nel traforo
- pressione nelle ST e PHT come nella galleria
- pressione d'esercizio nel traforo 0 - 1'100 Pa
- differenza di pressione tra PHT e traforo 80 Pa

La velocità del ventilatore del monoblocco è regolata in funzione della temperatura e dell'umidità misurata nella ST.

Una macchina frigorifera, raffreddata da un circuito d'acqua dedicato nella galleria di sicurezza, raffredderà l'aria immessa nei locali della ST in funzione della temperatura e dell'umidità misurata.

Un controllo automatico di umidità prevede un pre-riscaldamento elettrico dell'aria.

Esempi di parametri di regolazione da imporre in funzione della temperatura ambiente e dell'umidità sono indicati di seguito:

- Temperatura ambiente < 12°C: riscaldamento elettrico
- Temperatura ambiente > 25°C: raffreddamento
- Umidità relativa > 75% et < 25°C: riscaldamento elettrico
- Umidità relativa > 75% et > 25°C: raffreddamento/condensazione seguito da riscaldamento elettrico

### 5.6.3 Circuiti d'acqua di raffreddamento

Il calore dissipato nei condensatori delle macchine frigorifere nelle ST viene trasmesso a due circuiti d'acqua di raffreddamento nella galleria di sicurezza. Un primo circuito è previsto dal lato francese, mentre un secondo circuito rifornisce le ST dal lato italiano.

Ogni circuito è composto di un tubo di mandata, con una temperatura d'entrata di ca. 25°C, e da un tubo di ritorno per l'acqua riscaldata fino a ca. 35°C. Ai portali, l'acqua di ogni circuito viene raffreddata da una torre di raffreddamento. Il calore da dissipare delle 4 ST e della centrale di estrazione massiva ammonta al massimo a 270 kW (4 x 60 kW + 30 kW).

Le torri di raffreddamento richieste all'esterno sono disponibili sul mercato in dimensioni standardizzate. Vengono considerate delle torri di tipo evaporativo per poter raffreddare ad una temperatura inferiore di quella esterna in estate. Il dimensionamento dipende dalla potenza da dissipare, dalla temperatura dell'acqua in entrata ed in uscita come pure dalla temperatura ambiente. Quest'ultima non supera i 20°C durante 95% del tempo nella regione del progetto, dunque una temperatura d'acqua a 25°C dopo il raffreddamento può essere ottenuta con una potenza di raffreddamento di ca. 300 kW termici consuma ca. 4 kW di energia elettrica per il ventilatore. Il flusso d'acqua evaporata nella torre ammonta a 0.43 m<sup>3</sup>/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.

In alternativa alle torri, una valorizzazione del calore per esempio per scopo di riscaldamento può essere considerata durante la stagione fredda.

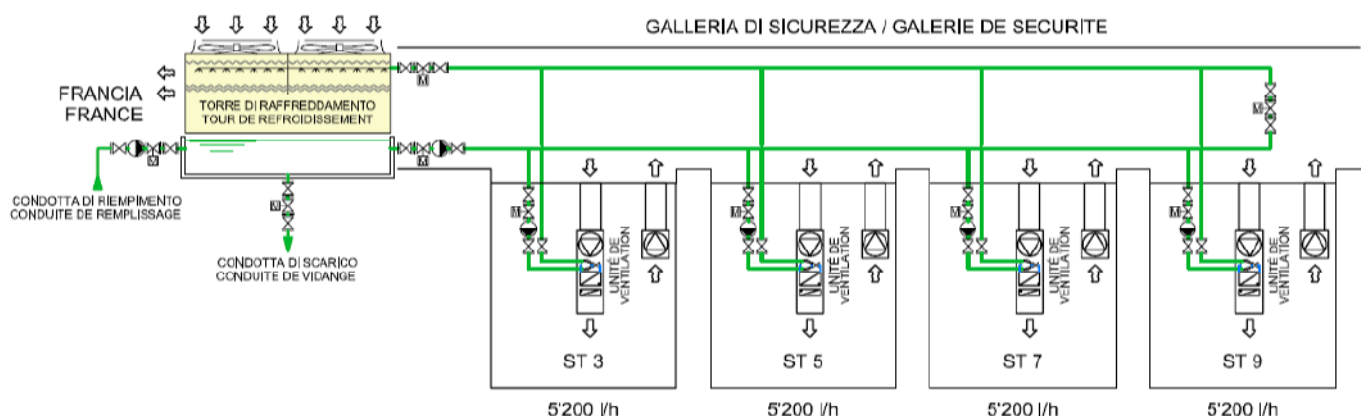


Fig. 5.12 : Circuito di raffreddamento - lato Francia.

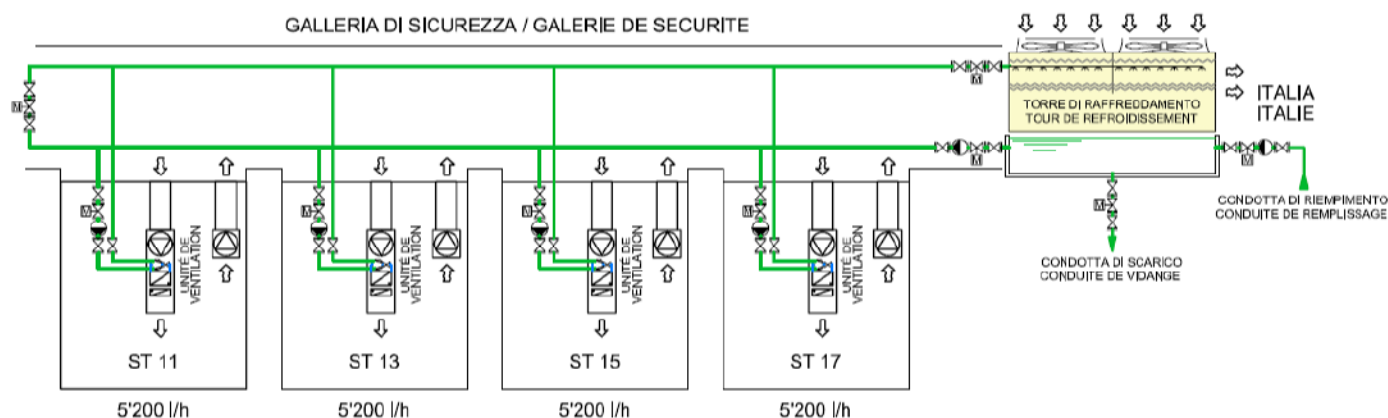


Fig. 5.13 : Circuito di raffreddamento - lato Italia.

Le condotte del circuito di raffreddamento sono dei tubi di PE con resistenza alla pressione PN16.

Per la condotta di mandata verrà impiegato il tubo di aria compressa (diametro interno di 200 mm) utilizzato per l'apporto d'aria fresca ai rifugi durante la fase di scavo della galleria di sicurezza (rapporto 6145.2-R-05A). Come tubo di ritorno, invece, un tubo con un diametro esterno di 125 mm ed un diametro interno di 110.2 mm è sufficiente.

La portata è assicurata da una pompa d'acqua principale al portale che preleva l'acqua raffreddata dalla vasca della torre di raffreddamento. La distribuzione di pressione nelle condotte è illustrata nella Fig. 5.14. La variazione della pressione dipende dalle perdite di attrito e dalle differenze geodetiche.

Mantenendo sempre una pressione minima di 2 bar nelle condotte, ai portali sono previste delle pompe aventi le seguenti caratteristiche:

Lato Francia :

- Portata d'acqua 23.4 m<sup>3</sup>/h
- Pressione 5.3 bar
- Potenza 6 kW
- Velocità di rotazione variabile

Lato Italia :

- Portata d'acqua 23.4 m<sup>3</sup>/h
- Pressione 3 bar
- Potenza 3.5 kW
- Velocità di rotazione variabile

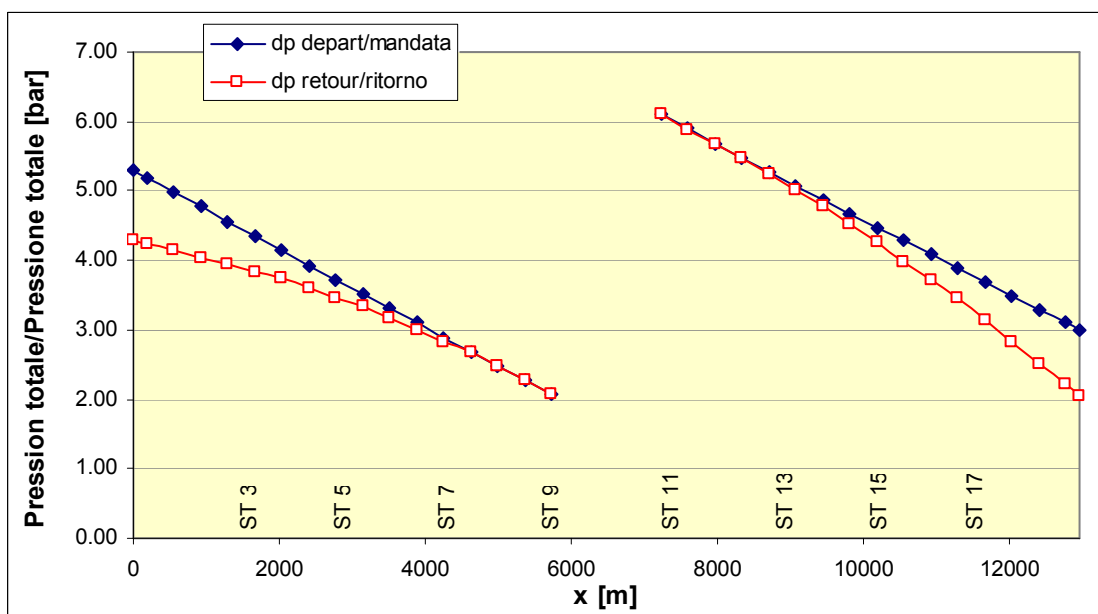


Fig. 5.14 : Distribuzione della pressione nelle condotte di acqua.

#### 5.6.4 Alimentazione elettrica

Per ogni ST è previsto un quadro elettrico d'alimentazione e di regolazione degli apparecchi di ventilazione e climatizzazione (ventilatori, serrande, sensori differenza di pressione, dispositivi di regolazione).



Il quadro è installato presso il monoblocco di trattamento dell'aria ed equipaggiato con regolatori di frequenza (inverter) per la variazione della velocità dei ventilatori.

L'alimentazione elettrica proviene dal quadro di bassa tensione TGBT della stazione tecnica pari, previsto dall'impianto d'alimentazione elettrica (vedi rapporto 6145.2-R-14A).

### **5.7 Attrezzatura di misurazione nella galleria di sicurezza**

La galleria è munita di sensori per la sorveglianza della qualità dell'aria (CO e opacità), lo stato aerodinamico e termico (velocità e direzione dell'aria, temperatura) e per il rilevamento d'incendi (sensori di fumo).

I valori di CO/opacità sono utilizzati per il controllo/comando della ventilazione sanitaria in galleria.

La temperatura viene sorvegliata per avvertire gli operatori in caso di temperatura eccessiva nella galleria, per esempio a seguito di un'operazione prolungata degli acceleratori per creare una sovrappressione e dunque con solo lieve ricambio d'aria con l'esterno.

I sensori della velocità e della direzione dell'aria si trovano vicino ai portali come pure ad ogni lato delle centrali d'estrazione. Complessivamente sono dunque previste sei stazioni di misurazione.

Le misure di velocità e direzione dell'aria nei vari settori saranno utilizzate per il controllo della velocità longitudinale in galleria.

I sensori di fumo sono previsti a 100 m di distanza l'uno dall'altro permettendo la rilevazione precisa del luogo d'incendio in galleria. Questi rilevatori sono descritti dettagliatamente in un rapporto separato.

## 6. PORTE TRA RIFUGI E GALLERIA DI SICUREZZA

La differenza di pressione tra galleria di sicurezza e ogni rifugio può raggiungere dei valori dell'ordine di 600-700 Pa (capitolo 4.2.6, Fig. 4.17) in caso d'incendio nel traforo. Una porta convenzionale a battente non può essere aperta con una tale differenza di pressione, se non è munita di un dispositivo meccanico per ridurre la forza di pressione prima della sua completa apertura.

La porta prevista nel progetto è di tipo scorrevole - manualmente apribile anche con pressione elevata - con dimensioni di 1.60 m di larghezza e 2.00 m di altezza.

La porta è in acciaio ed è dotata di caratteristiche di resistenza al fuoco REI 120. Queste porte costituiscono oggi la scelta del committente per casi simili a quello in oggetto. In particolare si cita l'utilizzazione di dette porte nelle nuove linee ferroviarie sotto le Alpi del Lötschberg, come pure in vari altri trafori stradali. In alcuni casi è richiesta anche la motorizzazione delle porte scorrevoli.

Questa tendenza è anche conseguenza delle esperienze positive fatte nel traforo stradale del San Gottardo dove le prestazioni delle porte scorrevoli sono state confermate.

Queste porte non necessitano di alcun sistema per equilibrare la pressione dell'aria e sono affidabili anche in presenza di un'importante differenza di pressione, come nel caso del Fréjus, permettendo un'apertura semplice senza alcun rischio per le persone che le utilizzano.

D'altronde il progetto delle direttive svizzere relative alle porte nei trafori stradali [15] esige delle porte scorrevoli nel caso di una galleria di sicurezza in sovrappressione e pure una chiusura automatica della porta senza apporto di energia.

Il Comitato di Sicurezza ha emesso un avviso favorevole all'utilizzo delle porte scorrevoli durante la riunione del 8 giugno 2005.

## 7. INTERFACCE CON ALTRI IMPIANTI

### 7.1 Interfacce a livello terreno

L'impianto di ventilazione è interfacciato a livello terreno con i quadri di bassa tensione delle centrali di ventilazione (TGVE), delle stazioni tecniche (TGBT) e dei rifugi (TSR). Le seguenti connessioni saranno realizzate a partire dai ventilatori, delle serrande e dei sensori verso i quadri di bassa tensione:

- le connessioni di forza, per l'alimentazione elettrica;
- le connessioni dei segnali per la trasmissione dei dati d'esercizio e d'allarme alla Gestione Tecnica Centralizzata GTC.

La gestione dell'impianto a livello terreno è fatto mediante i seguenti automatismi locali programmabili:

- Sorveglianza locale degli acceleratori, interruzione in caso di vibrazioni e di caduta, registrazione delle ore di funzionamento, limitazione degli avvii per ore d'esercizio normale.
- Sistema di controllo locale dei ventilatori d'estrazione massiva: sorveglianza delle vibrazioni, surriscaldamento, raffreddamento secondario, regolazione di avviamento, sistema anti-pompaggio, limitazione di partenze, ecc.
- Sistema di controllo dei rifugi: regolazione delle sovrappressioni e delle portate d'aria fresca.
- Sistema di controllo dei by-pass: regolazione sovrappressione e della portata d'aria fresca, automazione della funzione filtro.
- Sistema di controllo delle ST: regolazione della climatizzazione con o senza acqua di raffreddamento, regolazione della sovrappressione e regolazione della portata d'aria fresca del SAS, automazione della funzione filtro di questo locale.

L'impianto è inoltre interfacciato verso il sistema della Gestione Tecnica Centralizzata, che gestirà il funzionamento dei ventilatori e delle serrande in funzione delle diverse condizioni d'esercizio della galleria e del traforo (esercizio normale, caso d'incendio, ecc.)

La GTC controllerà le pressioni, le portate e altri parametri concernenti il funzionamento.

## 7.2 Interfacce a livello superiore

Dalla Postazione di Comando e Controllo PCC, devono essere possibili:

- la gestione manuale dell'impianto di ventilazione;
- la rappresentazione grafica dei valori misurati, degli stati di funzionamento e degli allarmi corrispondenti a tutte le componenti principali dell'impianto di ventilazione.

Inoltre, la GTC è responsabile della gestione automatica superiore dell'insieme dell'esercizio normale e in caso d'incendio, comprendente:

### 1) Esercizio normale:

- Controllo della velocità longitudinale in galleria in presenza di una differenza di pressione tra i due portali, in funzione della misura della velocità e della direzione dell'aria (gestione porte ai portali).
- Ventilazione sanitaria della galleria in funzione delle misure di CO/opacità, con inserimento degli acceleratori in caso di bisogno, apertura delle porte ai portali.

### 2) Esercizio in caso di evento nel traforo:

- Gestione della velocità longitudinale nella galleria e pressurizzazione di fronte al luogo di evento.
- Sorveglianza della temperatura dell'aria in galleria con avvertimento in caso di riscaldamento importante.
- Gestione delle ST in modalità di raffreddamento per la sola ventilazione.
- Aumento della portata d'aria fresca nei rifugi.

### 3) Esercizio in caso di evento nella galleria di sicurezza:

- Espulsione dei fumi in funzione della posizione rilevata dell'evento attraverso il portale oppure attraverso la centrale d'estrazione massiva più vicina. Avviamento degli acceleratori solamente fuori della zona sinistrata. Controllo della velocità dell'aria a monte e a valle del luogo d'incendio.
- Avviamento di una centrale d'estrazione massiva, se necessario.
- Interruzione della ventilazione dei rifugi, by-pass e stazioni tecniche.
- Messa in sovrappressione del traforo.

## **8. LIMITI DI FORNITURA E DI INTERVENTO**

### **8.1 Limiti di fornitura**

L'impianto di ventilazione dovrà essere fornito completo di tutti gli apparecchi e accessori necessari al suo funzionamento integrale, cioè: ventilatori, serrande, canali, griglie, sonde/rilevatori, sistemi di regolazione, quadri elettrici di comando e regolazioni di frequenza (inverter).

### **8.2 Limiti d'intervento**

La condizione d'intervento concernente l'impianto di ventilazione è ai morsetti di allacciamento dei quadri di bassa tensione e corrente debole delle ST e dei rifugi.

## **9. CALENDARIO DI REALIZZAZIONE PREVEDIBILE**

### **9.1 Generale**

Il termine previsto per l'installazione è di 15 mesi a partire dall'inizio dei lavori di genio civile.

Il programma dettagliato dei lavori sarà definito in fase d'esecuzione in coordinamento con il Committente e le imprese esecutrici degli altri impianti.

### **9.2 Messa in servizio**

La messa in servizio rapida degli acceleratori permetterà la gestione della ventilazione durante la fase di montaggio degli impianti. Il loro montaggio sarà effettuato man mano che la ventilazione sul cantiere sarà smontata.

La messa in servizio dell'impianto sarà effettuata alla fine dell'installazione secondo le modalità definite nel disciplinare descrittivo e prestazionale con termine di 2 mesi a partire dalla scadenza dei 15 mesi previsti per gli impianti.

L'imprenditore dovrà inoltre collaborare all'esecuzione delle prove globali di funzionamento dell'insieme degli impianti della galleria di sicurezza e del traforo che si svolgeranno durante 3 mesi seguenti la messa in servizio.

## 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 12'868 mètres [10].

Le présent projet constitue la mise à jour du projet définitif de la galerie de sécurité [11]. Le projet de base, élaboré en 2005 et donc avant l'incendie du 5 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.

L'exploitation de la galerie de sécurité prévue pour 2013 devra être menée conjointement avec celle du tunnel routier. Un système unique de supervision devra en conséquence coordonner l'exploitation de l'ensemble galerie - tunnel.

Ce rapport décrit de manière détaillée tous les aspects liés au bon fonctionnement de la ventilation de la galerie de sécurité, des abris, des stations techniques et des by-pass en exploitation normale comme en cas d'incendie.

Il met en outre à jour le projet définitif rédigé en 2005 [11] suite à la décision du maître d'ouvrage d'agrandir la galerie de sécurité afin de « permettre en toute hypothèse la circulation des véhicules de secours en toute sécurité et commodité ».

## 1.2 Objectifs généraux

Un système de ventilation performant et fiable est indispensable pour atteindre les buts généraux de la galerie de sécurité.

Ce document traite uniquement la ventilation en phase finale, la ventilation en phase de chantier est l'objet d'un rapport séparé.

L'équipement de ventilation de la galerie de sécurité pour le tunnel du Fréjus répond aux objectifs suivants:

- Ventilation séparée et indépendante de la galerie par rapport au tunnel;
- Ventilation indépendante des abris pour garantir une surpression adéquate par rapport au tunnel;
- Ventilation et climatisation des stations techniques;



- Ventilation des locaux techniques existants dans le tunnel (PHT) situés sur le côté de la voie Italie -> France.
- Ventilation des by-pass.

Exigences nouvelles et supplémentaires par rapport au projet définitif de 2005 [11]:

- Maîtrise d'un incendie et désenfumage dans la galerie de sécurité même par la mise en œuvre d'une ventilation longitudinale avec extraction massive des fumées.
- Réalisation de la galerie de sécurité sans SAS aux portails afin de permettre un accès rapide, simple et commode aux véhicules de secours.

### 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] AIPCR/PIARC: Maîtrise des incidents et des fumées dans les tunnels routiers, 2004.
- [4] 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.
- [5] Tunnel routier du Fréjus, Définition des scénarios de désenfumage théoriques définitifs. SETEC TPI et Studio Associato Ferro e Cerioni, 21.11.03.
- [6] Etude préliminaire 2002, MUSI.NET.
- [7] Avant-projet, en particulier:
  - Note technique équipement de ventilation (6145.0-R-6) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Plan disposition usine côté France (6145.0-P-40) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Plan disposition usine côté Italie (6145.0-P-41) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Plan abri type - disposition ventilation (6145.0-P-42) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Plan abri 6-29 - disposition ventilation (6145.0-P-43) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Plan ST type - disposition ventilation (6145.0-P-44) 12/07/2004, Lombardi SA
  - Plan ST 7-13 - disposition ventilation (6145.0-P-45) 12/07/2004, Lombardi SA
- [8] Le dossier "Basculement des PHT vers les Stations Techniques de la galerie de sécurité" (6145.0-R-24 et annexes) 30/09/2004, Lombardi SA.

- [9] Observations des sociétés concessionnaires sur l'avant-projet, 20/09/2004, SFTRF e SITAF.
- [10] SITAF S.p.A, Traforo Autostradale del Fréjus, 1990
- [11] Lombardi SA, Rapport 6145.0-R-39A, Galerie de sécurité parallèle - Equipment ventilation, 17.12.2004
- [12] Lombardi SA, Rapport 6145.0-R-112, Galerie de sécurité parallèle - Optimisation du diamètre intérieur de la galerie pour garantir l'accès des véhicules de secours en sécurité et commodité, 9.3.2006
- [13] SETEC TPI, Ajustement des scénarios théoriques avec le modèle de calcul Express' air - rapport final, 24.11.2005, Doc. Nr. 20988 S T A 0020 B
- [14] SFTRF-SITAF, Analyse Fonctionnelle Détaillée, Chapitre 4: Exploitation de la Ventilation Niveau 2, 19.12.2005, Réf. FREJ AFD 043 Rév. Z (bis)
- [15] OFROU-directive, projet, Portes et accès dans les tunnels routiers, Edition 2005, Suisse
- [16] OFROU-directive, Ventilation des tunnels routiers, Edition 2004 - V1.2 avec précisions du 31 juillet 2006, Suisse
- [17] Tiefbauamt des Kantons Graubünden: Belüftung von Sicherheits- und Querstollen von Strassentunneln, Bericht US + FZ, Version 3, März 2003
- [18] CETU, Dossier pilotes des tunnels - Ventilation, novembre 2003
- [19] CETU, Calcul des émissions de polluants des véhicules automobiles en tunnel, Edition avril 2002
- [20] McGrattan, K., "Fire Dynamics Simulator (Version 4), Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, USA, 2005

#### 1.4 Références normatives

Pour les éléments des normes de base, on remarque que:

- La directive européenne du 29 avril 2004 [2] ne traite pas en détail la ventilation des abris.
- La Circulaire interministérielle no. 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité dans les tunnels routiers du réseau national [1] contient des prescriptions très détaillées concernant la ventilation des abris.
- Il n'existe pas de directive nationale italienne applicable à la ventilation de la galerie de sécurité et des abris.

Le dimensionnement de la ventilation de la galerie et des abris sera donc basé sur la Circulaire interministérielle française no. 2006-20 du 29 mars 2006 [1], confor-

mément à la décision du Comité de Sécurité du 12-13 octobre 2000 par rapport à la version précédente de la Circulaire, no. 2000-63 du 25 août 2000.

### **1.5 Analyse des phases du projet précédent**

Suite à l'abandon des SAS aux portails, les solutions proposées dans l'avant-projet sont partiellement modifiées surtout en ce qui concerne le système de la ventilation de la galerie de sécurité même. Dans la mesure de leur applicabilité, les observations à ce projet fournies par le Client et résumées dans le document « Observations des Sociétés concessionnaires sur l'avant-projet » publié par SFTRF et SITAF le 20/09/2004 ont été intégrées dans ce dossier.

Il s'agit des points suivants:

- les équipements de ventilation pour la galerie de sécurité et pour les abris sont complètement redondants;
- l'alimentation des ventilateurs est garantie aussi bien par le réseau EDF que par le réseau ENEL ;
- la capacité de refroidissement dans les stations techniques a été vérifiée, compte-tenu de l'équipement des nouveaux transformateurs.

### **1.6 Contenu du projet définitif**

Le projet définitif de la ventilation est constitué des documents suivants:

#### **1. Note Techniques:**

6145.2-R-08A	Note technique
6145.2-R-26A	Cahier des charges
6145.2-R-27A	Estimation des coûts

#### **2. Plans:**

6145.2-P-200	Schéma général ventilation de la galerie de sécurité
6145.2-P-201	Disposition des usines E/F - vue en plan et coupes
6145.2-P-202	Abri type - disposition ventilation
6145.2-P-203	By-pass 1 et 5 - disposition ventilation
6145.2-P-204	By-pass 2 et 4 - disposition ventilation

6145.2-P-205	Disposition au droit de l'abri 18 et du by-pass 3
6145.2-P-206	Station technique type - disposition ventilation niveau rez
6145.2-P-207	Station technique type - disposition ventilation 1° étage
6145.2-P-208	Station technique 7-14 et 8-13 - disposition ventilation

## 2. DONNEES DE BASE

### 2.1 Rappel de l'existant

#### 2.1.1 Configuration du tunnel routier

Les caractéristiques principales du tunnel du Fréjus sont les suivants [10]:

– Longueur	12'868 m
– Centrale de ventilation souterraine B	ca. 4'220 m du portail français
– Centrale de ventilation souterraine C	ca. 8'890 m du portail français
– Déclivité	0.54% (montant France -> Italie)
– Hauteur	4.54 m
– Largeur chaussée	9 m
– Diamètre hydraulique	6.4 m
– Section	47 m <sup>2</sup>
– Voies	2 voies
– Elévation	1'228 m s.m. tête côté France 1'298 m s.m. tête côté Italie

Son système de ventilation est divisé en 6 cantons, comme illustré en Fig. 2.1. La notion de cantons sera reprise pour la galerie de sécurité.

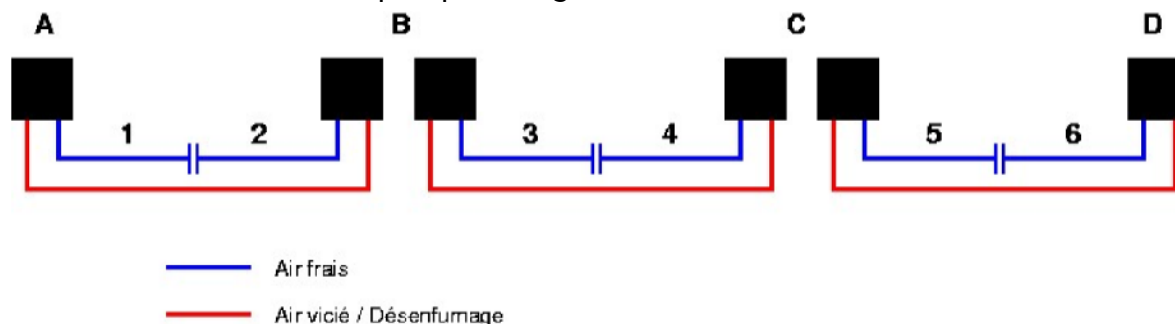


Fig. 2.1: Schéma des gaines de ventilation dans les 6 cantons.

### 2.1.2 Trafic du tunnel routier

Les données principales de trafic sont quantifiées par la SITAF([www.sitaf.it](http://www.sitaf.it)):

- Trafic moyen journalière 5'448 v/24h (moyenne 2004)
- Heures de pointe env. 850 v/h dans les deux sens
- Trafic poids lourds 57% (moyenne 2004)
- Vitesse maximale 70 km/h
- Espacement minimal 150 m (100 m à l'arrêt).

Par rapport à la capacité maximale d'un tunnel avec deux voies et trafic bidirectionnel, qui se monte à 1400-1800 v/h/par voie [16], le trafic dans le tunnel de Fréjus est relativement faible.

### 2.1.3 Ventilation du tunnel

La ventilation du tunnel a une forte influence sur la ventilation de la galerie. Elle est en fait déterminante pour l'établissement du niveau de pression dans le tunnel et donc pour les exigences de la ventilation de la galerie et des installations annexes.

Les caractéristiques principales de la ventilation du tunnel en conditions normales de fonctionnement sont:

- Ventilation semi-transversale, en général uniquement par injection d'air frais, sans extraction. Le débit d'air frais varie entre 284 m<sup>3</sup>/s (6 gaines à 20% du débit) et 1'420 m<sup>3</sup>/s (6 gaines à 100% du débit).
- Extraction en conditions normales de fonctionnement seulement dans des situations particulières.
- Extraction concentrée en cas d'incendie, avec un débit de l'ordre de 210-240 m<sup>3</sup>/s, selon le lieu de l'incendie [13].
- Contrôle de la vitesse longitudinale de l'air en cas d'événement par soufflage à l'opposé ou extraction à l'opposé appliqué en fonction de la différence de pression barométrique entre les têtes selon des scénarios prédéfinis [13].

## 2.2 Galerie de sécurité

Les caractéristiques principales de la galerie de sécurité du Fréjus sont [12]:

Coupe type	tunnelier	traditionnel
Longueur	9'680 m	2 x 1'600 m
Déclivité	0.54%	0.54%
Gabarit	6.60 x 4.00 m	6.60 x 4.00 m
Diamètre	8.0 m	-
Diamètre hydraulique	7.2 m	6.9 m
Section d'air	45 m <sup>2</sup>	44.5 m <sup>2</sup>

Il y aura deux typologies de coupe type. Depuis le portail jusqu'à environ 1.6 km, la galerie sera creusée en traditionnel à explosif, tandis que la partie principale sera exécutée par tunnelier.

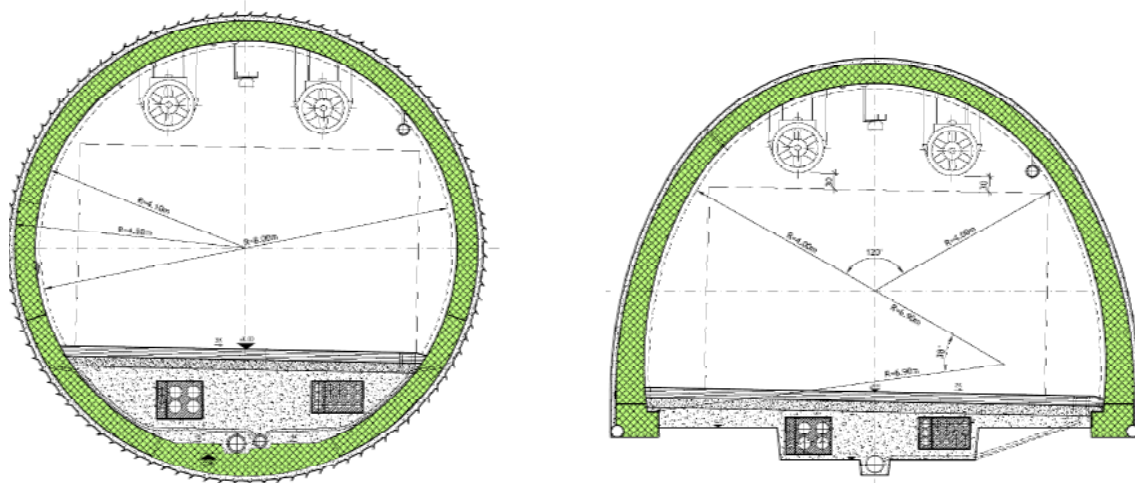


Fig. 2.2: Coupe types de la galerie de sécurité avec gabarit de 6.60 x 4.00 m (tunnelier et traditionnel).

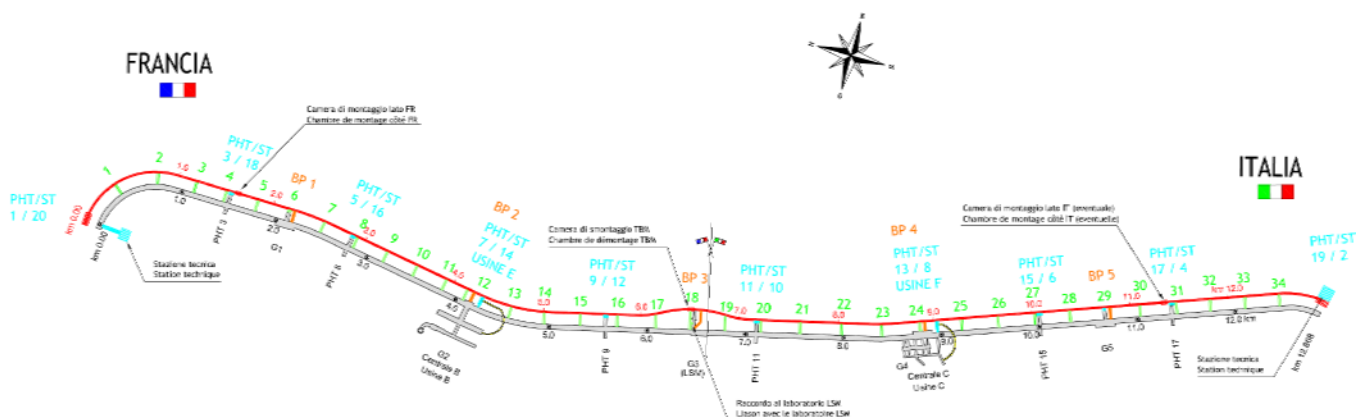


Fig. 2.3: Planimètre de la galerie de sécurité [12].

## 2.3 Les abris

Chaque abri est composé d'une zone filtre (SAS) et de l'abri proprement dit; ce dernier est relié à la galerie à travers un accès dédié. Les locaux de l'abri sont équipés des portes coupe-feu aussi bien côté tunnel que côté galerie.

Il y a deux typologies d'abris. Les caractéristiques géométriques principales des abris standards sont (Fig. 2.4):

- Nombre 33
- Surface abris 136.00 m<sup>2</sup> dont 110 m<sup>2</sup> utilisables par les usagers
- Surface SAS 15 m<sup>2</sup>
- Volume total env. 530 m<sup>3</sup>.

tandis que l'abri 18 près du laboratoire a les caractéristiques suivantes:

- Surface abri 65.00 m<sup>2</sup> dont 50 m<sup>2</sup> utilisables par les usagers
- Surface SAS 15 m<sup>2</sup>
- Volume total env. 250 m<sup>3</sup>.

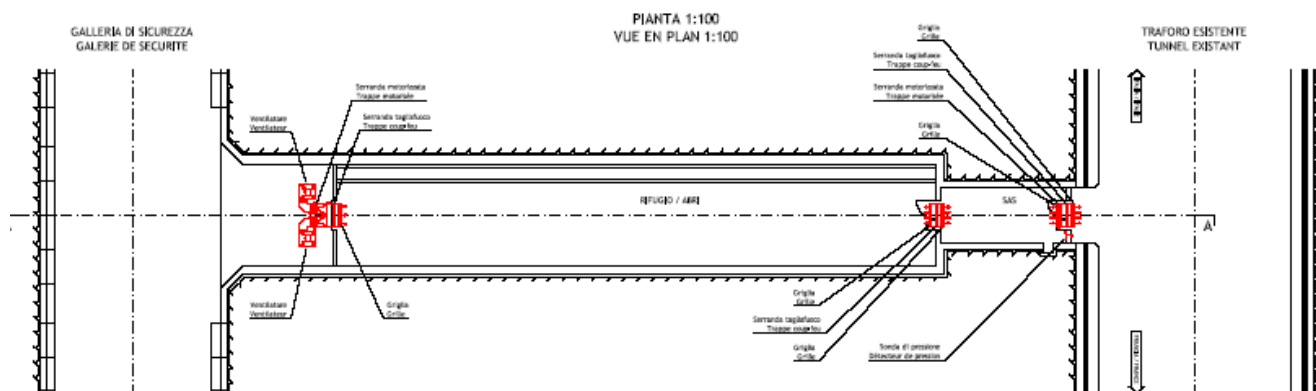


Fig. 2.4: Plan d'un abri (6145.2-P-202A).

Les abris sont réalisés aux positions suivantes:

RIFUGI / ABRIS					
No. RIFUGI No. ABRIS	PM RIFUGI PM ABRIS	DISTANZA DISTANCE	No. RIFUGI No. ABRIS	PM RIFUGI PM ABRIS	DISTANZA DISTANCE
FRANCIA / FRANCE	0.00		18	6505.547	
		377.71			363.86
1	377.707		19	6869.407	
		381.03			348.86
2	758.737		20	7218.267	
		387.15			408.00
3	1145.887		21	7626.267	
		373.49			408.66
4	1519.377		22	8034.927	
		330.50			407.67
5	1849.877		23	8442.597	
		361.01			407.62
6	2210.887		24	8850.217	
		333.38			418.50
7	2544.267		25	9268.717	
		362.85			381.00
8	2907.117		26	9649.717	
		342.50			381.10
9	3249.617		27	10030.817	
		336.00			351.00
10	3585.617		28	10381.817	
		339.50			311.00
11	3925.117		29	10692.817	
		262.50			404.90
12	4187.619		30	11097.717	
		401.53			364.90
13	4589.148		31	11462.617	
		381.91			350.10
14	4971.057		32	11812.717	
		383.71			354.90
15	5354.766		33	12167.617	
		385.50			352.50
16	5740.267		34	12520.117	
		380.38			354.90
17	6120.648		ITALIA / ITALIE	12875.017	
		384.90			

Tab. 2.1: Position des abris.

## 2.4 Stations techniques (ST)

Il y a quatre typologies différentes de ST: le type standard, les ST combinées avec les centrales de ventilation, la ST intégrée dans le bâtiment côté italien ainsi que la ST côté France.



- Nombre 8 à l'intérieur de la galerie, disposées en couples (pair et impaire);  
2 à l'extérieur de la galerie ;
- Puissance installée env. 2 x 300 kW dans chaque ST intérieure;
- Puissance dissipée env. 2 x 15 kW dans chaque ST intérieure;

Dans les deux stations techniques combinées avec les centrales d'extraction massive la puissance installée des ventilateurs d'extraction s'ajoute à la valeur indiquée ci-dessus. Puisque ces ventilateurs n'entrent en service qu'en cas d'événement dans la galerie de sécurité, ce qui nécessite de toute façon une interruption de la ventilation des ST, le dimensionnement de la ventilation permanente des ST n'est pas influencé par cet équipement.

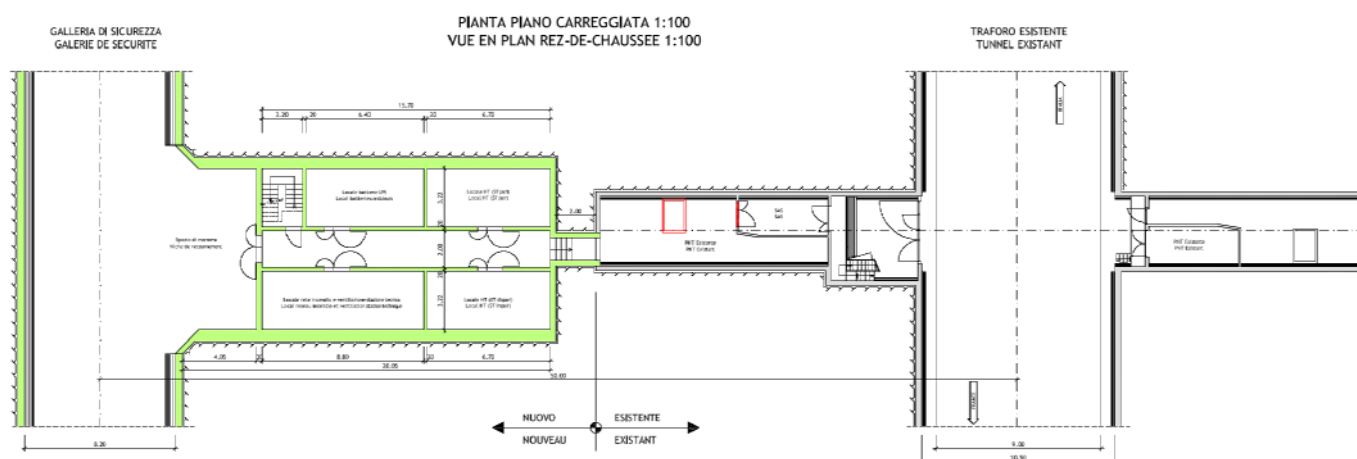


Fig. 2.5: Vue en plan des ST standards et PHT, rez-de-chaussée.

Les positions des stations techniques sont spécifiées dans le tableau suivant:

ST		
No. ST No. ST	PM ST PM ST	DISTANZA DISTANCE
FRANCIA / FRANCE	0.00	
		1559.89
3/18	1559.887	
		1306.73
5/16	2866.617	
		1444.78
7/14	4311.397	
		1328.27
9/12	5639.667	
		1538.10
11/10	7177.767	
		1796.73
13/8	8974.497	
		1096.82
15/6	10071.317	
		1350.80
17/4	11422.117	
		1452.90
ITALIA 19/2 / ITALIE 19/2	12875.017	

Tab. 2.2: Position des ST.

## 2.5 By-pass carrossable

Trois typologies de by-pass seront réalisées: by-pass 1 et 5 à l'endroit des demi-tours, by-pass 2 et 4 vis-à-vis des usines souterraines, by-pass 3 auprès du laboratoire.

- Nombre total 5
- Surface à l'intérieur de l'écluse 135 m<sup>2</sup> (22 m x 6.15 m)
- Volume total écluse env. 550 m<sup>3</sup> (22 m x 25 m<sup>2</sup>)

### 3. CONCEPT DE VENTILATION

#### 3.1 Exigences de la ventilation

Les installations de ventilation doivent satisfaire aux exigences suivantes:

- Ventiler la galerie en cas d'événement en tunnel pour permettre la circulation des véhicules de secours et pour assurer le confort physiologique du personnel de secours et des usagers évacués du tunnel;
- Lors d'un événement en tunnel, ventiler les abris, les nouvelles ST et les by-pass avec de l'air de la galerie afin d'assurer entre ces locaux et le tunnel une surpression suffisante pour empêcher la pénétration des fumées dans les abris, les ST, les by-pass et la galerie même;
- Empêcher un court-circuit des fumées en cas d'événement entre les portails du tunnel et la galerie;
- Ventiler la galerie en conditions normales d'exploitation pour permettre la circulation des véhicules de service chargés d'effectuer les travaux d'entretien en galerie et en tunnel et garantir en même temps le confort psychologique du personnel en service;
- Extraction massive des fumées en cas d'événement dans la galerie de sécurité à travers le puits ou le portail le plus proche.

Les principaux paramètres qui influencent la ventilation sont:

- Événement dans le tunnel et sa magnitude;
- Événement dans la galerie de sécurité et sa magnitude;
- Différence de la pression barométrique entre les têtes;
- Conditions d'urgence dans la galerie, les abris, les by-pass et les ST;
- Conditions normales dans la galerie, les abris, les by-pass et les ST;
- Conditions thermiques dans les abris, dans les rameaux de communication et dans les ST, suite à un événement en tunnel;
- Emplacement des accélérateurs pour la ventilation longitudinale et leur modalité de réglage et d'exploitation;
- Exploitation des centrales d'extraction massive liées aux puits des usines B et C existantes;
- Intégration du contrôle des accélérateurs, des ventilateurs d'extraction massive et des autres installations de ventilation de la galerie dans le système de contrôle du tunnel (GTC).

### 3.2 Choix du concept

On adopte une ventilation longitudinale avec des accélérateurs en voûte:

- pour la pressurisation de la galerie en cas d'événement dans le tunnel,
- pour la maîtrise de la vitesse longitudinale en cas d'événement dans la galerie même,
- pour la ventilation sanitaire en exploitation normale, quand le niveau de pollution requiert une ventilation mécanique supplémentaire.

Afin de maîtriser pleinement un événement dans la galerie même, à sureté élevée pour le personnel éventuellement présent dans la galerie et avec impact minimal sur la structure et les équipements, des centrales d'extraction massive sont prévues à proximité des deux usines souterraines existantes raccordées aux puits d'air vicié.

### 3.3 Puissance d'incendie

La ventilation de la galerie de sécurité est dimensionnée pour maîtriser un événement impliquant des véhicules de secours. L'incendie de dimensionnement est donc le suivant:

- Puissance d'incendie 30 MW
- Débit des fumées 80 m<sup>3</sup>/s

### 3.4 Conditions météorologiques et environnementales

#### 3.4.1 Différence de pression entre les têtes

La différence de pression météorologique avec des valeurs dans le pourcentage 95 entre -300 et +500 Pa est considérée en accord avec [5] et en conformité avec la Circulaire [1], qui demande de prendre en charge « des effets atmosphériques défavorables mais non exceptionnels ».

Des valeurs positives signifient que la pression est plus élevée du côté français.

### 3.4.2 Densité

La densité (masse volumétrique) de l'air de dimensionnement calculée pour une altitude de 1'250 m et une température moyenne dans le tunnel de 25°C est:

$$\rho=1.05 \text{ kg/m}^3$$

### 3.5 Gestion de la ventilation des abris

La Circulaire Interministérielle Française [1] (chapitre 3.2.3) contient des prescriptions précises pour la ventilation des abris:

- Les abris devront être dotés d'un système de ventilation spécifique.
- 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, pour assurer un débit global de 2'500 m<sup>3</sup>/h pour une surface au sol de 50 m<sup>2</sup>.
- 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.
- Pendant toute utilisation, le cheminement servant à l'accès des secours et à l'évacuation des personnes réfugiées dans les abris sera ventilé afin d'assurer une bonne qualité de l'air.
- En cas d'utilisation, la température ambiante de l'air d'un abri ou d'un cheminement d'accès devra être maintenue à moins de 40°C pendant au moins 120 minutes. Cette condition doit être vérifiée pour un incendie de 200 MW dans les conditions d'emplacement du feu et de ventilation du tunnel les plus défavorables (y compris le non fonctionnement du désenfumage).
- La ventilation des abris et de leurs cheminements d'accès devra être conçue suivant le principe de la redondance des installations: au moins deux ventilateurs fonctionnant en parallèle, ou ventilateur de secours.

En exploitation normale, la différence de pression entre abri et galerie de sécurité peut rejoindre jusqu'à 1'100 Pa (chapitre 4.2). Bien qu'une porte coulissante soit prévue entre l'abri et la galerie, une telle différence de pression est quand même trop élevée pour ouvrir la porte. En cas de besoin de son ouverture, dans un pre-

mier temps le ventilateur doit être mis hors service afin de réduire la pression différentielle à moins de 1000 Pa (différence de pression habituellement rejointe pour exemple dans le tunnel routier du Gothard entre abri et tunnel et permettant encore l'ouverture des portes coulissantes).

En cas d'événement dans le tunnel, la différence de pression entre tunnel et galerie de sécurité décline rapidement si bien que la porte en question sera ouvrable même en cas de fonctionnement de la ventilation de l'abri.

### **3.6 Gestion de la ventilation des stations techniques**

La ventilation des stations techniques doit être compatible avec les exigences liées au fonctionnement stable et durable des équipements installés.

Les stations techniques prennent l'air de la galerie de sécurité et en refoulent la majeure partie également dans la galerie, parce que l'espace dans les PHT - avant le basculement - ne suffit pas pour faire passer des conduites de ventilation vers le tunnel.

La prise et le refoulement de l'air quasiment au même endroit dans la galerie créent clairement le risque d'un court-circuit entre les deux flux. Un tel court-circuit n'est cependant pas problématique, puisque le refroidissement est assuré par un monobloc de climatisation refroidi à l'eau. Il faut donc seulement veiller à apporter suffisamment d'air frais pour satisfaire au moins aux exigences sanitaires.

Avant le basculement, les PHT sont ventilés avec le système actuellement en place alimentant les locaux en air frais depuis la gaine d'air frais du tunnel. Après le basculement, une quantité suffisante d'air conditionné est reprise de la station technique, passe par le PHT et est refoulé vers le tunnel. En exploitation normale, le tunnel sera en surpression par rapport à la galerie de sécurité (chapitre 4.2). Le local du PHT adjoint au tunnel servira donc comme zone tampon (SAS) et sera donc pressurisé à un niveau de pression supérieur à celui du tunnel même afin d'éviter l'infiltration de l'air vicié et pollué.

S'il fallait accéder la gaine d'air frais ou s'il fallait ouvrir le local tampon pour une autre raison, un système de dépressurisation permet de purger ce local jusqu'au niveau de pression de la ST/PHT afin que des personnes venant de la galerie de sécurité puissent y entrer. Elles doivent ensuite refermer la porte entre le PHT

et le local tampon pour rapporter la pression au niveau du tunnel. Il s'agit donc bel et bien d'un système d'écluse.

En cas d'événement à l'intérieur d'une station technique la ventilation est bloquée afin d'empêcher une propagation des fumées vers la galerie ou vers le tunnel.

### **3.7 Gestion de la ventilation des by-pass**

La ventilation des by-pass doit assurer la qualité de l'air par un renouvellement du volume de by-pass environ trois fois par heure et la pressurisation du by-pass à un niveau supérieur à celui du tunnel pour empêcher la pénétration de l'air vicié et pollué.

La circulation de l'air se fera alors dans le sens galerie - by-pass - tunnel de manière à maintenir l'atmosphère du by-pass en surpression d'environ 80 Pa par rapport au tunnel.

Pour accéder au by-pass depuis la galerie de sécurité, les étapes suivantes sont exécutées:

- La trappe d'expulsion vers le tunnel se ferme, le ventilateur du by-pass (placé du côté galerie) est mis hors service.
- La pression dans le by-pass est rapportée à la pression de la galerie en ouvrant une trappe de purge entre le by-pass et la galerie.
- La porte côté galerie s'ouvre.
- Le véhicule entre.
- La porte se ferme.
- La trappe de purge se ferme, la trappe d'expulsion s'ouvre, le ventilateur est mis en service.
- Quand la pression du tunnel est rejoint dans le by-pass, la porte vers le tunnel s'ouvre et le véhicule peut sortir.

En cas d'événement à l'intérieur d'un by-pass, la ventilation est bloquée et les trappes sont fermées afin d'empêcher une propagation des fumées vers la galerie ou vers le tunnel.

Ces opérations sont exécutées en mode automatique et durent environ 30 seconds.

### 3.8 Mode de fonctionnement de l'ensemble

#### 3.8.1 *Fonctionnement normal*

En conditions normales de fonctionnement, l'induction d'un flux d'air excessif dans la galerie de sécurité est empêchée en fermant une porte au portail à plus basse pression atmosphérique en cas de dépassement d'une vitesse longitudinale d'environ +/- 2 m/s. Cette porte serait immédiatement ouverte en cas d'événement dans le tunnel ou dans la galerie.

Puisqu'il y a toujours au moins un portail de la galerie d'ouvert et que la section d'air de la galerie est telle que la perte de charge à faibles débits est négligeable dans le tube, l'apport de l'air frais aux abris, by-pass et ST ne requièrent pas une ventilation mécanique dédiée, mais est réalisé directement par les ventilateurs de ces locaux.

Chaque local entre le tunnel et la galerie est donc muni de ventilateurs locaux qui reprennent l'air de la galerie de sécurité et la refoulent dans le tunnel ou, s'il s'agit des ST, en partie dans la galerie même.

Le projet préliminaire [4] envisageait deux solutions pour la circulation de l'air vers les abris et vers les ST:

- Circulation de l'air frais de la galerie au tunnel. Dans ce cas de figure l'air utilisé pour la ventilation des abris et des ST est refoulé dans le tunnel.
- Circulation de l'air frais de la galerie aux abris ou ST et refoulement dans la galerie même, sans expulsion de l'air vers le tunnel.

La deuxième solution avait été préférée en [4], principalement pour des raisons de stabilisation des pressions.

Il est cependant retenu plus pertinent d'adopter la première solution pour la ventilation des abris, laquelle donne de meilleures garanties contre la pénétration de la fumée et est la seule permettant de maîtriser de manière précise la surpression d'un abri par rapport au tunnel par réduction contrôlée du débit effluent.



De même cette solution est également retenue pour les by-pass, vu que leur disposition entre la galerie de sécurité et le tunnel facilite le balayage avec un flux d'air longitudinal et unidirectionnel.

Pour les ST par contre, la majorité de l'air est refoulé dans la galerie simplement parce que l'espace dans les PHT adjacents au tunnel ne suffit pas pour faire passer l'air vicié de la ST au tunnel. Les PHT seront équipés d'un SAS vers le tunnel après le basculement des équipements.

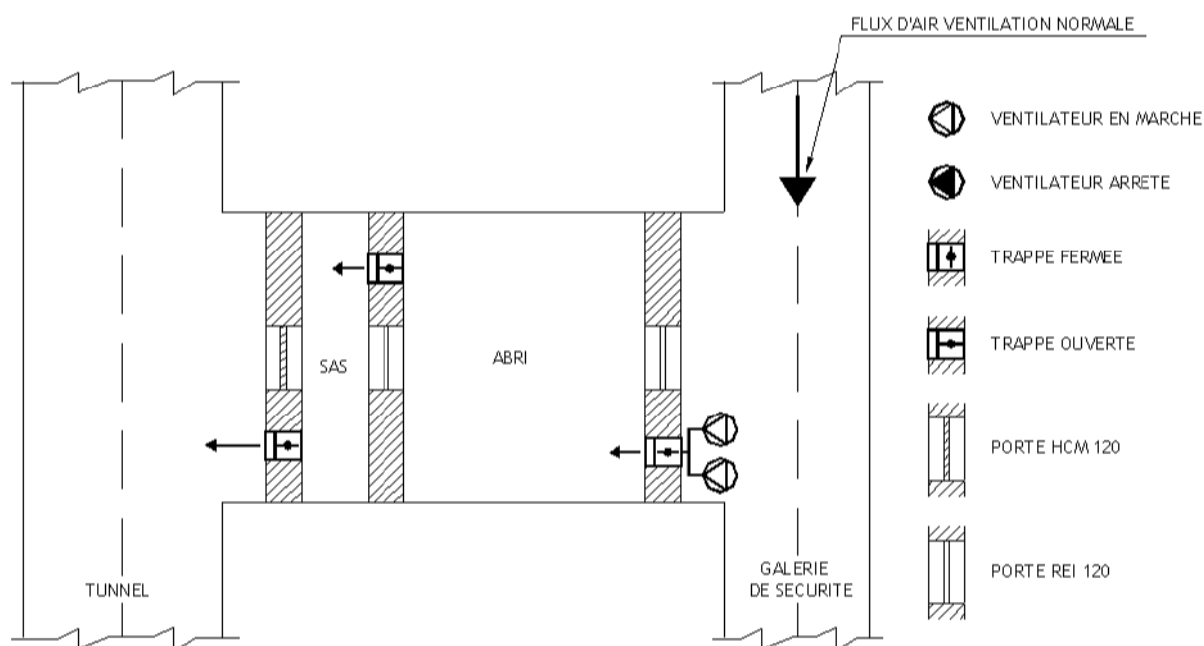


Fig. 3.1: Ventilation des abris, fonctionnement normal.

### 3.8.2 Fonctionnement en cas d'événement dans le tunnel

Le cas d'un événement dans le tunnel même constitue l'éventualité la plus probable et la plus dangereuse pour les usagers.

#### 3.8.2.1 Ventilation des abris

La ventilation des abris fonctionne comme en exploitation normale, bien qu'avec un débit d'air frais augmenté, Fig. 3.2.

Des trappes coupe-feu sont prévues côté tunnel. Elles restent normalement en position ouverte, puisque la circulation d'air frais est suffisante pour empêcher

toute pénétration des fumées et de chaleur. Les trappes ne sont utilisées qu'en cas d'une surchauffe thermique à l'intérieur du conduit de décharge, qui peut se produire uniquement dans le cas très rare de perte complète de l'alimentation en air frais d'un abri situé à proximité de l'incendie ou d'un rayonnement thermique de très haute intensité.

Un capteur de pression différentielle surveille la surpression de l'abri relatif au tunnel.

Si les deux portes du SAS restent ouvertes, cette situation est relevée par des dispositifs de contact. A ce moment, le débit d'air frais est augmenté afin de rejoindre une vitesse moyenne à travers les portes ouvertes d'au moins 1 m/s pour minimiser le risque de pénétration de fumée, comme le conseille la recommandation suisse applicable [17].

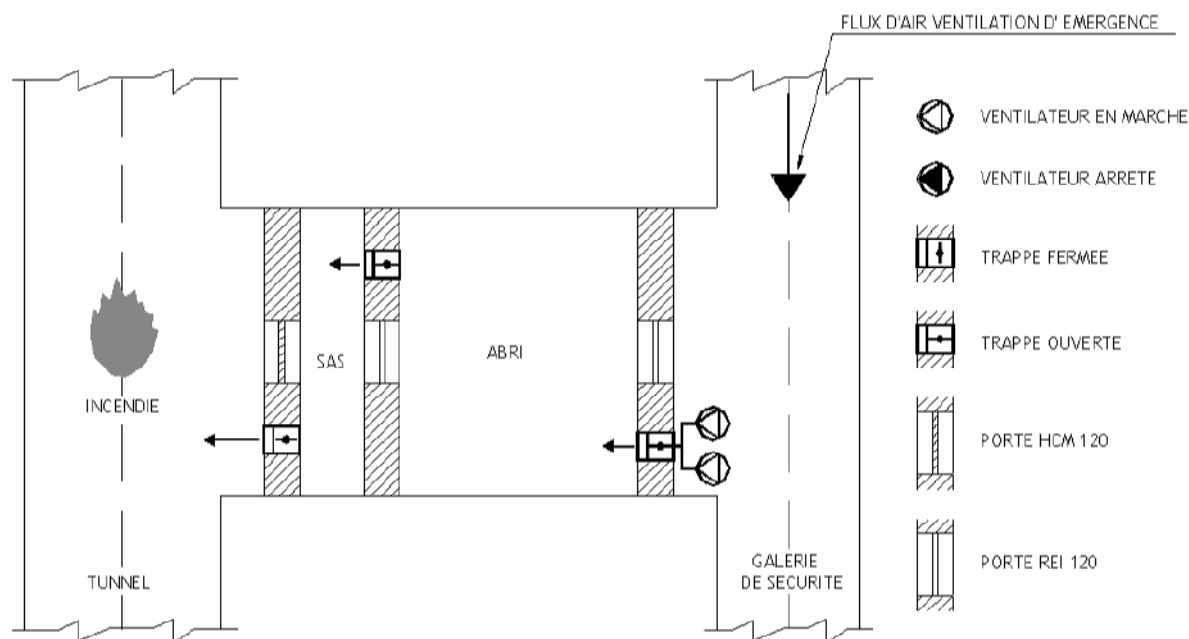


Fig. 3.2: Ventilation des abris en cas d'événement dans le tunnel.

Si par contre les trois portes d'un abri restent ouvertes créant un court-circuit entre le tunnel et la galerie, le système de ventilation de l'abri même n'est clairement plus en mesure de contrôler les flux d'air. Le système de contrôle de la ventilation de la galerie de sécurité veille cependant à maintenir une surpression dans la galerie même au droit du foyer d'événement, empêchant alors aussi dans ce cas la pénétration des fumées en galerie.

### 3.8.2.2 *Ventilation des by-pass*

La ventilation des by-pass fonctionne comme en l'exploitation normale.

### 3.8.2.3 *Ventilation des ST*

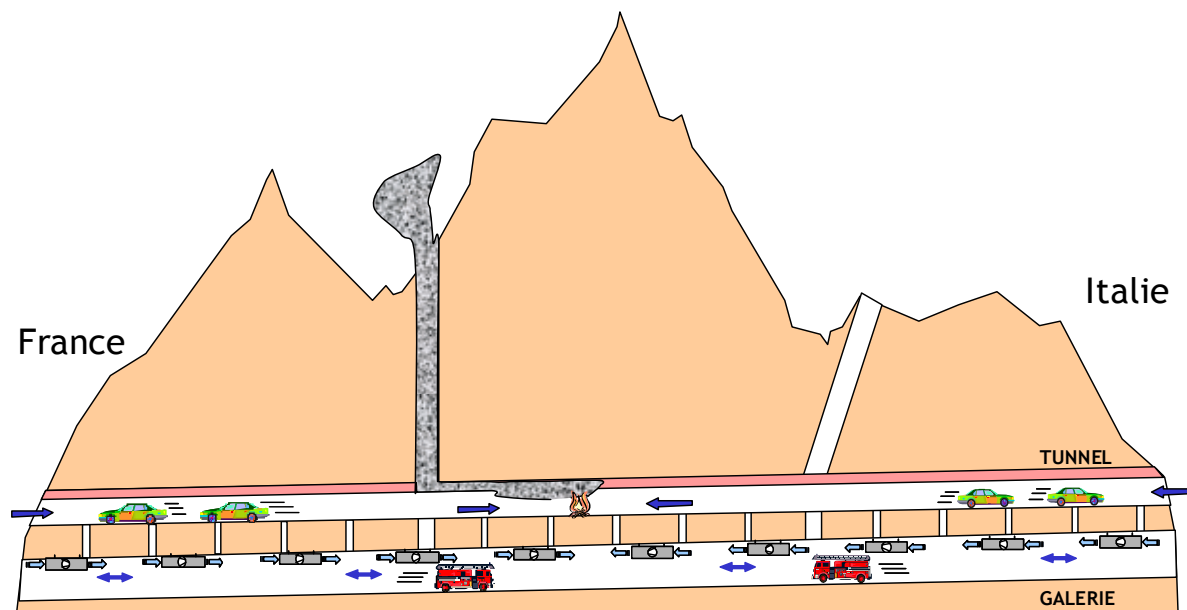
La ventilation des ST fonctionne comme en l'exploitation normale.

### 3.8.2.4 *Ventilation de la galerie de sécurité*

Si un portail de la galerie était fermé avec une porte au moment de l'irruption de l'événement, cette porte sera immédiatement ouverte pour garantir l'accès aux secours.

Simultanément, le système de contrôle des accélérateurs entre en fonction avec la séquence suivante:

- En présence d'un gradient de pression atmosphérique entre les deux têtes, un nombre suffisant d'accélérateurs est mis en service afin de balancer cette différence et d'empêcher l'induction d'une vitesse longitudinale dans la galerie au-delà du flux requis pour les abris, les ST et les by-pass. Dans un premier temps, le nombre des accélérateurs mis en service est donc piloté en fonction de la différence de pression effectivement mesurée pour entrer ensuite dans un réglage à boucle fermée, basé sur les mesures de la vitesse d'air en galerie. Les accélérateurs sont mis en service depuis le portail à plus basse pression afin d'obtenir une zone de surpression en proximité du foyer d'événement.
- Si le désenfumage dans le tunnel est effectué avec une usine de tête (A ou D), le système de réglage des accélérateurs veille que l'air sort avec une faible vitesse longitudinale à travers ce portail (environ 0.5 m/s) afin d'éviter un court-circuit des fumées du tunnel vers la galerie.
- Les accélérateurs encore hors service après ces manœuvres essentielles sont ensuite gérés de manière à créer une surpression dans la galerie de sécurité vis-à-vis du foyer d'événement enclenchant la moitié dans un sens et respectivement l'autre moitié dans le sens inverse (Fig. 4.16, Fig. 4.17, Fig. 4.18).

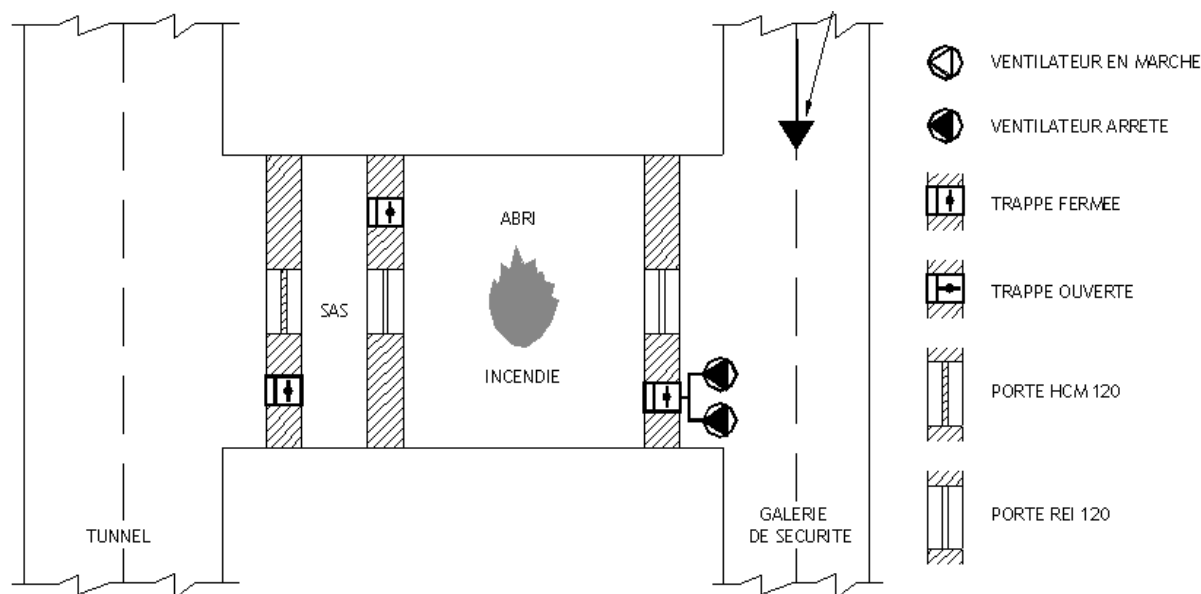


**Fig. 3.3** Gestion d'un événement dans le tunnel: ventilation dans la galerie d'une manière à créer une surpression et de contrôler la vitesse longitudinale.

### 3.8.3 Fonctionnement en cas d'événement dans un abri

En cas d'événement à l'intérieur d'un abri ou du SAS correspondant, la ventilation de cet abri est arrêtée et les ouvertures avec le tunnel et avec la galerie sont fermées par des trappes coupe-feu, Fig. 3.4.

La ventilation du tunnel et de la galerie passe en modalité événement, c'est-à-dire que dans le tunnel un scénario de désenfumage est déclenché avec aspiration concentrée à l'endroit de l'abri tandis que la gestion de la ventilation dans la galerie se fait selon la procédure décrite au chapitre 3.8.2.



**Fig. 3.4:** Ventilation des abris en cas d'événement à l'intérieur.

### 3.8.4 Fonctionnement en cas d'événement dans une Station technique (ST) ou by-pass

En cas d'événement à l'intérieur d'une ST ou d'un by-pass, la ventilation de ce local est arrêtée et les ouvertures avec la galerie et le tunnel sont fermées par des trappes coupe-feu.

La ventilation du tunnel et de la galerie passe en modalité événement, c'est-à-dire dans le tunnel un scénario de désenfumage est déclenché avec aspiration concentrée à l'endroit de la ST/by-pass et la gestion de la ventilation dans la galerie se fait selon la procédure décrite en chapitre 3.8.2.

### 3.8.5 Fonctionnement en cas d'événement dans la galerie

La galerie est un élément fondamental de la sécurité pour les usagers dans le tunnel. Comme énoncé au chapitre 1, toute autre fonction, en particulier le transit du personnel de service, est subordonnée à la fonction principale. La possibilité d'un événement dans la galerie est faible, mais doit être considérée. Le choix de la philosophie de gestion en cas d'événement dans la galerie est basé sur les éléments suivants:

- Priorité à la sécurité des usagers.
- Interaction minimale entre tunnel et galerie.
- Disponibilité maximale des abris.
- Simplicité de configuration et de gestion.

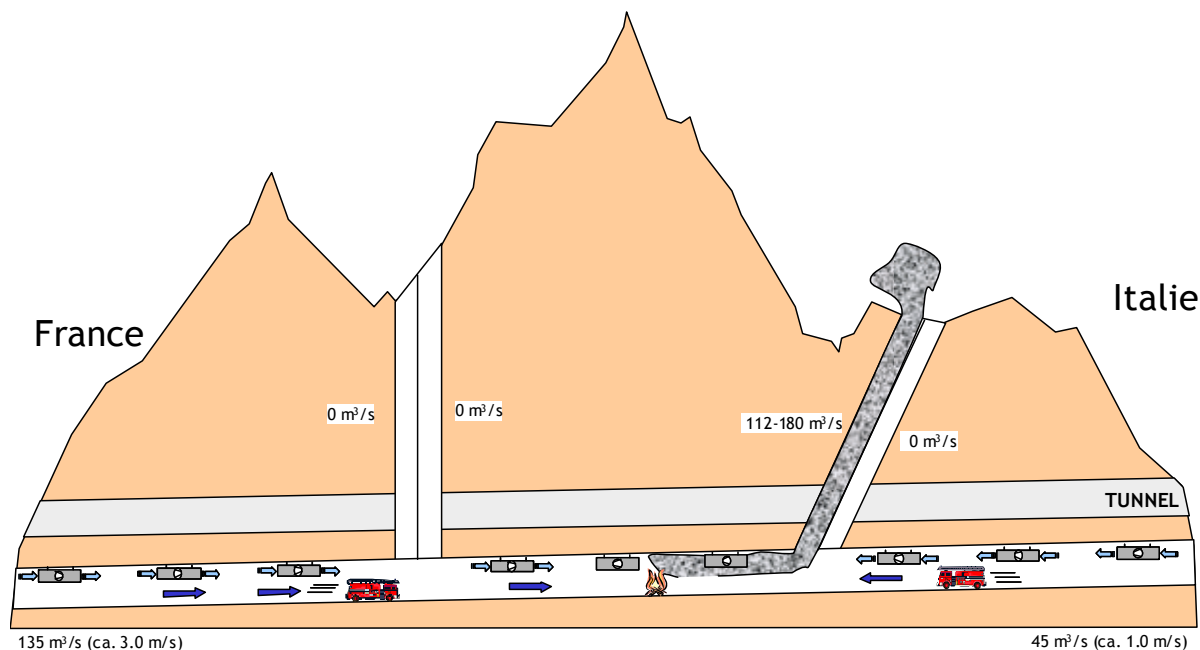
Le désenfumage de la galerie peut en principe être garanti de trois manières:

4. Expulsion des fumées vers le tunnel à travers les abris/by-pass, avec désenfumage concentré.
5. Gestion des fumées à l'intérieur de la galerie en modalité longitudinale pure.
6. Gestion des fumées à l'intérieur de la galerie en modalité longitudinale avec extraction massive.

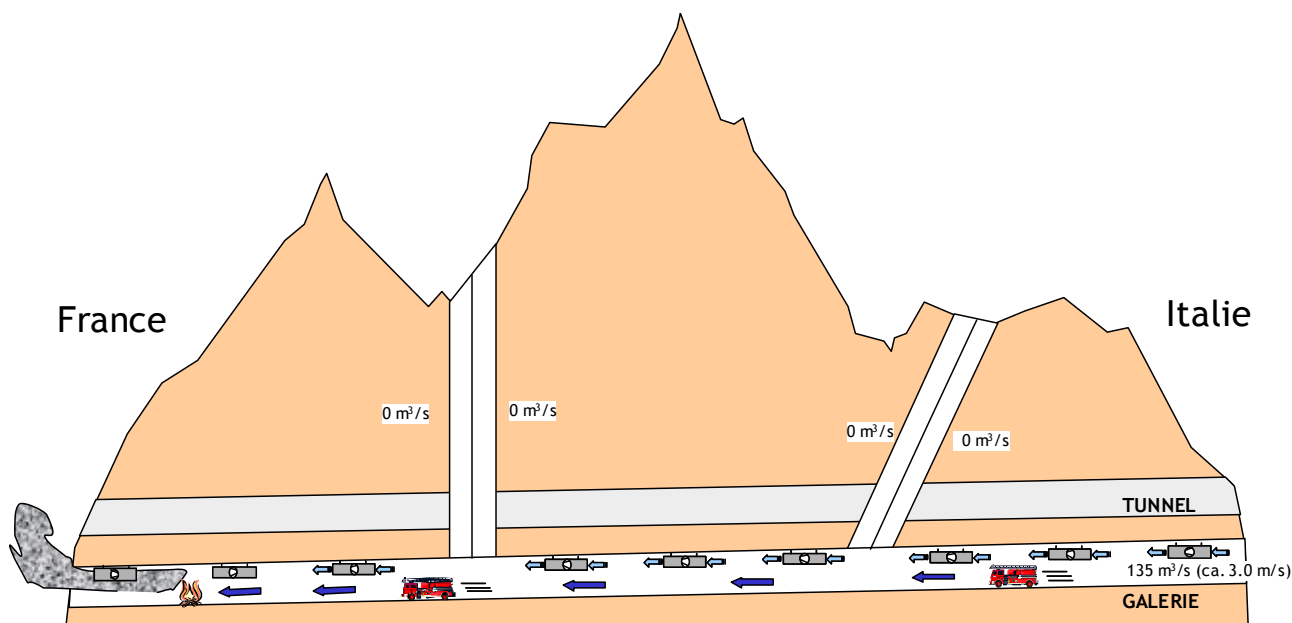
La **première alternative** comporte une forte interaction entre le tunnel et la galerie. Elle serait optimale du point de vue de la sécurité de la galerie. Par contre, tout début d'événement dans la galerie aurait un impact important sur le tunnel, avec des effets similaires à ceux d'un événement dans le tunnel même, vu que la fumée entrerait dans le dernier et y devrait être extraite. Cette option est donc à rejeter.

La **seconde alternative** a été adoptée et développée dans le projet définitif précédent [11]. Bien que simple, économique et robuste, cette solution permettait seulement ou bien une stabilisation de l'air pour limiter la longueur de propagation des fumées et en limiter - dans la mesure du possible - la déstratification, ou bien l'expulsion des fumées dans une direction sur une longueur s'étendant jusqu'à la moitié de la galerie.

La **troisième alternative** adoptée maintenant consiste en un système de ventilation longitudinale combiné avec des centrales d'extraction massive de la fumée situées chaque fois en proximité des usines de ventilation souterraines du tunnel. Le principe de fonctionnement générique est similaire à celui de la deuxième alternative, mais est amplifié de manière à pouvoir limiter la zone enfumée à une distance maximale d'environ 2.2 km, la demi-distance entre deux points d'extraction ou bien un portail. Fig. 3.5 et Fig. 3.6 illustrent ce principe.



**Fig. 3.5:** Gestion d'un événement dans la galerie de sécurité: ventilation longitudinale et extraction massive.



**Fig. 3.6:** Gestion d'un événement dans la galerie de sécurité proche d'un portail: ventilation longitudinale et expulsion à travers un portail.

La gestion d'un événement dans la galerie sera faite dans une phase initiale en mode automatique, basé sur les données de l'installation de détection d'événement (détecteurs de fumée tous les 100 m) pour garantir une réponse rapide.

Cette réaction primaire en l'absence d'information sur la présence de personnes dans la galerie de sécurité est une réaction prudente, sans inverser le sens du courant d'air initial afin de maintenir le plus possible la stratification des fumées et de permettre la fuite des personnes. La vitesse d'air maximale adoptée en automatique sera donc limitée à 1.5 m/s, acceptant une propagation éventuelle des fumées dans le sens inverse (« backlayering »).

Si dans une phase successive l'absence de personnes dans la zone d'expulsion des fumées est vérifiée par les operateurs, la vitesse d'expulsion peut être incrémentée à 3 m/s par choix manuel du scenario de désenfumage approprié.

Lorsqu'un portail de la galerie était fermé avec une porte au moment initial de l'événement, cette porte sera immédiatement ouverte pour garantir l'accès aux secours et pour permettre la mise en service du désenfumage.

La gestion automatique de ce dernier se fait de la manière suivante en fonction du canton concerné:

ÉVÉNEMENT DANS LES CANTONS 1 OU 2		
Foyer d'incendie	Sens et vitesse initiale du courant d'air	Action
canton 1 ou 2	vers la France, < -0.5 m/s	Expulsion à travers le portail français avec -1.5 m/s
canton 1 ou 2	vers l'Italie, > +0.5 m/s	Vitesse longitudinale de 1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale B, vitesse dans le sens inverse en aval -1 m/s
canton 1	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Expulsion à travers le portail français avec -1.5 m/s
canton 2	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Vitesse longitudinale de 1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale B, vitesse dans le sens inverse en aval -1 m/s

**Tab. 3.1:** Scénarios automatiques de désenfumage dans les cantons 1 et 2



ÉVÉNEMENT DANS LES CANTONS 3 OU 4		
Foyer d'incendie	Sens et vitesse initiale du courant d'air	Action
canton 3 ou 4	vers la France, < -0.5 m/s	Vitesse longitudinale de -1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale B, vitesse dans le sens inverse en aval 1 m/s
canton 3 ou 4	vers l'Italie, > +0.5 m/s	Vitesse longitudinale de 1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale C, vitesse dans le sens inverse en aval -1 m/s
canton 3	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Vitesse longitudinale de -1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale B, vitesse dans le sens inverse en aval 1 m/s
canton 4	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Vitesse longitudinale de 1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale C, vitesse dans le sens inverse en aval -1 m/s

**Tab. 3.2:** Scénarios automatiques de désenfumage dans les cantons 3 et 4

ÉVÉNEMENT DANS LES CANTONS 5 OU 6		
Foyer d'incendie	Sens et vitesse initiale du courant d'air	Action
canton 5 ou 6	vers la France, < -0.5 m/s	Vitesse longitudinale de -1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale C, vitesse dans le sens inverse en aval 1 m/s
canton 5 ou 6	vers l'Italie, > +0.5 m/s	Expulsion à travers le portail italien avec -1.5 m/s
canton 5	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Vitesse longitudinale de -1.5 m/s et extraction massive à travers la centrale C, vitesse dans le sens inverse en aval 1 m/s
canton 6	> -0.5 m/s et < +0.5 m/s	Expulsion à travers le portail italien avec -1.5 m/s

**Tab. 3.3:** Scénarios automatiques de désenfumage dans les cantons 5 et 6

La GTC en outre devra mettre en place certaines mesures fondamentales complémentaires de manière automatique:

- Fermeture du tunnel.
- Arrêt de l'injection d'air frais dans les abris, Fig. 3.7.
- Arrêt de la ventilation des stations techniques et des by-pass.

- Débit d'air frais dans le tunnel au maximum (AF 65% pour limiter la vitesse à travers les portails du tunnel à 10 m/s) pour le pressuriser afin d'empêcher la pénétration des fumées.

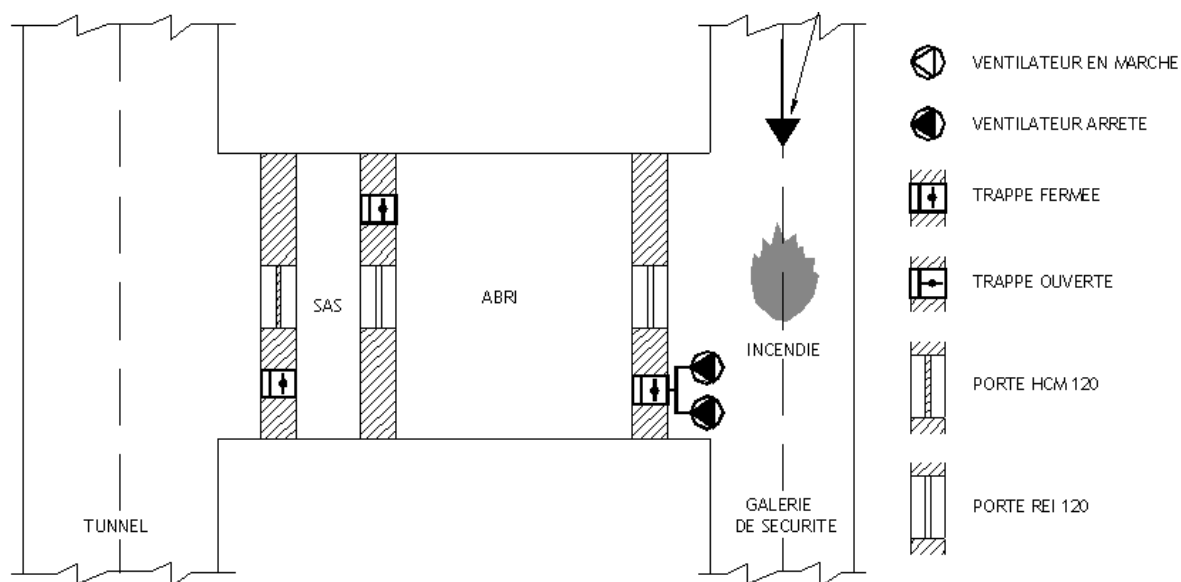


Fig. 3.7: Ventilation des abris en cas d'événement dans la galerie.

## 4. BASES DE DIMENSIONNEMENT

### 4.1 Débit d'air frais nécessaire

#### 4.1.1 Conditions normales de fonctionnement

En conditions normales de fonctionnement le débit d'air frais sera le suivant:

##### 4.1.1.1 Galerie

Le balayage de la galerie est garanti par l'air frais requis pour ventiler les abris, les by-pass et les stations techniques.

##### 4.1.1.2 Abris

Spécification en [1]:  $3 \text{ renouvellements/h} \approx 3 \text{ }^1/\text{h} * 530 \text{ m}^3 = 1590 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0.44 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.1.1.3 Stations techniques (ST)

Le débit d'air frais nécessaire pour emmener la chaleur dissipée par les équipements présents dans les ST se calcule (si l'on n'utilise pas de climatisation) sur la base de la formule du transport calorifique:

$$\dot{V}_k = \frac{P}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta T}$$

avec

- $\dot{V}_k$  Débit d'air frais nécessaire
- P Puissance thermique dissipée
- $\rho$  Densité de l'air
- $C_p$  Capacité thermique de l'air
- $\Delta T$  Différence de température de l'air

En prenant en compte les valeurs suivantes,

$$\Delta T = 10^\circ\text{C}$$

$$P = 30 \text{ kW pour deux ST regroupées}$$

le débit d'air frais qui en résulte est de 2.8 m<sup>3</sup>/s pour chaque couple de ST. Le débit nécessaire double en cas de réduction de  $\Delta T$  à 5°C. On utilisera ici une valeur intermédiaire de 3.3 m<sup>3</sup>/s pour chaque couple de ST.

Un flux partiel d'environ 0.85 m<sup>3</sup>/s de ce débit peut être convoyé dans le tunnel selon l'espace à disposition dans le PHT, tandis que 2.45 m<sup>3</sup>/s sont refoulés dans la galerie.

#### 4.1.1.4 By-pass carrossables

Analogue aux abris: 3 renouvellements/h  $\approx 3^{1/h} \cdot 550 \text{ m}^3 = 1650 \text{ m}^3/\text{h} \approx 0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.1.1.5 Débit d'air vers le tunnel total en conditions normales de fonctionnement

Elément	Débit AF	Nombre	Débit AF total
Abris	0.44 m <sup>3</sup> /s	34	15.0 m <sup>3</sup> /s
ST	0.85 m <sup>3</sup> /s	8	6.8 m <sup>3</sup> /s
By-pass	0.46 m <sup>3</sup> /s	5	2.3 m <sup>3</sup> /s
<b>TOTAL</b>			<b>24.1 m<sup>3</sup>/s</b>

**Tab. 4.1:** Débit d'air vers le tunnel en conditions normales de fonctionnement.

#### 4.1.2 Travaux d'entretien

En cas de travaux dans la galerie ou dans les locaux, le débit d'air frais peut être augmenté pour réduire la température ou les concentrations de polluants par la mise en service d'un nombre suffisant d'accélérateurs avec les deux portails ouverts.

#### 4.1.3 Événement dans le tunnel

En cas d'événement le débit d'air frais sera le suivant:

##### 4.1.3.1 Galerie de sécurité

La ventilation de la galerie est garantie par l'air frais utilisé pour ventiler les abris, les by-pass et les stations techniques.

##### 4.1.3.2 Abris

Le besoin d'air frais d'une personne pour l'approvisionnement en oxygène est d'environ 1 à 5 m<sup>3</sup>/h. Afin d'emporter également les odeurs et polluants, 10-25 m<sup>3</sup>/h par personne sont requis. La Circulaire française [1] exige un débit de 2'500 m<sup>3</sup>/h par abris en cas d'occupation, basé sur une surface minimale de 50 m<sup>2</sup>. Cette quantité d'air est suffisante pour un maximum de 250 personnes. En considérant la surface utile d'un abri de 110 m<sup>2</sup>, une occupation plus élevée n'est en aucun cas envisageable, raison pour laquelle il n'y a pas besoin d'adapter le débit de 2'500 m<sup>3</sup>/h à la surface réelle.

Par conséquent, la spécification en [1]: 2'500 m<sup>3</sup>/h  $\approx$  0.7 m<sup>3</sup>/s vaut pour chaque abri occupé.

À noter que la Circulaire [1] demande que ce débit de 2'500 m<sup>3</sup>/h soit maintenu simultanément dans au moins 3 abris. Le débit minimal serait donc de  $3 \times 2'500 \text{ m}^3/\text{h} + 31 \times 1'590 \text{ m}^3/\text{h} \approx 56'800 \text{ m}^3/\text{h} \approx 16 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Cette exigence minimale est estimée trop faible pour le tunnel du Fréjus. Le dimensionnement est conditionné par la nécessité de pouvoir ventiler l'ensemble des abris en modalité incendie, avec un débit de  $34 \times 2'500 \text{ m}^3/\text{h} \approx 85'000 \text{ m}^3/\text{h} \approx 24 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En cas que les deux portes d'un SAS restent ouvertes, le débit d'air frais de cet abri est augmenté pour atteindre 1 m/s à travers les portes. Cette condition correspond à un débit de  $1.4 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1 \text{ m/s} = 2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4.1.3.3 Stations techniques (ST)

Le débit d'air frais nécessaire pour l'évacuation de la chaleur dissipée par les équipements présents dans les ST est le même qu'en fonctionnement normal.

#### 4.1.3.4 By-pass carrossables

Même ventilation qu'en fonctionnement normal.

#### 4.1.3.5 Débit d'air vers le tunnel en cas d'événement dans le tunnel:

Elément	Débit AF	Nombre	Débit AF total
Abris	0.70 m <sup>3</sup> /s	34	23.8 m <sup>3</sup> /s
ST	0.85 m <sup>3</sup> /s	8	6.8 m <sup>3</sup> /s
By-pass	0.46 m <sup>3</sup> /s	5	2.3 m <sup>3</sup> /s
TOTAL			32.9 m <sup>3</sup> /s

Tab. 4.2: Débit d'air vers le tunnel en cas d'événement.

Les vérifications conduites au cours du projet préliminaire (Annexe 1 de [4]) ont permis de démontrer que la température à l'intérieur des abris ne dépasse pas les 40°C stipulés par la Circulaire Interministérielle Française [1] même en cas d'événement en tunnel à proximité immédiate d'un abri.

#### 4.1.4 Événement dans la galerie de sécurité

En cas d'événement dans la galerie, le débit d'air frais nécessaire est déterminé par la nécessité d'atteindre au moins la vitesse critique dans la galerie. Une vitesse longitudinale de l'air supérieure à la vitesse critique représente la condition nécessaire et suffisante pour empêcher la propagation des fumées en amont de l'événement, dans le sens inverse de la direction de ventilation [3].

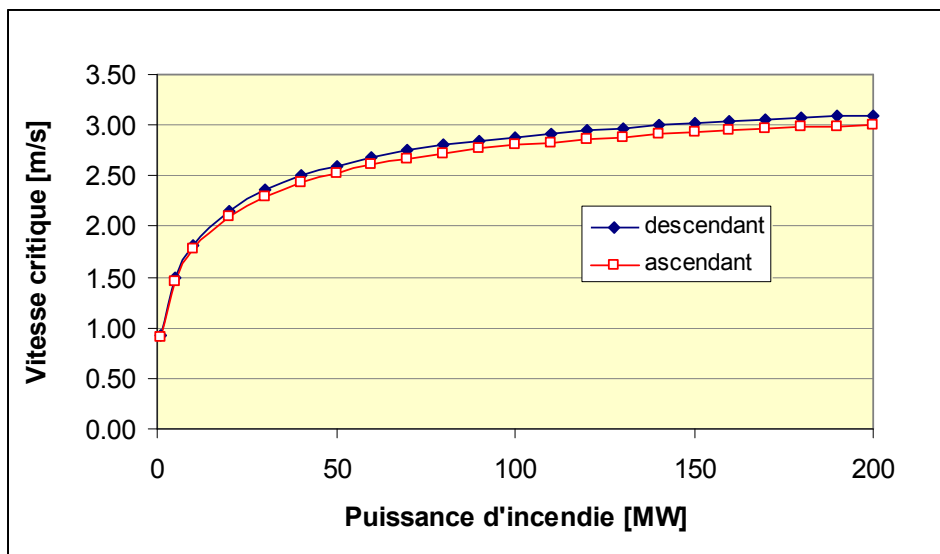


Fig. 4.1: Vitesse critique à l'intérieur de la galerie de sécurité [3].

En l'absence de prescriptions normatives quant à la modalité de la ventilation de la galerie de sécurité, son système de ventilation est dimensionné avec une puissance maximale d'événement de 30 MW (voir chapitre 3.3). La vitesse critique dans la galerie est donc de l'ordre de 2.3 m/s selon Fig. 4.1, tandis que la Circulaire Interministérielle Française ([1], chapitre 3.2.2a) requiert une vitesse minimale de 3 m/s en cas de trafic unidirectionnel. Le débit minimal à atteindre en cas d'événement, lorsque le but de la ventilation est le renvoi des fumées dans une seule direction, est donc de l'ordre de  $3 \times 45 \text{ m}^2 = 135 \text{ m}^3/\text{s}$ .

C'est alors cette condition, la plus exigeante quant à la ventilation longitudinale qui déterminera le nombre et la puissance des accélérateurs requis.

## 4.2 Distribution de pression

### 4.2.1 Préambule

La distribution de pression dans le tunnel et dans la galerie est importante pour le dimensionnement de la ventilation et pour garantir le bon fonctionnement du système. Les deux distributions sont calculées séparément, puisque l'influence de la galerie sur la pression dans le tunnel est négligeable.

## 4.2.2 Pressions dans le tunnel

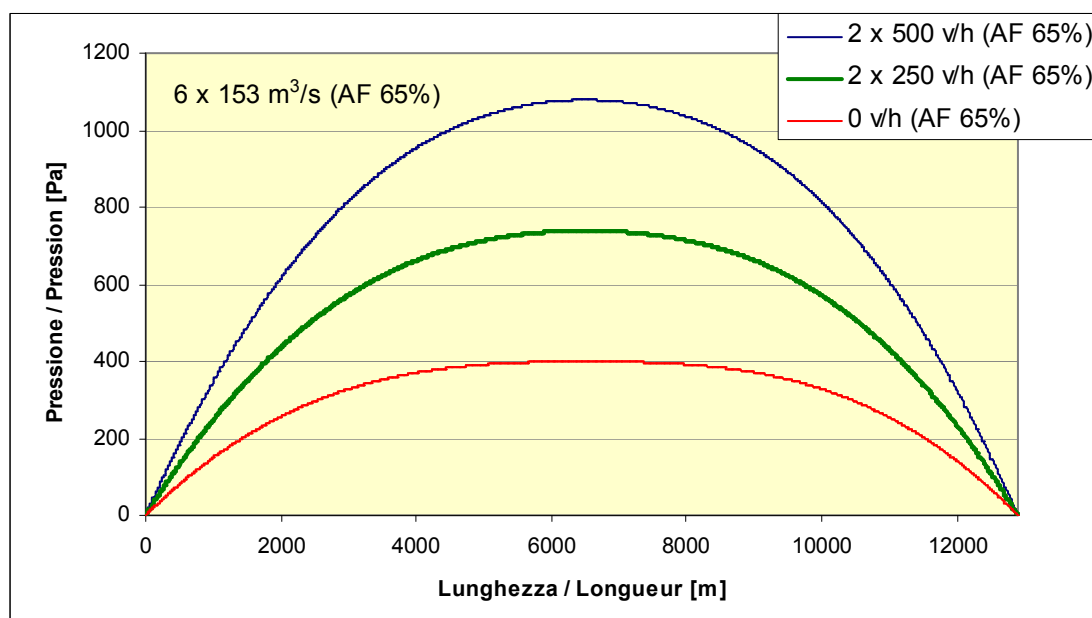
### 4.2.2.1 Introduction

La pression dépend de nombreux paramètres. Les plus importants sont:

- La modalité de ventilation;
- Le trafic;
- La différence de pression météorologique.

Les pressions les plus élevées sont rejointes en cas d'un régime de ventilation semi-transversale assorti d'un trafic intense. En tenant compte des caractéristiques du tunnel et de son système de ventilation (chapitre 2.1), le débit en semi-transversale peut atteindre au maximum 65% de la capacité d'air frais, ce qui correspond à une vitesse d'air à travers les portails de 10 m/s, valeur considérée comme le seuil admissible pour la sécurité des usagers.

Le trafic le plus élevé pris en compte se monte à 500 unités-voiture par heure et par voie, ce qui correspond environ à la capacité maximale du tunnel de Fréjus tenant compte de la limitation de vitesse à 70 km/h et la distance minimale de 150 m.



**Fig. 4.2:** Distribution de pression dans le tunnel en conditions normales de fonctionnement avec ventilation semi-transversale et un débit d'air frais à 65% (70 km/h, 60% de PL,  $\lambda=0.016$  selon [13]).

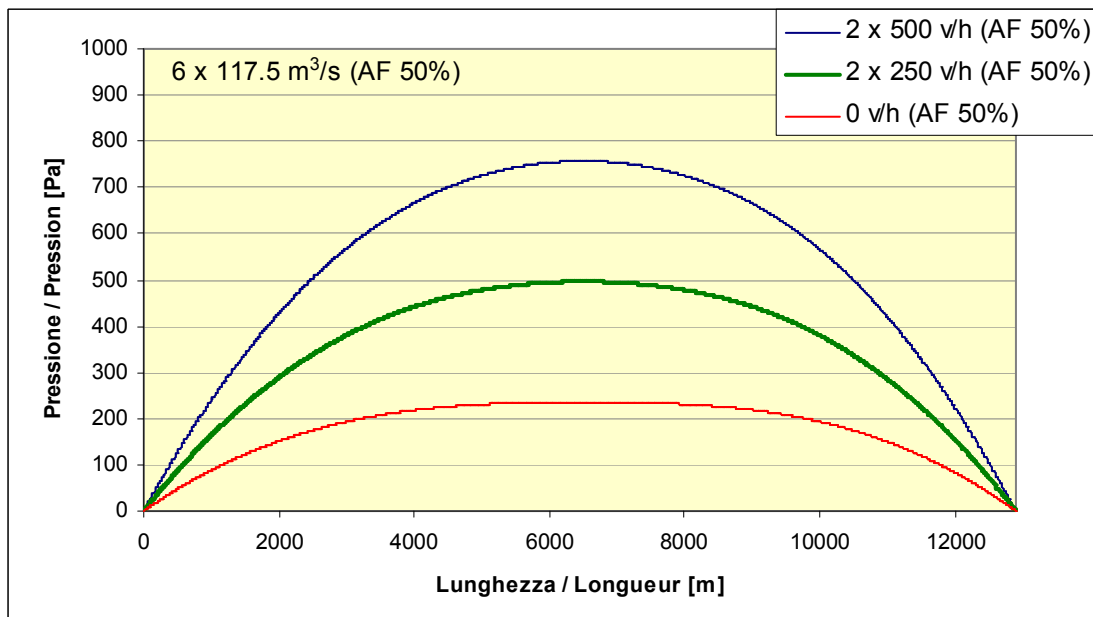


Fig. 4.3: Distribution de pression dans le tunnel en conditions normales de fonctionnement avec ventilation semi-transversale et un débit d'air frais à 50% (70 km/h, 60% de PL,  $\lambda=0.016$  selon [13]).

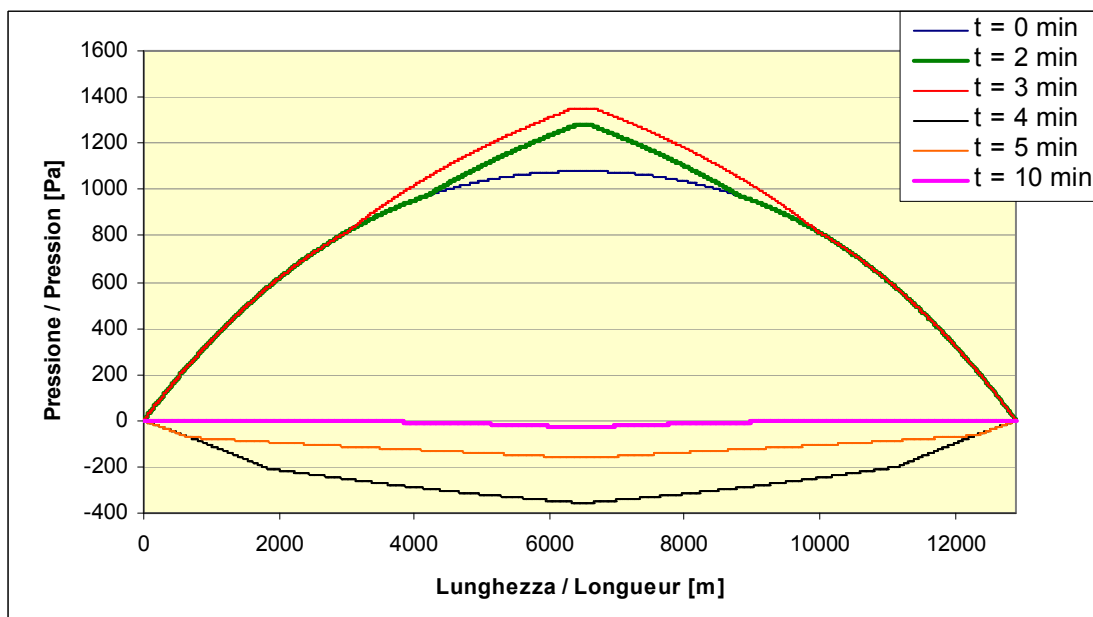


Fig. 4.4: Evolution temporelle de la pression dans le tunnel en cas d'événement au centre (2 x 500 v/h, 60% PL, ventilation initiale à 65% AF). Dans le calcul on suppose que la ventilation événement est démarrée 3 minutes après le déclenchement de l'événement.

L'analyse est conduite en utilisant le logiciel TunSim. L'évolution de la pression dans le tunnel avec une ventilation semi-transversale présente un maximum au centre, qui croît avec le débit de ventilation et avec le volume de trafic, comme

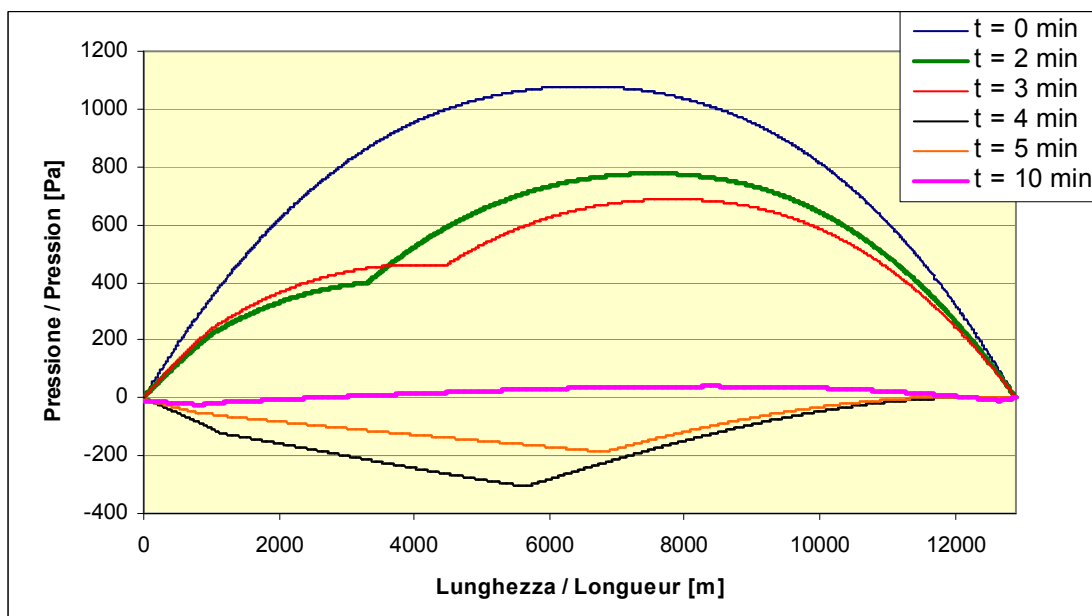


le montrent les Fig. 4.2 et Fig. 4.3. La surpression est fortement réduite en cas de trafic à l'arrêt sans effet de pistonnement des véhicules.

Cette analyse montre donc que la pression au milieu du tunnel peut atteindre des valeurs de 1'100 Pa en conditions normales de fonctionnement avec 65% de l'air frais.

En cas d'événement au centre du tunnel avec trafic intense équilibré, la pression croît au milieu dans un premier temps avant la mise en service du désenfumage, car les véhicules dirigés vers le centre sont obligés de s'arrêter devant le foyer d'événement et ne peuvent donc plus développer un effet de pistonnement en sortant du tunnel. Seulement après le début de désenfumage, la pression tombe rapidement, Fig. 4.4, pour arriver à des valeurs de dépressurisation quelques minutes après l'irruption de l'événement.

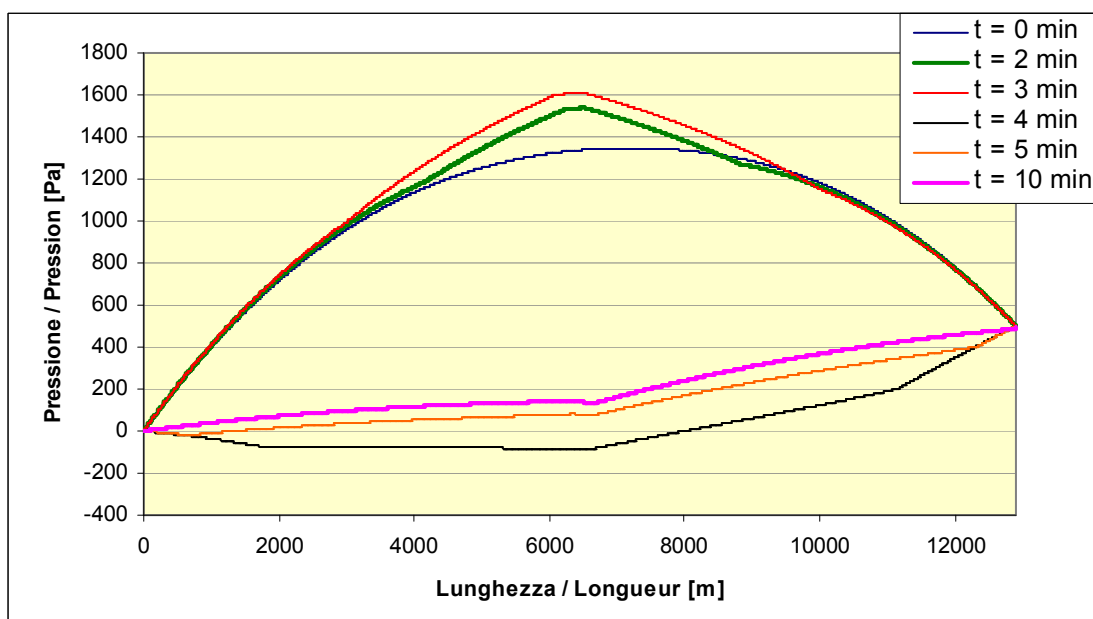
En cas d'événement à proximité d'une tête, la distribution de pression résultante est modifiée, sans influence déterminante sur les niveaux de pression dans le tunnel, Fig. 4.5. L'augmentation de la pression en tunnel qui en résulte est modeste (après 10 minutes).



**Fig. 4.5:** Evolution temporelle de la pression dans le tunnel en cas d'événement à 1'000 m du portail français (2 x 500 v/h, 60% PL, ventilation initiale à 65% AF). Dans le calcul, on suppose que la ventilation événement est démarrée 3 minutes après le déclenchement de l'événement.

#### 4.2.2.2 Différence de pression entre les têtes

La distribution de pression résultante en cas de forte différence de pression atmosphérique entre les deux têtes est représentée en Fig. 4.6 sans contrôle de la vitesse longitudinale comme cas de base.



**Fig. 4.6:** Evolution temporelle de la pression en cas de forte différence de pression entre les têtes avec  $\Delta p = -500$  Pa pour un événement au centre du tunnel (2 x 500 v/h, 60% PL, ventilation initiale à 65% AF). Dans le calcul on suppose que la ventilation événement est démarrée 3 minutes après le déclenchement de l'événement.

Aujourd'hui cependant, le tunnel du Fréjus est doté d'un système de contrôle de la vitesse longitudinale en cas d'événement travaillant avec un dosage des débits d'air frais et d'air vicié [5], [14]. Les résultats de simulation de ces algorithmes de contrôle disponibles [5] pour l'état stationnaire de la pression après quelques minutes montrent que la distribution de pression induite par la procédure de maîtrise de la vitesse longitudinale peut être très différente de la distribution de base et doit donc être prise en compte d'une manière appropriée (comparer les Fig. 4.6 et Fig. 4.7).

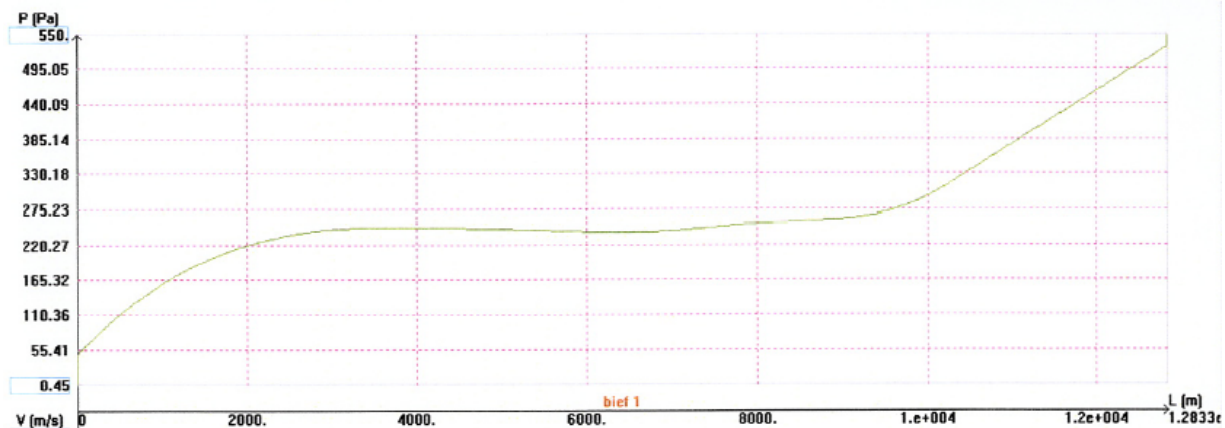


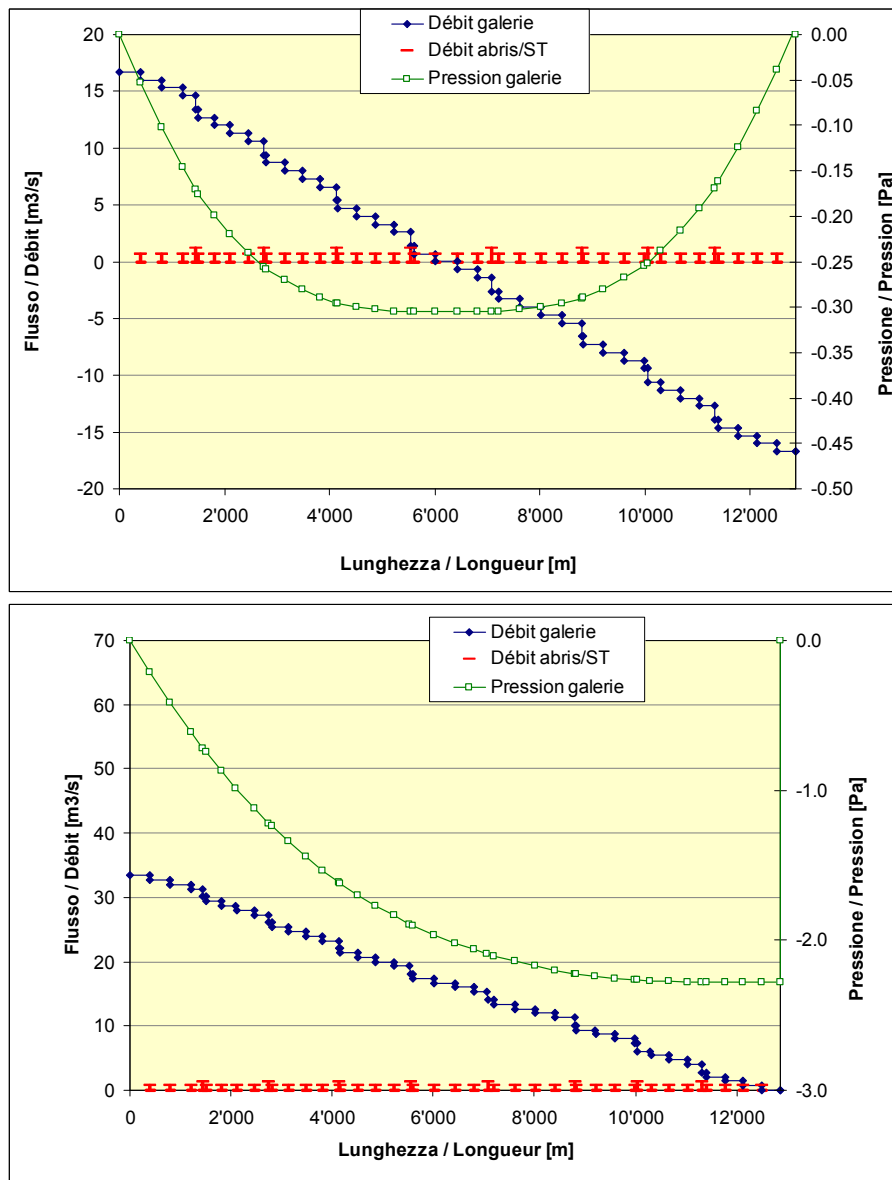
Fig. 4.7: Événement au milieu du tunnel (position 5): Distribution de pression en cas de forte différence de pression ( $\Delta p = -500$  Pa) avec procédure pour la maîtrise de la vitesse longitudinale [5].

#### 4.2.3 Pression et vitesse d'air dans la galerie en fonctionnement normal

Les flux d'air nécessaires à la ventilation des abris, des by-pass et des stations techniques (ST) sont amenés à travers la galerie de sécurité. Selon la description du paragraphe 3.8, la ventilation des abris et des by-pass ainsi que partiellement des ST est réalisée par expulsion de l'air utilisé dans le tunnel. Les débits totaux requis varient entre  $24.1 \text{ m}^3/\text{s}$  en fonctionnement normal et  $32.9 \text{ m}^3/\text{s}$  en cas d'événement (chapitre 4.1).

En raison de la section d'air importante de la galerie de sécurité, la perte de charge liée au besoin d'air des locaux est très faible ( $< 3$  Pa) en fonctionnement normal comme en cas d'événement, puisque la vitesse d'air en galerie sera seulement de l'ordre de  $0.3\text{-}0.75 \text{ m/s}$ , Fig. 4.8.

La pression dans la galerie de sécurité correspond donc à la pression atmosphérique à l'extérieur. En cas de gradient de pression atmosphérique entre les deux têtes et sans aucune contre-mesure de ventilation, la pression dans la galerie varie alors linéairement entre les deux valeurs extérieures et induit une vitesse longitudinale du portail à plus haute pression vers celui à basse pression (voir aussi Fig. 4.10).



**Fig. 4.8:** Distribution de pression et de débit dans la galerie pour l'entrée symétrique et asymétrique de l'air distribué aux abris/by-pass/ST en cas d'événement.

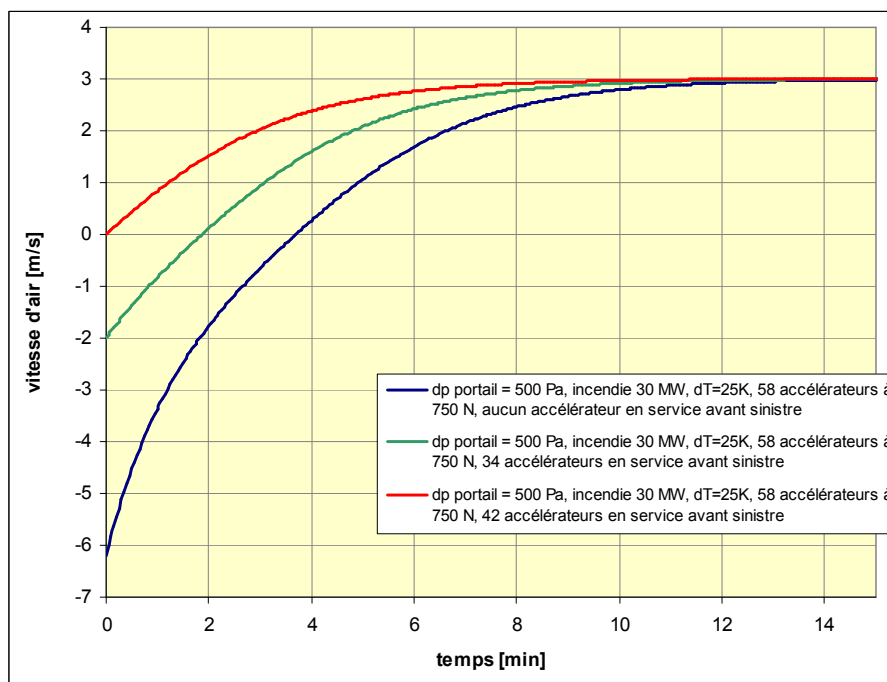
#### 4.2.4 Nécessité du contrôle de la vitesse longitudinale en galerie

En présence d'un gradient de pression atmosphérique entre les portails induisant une vitesse d'air longitudinale supérieure à +/- 2 m/s dans la galerie de sécurité, la porte à la tête à plus basse pression atmosphérique est fermée.

Cette mesure est nécessaire afin de garantir un temps de réaction suffisamment court en cas d'événement dans la galerie même, parce que le réglage de la vitesse d'air est très lent vu l'inertie importante de la colonne d'air.

Le cas le plus contraignant est un événement dans la galerie de sécurité proche du portail français (1. canton) en présence d'une différence de pression maximale

considérée de 500 Pa ainsi que d'une pression thermique de 65 Pa due à une différence de température entre la galerie et l'extérieur de 25°C en hiver. La réaction du système de ventilation sera alors d'expulser la fumée avec jusqu'à 3 m/s ([1], chapitre 3.2.2a) à travers le portail, nécessitant la mise en mouvement de l'air dans toute la galerie à cette vitesse. Sans contrôle de la vitesse d'air avant le début d'événement (donc avec les portails ouverts), la vitesse due à la différence de pression serait de 6 m/s dans le sens contraire (Fig. 4.10). Comme illustré en Fig. 4.9, le système aurait donc besoin de 4 minutes pour changer la direction de l'air et en tout de 10 minutes pour atteindre 3 m/s dans la direction désirée. Ce temps de réaction est décidément trop lent et n'est pas en conformité avec la Circulaire français, qui admet seulement un délai de « quelques minutes après la commande » ([1], chapitre 3.2.2c).



**Fig. 4.9:** Temps de réaction pour atteindre 3 m/s en cas d'événement dans la galerie et avec une différence de pression de 500 Pa entre les portails.

La réaction peut être sensiblement accélérée si la vitesse d'air initiale est maintenue dans une fourchette de +/-2 m/s ou encore mieux à 0 m/s (Fig. 4.9).

Si ce contrôle de la vitesse se faisait avec des accélérateurs au lieu d'une porte fermée, le nombre d'accélérateurs requis en fonction de la pression motrice serait celui montré en Fig. 4.11. La consommation d'énergie associée à cette solution serait clairement très élevée, raison pour laquelle la fermeture d'une porte est

adoptée, ce qui permet de ne faire pas du tout usage des accélérateurs en exploitation normale.

En outre, par la fermeture du portail à plus basse pression atmosphérique, la différence de pression naturelle soutient la ventilation des abris, des by-pass et des ST réduisant alors aussi la consommation électrique de ventilation de ces locaux.

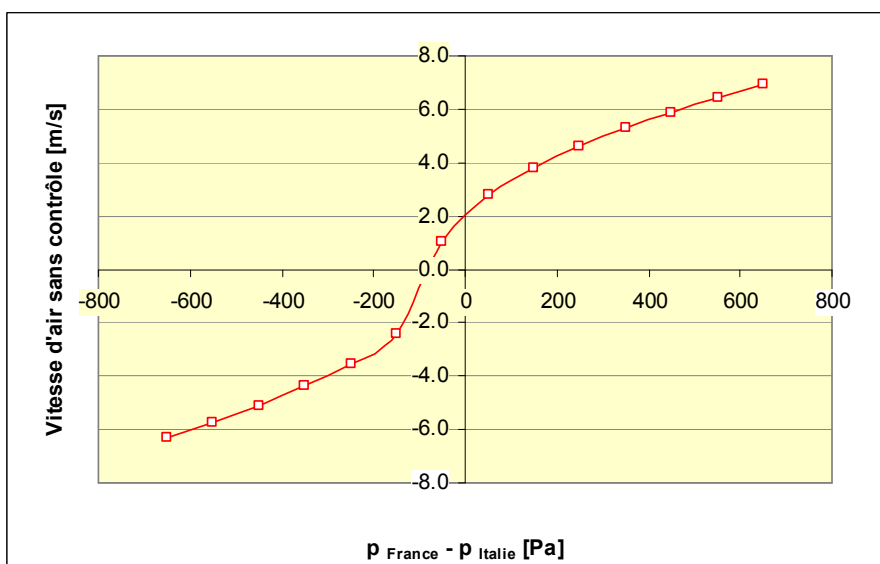


Fig. 4.10: Vitesse d'air dans la galerie de sécurité en hiver ( $dT=25^{\circ}\text{C}$ ) sans contrôle de la vitesse longitudinale en fonction de la pression motrice.

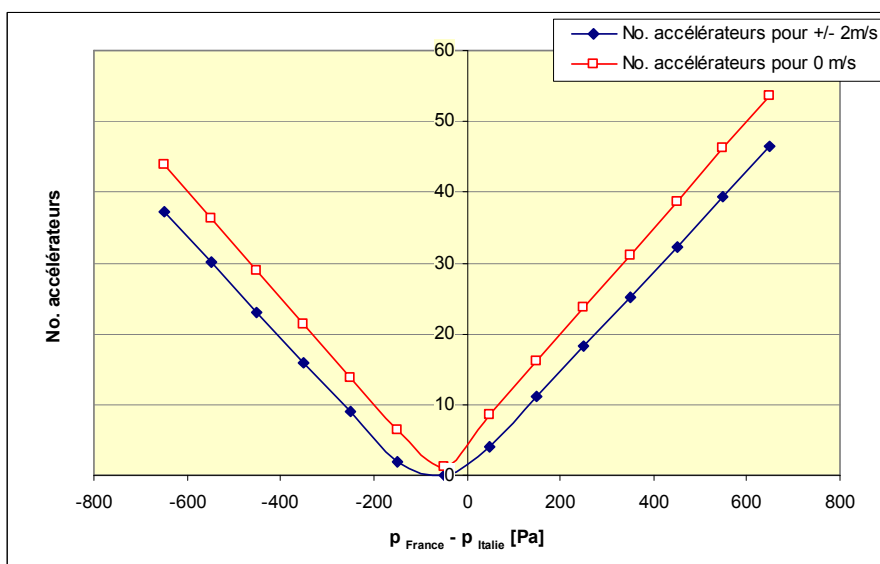


Fig. 4.11: Numéro des accélérateurs requis pour le contrôle de la vitesse longitudinale dans la galerie de sécurité en exploitation normale avec les deux portails ouverts (hiver,  $dT=25^{\circ}\text{C}$ ).

#### 4.2.5 Différence de pression entre galerie et tunnel en exploitation normale

La différence de pression maximale entre galerie et tunnel en exploitation normale sans différence de pression entre les têtes est illustrée en Fig. 4.12. Puisque dans ces conditions, la pression dans la galerie reste au niveau de la pression atmosphérique, une différence maximale au milieu du tunnel d'environ 1100 Pa peut être rejointe à trafic intense et équilibré ainsi que l'apport de l'air frais à 65%.

En présence d'un gradient de pression maximale considérée entre les têtes de 500 Pa, l'évolution des pressions dans les deux tubes est illustré en Fig. 4.13 sans fermeture d'un portail et en Fig. 4.14 en cas de la fermeture du portail à plus basse pression atmosphérique.

La plus grande différence de pression inverse avec surpression dans la galerie de sécurité par rapport au tunnel est démontrée en Fig. 4.15, valable pour une situation sans trafic dans le tunnel et sa ventilation hors service, en présence d'un gradient de pression entre les têtes et un portail de la galerie fermé.

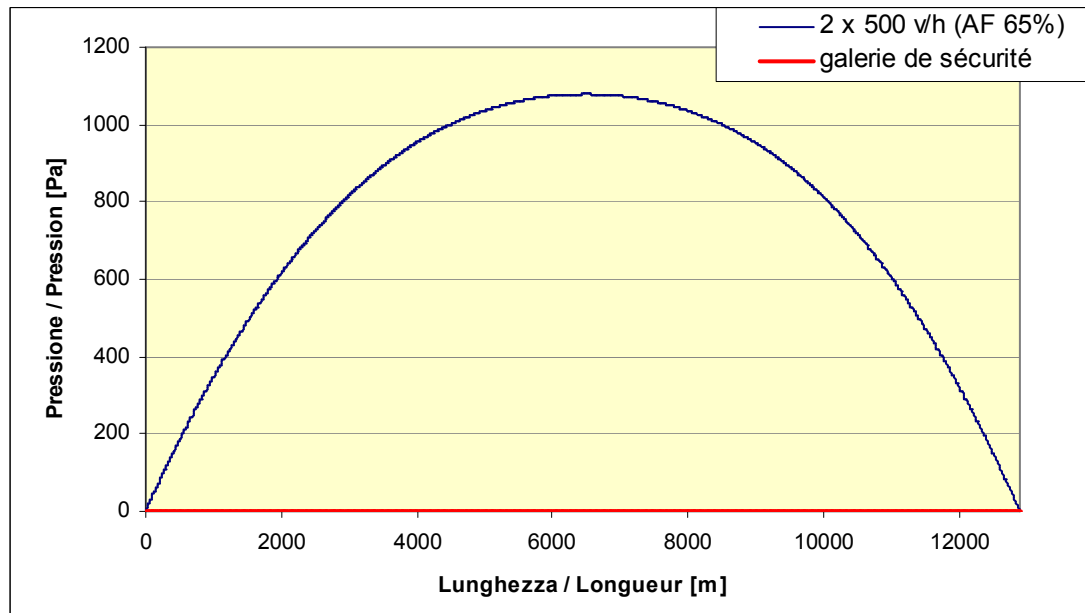


Fig. 4.12: Exploitation normale: Différence de pression maximale considérée entre la galerie et le tunnel en absence de gradient atmosphérique.

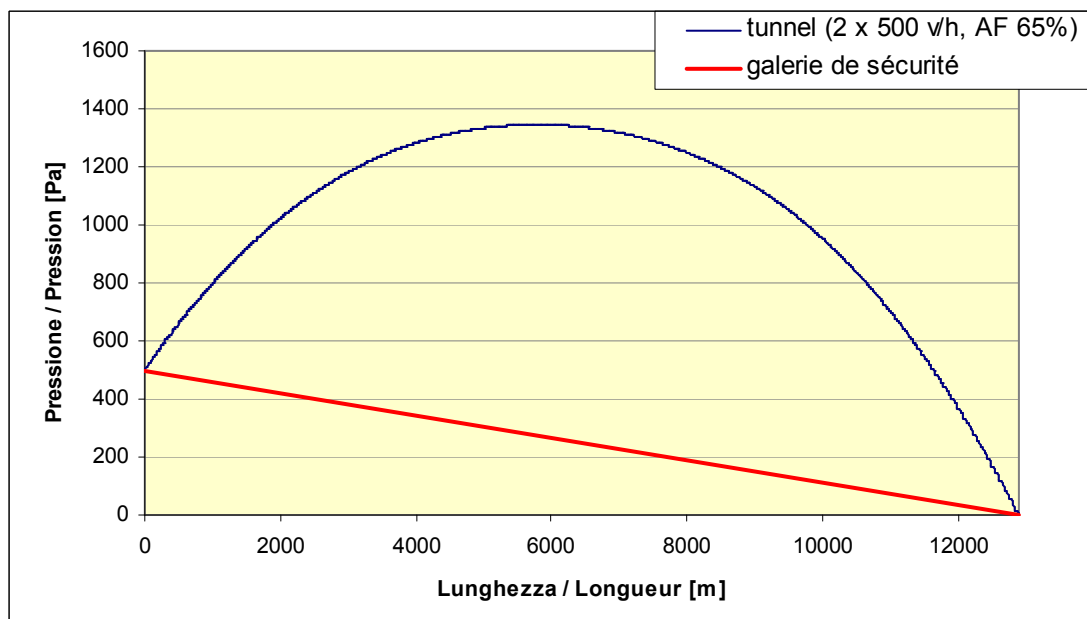


Fig. 4.13: Exploitation normale: Différence de pression maximale considérée entre la galerie et le tunnel en présence d'un gradient atmosphérique de 500 Pa.

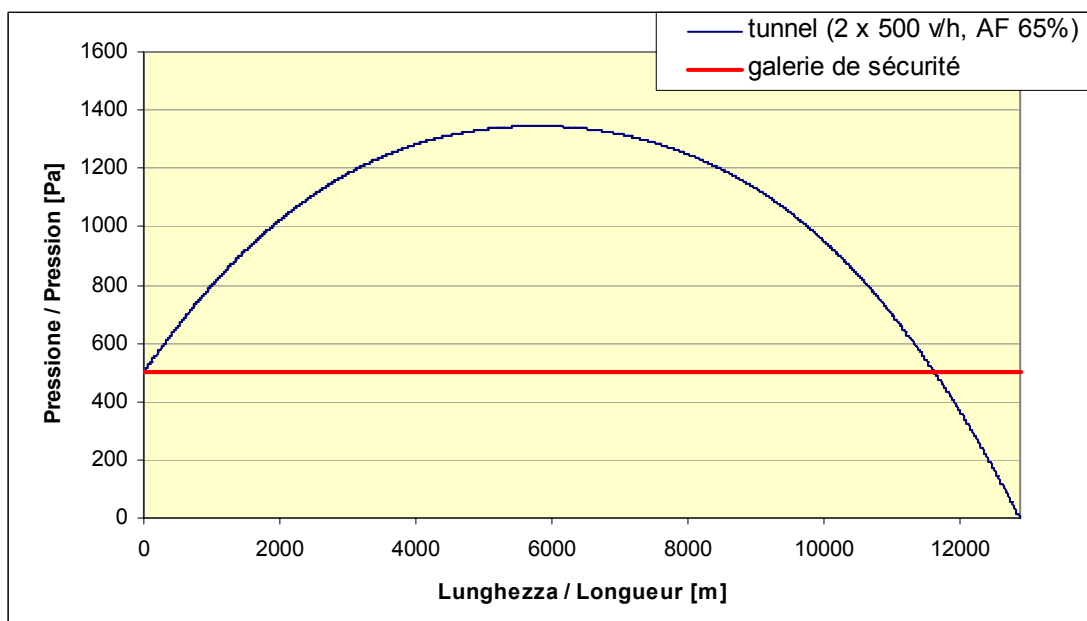
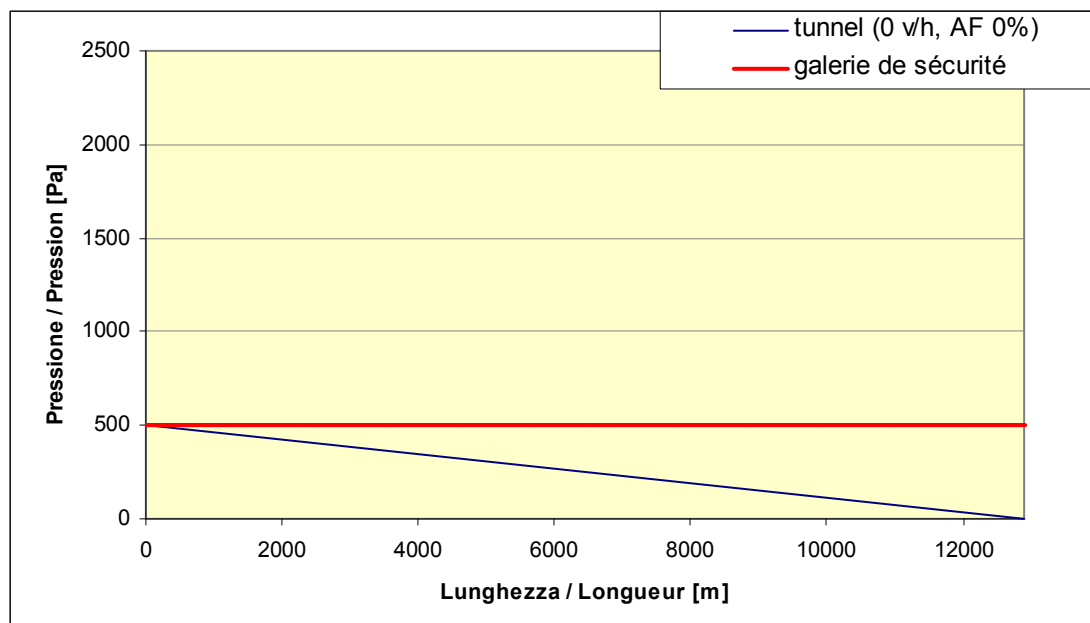


Fig. 4.14: Exploitation normale: Différence de pression maximale considérée entre la galerie et le tunnel en présence d'un gradient atmosphérique de 500 Pa et une porte fermée au portail italien de la galerie.





**Fig. 4.15:** Exploitation sans trafic et la ventilation du tunnel hors service: Différence de pression maximale considérée entre la galerie et le tunnel en présence d'un gradient atmosphérique de 500 Pa et une porte fermée au portail italien de la galerie.

#### 4.2.6 Différence de pression entre galerie et tunnel en cas d'événement dans le tunnel

La différence de pression entre la galerie et le tunnel est étudiée plus en détail pour trois positions représentatives d'événement dans le tunnel:

- demi-distance entre le portail français et la centrale de ventilation souterraine du côté français, environ PM 2'110 m (Position 2 selon [13])
- au milieu du tunnel, environ PM 6'555 m (Position 5 selon [13])
- demi-distance entre le portail italien et la centrale de ventilation souterraine du côté italien, environ PM 10'890 m (Position 8 selon [13])

Les résultats numériques en l'absence d'un gradient de pression atmosphérique entre les portails sont illustrés en Fig. 4.16. Tous les 70 accélérateurs sont gérés de manière à créer une surpression dans la galerie de sécurité par leur mise en service vers le centre de la galerie. Il en résulte une pression maximale d'environ 450 Pa au centre. L'évolution de la pression dans le tunnel pour les trois positions d'événement définies ci-dessus a été reprise du document [5], valables pour des conditions avec contrôle de la vitesse longitudinale. Ce profils représentent les conditions aérauliques stationnaires de désenfumage après atténuation complète des effets transitoires dus au trafic.

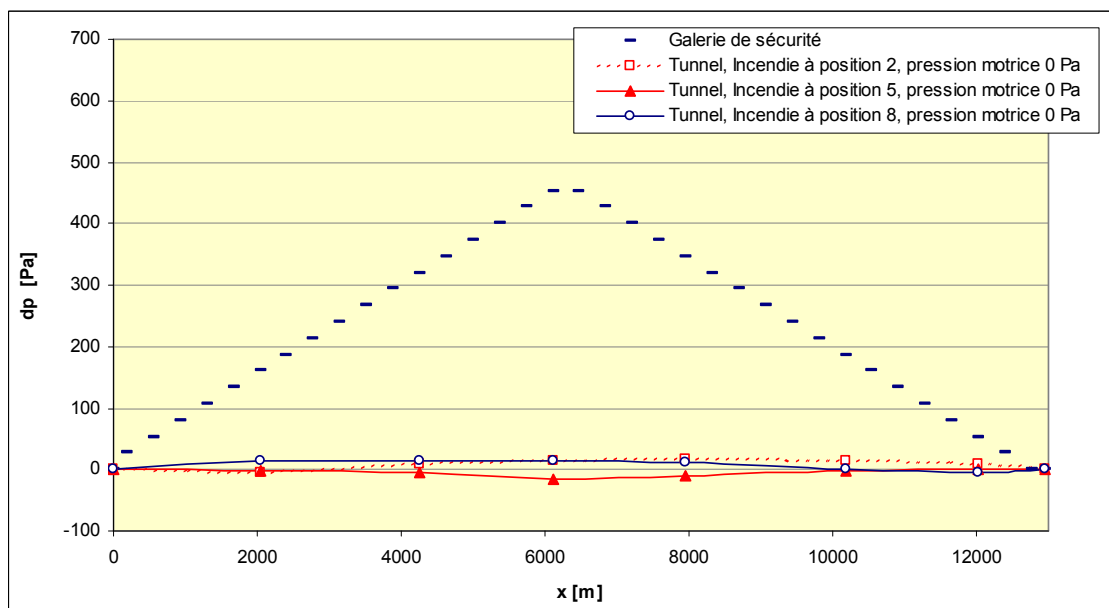


Fig. 4.16: Événement dans le tunnel: Différence de pression entre la galerie et le tunnel en l'absence de gradient atmosphérique (Pression dans le tunnel selon [5]).

Pour toutes les positions d'événement la pression dans la galerie de sécurité sera supérieure à la pression dans le tunnel assurant donc que nulle part l'air du tunnel ou la fumée ne pourrait pénétrer dans la galerie.

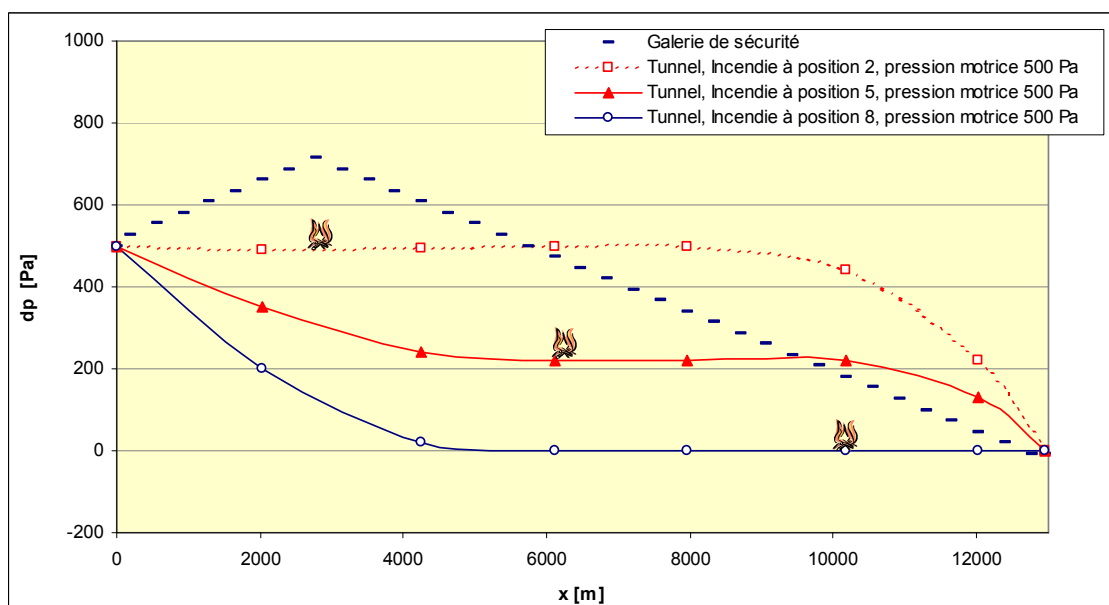
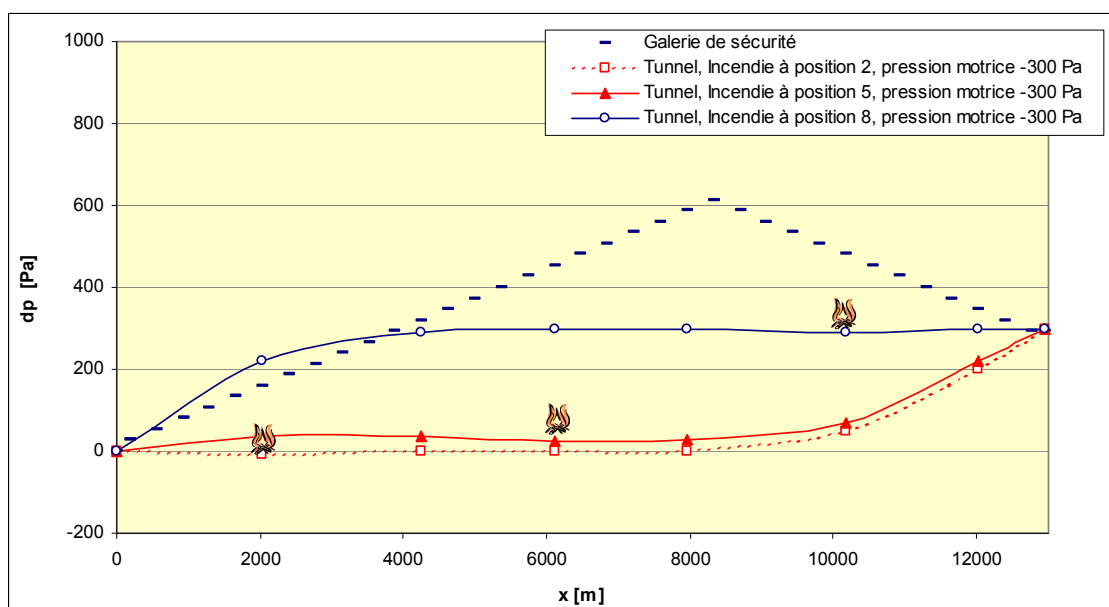


Fig. 4.17: Événement dans le tunnel: Différence de pression entre la galerie et le tunnel en présence d'un gradient atmosphérique de 500 Pa (Pression dans le tunnel selon [5]).

(Ce régime de fonctionnement quasi sans échange d'air avec l'extérieur réchaufferait l'air de la galerie de sécurité par brassage/dissipation. D'une manière pessimiste en conditions adiabatiques, cet échauffement serait de l'ordre de 10°C par heure.)

La Fig. 4.17 montre la situation en présence du gradient de pression atmosphérique le plus haut considéré de 500 Pa (chapitre 3.4). Environ 40 accélérateurs sont utilisés pour balancer cette différence de pression statique, tandis que les autres sont mis en service de manière à créer une surpression vers le portail français. Seulement en cas d'événement proche du portail italien, position 8, la pression dans la galerie sera toujours supérieure à celle dans le tunnel. Pour les autres positions, celle-ci n'est pas toujours le cas, cependant seulement dans une distance importante de l'événement, si par exemple le foyer d'événement se trouve au centre du tunnel à PM 6'555 m, la surpression de la galerie est garantie jusqu'au portail français et pour une distance d'environ 3'000 m du foyer en direction du portail italien. Si par contre le foyer d'événement se trouve vers le portail français (position 2), la surpression de la galerie est garantie pour une distance d'environ 3'500 m du foyer en direction du portail italien.



**Fig. 4.18:** Événement dans le tunnel: Différence de pression entre la galerie et le tunnel en présence d'un gradient atmosphérique de -300 Pa (Pression dans le tunnel selon [5]).

La situation pour le gradient de pression maximal considéré dans le sens inverse de -300 Pa (chapitre 4.2.2) est illustrée en Fig. 4.18. La gestion des accélérateurs ainsi que l'évolution de pression dans la galerie et dans le tunnel sont analogues au cas précédent. A cause de la différence de pression atmosphérique inférieure, par contre, les zones en surpression s'étendent encore plus loin que précédemment pour le cas le plus contraignant avec le foyer d'événement à la position 8, tandis que pour les autres deux positions, la surpression est garantie sur toute la longueur.

Cette évaluation montre donc que le nombre prévu des accélérateurs ou respectivement leur poussée totale est suffisant pour maintenir une sécurité élevée en regard aux voies de secours en cas d'événement.

La différence de pression sur les portes entre les abris et la galerie de sécurité peut atteindre des valeurs de l'ordre de 600-700 Pa (Fig. 4.17) en cas d'incendie dans le tunnel.

Ces portes peuvent être de type coulissant, qui est par exemple utilisé dans le tunnel du St. Gothard avec des différences de pression similaires. Plus de détails sont fournis au chapitre 6.

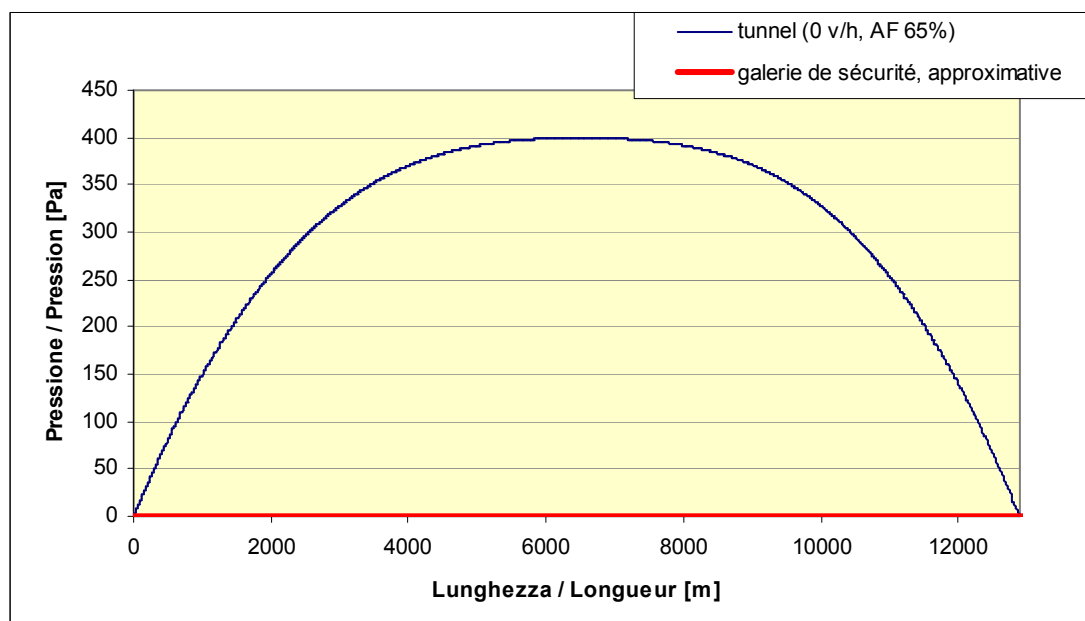


Fig. 4.19: Événement dans la galerie: Différence de pression entre la galerie et le tunnel en l'absence de gradient atmosphérique.

#### 4.2.7 Différence de pression entre galerie et tunnel en cas d'événement dans la galerie

En cas d'incendie dans la galerie de sécurité, le tunnel est pressurisé afin d'empêcher la pénétration des fumées (chapitre 3.8.5). Le niveau de pressurisation maximal atteignable à un débit d'air frais de 65% est illustré en Fig. 4.19 et rejoint donc environ 400 Pa sans différence de pression entre les têtes.

Avec une différence de pression atmosphérique entre les têtes de 500 Pa, l'évolution de pression devient asymétrique comme illustrée en Fig. 4.20. La différence maximale entre les deux tubes reste toutefois d'environ 400 Pa au milieu du tunnel.

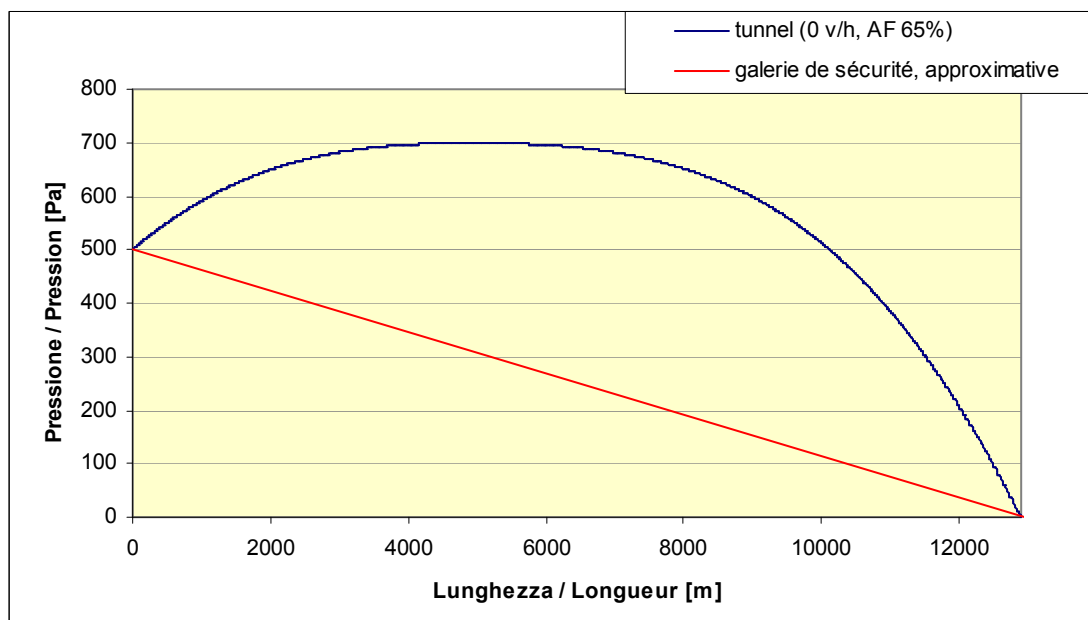


Fig. 4.20: Événement dans la galerie: Différence de pression entre la galerie et le tunnel en présence d'un gradient atmosphérique de 500 Pa.

#### 4.2.8 Ventilation sanitaire

Une qualité suffisante de l'air dans la galerie et dans l'ensemble des stations techniques doit être garantie aussi en cas de circulation des véhicules à l'intérieur de la galerie. Les valeurs limites sont selon [18]:

- CO 50 ppm
- NO<sub>2</sub> 0.4 ppm
- Opacité  $5 \times 10^{-3}$  / m

En outre, la pollution de fond suivante de l'air frais est considérée [18]:

- CO 2 ppm
- NO<sub>2</sub> 0.05 ppm
- Opacité 0.15 x 10<sup>-3</sup> / m

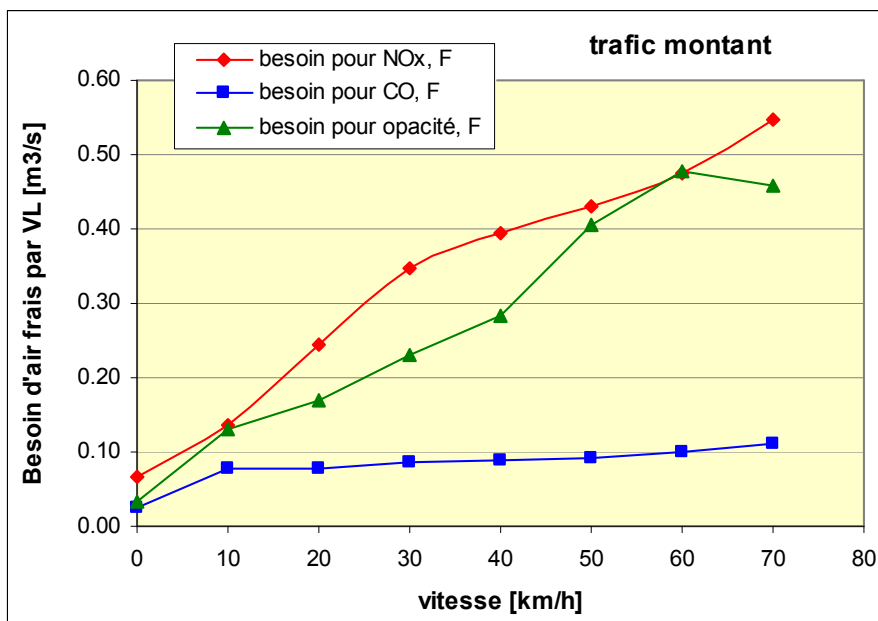


Fig. 4.21: Besoin d'air frais d'un véhicule léger (VL) en 2015 dirigé de France vers Italie selon [18] et [19], taux Diesel environ 60%.

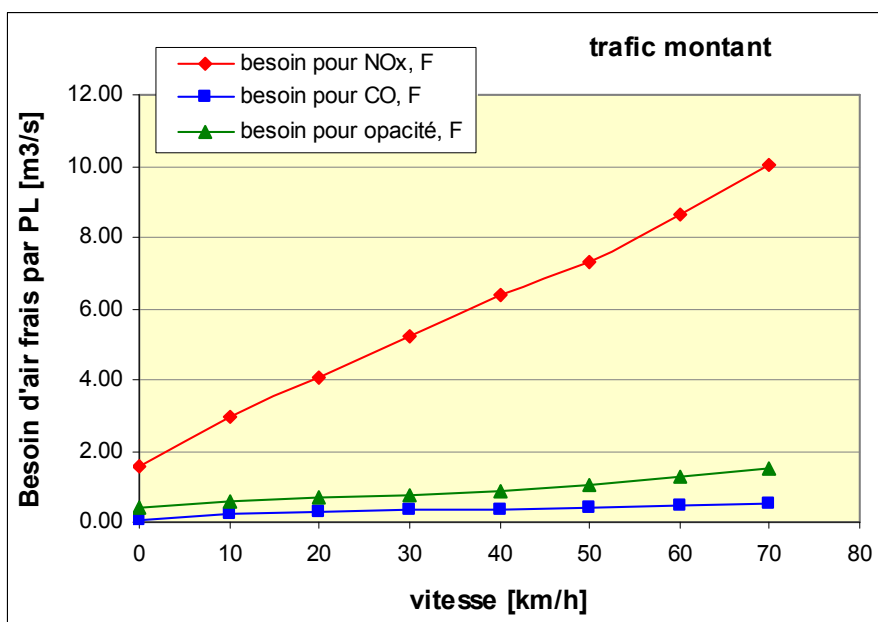


Fig. 4.22: Besoin d'air frais d'un poids lourd (PL) de 10 t en 2015 dirigé de France vers Italie selon [18] et [19].

Les calculs du besoin d'air frais ont été conduits selon la procédure décrite en [19] et les résultats pour les véhicules légers ainsi que les poids lourds sont illustrés en Fig. 4.21 et Fig. 4.22. Généralement déterminant est le besoin d'air pour la dilution de NOx. A une vitesse de 60 km/h, un VL a besoin d'environ 0.5 m<sup>3</sup>/s, tandis que un PL de 10 tonnes requiert 9 m<sup>3</sup>/s.

Sans renforcement de la ventilation dans la galerie avec des accélérateurs, ou dans le cas d'un portail de la galerie fermé, le débit d'air frais en fonctionnement normal de 24.1 m<sup>3</sup>/s (chapitre 4.1) permet donc la présence d'environ 50 VL ou 3 PL dans des conditions défavorables (60 km/h).

Autrement, avec les deux portails ouverts, la puissance et le nombre des accélérateurs installés permettent - en fonction du gradient de la pression atmosphérique entre les portails - d'atteindre une vitesse d'air longitudinale dans la galerie d'environ 4-9 m/s (Fig. 4.23), ce qui correspond à un débit d'air frais de 180-400 m<sup>3</sup>/s.

En cas de présence de véhicules dans la galerie, le système de gestion centralisé (GTC) doit cependant assurer un régime suffisamment élevé de la ventilation, soit en mode automatique basé sur des mesures du degré de pollution, soit en mode manuel.

Pour cela, la qualité d'air est surveillée avec des capteurs de CO et d'opacité au centre de chaque canton et donc en six positions réparties le long de la galerie.

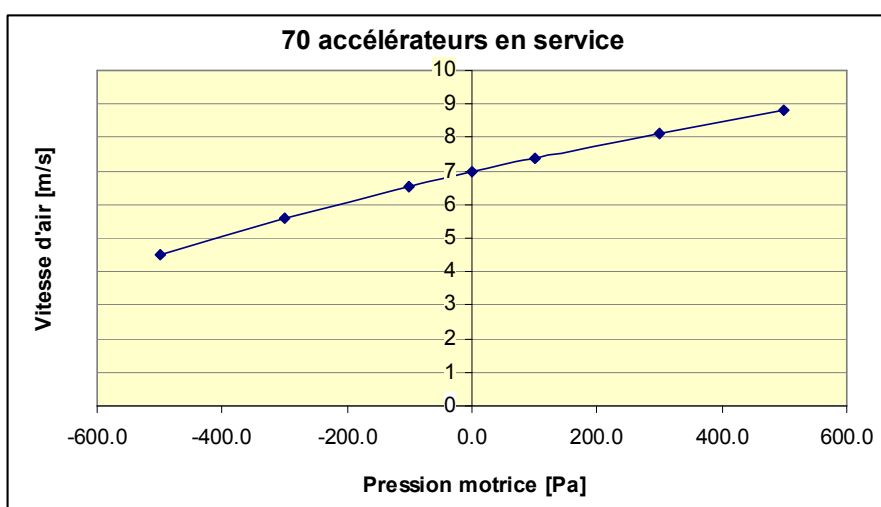


Fig. 4.23: Vitesse d'air maximale dans la galerie de sécurité avec tous les accélérateurs en service.

## 5. PRINCIPES CONSTRUCTIFS

### 5.1 Conditions limites de dimensionnement

Les conditions et paramètres suivants sont considérés lors du dimensionnement de l'équipement:

- |   |                              |
|---|------------------------------|
| – Coefficient de frottement dans la galerie   | $\lambda=0.015$              |
| – Coefficient de perte singulière à l'entrée  | $\zeta_i=0.6$                |
| – Coefficient de perte singulière à la sortie | $\zeta_o=1.0$                |
| – Vitesse du jet d'air des accélérateurs      | $u_{jet}=35 \text{ m/s}$     |
| – Densité d'air dans la galerie               | $\rho_i=1.05 \text{ kg/m}^3$ |

### 5.2 Accélérateurs dans la galerie de sécurité

#### 5.2.1 Concepts généraux

Les accélérateurs dans la galerie de sécurité ont les fonctions suivantes:

- Contrôle de la vitesse longitudinale en exploitation normale, si les deux portails sont ouverts.
- Apport de l'air frais en cas d'une présence élevée de véhicules dans la galerie.
- En cas d'événement dans le tunnel, création d'une surpression dans la galerie, contrôle de la vitesse longitudinale et empêchement d'un court-circuit des fumées entre les portails.
- En cas d'événement dans la galerie de sécurité dans les cantons 1/2 ou 5/6, expulsion des fumées à travers le portail le plus proche avec jusqu'à 3 m/s (régime de ventilation et vitesse d'air selon la présence de personnes dans cet tronçon).
- En cas d'événement dans la galerie de sécurité dans les cantons 2 à 5, apport des fumées au puits le plus proche avec une vitesse d'air jusqu'à 3 m/s en amont du puits et -1 m/s en aval du puits.



## 5.2.2 Les cas d'exploitation des accélérateurs

### 5.2.2.1 Service normal, équilibrage d'un gradient de pression entre les têtes

Pour les accélérateurs en exploitation normale, le système de ventilation est dimensionné d'une manière à maîtriser une différence de pression météorologique entre -300 et 500 Pa (chapitre 3.4). Vu que les accélérateurs sont prévus avec réversibilité de la poussée, c'est la valeur plus grande de 500 Pa qui est déterminante.

La poussée dynamique totale requise est donc:

$$F_{\text{tot},\Delta p}^{\text{dyn}} = \Delta p_{\text{atmos}} \cdot A = 500 \text{ Pa} \cdot 45 \text{ m}^2 = 22'500 \text{ N} \quad \text{val. 5.1}$$

et la poussée statique, tenant compte d'un rendement d'installation de 80%:

$$F_{\text{tot},\Delta p}^{\text{stat}} = \frac{F_{\text{tot},\Delta p}^{\text{dyn}}}{\eta_{\text{install}}} = 28'100 \text{ N} \quad \text{val. 5.2}$$

### 5.2.2.2 Apport d'air frais pour véhicules

Les calculs exposés dans le chapitre 4.2.8 ont démontré que le débit d'air en service normal sans opération des accélérateurs suffit pour garantir la qualité d'air durant des interventions de maintenance, de contrôle et de surveillance. Un dimensionnement spécifique des accélérateurs pour cette tâche n'est donc pas requis.

### 5.2.2.3 Événement dans le tunnel

Dans ce cas, la fonction principale des accélérateurs est de balancer une différence de pression météorologique entre les portails afin d'empêcher une vitesse longitudinale importante dans la galerie et - en cas de risque d'un court-circuit de fumées entre le tunnel et la galerie - de pouvoir établir un flux sortant du portail concerné. En outre, des accélérateurs sont utilisés pour la création d'une surpression vis-à-vis du foyer d'événement.

Avec une vitesse à travers le portail d'environ  $u=0.5$  m/s, les poussées minimales sans réserve pour la création d'une surpression sont alors:

$$F_{\text{tot,cc}}^{\text{dyn}} = \left[ \Delta p_{\text{atmos}} + \frac{\rho}{2} u^2 \left( \zeta_i + \frac{\lambda L}{D_H} + \zeta_o \right) \right] \cdot A = 22'600 \text{ N} \quad \text{val. 5.3}$$

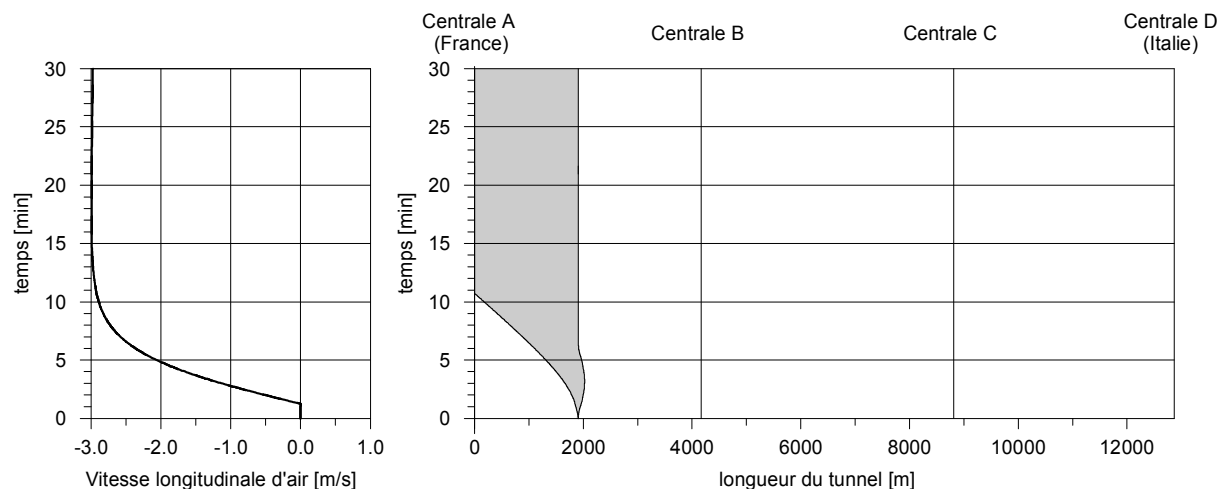
$$F_{\text{tot,cc}}^{\text{stat}} = \frac{F_{\text{tot,cc}}^{\text{dyn}}}{\eta_{\text{install}} \frac{u_{\text{jet}} - u}{u_{\text{jet}}}} = 28'700 \text{ N} \quad \text{val. 5.4}$$

#### 5.2.2.4 Événement dans la galerie proche d'un portail, expulsion des fumées

La vitesse d'expulsion maximale requise est de  $u=3 \text{ m/s}$  (chapitre 4.1.4). Tenant compte d'une différence de pression atmosphérique de  $500 \text{ Pa}$ , d'une différence de température entre la galerie et l'extérieur en hiver de  $dT=25^\circ \text{C}$  et d'un effet de cheminée causé par un événement de  $30 \text{ MW}$ , tous dirigés de la France vers Italie en raison de la déclivité, les poussées dynamique et statique nécessaires sont alors:

$$F_{\text{tot,expul}}^{\text{dyn}} = \left[ \Delta p_{\text{atmos}} + \Delta p_{dT} + \Delta p_{\text{incendie}} + \frac{\rho}{2} u^2 \left( \zeta_i + \frac{\lambda L}{D_H} + \zeta_o \right) \right] \cdot A = 31'800 \text{ N} \quad \text{val. 5.5}$$

$$F_{\text{tot,expul}}^{\text{stat}} = \frac{F_{\text{tot,expul}}^{\text{dyn}}}{\eta_{\text{install}} \frac{u_{\text{jet}} - u}{u_{\text{jet}}}} = 43'500 \text{ N} \quad \text{val. 5.6}$$



- Incendie de  $30 \text{ MW}$  à  $1900 \text{ m}$  du portail francais
- Temps de detection:  $60 \text{ seconds}$
- Expulsion avec  $3 \text{ m/s}$

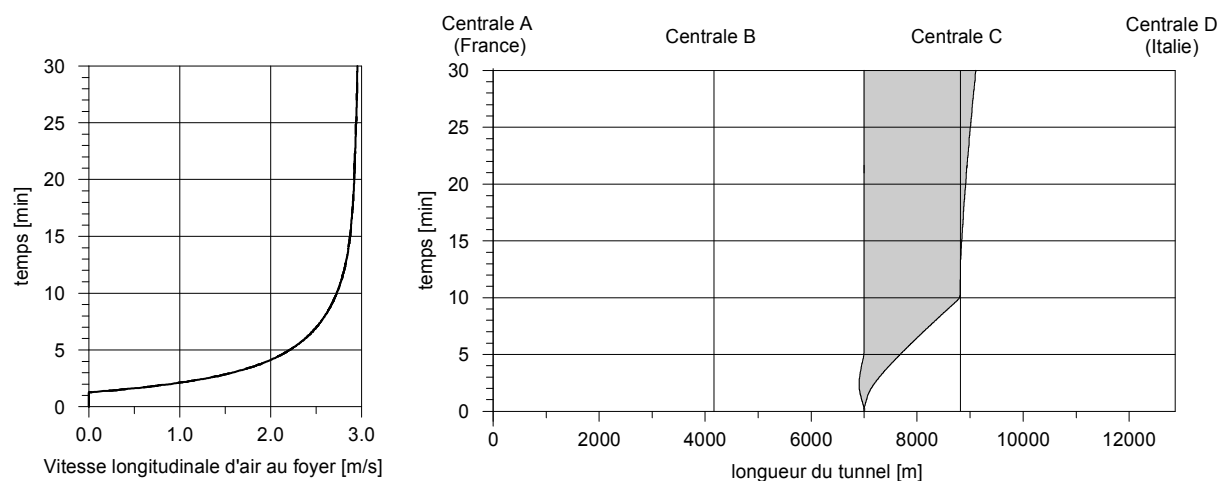
**Fig. 5.1:** Maîtrise d'un événement et désenfumage par expulsion à travers le portail, évolution de la fumée et de la vitesse longitudinale (calcul TunSim 1.5).

L'évolution de la vitesse longitudinale et de la fumée en fonction du temps est représentée en Fig. 5.1 pour ce scénario. En raison de l'inertie importante de la colonne d'air dans la galerie, une vitesse de 2 m/s est atteinte 4 minutes après la mise en service des accélérateurs et la vitesse de 3 m/s après environ 10 minutes.

#### 5.2.2.5 Événement dans la galerie avec extraction massive

La vitesse d'air maximale à atteindre est de 3 m/s en amont du foyer d'événement. Le cas est donc analogue au cas précédent, chapitre 5.2.2.4.

L'évolution de la vitesse longitudinale et de la fumée en fonction du temps est représentée en Fig. 5.2 pour ce scénario.



- Incendie de 30 MW à 7000 m du portail français
- Temps de detection: 60 seconds
- Extraction massive de 180 m<sup>3</sup>/s
- Vitesse 3 m/s en amont et -1 m/s en aval

**Fig. 5.2:** Maîtrise d'un événement et désenfumage par extraction massive, évolution de la fumée et de la vitesse longitudinale (calcul TunSim 1.5).

#### 5.2.3 Caractéristiques techniques requises

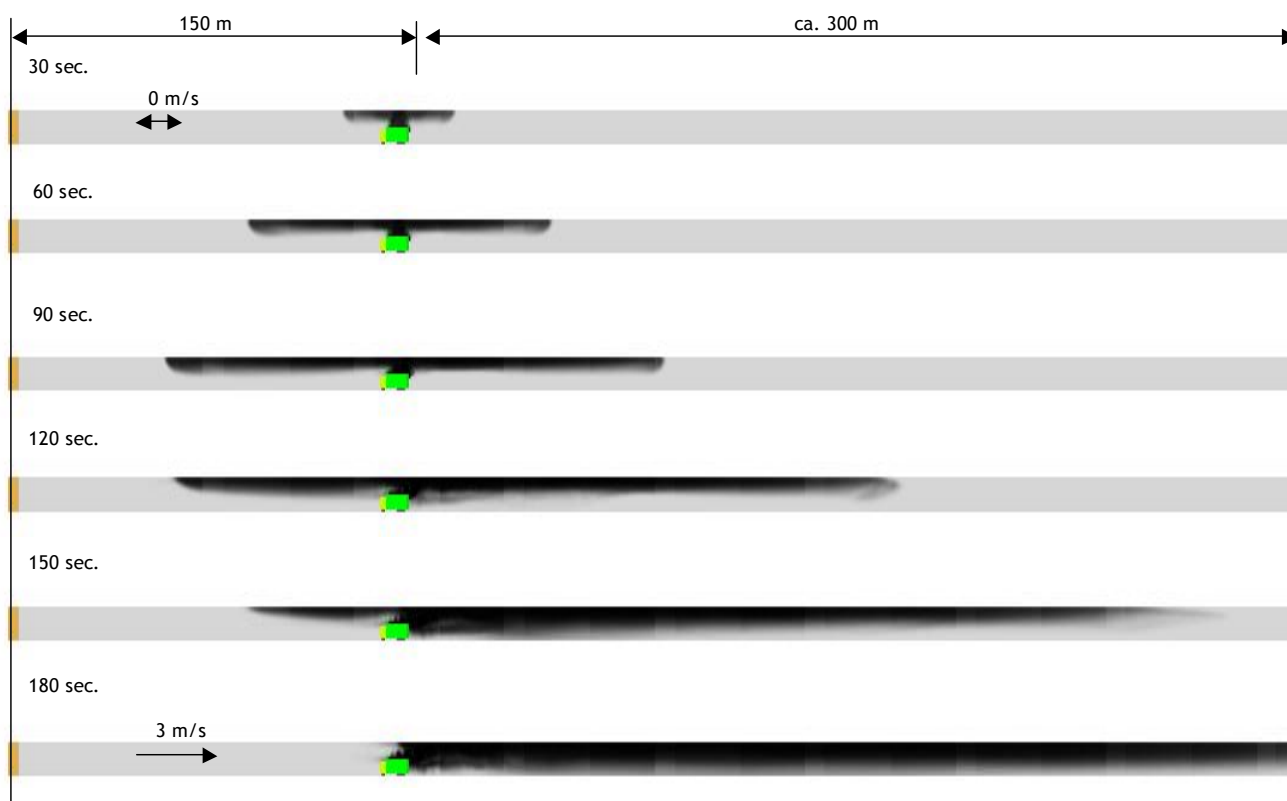
La poussée statique la plus élevée obtenue lors de l'étude des cas de fonctionnement est de 43'500 N (val. 5.6). Cette poussée est nécessaire pour l'expulsion de la fumée à travers le portail français dans les conditions les plus défavorables sans tenir compte d'aucune redondance.

Toutefois, deux aspects doivent être pris en considération:

- La stratification des fumées sous le plafond reste intacte en aval de l'événement pendant un certain temps également en cas de refoulement dans un sens, Fig. 5.3. La mise en service des accélérateurs dans cette zone

enfumée détruirait par contre immédiatement la stratification et rendrait la fuite des usagers ainsi que l'arrivée de secours plus difficile.

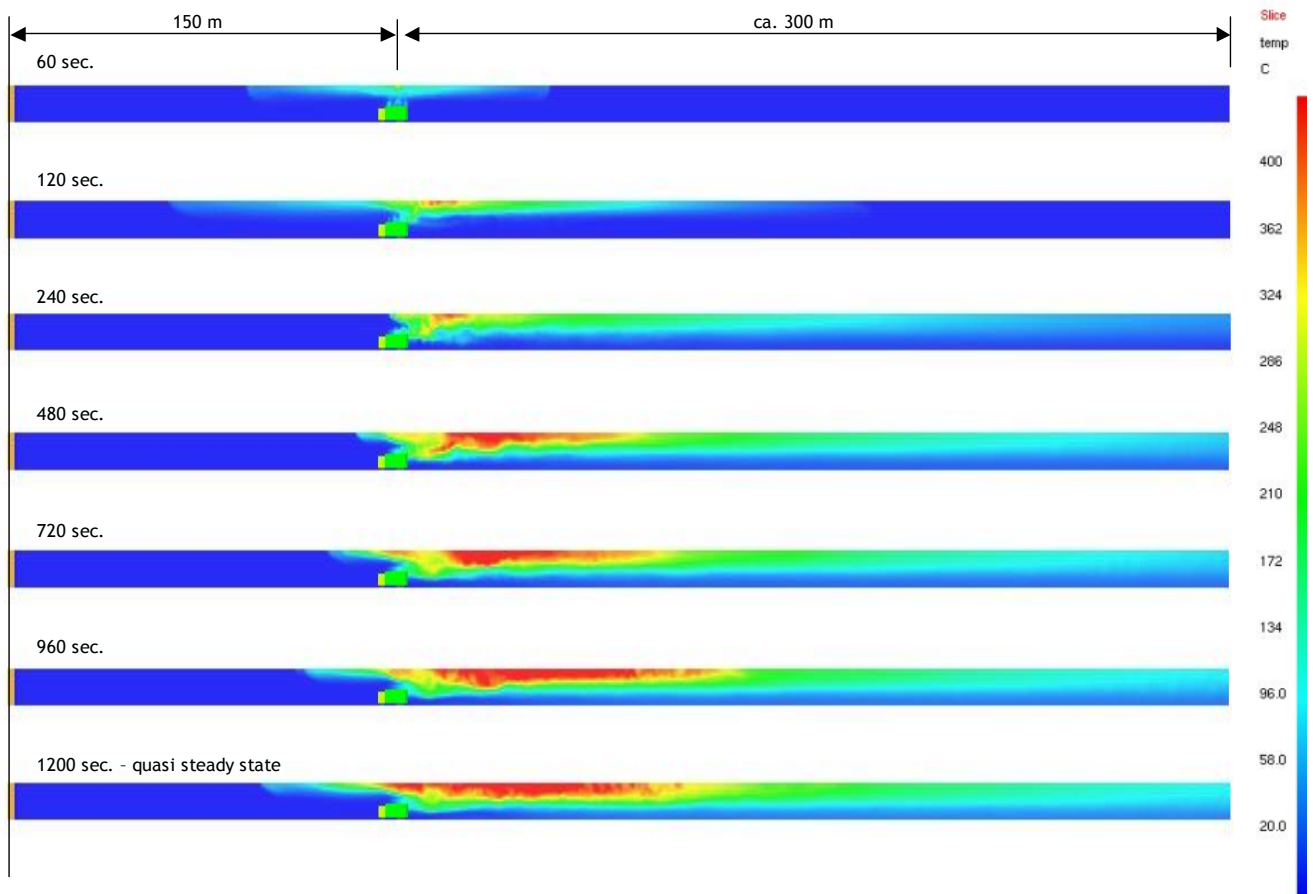
- La température de l'air directement en aval de l'événement peut atteindre plus de 400°C, pendant qu'une zone avec plus de 200°C persiste sur plusieurs centaines de mètres, Fig. 5.4. Des accélérateurs (de résistance conventionnelle à 200°C) dans cette zone seraient donc thermiquement détruits.



Temps de détection	60 seconds	Incendie de 30 MW
Préparation démarrage ventilation	15 seconds	0-100% en 300 seconds, linéaire
Démarrage ventilation 0-100%	60 seconds	

**Fig. 5.3:** Simulation 3D d'un événement de 30 MW dans la galerie de sécurité avec FDS version 4.07 [20]: Evolution de la fumée (rapport hauteur/largeur x 2 pour la visualisation).

Il en résulte alors, que la mise en service des accélérateurs dans le canton concerné de l'événement ne doit pas être prise en considération. La poussée requise doit donc être obtenue par les accélérateurs installés en seulement 5 des 6 cantons. Ceci signifie un facteur de redondance de  $6/5 = 1.2$ .



**Fig. 5.4:** Simulation 3D d'un événement de 30 MW dans la galerie de sécurité avec FDS version 4.07 [20]: Evolution de la température d'air (rapport hauteur/largeur x 2 pour la visualisation).

La poussée statique requise de 43'500 N peut être obtenue avec différentes configurations des accélérateurs, par exemple:

Diamètre extérieur	Poussée statique unitaire	Nombre pour 43'500 N	Nombre avec redondance
800 mm	450 N	97	116
1000 mm	750 N	58	70
1200 mm	1000 N	44	53
1500 mm	1500 N	29	35

**Tab. 5.1:** Configurations des accélérateurs

Selon la géométrie de la galerie de sécurité, Fig. 2.2, deux accélérateurs avec un diamètre extérieur de 1'000 mm pourraient être accommodés en couple dans une

section type en respectant les distances recommandées vers le plafond, entre les deux appareils et vers le gabarit [16]. Les caractéristiques techniques de ces appareils sont résumées dans le Tab. 5.2. Une totalité de 70 accélérateurs serait requise. En les installant en couples de deux, il y aurait donc 35 couples, qui pourraient être installés chaque fois à mi-distance entre les 34 abris. Ce choix de mi-distance assure qu'il n'y ait pas d'influence significative du champ de pression des accélérateurs sur les portes entre les abris et la galerie et empêche leurs jets de déranger le service de secours en cas de nécessité.

Un diamètre inférieur requerrait un nombre d'appareils sensiblement plus important de 116 appareils et nécessiterait pour cette raison des ressources plus importants pour leur installation (câblage, connecteurs, PLC).

Un diamètre extérieur de 1'200 mm n'autoriserait par contre l'installation que d'un seul accélérateur à la fois, vu les dimensions d'un couple d'accélérateurs. Le nombre des endroits de montage serait alors plus élevé que pour la solution par couples avec 53 au lieu de 35 positions.

Le nombre idéal d'appareils serait de 35 accélérateurs avec un diamètre extérieur de 1'500 mm. Cette dimension importante ne s'intègre toutefois plus dans la section de la galerie de sécurité en maintenant les distances minimales du gabarit et du plafond.

La solution consistant en 35 couples d'accélérateurs et un diamètre extérieur de 1'000 mm est donc retenue.

Les accélérateurs disposeront de capteurs standards, comprenant en particulier:

- Mesure de vibration;
- Détection de chute et disjonction automatique de l'alimentation électrique;
- Mesure de température, tension et courant des moteurs.

Depuis la GTC il sera possible de visualiser tous les paramètres des accélérateurs et de les enclencher dans un sens de rotation désiré ou bien de les désenclencher.

Nombre requis	58
- avec redondance ([1] chapitre 3.2.2a)	70 <b>6 pairs pour 2 km</b>
Direction de poussée	reversibel
Distance entre pairs	370 m
Poussée statique	750 N
Tension	400 V
Puissance	25 kW
Diamètre extérieur	1000 mm
Diamètre roue	800 mm
Longueur (75 dB(A) 10m 45°)	3800 mm
Resistance thermique à 200°C	120 min
Protection contre la chute 450°C	120 min

**Tab. 5.2:** Caractéristiques techniques des accélérateurs, prescriptions thermiques selon [1], chapitre 4.4.2a.

#### 5.2.4 Alimentation électrique

L'alimentation électrique est dérivée par le réseau normal, avec connexion au tableau basse tension TGBT des ST, prévu par l'équipement d'alimentation électrique (voir dossier 6145.2-R-14A).

Le système de distribution électrique prévoit l'alimentation des accélérateurs impairs par le réseau HT 20kV EDF, dans les stations techniques impaires, tandis que les accélérateurs pairs seront alimentés par le réseau HT 20kV ENEL, dans les stations techniques paires.

Une redondance complète de l'alimentation électrique est assurée aussi bien en cas de panne sur un des deux réseaux HT qu'en cas de panne au niveau basse tension, par un système de connexion prévu entre le TGBT de la ST pair et le TGBT de la ST impair.

Cette solution prévoit, pour chaque TGBT, deux interrupteurs généraux, dont un normalement fermé sur les barres de distribution (DG) et un supplémentaire normalement ouvert (DS), prédisposé pour le couplage avec le TGBT de la ST adjacente.

L'interrupteur supplémentaire du TGBT installé dans la ST impaire sera connecté à celui du TGBT installé dans la ST paire correspondante. En cas de hors service d'un transformateur, il est prévu la fermeture manuelle locale et/ou à distance des deux DS, selon confirmation donnée par l'ouverture du dispositif de protection installé en amont du transformateur hors service. Cette manœuvre permet d'alimen-

ter les TGBT des deux ST par le transformateur resté en service, en limitant le manque d'alimentation des installations à un délai de quelques secondes.

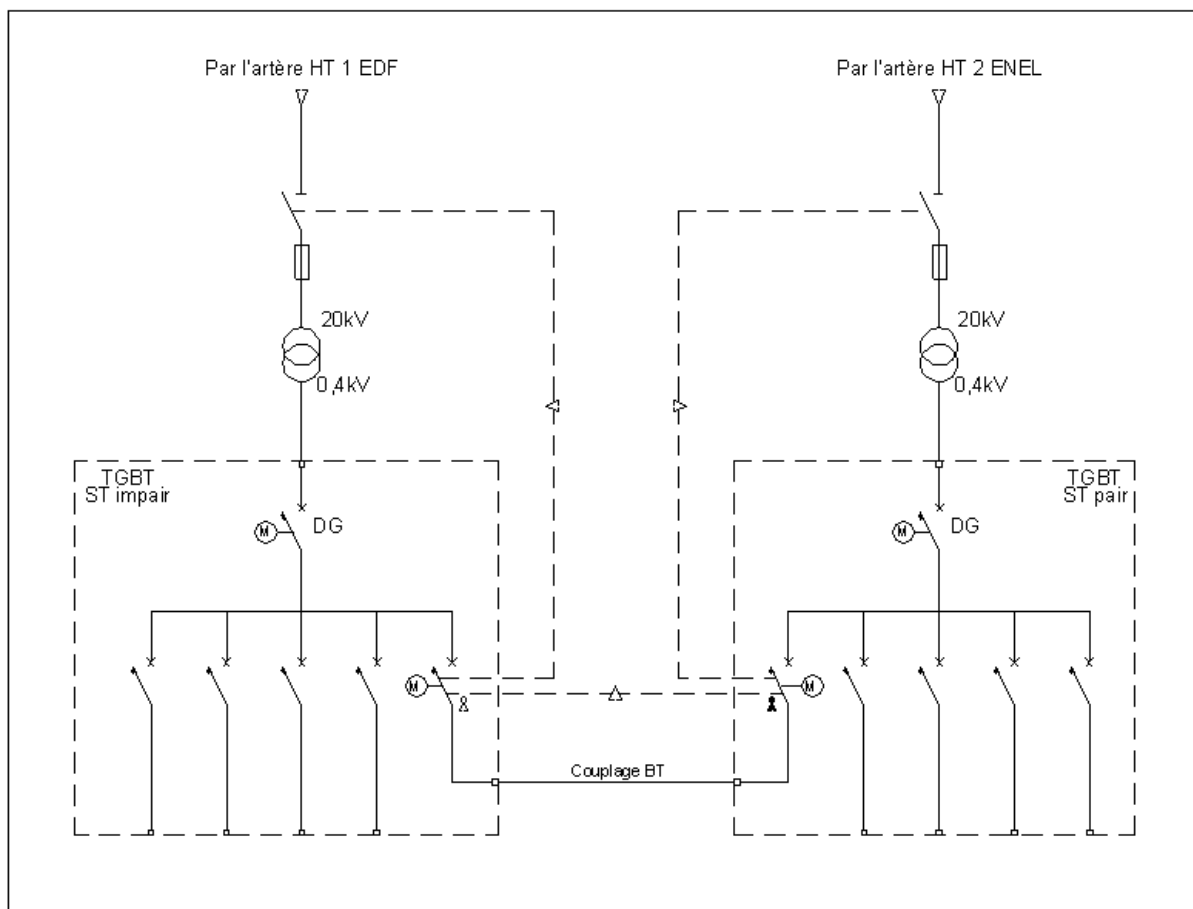


Fig. 5.5: Couplage au niveau BT - Schéma unifilaire

Les DS seront électriquement bloqués avec les dispositifs de protection côté HT correspondants installés immédiatement en amont, au but d'éviter la fermeture en court circuit entre les secondaires des transformateurs HT/BT.

Une commande manuelle des interrupteurs supplémentaires sera possible seulement par un système de manœuvres avec clés bouclées, nécessaire pour éviter la fermeture simultanée des DS pendant le fonctionnement en configuration normale.



## 5.3 Ventilateurs d'extraction massive

### 5.3.1 Concepts généraux

En cas d'événement dans la galerie de sécurité (chapitre 3.8.5), le désenfumage de la galerie peut être effectué par une extraction massive des fumées. Pour ce faire, deux nouvelles centrales de ventilation (E et F) sont prévues à proximité des usines souterraines existantes B et C utilisant les mêmes puits que ces dernières (Fig. 5.6 et Fig. 5.7).

Le débit d'extraction maximale se monte à  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ , ce qui correspond à une vitesse d'air du débit affluent du foyer d'événement de  $3 \text{ m/s}$  et de  $1 \text{ m/s}$  dans la direction opposée.

Une variante avec raccordement de la galerie de sécurité aux ventilateurs existants des usines de ventilation B & C a été aussi étudiée. Cependant cette solution n'a pas pu être retenue, car il en résultait un impact important mais incontournable sur l'exploitation du tunnel durant la phase de construction pour une durée prolongée. En effet, la jonction d'une galerie de raccordement aux canaux en amont des ventilateurs ou bien à la gaine d'air vicié en tunnel est une opération très délicate, entre autre parce que les ancrages existants doivent être partiellement enlevés et parce que le percement doit être soigneusement préparé et sécurisé.

Suite à la non-disponibilité des centrales de désenfumage durant la phase de raccordement, une fermeture du tunnel au trafic pour une certaine période aurait été donc nécessaire. Une telle mesure était toutefois jugée inacceptable par le maître d'ouvrage.

### 5.3.2 Redondance

Chaque centrale sera dotée de deux ventilateurs afin de garantir une certaine redondance en cas de défaillance d'un appareil et pour faciliter l'entretien et la maintenance sans devoir renoncer durant cette période à la possibilité d'un désenfumage en cas d'événement. En absence d'un critère de redondance réglementaire en France, la recommandation de la directive suisse est alors adoptée [16], qui demande, qu'en cas de fonctionnement d'un seul ventilateur, un débit d'aspiration de 65% doit être obtenu. Cette valeur correspond alors à  $117 \text{ m}^3/\text{s}$  de débit pour un ventilateur isolé.

Pour garantir une sûreté élevée de fonctionnement, la redondance de l'alimentation électrique des ventilateurs est aussi prévue. Dans chaque centrale, les ventilateurs peuvent donc être alimentés par le réseau EDF et/ou le réseau ENEL.

### 5.3.3 Résistance thermique et refroidissement moteur

Au vu des contraintes spatiales et pour consentir une maintenance aisée, les ventilateurs seront installés à proximité de la galerie de sécurité et donc près du point d'extraction massive. En cas d'un événement à proximité de cette centrale, les ventilateurs risquent d'être exposés à des températures d'air élevées (Fig. 5.4). Dans une telle situation, la Circulaire française ([1], chapitre 4.4.2b) requiert une résistance thermique particulière, qui garantit le bon fonctionnement des ventilateurs durant 120 minutes à 400 °C.

Typiquement, les ventilateurs répondant à cette exigence disposent d'un système de refroidissement à air. Aucun ventilateur avec un refroidissement à eau certifié pour 400 °C n'est actuellement disponible sur le marché.

Pour le refroidissement à air, un ventilateur auxiliaire fait circuler l'air frais à travers la boîte et la cage du moteur du ventilateur. Puisque l'aspiration de l'air frais et propre depuis l'extérieur en cas d'événement dans la galerie n'est guère possible dans les nouvelles centrales souterraines d'extraction massive (impossible depuis la galerie à cause de l'événement ; air du tunnel n'est pas propre ; la prise d'air par le canal d'air frais du tunnel est problématique), un système combiné avec refroidissement secondaire à l'eau du circuit d'air dans un radiateur est adopté.

Pour un ventilateur d'extraction massive avec un moteur électrique de 650 kW, le ventilateur auxiliaire aura un débit d'environ 2 m<sup>3</sup>/s et absorbera une puissance électrique d'environ 4 kW.

Un moteur de 650 kW a un rendement électrique d'environ 95%, c'est-à-dire qu'environ 30 kW sont dissipés et nécessitent un refroidissement. L'air de refroidissement se réchauffera donc d'environ  $dT=15^{\circ}\text{C}$ . L'échangeur de chaleur air/eau est alimenté le circuit de l'eau de refroidissement (chapitre 5.6.3).

L'alimentation électrique du moteur d'un ventilateur d'extraction massive dépend indirectement aussi de l'exigence thermique. En effet, un moteur de la puissance



La température moyenne au niveau des ventilateurs peut être estimée pour la puissance d'incendie de 30 MW (chapitre 3.3) et en considérant que 1/3 de la puissance est transmise directement aux parois par rayonnement. Le réchauffement de l'air à un peu de distance du foyer d'incendie est donc déterminé par l'emport convectif de la chaleur:

$$\frac{2}{3} Q_{\text{incendie}} = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot dT$$

$$dT \approx 100^\circ\text{C} \quad \text{et donc} \quad T \approx 125^\circ\text{C}$$

La densité du gaz à une température d'environ 125°C descend alors à 0.79 kg/m<sup>3</sup> (1.05 kg/m<sup>3</sup> à 25°C), ce qui équivaut à une augmentation du débit volumétrique des ventilateurs de 1/3 afin de maintenir le débit massique requis.

Cette prise en considération de la dégradation du fonctionnement à température élevée est d'ailleurs cohérente avec la directive suisse, qui impose une augmentation du débit volumétrique à froid par un facteur de 1.3 pour le dimensionnement d'un ventilateur admis jusqu'à 400°C [16].

La perte de charge globale dans le système des galeries est considérée inaltérée par la température, ce qui n'est pas tout à fait correct à débit massique constant, vu que la vitesse augmente au carré alors que la densité diminue seulement d'une manière linéaire. Toutefois l'impact de la température est généralement limité à la zone immédiatement en aval du foyer d'incendie dû à un refroidissement rapide du gaz par échange de chaleur avec les parois (voir aussi Fig. 5.4), limitant donc l'augmentation de la résistance aéraulique.

Le fonctionnement parallèle de l'usine de ventilation existante avec la nouvelle centrale de ventilation est pris en considération afin de permettre la maîtrise de la vitesse longitudinale dans le tunnel par extraction d'air durant un événement dans la galerie et pour pouvoir maîtriser dans le futur des événements simultanément dans le tunnel et dans la galerie.

L'impact sur la perte de charge est de taille, parce que les deux centrales partagent un puits commun, qui est alors à l'origine d'une résistance aéraulique importante en cas du fonctionnement simultané. On considère qu'au maximum un ventilateur d'air vicié est en service par canton dans l'usine existante avec un débit

maximal unitaire de 130 m<sup>3</sup>/s, comme exposé en [13]. Le débit total de l'usine existante se monte donc à 260 m<sup>3</sup>/s avec deux ventilateurs en service.

Bien entendu, les ventilateurs existants des usines B et C ne sont actuellement pas en mesure de travailler à plein régime ensemble avec les nouvelles centrales d'extraction massive. Un fonctionnement en parallèle à haut débit reste donc réservé à l'avenir après un renforcement des usines existantes.

Selon la Tab. 5.3 la puissance la plus élevée requise par ventilateur est de 586 kW sans réserve. On ajoute donc une réserve habituelle d'environ 10%, ce qui porte la puissance installée par ventilateur dans la centrale E à 650 kW.

Les dimensions et données techniques approximatives seront:

Diamètre de la roue:	1'800 mm
Diamètre du moyeu:	1'250 mm
Diamètre du diffuseur:	2'300 mm
Longueur entre buse d'entrée et diffuseur:	7'000 mm
Poids:	15'000 kg
Numéro de tours:	1'470 1/min
Puissance électrique:	650 kW

Régime de fonctionnement (vitesse d'air en galerie en cas d'extraction massive)	Débit volumétrique d'extraction massive à 1.05 kg/m <sup>3</sup>	Débit volumétrique d'extraction massive à 0.79 kg/m <sup>3</sup>	Débit usine B existante	Rapport de pression totale	Puissance (rendement électrique/aéraulique 75%)	Fiche de calcul en Annexe
2 ventilateurs (3 m/s et 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	3'664 Pa	2 x 586 kW	Tab. 11.1
2 ventilateurs (3 m/s et 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	1'300 Pa	2 x 208 kW	Tab. 11.2
2 ventilateurs (1.5 m/s et 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	2'306 Pa	2 x 230 kW	Tab. 11.3
2 ventilateurs (1.5 m/s et 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	508 Pa	2 x 51 kW	Tab. 11.4
1 ventilateur (3 m/s et 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	2'542 Pa	1 x 529 kW	Tab. 11.5
1 ventilateur (3 m/s et 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	707 Pa	1 x 147 kW	Tab. 11.6

**Tab. 5.3:** Points de fonctionnement pour les ventilateurs d'extraction massive de la nouvelle centrale E.



Régime de fonctionnement (vitesse d'air en galerie en cas d'extraction massive)	Débit volumétrique d'extraction massive à 1.05 kg/m <sup>3</sup>	Débit volumétrique d'extraction massive à 0.79 kg/m <sup>3</sup>	Débit usine C existante	Rapport de pression totale	Puissance (rendement électrique/aérodynamique 75%)	Fiche de calcul en Annexe
2 ventilateurs (3 m/s et 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	2'130 Pa	2 x 341 kW	Tab. 11.7
2 ventilateurs (3 m/s et 1 m/s)	2 x 90.0 m <sup>3</sup> /s	2 x 120 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	1'036 Pa	2 x 166 kW	Tab. 11.8
2 ventilateurs (1.5 m/s et 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	1'291 Pa	2 x 129 kW	Tab. 11.9
2 ventilateurs (1.5 m/s et 1 m/s)	2 x 56.5 m <sup>3</sup> /s	2 x 75 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	390 Pa	2 x 39 kW	Tab. 11.10
1 ventilateur (3 m/s et 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	260 m <sup>3</sup> /s	1'496 Pa	1 x 311 kW	Tab. 11.11
1 ventilateur (3 m/s et 1 m/s)*0.65	1 x 117.0 m <sup>3</sup> /s	1 x 156.0 m <sup>3</sup> /s	0 m <sup>3</sup> /s	579 Pa	1 x 120 kW	Tab. 11.12

**Tab. 5.4:** Points de fonctionnement pour les ventilateurs d'extraction massive de la nouvelle centrale F.

Les dimensions et données techniques approximatives seront:

Diamètre de la roue:	1'800 mm
Diamètre du moyeu:	1'250 mm
Diamètre du diffuseur:	2'300 mm
Longueur entre buse d'entrée et diffuseur:	7'000 mm
Poids:	15'000 kg
Numéro de tours:	1'470 1/min
Puissance électrique:	650 kW

### 5.3.6 Réglage

La variation du régime de fonctionnement des ventilateurs s'effectuera avec des pales réglables en marche afin de permettre le démarrage d'un ventilateur aussi en présence d'une contre-pression statique déjà régnante. Cette condition peut survenir dans différentes situations:

- Un ou deux des ventilateurs de l'usine existante sont en service créant une surpression dans la galerie au pied du puits.

- Le ventilateur jumeau est déjà en service.
- En été, quand il fait plus chaud à la tête du puits que dans la galerie, un effet de cheminée renversée est à l'origine d'une pression statique au pied du puits.

En outre, les ventilateurs seront dotés de moteurs à deux vitesses de rotation afin de pouvoir atteindre tous les points de fonctionnement avec un rendement aérodynamique raisonnable. Le choix de ces deux vitesses est fait de manière à ce qu'environ 50% du débit maximal puisse être atteint à petite vitesse, ce qui assure une plage de fonctionnement assez vaste et ceci à haut rendement aérodynamique.

### *5.3.7 Silencieux*

Comme exposé dans le chapitre précédent, les ventilateurs seront installés près de la galerie de sécurité. En l'absence de contre mesure, l'exposition aux bruits dans la galerie serait donc extrêmement élevée, raison pour laquelle un silencieux est prévu en amont de chaque ventilateur, réduisant le niveau sonore à un niveau encore supportable sans protection spécifique d'environ 75-80 dB(A).

L'exigence thermique de 120 minutes à 400°C pour le silencieux est la même que pour le ventilateur, vu qu'une défaillance du silencieux endommagerait ou mettrait hors fonctionnement ce dernier.

### *5.3.8 Registres de ventilateur*

Chaque ventilateur est équipé de deux registres motorisés, un en amont et un en aval.

Le fait d'installer deux registres donne une sécurité élevée quant à la séparation des deux branches aérodynamiques de l'usine de ventilation existante et de la nouvelle centrale d'extraction massive, qui ont comme tronçon commun le puits d'air vicié. Similairement aux ventilateurs et silencieux, ces registres sont également dimensionnés pour 120 minutes à 400°C.



### 5.3.9 *Equipment de montage et maintenance*

#### 5.3.9.1 *Cric sur monorail*

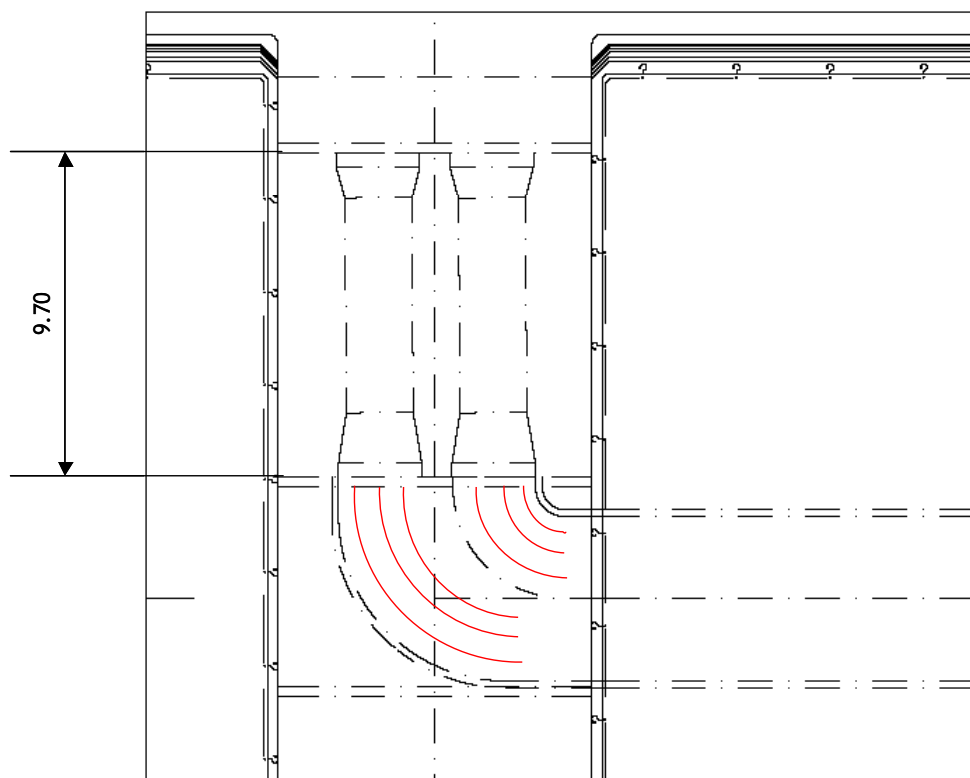
Chaque emplacement de montage d'un ventilateur est muni d'un cric sur monorail monté en voûte, qui permet de monter/descendre le ventilateur et ses accessoires (registres, système hydraulique, etc.).

#### 5.3.9.2 *Trappe sous ventilateur*

Chaque ventilateur est levé depuis le niveau de la chaussée à son emplacement de montage à travers une ouverture dans le faux plafond. Cette ouverture est ensuite fermée avec une trappe métallique, pivotée en position de fermeture à l'aide du cric.

#### 5.3.10 *Déфлекteurs*

En aval de chaque ventilateur, le courant d'air doit suivre un coude de 90° avant d'entrer dans la galerie de raccordement. Afin de limiter la perte de charge à cet endroit, des déflecteurs métalliques sont prévus.



**Fig. 5.8:** Déфлекteurs en aval des ventilateurs.

### 5.3.11 *Equipment de contrôle*

Les ventilateurs disposeront de capteurs standards, comprenant en particulier:

- Mesure de débit, pression et température d'air;
- Mesure de vibration;
- Détection d'instabilité aérodynamique;
- Mesure de température, tension et courant des moteurs.

Depuis la GTC il sera possible de visualiser tous les paramètres des ventilateurs et de commander:

- Le débit des ventilateurs;
- La vitesse des ventilateurs;
- L'angle des pales des ventilateurs;
- L'ouverture et la fermeture des trappes.

### 5.3.12 *Raccordement à l'usine B existante*

Comme illustré en Fig. 5.6, la nouvelle centrale d'extraction massive E sera raccordée au puits de l'usine B existante.

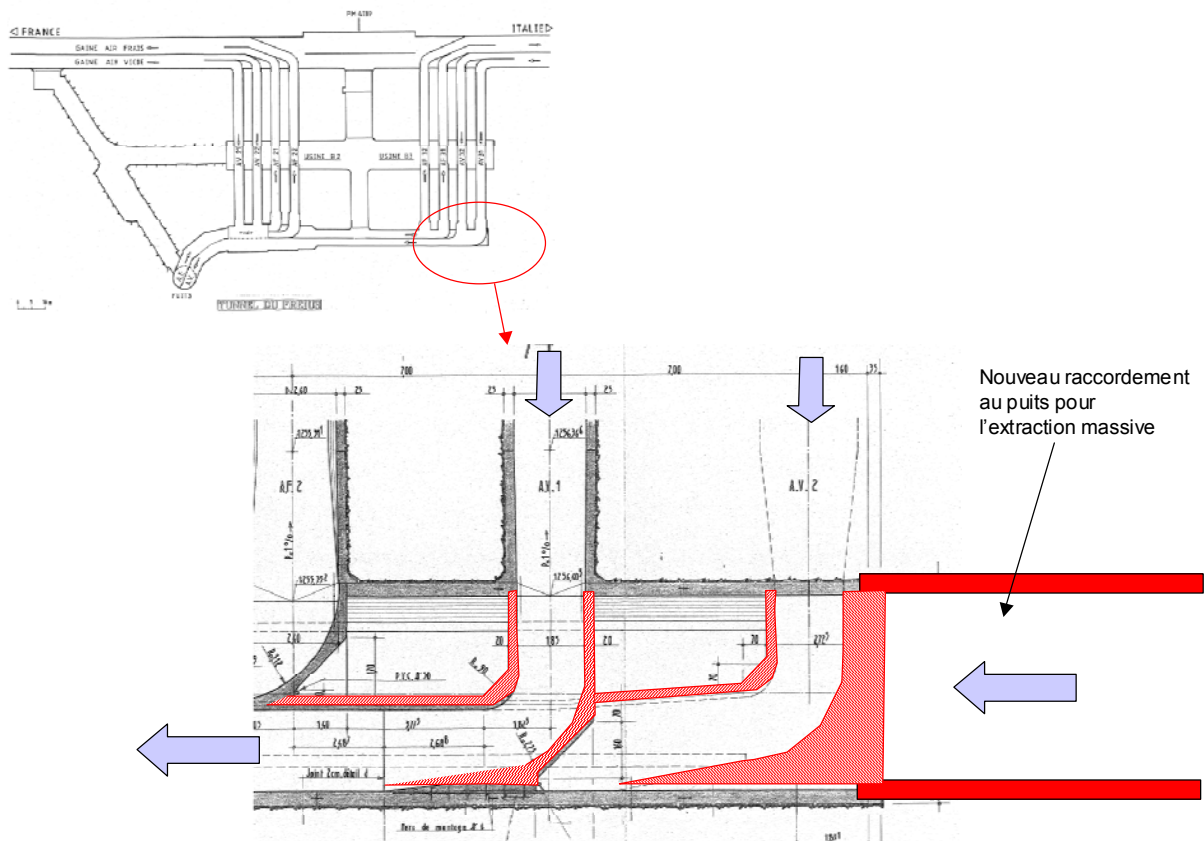


Fig. 5.9: Détail du raccordement de l'extraction massive à la galerie en pied de puits de l'usine B.

Ceci nécessite la démolition des canaux et courbes faisant actuellement la liaison entre les deux ventilateurs d'air vicié du côté est de l'usine et la galerie au pied de puits. La Fig. 5.9 fait apparaître les parois qui doivent être éliminées pour ce faire (hachures en rouge). Il va de soi que cette modification augmente la perte de charge des ventilateurs de l'usine B existante. Selon une estimation de premier ordre, la résistance aéraulique augmentera à plein régime d'un ventilateur (130 m<sup>3</sup>/s) d'environ 300-400 Pa, quand la centrale d'extraction massive est hors service.

Selon la réserve de fonctionnement encore disponible pour ces ventilateurs existants, une réduction de débit pour les scénarios de désenfumage dans le tunnel pourrait s'ensuivre.

Une intervention de cette envergure n'est pas requise pour l'usine C, parce que le raccordement peut être réalisé directement en amont du puits d'air vicié, Fig. 5.7.

### 5.3.13 Alimentation électrique

Pour l'alimentation et la protection électrique de chaque ventilateur, un tableau de ventilation TVGE associé à un variateur de fréquence (convertisseur) nécessaire au réglage de la vitesse de rotation du ventilateur sera installé.

Le système de distribution électrique prévoit l'alimentation d'un ventilateur par le réseau HT 20kV EDF, dans la station technique impaire (ST07 de l'usine E et ST13 dans l'usine F), tandis que l'autre ventilateur sera alimenté par le réseau HT 20kV ENEL, dans la station technique paire (ST14 dans l'usine E et ST08 dans l'usine F).

Une redondance complète de l'alimentation électrique est assurée aussi bien en cas de panne sur un des deux réseaux HT qu'en cas de panne au niveau basse tension, par un système de connexion prévu entre les tableaux TGVE des deux ventilateurs situés dans la même usine.

Cette solution prévoit, pour chaque TGVE, deux interrupteurs généraux, dont un normalement fermé sur les barres de distribution (DG) et un supplémentaire normalement ouvert (DS), prédisposé pour le couplage avec le TGVE de la ST adjacente.

L'interrupteur supplémentaire du TGVE installé dans la ST impaire sera connecté à celui du TGVE installé dans la ST paire correspondante. En cas de hors service d'un transformateur, il est prévu la fermeture manuelle locale et/ou à distance des deux DS, selon confirmation donnée par l'ouverture du dispositif de protection installé en amont du transformateur hors service. Cette manœuvre permet d'alimenter les TGVE des deux ST par le transformateur resté en service, en limitant le manque d'alimentation des installations à un délai de quelques secondes.

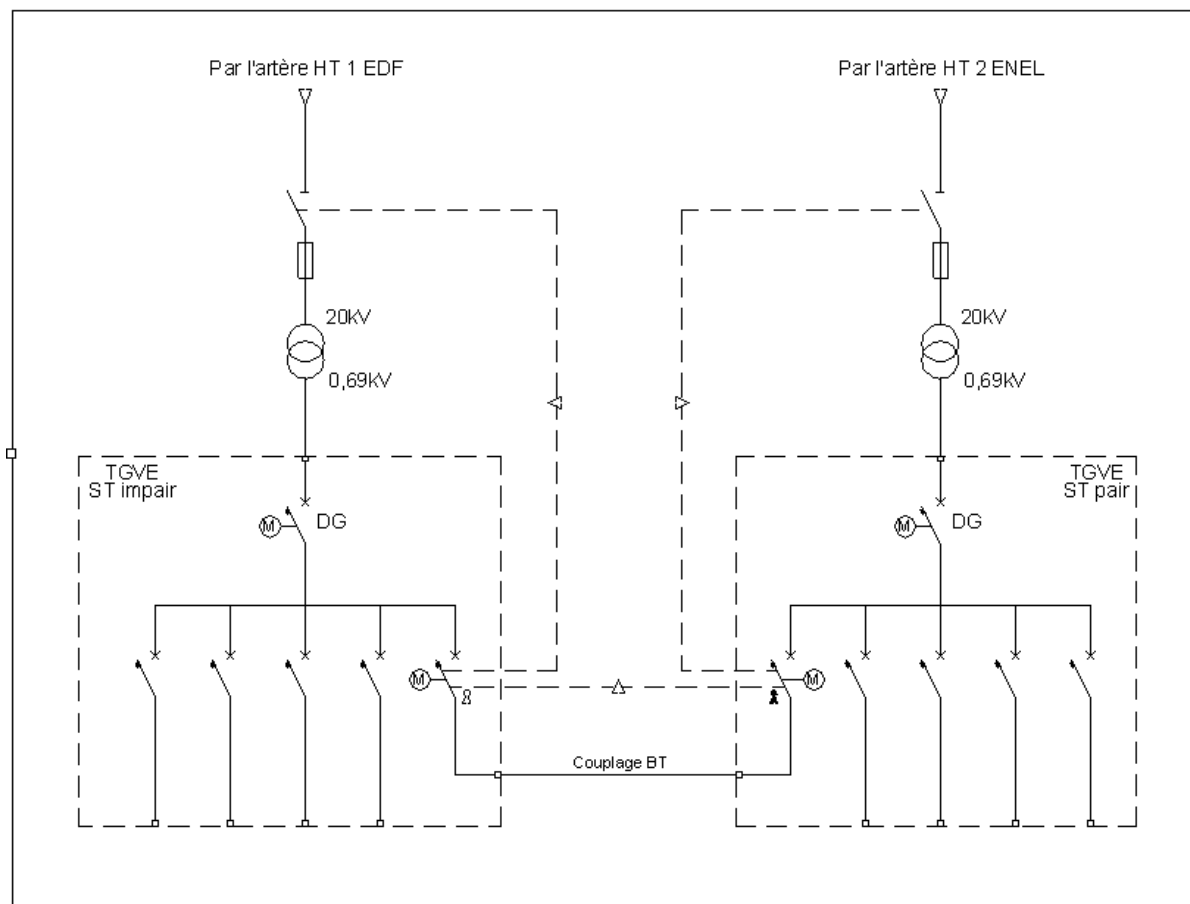


Fig. 5.10: - Couplage au niveau BT - Schéma unifilaire

Les DS seront électriquement bloqués avec les dispositifs de protection côté HT correspondant installés immédiatement en amont, dans le but d'éviter la fermeture en court circuit entre les secondaires des transformateurs HT/BT.

Une commande manuelle des interrupteurs supplémentaires sera possible seulement par un système de manœuvre avec clés bouclées, nécessaire pour éviter la fermeture simultanée des DS pendant le fonctionnement en configuration normale.

## 5.4 Ventilation des abris

### 5.4.1 Concepts généraux

La ventilation des abris fonctionne comme suit:

- Aspiration de l'air depuis la galerie de sécurité par un ventilateur à haut rendement. Un deuxième ventilateur de réserve, avec les mêmes caractéristiques techniques, sera branché automatiquement en cas de panne. Le fonc-

tionnement sera contrôlé par l'équipement de régulation automatique. Les ventilateurs sont installés à l'extérieur des abris côté galerie;

- Injection d'air dans les abris, par une trappe motorisée en aval de chaque ventilateur et une trappe coupe-feu installée sur la paroi de séparation entre la galerie et l'abri;
- Passage vers le SAS par une trappe coupe-feu ;
- Refoulement de l'air vers le tunnel par une trappe de régulation de la pression et une trappe coupe-feu.

Les composantes principales sont (Fig. 3.1):

- 2 ventilateurs à vitesse variable;
- 2 trappes motorisées (une pour chaque ventilateur);
- 3 trappes coupe-feu, entre la galerie et l'abri, entre l'abri et le SAS et entre le SAS et le tunnel;
- 1 trappe de régulation de la pression;
- 1 capteur de différence de pression entre le tunnel et l'abri;
- 1 dispositif de réglage.

Deux ventilateurs électriques radiaux à haut rendement sont prévus pour chaque abri, avec les caractéristiques suivantes:

- Débit d'air en cas d'événement 0.70 m<sup>3</sup>/s (chapitre 4.1.3.2)
- Débit d'air en exploit. normale 0.44 m<sup>3</sup>/s (chapitre 4.1.1.2)
- Rapport de pression statique 1'400 Pa (jusqu'à 1'100 Pa entre tunnel et galerie, chapitre 4.2.5)
- Vitesse de rotation variable
- Puissance moteur 3.0 kW

Si les deux portes du SAS d'un abri restent ouvertes, le débit d'air frais est augmenté à 2.8 m<sup>3</sup>/s (chapitre 4.1.3.2). Ce flux doit cependant être atteignable seulement en cas d'un événement dans le tunnel et donc avec une surpression dans l'abri par rapport à la galerie de l'ordre de 600-700 Pa (Fig. 4.17). Afin de limiter les dimensions des ventilateurs, ce point de fonctionnement doit seulement être garanti par un fonctionnement parallèle des deux ventilateurs.

Bien que le rapport de pression maximale soit variable le long de la galerie avec la valeur la plus élevée au milieu du tunnel (chapitre 4.2.5), le même équipement et en particulier les mêmes ventilateurs sont prévus pour tous les abris afin de disposer du matériel identique pour faciliter l'exploitation et la maintenance. Cette remarque vaut également pour l'abri 18, qui dispose en effet d'une surface réduite et aurait donc théoriquement des exigences en air frais plus basses (chapitre 2.3).

#### 5.4.2 Fonction et régulation automatique

Une différence de pression d'environ 80 Pa sera maintenue entre l'abri et le tunnel selon la prescription de [1] au moyen de la trappe de régulation motorisée, réglée sur la base de la mesure de différence de pression. Cette trappe adapte donc la caractéristique de résistance aéraulique de l'abri afin de maintenir la surpression indépendamment du débit donné. Le débit à son tour est réglé par la vitesse de rotation du ventilateur. La boucle de réglage de la trappe est nettement plus rapide de celle du débit pour éviter des instabilités et interdépendances entre les deux systèmes.

En cas de surpression importante dans la galerie de sécurité par rapport au tunnel, qui peut rejoindre jusqu'à 500 Pa (chapitre 4.2.5 et 4.2.6), la boucle de réglage de débit éteint le ventilateur dès que son débit reste au-dessus de la consigne, laissant cependant la trappe du ventilateur ouverte. Le ventilateur fonctionne alors comme étranglement pour réduire la pression au niveau désiré dans l'abri de 80 Pa relatif au tunnel. En fonction des caractéristiques du ventilateur installé, le débit d'air à travers l'abri peut considérablement dépasser la valeur de consigne dans ce régime de fonctionnement.

- |   |  |
|---|--|
| – Pression d'exploitation dans la galerie | ambiante, située entre les valeurs des deux portails en exploitation normale, jusqu'à 500 Pa surpression en cas d'incendie dans le tunnel. |
| – Pression d'exploitation dans l'abri     | +80 Pa par rapport à la pression locale dans le tunnel   |
| – Pression d'exploitation dans le tunnel  | 0 - 1'100 Pa   |

### 5.4.3 Alimentation électrique

Pour chaque abri est prévu un tableau électrique d'alimentation et de régulation des appareils de la ventilation (ventilateurs, trappes, capteurs de différence de pression, dispositifs de régulation).

Le tableau est installé près du groupe de ventilation et est équipé de régulateurs de fréquence (convertisseurs) pour la variation de la vitesse des ventilateurs.

L'alimentation électrique est dérivée par le réseau secouru, avec connexion au tableau basse tension TSR de l'abri même, prévu par l'équipement d'alimentation électrique (voir dossier 6145.2-R-14A).

## 5.5 Ventilation des by-pass

### 5.5.1 Concepts généraux

La ventilation des by-pass fonctionne comme suit:

- Aspiration de l'air depuis la galerie de sécurité par un ventilateur à haut rendement. Le fonctionnement sera contrôlé par l'équipement de régulation automatique. Le ventilateur est installé à l'extérieur du by-pass côté galerie;
- Injection d'air dans le by-pass, par une trappe motorisée en aval de chaque ventilateur et une trappe coupe-feu installée sur la paroi de séparation entre la galerie et le by-pass;
- Refoulement de l'air vers le tunnel par une trappe de régulation de la pression et une trappe coupe-feu.
- Dépressurisation du by-pass en cas d'accès de la porte vers la galerie par une trappe de purge.

Les composantes principales sont:

- 1 ventilateur à vitesse variable;
- 1 trappe motorisée (pour le ventilateur);
- 1 trappe de régulation de la pression;
- 1 trappe de purge côté galerie de sécurité;
- 3 trappes coupe-feu, entre la galerie et le by-pass et entre le by-pass et le tunnel;



- 1 capteur de différence de pression;
- 1 dispositif de réglage.

Deux ventilateurs électriques radiaux à haut rendement sont prévus pour chaque by-pass, avec les caractéristiques suivantes:

- Débit d'air 0.46 m<sup>3</sup>/s (chapitre 4.1.1.4)
- Rapport de pression statique 1'400 Pa (jusqu'à 1'100 Pa entre tunnel et galerie, chapitre 4.2.5)
- Vitesse de rotation variable
- Puissance moteur 1.5 kW

Bien que le rapport de pression maximale soit variable le long de la galerie avec la valeur la plus élevée au milieu du tunnel (chapitre 4.2.5), l'équipement et en particulier les ventilateurs prévus sont les mêmes pour tous les by-pass afin de disposer de matériel identique pour faciliter l'exploitation et la maintenance.

### 5.5.2 Fonction et régulation automatique

Une différence de pression d'environ 80 Pa sera maintenue entre le by-pass et le tunnel comme pour les abris au moyen de la trappe de régulation motorisée, réglée sur la base de la mesure de différence de pression. Cette trappe adapte donc la caractéristique de résistance aéraulique du by-pass afin de maintenir la surpression indépendamment du débit donné. Le débit à son tour est réglé par la vitesse de rotation du ventilateur. La boucle de réglage de la trappe est réalisée nettement plus rapide que celui du débit afin d'éviter des instabilités et interdépendances entre les deux systèmes.

En cas de surpression importante dans la galerie de sécurité par rapport au tunnel, qui peut rejoindre jusqu'à 500 Pa (chapitre 4.2.5 et 4.2.6), la boucle de réglage de débit éteint le ventilateur dès que son débit reste au-dessus de la consigne, laissant cependant la trappe du ventilateur ouverte. Le ventilateur fonctionne alors comme étranglement pour réduire la pression au niveau désiré dans le by-pass de 80 Pa relatif au tunnel. En fonction des caractéristiques du ventilateur installé, le débit d'air à travers le by-pass peut considérablement dépasser la valeur de consigne dans ce régime de fonctionnement.

- Pression d'exploitation dans la galerie ambiante, située entre les valeurs des deux portails en

	exploitation normale, jusqu'à 500 Pa surpression en cas d'incendie dans le tunnel.
– Pression d'exploitation dans le by-pass	+80 Pa par rapport au tunnel.
– Pression d'exploitation dans le tunnel	0 - 1'100 Pa

### 5.5.3 Alimentation électrique

Pour chaque by-pass est prévu un tableau électrique d'alimentation et de régulation des appareils de la ventilation (ventilateurs, trappes, capteurs de différence de pression, dispositifs de régulation).

Le tableau est installé près du groupe de ventilation et est équipé de régulateurs de fréquence (convertisseurs) pour la variation de la vitesse des ventilateurs.

L'alimentation électrique est dérivée par le réseau secours, avec connexion au tableau basse tension TSR de l'abri plus voisin (pour les by-pass 1, 3 et 5), ou au tableau basse tension TGBT5 du ST 07-14 (pour le by-pass 2) et du ST 13-08 (pour le by-pass 4), prévus par l'équipement d'alimentation électrique (voir dossier 6145.2-R-14A).

## 5.6 Ventilation et climatisation des stations techniques (ST)

### 5.6.1 Concepts généraux

Les nouvelles stations techniques communiquent avec le tunnel à travers les PHT. L'air frais nécessaire pour ventiler les ST est pris par la galerie et refoulé en majeure partie également dans la galerie. Seul un débit partiel est utilisé pour la ventilation du PHT associé et est ensuite expulsé vers le tunnel.

Il est prévu de réaliser une combinaison de ventilation et de climatisation, puisque la ventilation seule n'est pas en mesure de garantir une température acceptable dans chaque ST dans toute situation. Le système sera dimensionné dans le but de pouvoir garantir avec la ventilation seule (en cas de panne ou d'entretien de la climatisation) des températures inférieures à 35-40°C.

Pour chaque couple de stations techniques (ST paires + ST impaires) les principales composants du système de ventilation et de climatisation sont:

- Un monobloc de traitement de l'air pour le prélèvement d'air depuis la galerie et le soufflage dans les locaux des ST, composé d'un ventilateur à vitesse variable, d'un appareil frigorifique refroidi à eau, d'une batterie électrique de chauffage et d'un filtre d'air;
- Une gaine d'injection d'air;
- 2 ventilateurs à régime variable entre le ST et la galerie pour le refoulement de l'air réchauffé;
- 1 ventilateur à régime variable entre le PHT et le tunnel pour l'extraction de l'air du PHT la pressurisation dans le local tampon entre PHT et tunnel étant supérieure à la pression dans le tunnel;
- 3 trappes coupe-feu, entre la galerie et la ST (1 pour l'air frais, 2 pour l'air vicié);
- 1 trappe coupe-feu entre le PHT et le tunnel;
- 1 trappe de régulation de la pression entre le SAS et le tunnel;
- 1 trappe de purge entre le SAS et le PHT;
- 1 trappe motorisée (pour le ventilateur d'expulsion);
- 1 capteur de pression entre SAS et tunnel;
- des dispositifs de réglage et des capteurs de température, humidité et pression.

Le monobloc d'injection et de traitement de l'air est prévu selon les caractéristiques suivantes:

- Débit d'air max.	3.3 m <sup>3</sup> /s
- Pression statique	1'000 Pa
- Vitesse de rotation	variable
- Puissance ventilateur	5.5 kW
- Puissance compresseur	20 kW
- Puissance pompe d'eau	0.5 kW
- Puissance chaleur de refroidissement	40 kW
- Température de l'air en entrée	30°C (60% humidité relative)
- Température de l'air en sortie	23°C (82% humidité relative)
- Puissance chaleur à dissiper	60 kW
- Température de l'eau en entrée	25°C
- Température de l'eau en sortie	35°C
- Débit d'eau	de 0 à 5.2 m <sup>3</sup> /h

- Température de l'air en entrée 15 °C
- Température de l'air en sortie 20°C
- Puissance électrique de 0 à 19 kW

Les deux ventilateurs entre le ST et la galerie ont les caractéristiques suivantes:

- Débit d'air 2 x 1.3 m<sup>3</sup>/s
- Pression 150 Pa
- Puissance 1.0 kW
- Vitesse de rotation variable par convertisseur

Le ventilateur entre le PHT et le SAS a les caractéristiques suivantes:

- Débit d'air 0.85 m<sup>3</sup>/s
- Pression statique 1'400 Pa
- Vitesse de rotation variable
- Puissance moteur 2.2 kW

Bien que le rapport de pression maximale soit variable le long de la galerie avec la valeur la plus élevée au milieu du tunnel (chapitre 4.2.5), l'équipement et en particulier les ventilateurs entre PHT et local tampon prévus sont les mêmes pour toutes les ST afin de disposer de matériel identique pour faciliter l'exploitation et la maintenance.

### 5.6.2 Fonction et régulation automatique

Une différence de pression d'environ 80 Pa sera maintenue entre le local tampon et le tunnel en analogie aux abris au moyen de la trappe de régulation motorisée dans la paroi vers le tunnel, réglée sur la base de la mesure de différence de pression. Cette trappe adapte donc la caractéristique de résistance aéraulique afin de maintenir la surpression dans le local indépendamment du débit donné. Le débit à son tour est réglé par la vitesse de rotation du ventilateur. La boucle de réglage de la trappe est réalisée nettement plus rapide que celui du débit afin d'éviter des instabilités et interdépendances entre les deux systèmes.

En cas de surpression importante dans la galerie de sécurité par rapport au tunnel, qui peut rejoindre jusqu'à 500 Pa (chapitre 4.2.5 et 4.2.6), la boucle de réglage de

débit éteint le ventilateur d'expulsion de que son débit reste au-dessus de la consigne, laissant cependant la trappe du ventilateur ouverte. Le ventilateur fonctionne alors comme étranglement pour réduire la pression au niveau désiré dans le local tampon de 80 Pa relatif au tunnel.

La pression dans la ST sera par contre similaire à la pression dans la galerie afin de permettre l'accès facile au personnel. En cas de différence de pression importante entre la galerie et le tunnel, c'est alors le ventilateur entre le PHT et le local tampon qui doit assurer la pressurisation requise pour empêcher l'infiltration de l'air vicié et pollué du tunnel.

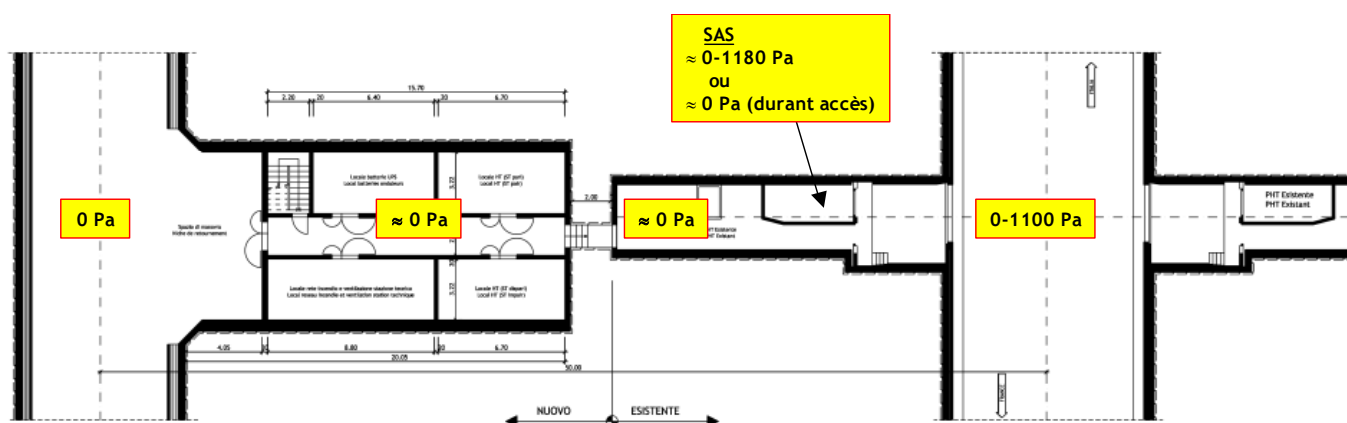


Fig. 5.11: Vue en plan des ST et PHT, rez-de-chaussée, avec niveaux de pression.

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– Pression d'exploitation dans la galerie</li> <li>– Pression dans la ST, le PHT</li> <li>– Différence de pression entre PHT et tunnel</li> <li>– Pression d'exploitation dans le tunnel</li> </ul> | <p>ambiante, située entre les valeurs des deux portails en exploitation normale, jusqu'à 500 Pa surpression en cas d'incendie dans le tunnel.</p> <p>similaire à la galerie</p> <p>80 Pa</p> <p>0 - 1'100 Pa</p> |
|--|--|

La vitesse du ventilateur appartenant au monobloc sera réglée en fonction de la température et de l'humidité mesurée dans l'environnement de la ST.

Un appareil frigorifique, refroidi par un circuit d'eau dédié dans la galerie, refroidira l'air injecté dans les locaux BT/HT en fonction de la température et de l'humidité mesurée dans cet environnement.

Un contrôle automatique de l'humidité prévoit un préchauffage électrique de l'air.

Des exemples de paramètres de réglage à imposer en fonction de la température ambiante et de l'humidité relative sont indiqués ci-après:

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| – Température ambiante < 12°C:       | chauffage électrique                                       |
| – Température ambiante > 25°C:       | refroidissement  |
| – Humidité relative > 75% et < 25°C: | chauffage électrique                                       |
| – Humidité relative > 75% et > 25°C: | refroidissement/condensation suivi de chauffage électrique |

### 5.6.3 Circuits d'eau de refroidissement

La chaleur dissipée par les condensateurs des appareils frigorifiques dans les ST est transmise à deux circuits d'eau de refroidissement dans la galerie de sécurité. Un circuit est prévu du côté français, tandis que le deuxième circuit asservira les ST du côté italien.

Chaque circuit consiste en un tube de départ avec une température d'entrée d'environ 25°C ainsi qu'en un tube de retour avec l'eau réchauffée jusqu'environ 35°C. Aux portails, l'eau de chaque circuit est à son tour refroidie dans un tour de refroidissement. La chaleur des 4 ST et de la centrale d'extraction massive à dissiper se monte au maximum jusqu'à 285 kW (4 x 60 kW + 45 kW).

Les tours de refroidissement requises à chaque portail sont disponibles sur le marché en dimensions standardisées. Le type considéré ici est évaporatoire afin de pouvoir refroidir à une température inférieure à la température externe en été. Leur dimensionnement dépend 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. La température d'eau considérée d'environ 25°C après son refroidissement peut donc être obtenue.

Une tour avec une capacité de refroidissement d'environ 300 kW thermiques consomme environ 4 kW d'électricité pour son ventilateur. Le flux d'eau évaporée dans la tour est de 0.43 m<sup>3</sup>/h. La consommation effective de l'eau fraîche est cependant plus élevée afin d'éviter une concentration excessive des sels et miné-

raux, 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.

Alternativement aux tours, une valorisation de la chaleur par exemple pour une fin de chauffage peut être considérée durant la saison froide.

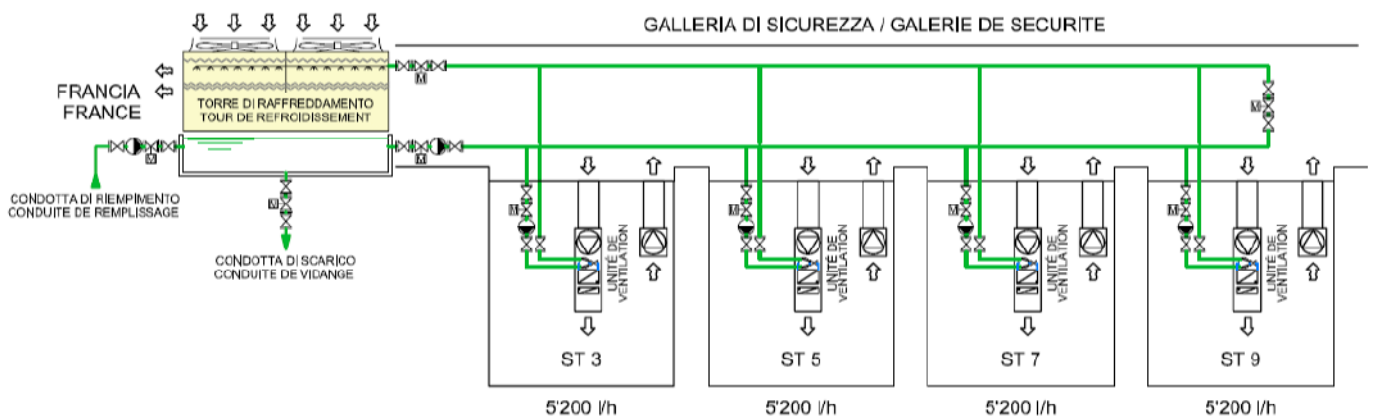


Fig. 5.12 : Circuit de refroidissement - côté France

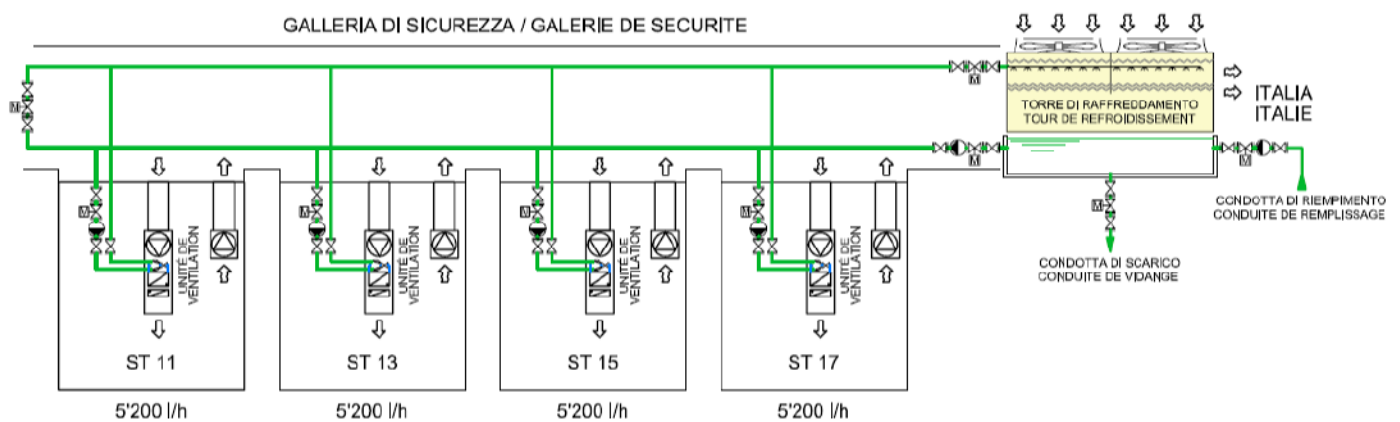


Fig. 5.13 : Circuit de refroidissement - côté Italie

Les conduites du circuit refroidissement sont des tubes en PE, classe de pression PN16. Comme tube d'entrée, le tube d'air comprimé de la phase de construction avec un diamètre intérieur de 200 mm est réutilisé (rapport 6145.2-R-05A). Comme tube de retour, par contre, un tube avec un diamètre extérieur de 125 mm et un diamètre inférieur de 110.2 mm est suffisant.

Le débit est assuré par une pompe principale au portail, qui prélève l'eau refroidie du bac de la tour de refroidissement.

La distribution de pression dans les conduites est illustrée en Fig. 5.14. La variation de la pression dépend des pertes de frottement et des différences géométriques.

En maintenant toujours une pression minimale de 2 bar dans les circuits, les pompes suivantes sont prévues aux portails :

Côté France :

- Débit d'eau 23.4 m<sup>3</sup>/h
- Pression 5.3 bar
- Puissance 6 kW
- Vitesse de rotation variable par convertisseur

Côté Italie :

- Débit d'eau 23.4 m<sup>3</sup>/h
- Pression 3 bar
- Puissance 3.5 kW
- Vitesse de rotation variable par convertisseur

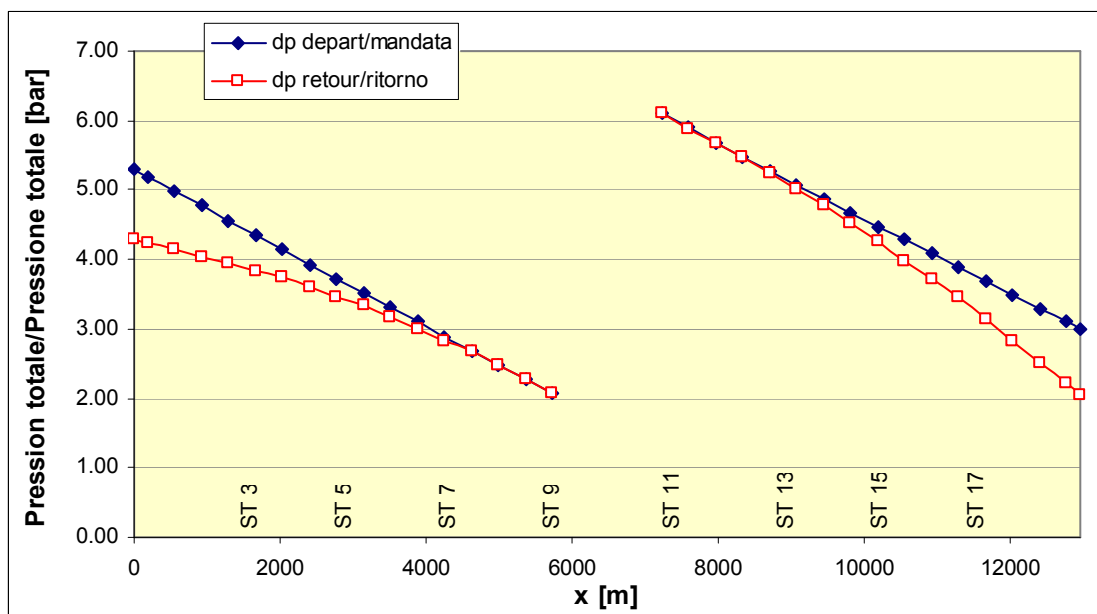


Fig. 5.14 : Distribution de pression dans les deux conduites d'eau.



#### *5.6.4 Alimentation électrique*

Pour chaque station technique est prévu un tableau électrique d'alimentation et de régulation des appareils de ventilation (ventilateurs, trappes, capteurs de différence de pression, dispositifs de réglage).

Le tableau est installé près du monobloc de traitement de l'air et est équipé de régulateurs de fréquence (convertisseurs) pour la variation de la vitesse des ventilateurs.

L'alimentation électrique est issue du tableau basse tension TGBT de la station technique paire, incluse dans l'équipement d'alimentation électrique (voir dossier 6145.2-R-14A).

#### **5.7 Equipement de mesure dans la galerie de sécurité**

La galerie est équipée de capteurs pour surveiller la qualité d'air (CO et opacité), l'état aéraulique et thermique (vitesse et direction d'air, température) et pour détecter un événement (détecteurs de fumée).

Les capteurs combinés CO/opacité ainsi que les capteurs de la température d'air seront installés au milieu de chaque canton, ce qui fait 6 stations de mesures réparties dans la galerie.

Les valeurs de CO/opacité sont utilisées pour contrôler/commander la ventilation sanitaire dans la galerie.

La température est surveillée afin d'avertir les opérateurs en cas de températures excessives dans la galerie par exemple suite à une opération prolongée des accélérateurs pour créer une surpression et donc sans ou seulement avec un faible échange d'air avec l'extérieur.

Les capteurs de la vitesse et de la direction d'air se trouveront à proximité des portails ainsi que de chaque côté des centrales d'extraction. Il y a donc également six stations de mesure.

La vitesse d'air et sa direction dans les différents cantons servent comme valeurs effectives pour les boucles de contrôle de la vitesse longitudinale dans la galerie.

Les détecteurs de fumées sont prévus à une interdistance de 100 m, afin de permettre une détection précise du foyer d'événement en galerie. Ils sont traités en détail dans un rapport séparé.

## 6. PORTES ENTRE LES ABRIS ET LA GALERIE DE SECURITE

La différence de pression entre les abris et la galerie de sécurité peut atteindre des valeurs de l'ordre de 600 à 700 Pa (chapitre 4.2.6, Fig. 4.17) en cas d'événement dans le tunnel. Une porte conventionnelle à battant ne peut plus être ouverte à une telle différence de pression, sauf si elle est munie d'un dispositif mécanique pour réduire la force de pression avant son ouverture complète.

La porte prévue dans le projet est donc du type coulissant - manuellement ouvrable aussi à une différence de pression élevée - avec des dimensions de 1.60 m de largeur et 2.00 m de hauteur.

La porte est en acier inox et est dotée des caractéristiques coupe-feu REI 120.

Ces portes constituent aujourd'hui le choix des maîtres d'ouvrages pour des applications similaires à celle en objet. On peut citer en particulier l'utilisation de ces portes dans les nouvelles lignes ferroviaires sous les Alpes du Lötschberg, ainsi que dans des nombreux tunnels routiers. Certains maîtres d'ouvrages demandent aussi la motorisation des portes coulissantes.

Cette tendance est aussi une conséquence de l'expérience positive dans le tunnel routier du St. Gothard où les prestations des portes coulissantes ont été confirmées.

Ces portes ne nécessitent aucun système pour équilibrer la pression de l'air et sont fiables aussi en présence d'une importante différence de pression comme dans le cas du Fréjus, en permettant une ouverture simple sans aucun risque pour les personnes qui les utilisent.

Par ailleurs, le projet de directive suisse relatif aux portes dans les tunnels routiers [15] exige des portes coulissantes dans le cas d'une galerie de sécurité en surpression et demande en outre une fermeture automatique de la porte sans énergie externe.

Le Comité de Sécurité a émis un avis favorable à l'utilisation des portes coulissantes lors de la réunion du 8 juin 2005.

## 7. INTERFACES AVEC LES AUTRES EQUIPEMENTS

### 7.1 Interfaces terrain

L'installation de la ventilation est interfacée au niveau terrain avec les tableaux de basse tension dans les usines de ventilation (TGVE), dans les stations techniques (TGBT) et dans les abris (TSR). Depuis les ventilateurs, les trappes et les capteurs vers les tableaux de basse tension seront exécutées:

- les connexions de puissance, pour l'alimentation électrique;
- les connexions de signal, pour la transmission des données d'exploitation et d'alarme au système de Gestion Technique Centralisée GTC.

La gestion de l'équipement au niveau terrain est effectuée par des automates locaux programmables. Les automates suivants sont requis:

- Surveillance locale des accélérateurs: disjonction en cas des vibrations, disjonction en cas de chute, enregistrement des heures de fonctionnement, limitation des démarrages par heure en exploitation normale.
- Système de contrôle local des ventilateurs d'extraction massive: surveillance vibrations, surchauffe, refroidissement secondaire, boucle de réglage du débit, système anti-pompage, limitation des démarrages etc..
- Système de contrôle des abris: réglage surpression et réglage débit d'air frais.
- Système de contrôle des by-pass: réglage surpression et réglage débit d'air frais, automatisation de la fonction écluse.
- Système de contrôle des ST: réglage de la climatisation avec ou sans eau de refroidissement, réglage surpression et réglage débit d'air frais du local tampon, automatisation de la fonction écluse de ce local.

L'équipement est en plus interfacé vers le système de Gestion Technique Centralisée GTC, lequel devra gérer le fonctionnement des ventilateurs et des trappes en

fonction des diverses conditions d'exploitation de la galerie et du tunnel (exploitation normale, cas d'événement, etc.).

La GTC contrôlera les pressions, les débits et autres paramètres concernant le fonctionnement.

## 7.2 Interfaces à niveau GTC

Depuis le Poste de Commande et Contrôle PCC, doivent être possibles:

- la gestion manuelle de l'équipement de ventilation;
- la représentation graphique des valeurs mesurées, des états de fonctionnement et des alarmes correspondant à toutes les composantes principales de l'équipement de ventilation.

En outre, la GTC est responsable de la gestion automatique supérieure de l'ensemble en exploitation normale ainsi qu'en cas d'événement, comprenant:

1) en exploitation normale:

- Le contrôle de la vitesse longitudinale en galerie en présence d'une différence de pression entre les deux têtes en fonction des mesures de la vitesse et direction d'air (gestion portes aux portails)
- La ventilation sanitaire de la galerie en fonction des mesures CO/opacité, donc enclenchement des accélérateurs en cas de besoin, ouverture des portes aux portails.

2) en cas d'événement dans le tunnel:

- Maîtrise de la vitesse longitudinale en galerie et pressurisation vis-à-vis du foyer d'incendie.
- Surveillance de la température d'air en galerie avec avertissement en cas d'échauffement important.
- Gestion des ST en mode de refroidissement par ventilation pure.
- Augmentation du débit d'air frais des abris.

3) en cas d'événement dans la galerie:

- Expulsion des fumées en fonction de la position détectée de l'événement, par un portail ou bien par une centrale d'extraction massive. Mise en service

des accélérateurs seulement hors de la zone sinistrée. Contrôle de la vitesse d'air en amont et en aval du foyer d'événement.

- Mise en service d'une centrale d'extraction massive, si besoin est.
- Interruption de la ventilation des abris, by-pass et stations techniques.
- Mise en surpression du tunnel.

## **8. LIMITE DE FOURNITURE ET D'INTERVENTION**

### **8.1 Limites de la fourniture**

L'équipement de ventilation devra être fourni complet avec tous les appareils et accessoires nécessaires au fonctionnement complet de l'équipement, c'est-à-dire: ventilateurs, trappes, gaines, grilles, capteurs, systèmes de réglage, tableaux électriques de commande et régulateurs de fréquence (convertisseurs).

### **8.2 Limite d'intervention**

La limite d'intervention concernant l'équipement de ventilation est située au bornier de connexion des tableaux basse tension et courants faibles des ST et des abris.

## **9. CALENDRIER PRÉVISIONNEL DE RÉALISATION PRÉVISIBLE**

### **9.1 En général**

Le délai prévu pour les installations est de 15 mois à partir de l'achèvement des travaux de génie civil.

Le programme détaillé des travaux sera défini en phase d'exécution en coordination avec la Maîtrise d'Ouvrage et les entreprises exécutrices des autres équipements.

## 9.2 Mise en service

La mise en place rapide des accélérateurs permettra la gestion de la ventilation pendant la phase de montage des équipements. Leur montage sera fait au fur et à mesure que la ventilation du chantier est démontée.

La mise en service de l'équipement sera effectuée à la fin de l'installation selon les modalités définies dans le cahier des charges dans un délai de 2 mois, à compter de l'échéance des 15 mois prévus pour les installations.

L'Entrepreneur devra en plus collaborer à l'exécution des essais globaux de fonctionnement de l'ensemble des équipements de la galerie de sécurité et du tunnel qui se dérouleront pendant les 3 mois suivants la mise en service.

## 10. ABRÉVIATIONS

A	m <sup>2</sup>	Section d'air
c <sub>p</sub>	J/kg K	Capacité thermique
D	m	Diamètre
F	N	Poussée
L	m	Longueur
p	Pa	Pression
T	°C	Température
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	Débit volumétrique
$\lambda$	–	Facteur de frottement
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Densité
$\eta$	–	Rendement
$\zeta$	–	Coefficient de perte de charge
AF		Air Frais
AV		Air Vicié
BT		Basse Tension
DAI		Détection Automatique des Incidents
GTC		Gestion Technique Centralisée
HT		Haute Tension
PCC		Poste de Commande et Contrôle
PHT		Poste Haute Tension
PL		Poids lourd
ST		Station technique
v		Unité-voiture
VL		Véhicule Léger

## 11. ANNEXE 1: CALCUL DE PERTES DE CHARGE - CENTRALES D'EXTRACTION MASSIVE

### 11.1 Centrale B - Coté France

Centrale de ventilation souterraine B (France)										Débit usine B 260 m <sup>3</sup> /s			Débit 180 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression					
Dénomination	No.	Données sections			Données canaux			Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Vitesse [m/s]	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Re <sub>p</sub>	Longueur [m]	Rugosité k [mm]	Coeff. ζ	Coeff. λ	Section [m <sup>2</sup> ]	Diamètre hyd. [m]	Circonférence [m]	Rayon [m]	Hauteur [m]	Largeur [m]
		Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ														
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	4.00	18.00	1.00	-	-	180	10.00	180	10.00	1.05	52.5						
Silencieux	1	6.00	3.00	-	4.00	18.00	1.77	-	-	180	10.00	180	10.00	1.05	92.9						
Buse d'entrée ventilateur	2	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	90	18.33	90	18.33	1.05	17.6						
Trappe ventilateur en amont	2	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	90	28.65	90	28.65	1.05	60.3						
Ventilateur	2	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	90	28.65	90	28.65	1.05	21.5						
Diffuseur en aval	2	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	90	18.33	90	18.33	1.05	24.7						
Trappe ventilateur en aval	2	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	364.5						
Courbe en aval du ventilateur	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	364.5						
Canal de connexion	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	63.6						
Confluence AV21	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	77.9						
Galerie en pied de puits I	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	11.7						
Restriction de section	2	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	186.9						
Galerie en pied de puits II	2	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	146.1						
Galerie en pied de puits III	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	249.3						
Expansion de section	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	174.2						
Confluence AV22	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	156.9						
Galerie en pied de puits IV	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	54.9						
Courbe en pied de puits	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	470.6						
Puits	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	1153.8						
Sortie	1	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	180	22.38	180	22.38	1.05	313.7						
										Totale ΔP [Pa]:		3'683.6									
										η (aéraulique et électrique)		70%									
										Puissance requise [kW]:		942									
										Reserve de 5% [kW]:		47									
										Puissance installée [kW]:		989									

Tab. 11.1: Pertes de charge pour une extraction de 180 m<sup>3</sup>/s (deux ventilateurs) et un débit de 260 m<sup>3</sup>/s de l'usine B existante (utilisation commune du puits).



Centrale de ventilation souterraine B (France)												Débit usine B			0 m <sup>3</sup> /s			Débit			180 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression	
Dénomination												Données sections						Données canaux						Densité d'air	
No.	Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coef. ζ	Rugosité k [mm]	Coef. λ	Longueur [m]	Re <sub>p</sub>	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes de pression [Pa]										
1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	-	180	10.00	1.05	52.5										
1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	-	180	10.00	1.05	92.9										
2	1.25	-	-	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	-	90	18.33	1.05	17.6										
2	1.00	-	-	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	-	90	28.65	1.05	60.3										
2	1.00	-	-	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	-	90	28.65	1.05	21.5										
2	1.25	-	-	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	-	90	18.33	1.05	24.7										
1	-	-	-	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	180	22.38	1.05	394.5										
1	-	-	-	-	1.60	17.00	18.00	-	5.00	0.0204	251	2.42E+06	180	10.00	1.05	63.0									
1	-	-	-	-	17.00	4.24	18.00	-	5.00	0.0206	15	2.35E+06	180	10.00	1.05	0.0									
1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	-	5.00	0.0206	15	2.35E+06	180	10.00	1.05	3.9									
2	-	-	-	-	8.60	2.09	4.50	0.30	-	-	-	90	20.00	1.05	63.0										
2	-	-	-	-	8.60	2.09	4.50	0.30	5.00	0.0245	20	2.39E+06	90	20.00	1.05	49.3									
1	-	-	-	-	13.20	2.85	9.40	0.20	5.00	0.0226	55	3.11E+06	180	19.15	1.05	84.1									
1	-	-	-	-	13.20	2.85	9.40	0.20	-	-	-	180	19.15	1.05	38.5										
1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.00	-	-	-	180	10.00	1.05	0.0										
1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.00	5.00	0.0206	35	2.35E+06	180	10.00	1.05	9.2									
1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	1.50	-	-	-	180	10.00	1.05	78.8										
1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	-	5.00	0.0206	735	2.35E+06	180	10.00	1.05	193.1									
1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	-	5.00	0.0206	-	180	10.00	1.05	52.5										
1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	1.00	-	-	-	180	10.00	1.05	52.5										
Totale XP [Pa]												1 300.0													
η (aéraulique et électrique)												70%													
Puissance requise [kW]												334													
Reserve de 5% [kW]												17													
Puissance installée [kW]												351													

Tab. 11.2: Pertes de charge pour une extraction de 180 m<sup>3</sup>/s (deux ventilateurs) et l'usine B existante hors service.

Centrale de ventilation souterraine B (France)										Débit usine B		260 m <sup>3</sup> /s		Débit		112.5 m <sup>3</sup> /s		Pertes de pression					
Dénomination										Données sections					Données canaux					Densité d'air		Pertes de pression	
No.	Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coef. ζ	Rugosité λ [mm]	Longueur [m]	Re <sub>D</sub>	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes de pression [Pa]									
1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	112.5	6.25	1.05	20.5									
1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	112.5	6.25	1.05	36.3									
2	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	56.25	11.46	1.05	6.9									
2	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	56.25	17.90	1.05	23.6									
2	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	56.25	17.90	1.05	8.4									
2	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	56.25	11.46	1.05	9.7									
1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	112.5	13.99	1.05	154.1									
1	-	-	1.60	17.00	4.24	18.00	0.50	5.00	0.0204	251	1.51E+06	112.5	6.25	24.8									
1	-	-	-	17.00	4.24	18.00	0.50	-	-	-	242.5	13.47	1.05	47.6									
1	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.30	5.00	0.0206	15	3.16E+06	243	13.47	7.2									
2	-	-	-	8.60	2.09	4.50	0.30	-	-	-	121	26.94	1.05	114.3									
2	-	-	-	8.60	2.09	4.50	0.30	5.00	0.0245	20	3.72E+06	121	26.94	89.4									
1	-	-	-	13.20	2.85	9.40	0.20	5.00	0.0226	55	4.19E+06	243	25.80	152.6									
1	-	-	-	13.20	2.85	9.40	0.20	-	-	-	243	25.80	1.05	69.9									
1	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.50	-	-	-	373	20.69	1.05	112.4									
1	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.50	5.00	0.0206	35	4.86E+06	373	20.69	39.4									
1	-	-	-	17.50	4.11	18.00	1.50	-	-	-	373	20.69	1.05	337.3									
1	-	-	-	17.50	4.11	18.00	1.00	5.00	0.0206	735	4.86E+06	373	20.69	826.9									
1	-	-	-	17.50	4.11	18.00	1.00	-	-	-	373	20.69	1.05	224.8									
										Totale VP [Pa]		2'306.1											
										η (aéraulique et électrique)		70%											
										Puissance requise [kW]		371											
										Reserve de 6% [kW]		19											
										Puissance installée [kW]		389											

Tab. 11.3: Pertes de charge pour une extraction de 112.5 m<sup>3</sup>/s (deux ventilateurs) et un débit de 260 m<sup>3</sup>/s de l'usine B existante (utilisation commune du puits).

Centrale de ventilation souterraine B (France)										Débit usine B			0 m <sup>3</sup> /s			Débit			112.5 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression	
Dénomination	Données sections					Données canaux					Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Données sections		Données canaux		Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes de pression [Pa]		
	No.	Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ	Rugosité k [mm]	λ				Longueur [m]	Re <sub>0</sub>	Re <sub>0</sub>	Re <sub>0</sub>					Re <sub>0</sub>	Re <sub>0</sub>
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	-	4.00	16.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	6.25	1.05	20.5		
Silencieux	1	6.00	3.00	-	-	4.00	16.00	1.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	6.25	1.05	36.3		
Buse d'entrée ventilateur	2	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.25	11.46	1.05	6.9		
Trappe ventilateur en amont	2	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.25	17.90	1.05	23.6		
Ventilateur	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.25	17.90	1.05	8.4		
Diffuseur en aval	2	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.25	17.90	1.05	8.4		
Trappe ventilateur en aval	2	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56.25	11.46	1.05	9.7		
Courbe en aval du ventilateur	1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	154.1		
Canal de connection	1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	154.1		
Confluence AV31	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	24.8		
Galerie en pied de puits I	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	0.0		
Restriction de section	2	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	0.0		
Galerie en pied de puits II	2	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	0.0		
Galerie en pied de puits III	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	0.0		
Expansion de section	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	0.0		
Confluence AV22	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	0.0		
Galerie en pied de puits IV	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	0.0		
Courbe en pied de puits	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	30.8		
Puits	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	75.4		
Sortie	1	-	-	1.70	-	3.40	11.22	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	20.5		
										Totale ΔP [Pa]			507.8			η (aéraulique et électrique)		70%		Puissance requise [kW]:		82	
																				Reserve de 5% [kW]:		4	
																				Puissance installée [kW]:		86	

Tab. 11.4: Pertes de charge pour une extraction de 112.5 m<sup>3</sup>/s et l'usine B existante hors service.

Centrale de ventilation souterraine B (France)										Débit usine B 260 m <sup>3</sup> /s			Débit 117 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression									
Dénomination	No.	Données sections					Données canaux					Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Vitesse [m/s]	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Re <sub>0</sub>	Rugosité k [mm]	Coeff. ζ	Longueur [m]	R <sub>0</sub>	Vitesse [m/s]	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Pertes de pression [Pa]			
		Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonf. ence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coef. k	Rugosité k [mm]	Longueur [m]	Re <sub>0</sub>												Coef. ζ	Rugosité k [mm]	Longueur [m]
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	18.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	117	6.50	1.05	22.2
Silencieux	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	18.00	1.77	-	-	-	-	-	-	-	-	117	6.50	1.05	39.3
Buse d'entrée ventilateur	1	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	4.91	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	117	23.84	1.05	29.8
Trappe ventilateur en amont	1	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	3.14	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	117	37.24	1.05	101.9
Ventilateur	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Diffuseur en aval	1	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	3.14	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	117	37.24	1.05	36.4
Trappe ventilateur en aval	1	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	4.91	0.14	-	-	-	-	-	-	-	-	117	23.84	1.05	41.8
Courbe en aval du ventilateur	1	1.60	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	8.04	1.50	-	-	-	-	-	-	-	-	117	14.55	1.05	166.7
Canal de connection	1	-	-	1.60	17.00	4.24	18.00	0.50	5.00	0.0204	251	1.57E+06	117	6.50	1.05	26.9									
Confluence AV31	1	-	-	1.60	17.00	4.24	18.00	0.50	5.00	0.0206	15	3.22E+06	247	13.72	1.05	49.4									
Galerie en pied de puits I	1	-	-	1.60	17.50	4.11	18.00	0.30	5.00	0.0245	20	3.28E+06	124	27.44	1.05	7.4									
Restriction de section	2	-	-	1.60	8.60	2.09	4.50	0.30	5.00	0.0226	55	4.27E+06	247	26.28	1.05	158.3									
Galerie en pied de puits II	1	-	-	1.60	13.20	2.85	9.40	0.20	5.00	0.0206	35	4.92E+06	377	20.94	1.05	40.3									
Galerie en pied de puits III	1	-	-	1.60	13.20	2.85	9.40	0.20	5.00	0.0206	35	4.92E+06	377	20.94	1.05	40.3									
Expansion de section	1	-	-	1.60	17.50	4.11	18.00	0.50	5.00	0.0206	735	4.92E+06	377	20.94	1.05	345.5									
Confluence AV22	1	-	-	1.60	17.50	4.11	18.00	0.50	5.00	0.0206	735	4.92E+06	377	20.94	1.05	345.5									
Galerie en pied de puits IV	1	-	-	1.60	17.50	4.11	18.00	0.50	5.00	0.0206	735	4.92E+06	377	20.94	1.05	345.5									
Courbe en pied de puits	1	-	-	1.60	17.50	4.11	18.00	1.00	5.00	0.0206	735	4.92E+06	377	20.94	1.05	847.0									
Puits	1	-	-	1.60	17.50	4.11	18.00	1.00	5.00	0.0206	735	4.92E+06	377	20.94	1.05	847.0									
Sortie	1	-	-	1.60	17.50	4.11	18.00	1.00	5.00	0.0206	735	4.92E+06	377	20.94	1.05	230.3									
										Totale ΔP [Pa]:		2'542.2													
										η <sub>1</sub> (aéraulique et électrique)		70%													
										Puissance requise [kW]:		425													
										Réserve de 5% [kW]:		21													
										Puissance installée [kW]:		446													

Tab. 11.5: Pertes de charge pour une extraction de 117 m<sup>3</sup>/s (un seul ventilateur) et un débit de 260 m<sup>3</sup>/s de l'usine B existante (utilisation commune du puits).

Centrale de ventilation souterraine B (France)												Débit usine B			0 m <sup>3</sup> /s			Débit			117 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression	
Dénomination	No.	Données sections					Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ	Rugosité k [mm]	Données canaux			Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Re <sub>D</sub>	Pertes de pression [Pa]								
		Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]				Longueur [m]	Coef. λ														
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	-	117	6.50	1.05	22.2									
Silencieux	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	-	117	6.50	1.05	39.3									
Buse d'entrée ventilateur	1	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	-	117	23.84	1.05	29.8									
Trappe ventilateur en amont	1	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	-	117	37.24	1.05	101.9									
Ventilateur	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
Diffuseur en aval	1	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	-	117	37.24	1.05	36.4									
Trappe ventilateur en aval	1	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	-	117	23.84	1.05	41.8									
Courbe en aval du ventilateur	1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	117	14.55	1.05	166.7									
Canal de connexion	1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	5.00	0.0204	251	1.57E+06	117	6.50	1.05	26.9									
Confluence AV31	1	-	-	-	-	17.00	4.24	0.00	-	-	-	-	117	6.50	1.05	0.0									
Galerie en pied de puits I	1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.30	0.0206	15	1.53E+06	117	6.50	1.05	1.7									
Restriction de section	2	-	-	-	-	8.60	2.09	4.50	0.30	0.0245	20	1.55E+06	59	13.00	1.05	26.6									
Galerie en pied de puits II	2	-	-	-	-	8.60	2.09	4.50	0.30	0.0245	20	1.55E+06	59	13.00	1.05	20.8									
Galerie en pied de puits III	1	-	-	-	-	13.20	2.85	9.40	0.20	0.0226	55	2.02E+06	117	12.45	1.05	35.5									
Expansion de section	1	-	-	-	-	13.20	2.85	9.40	0.20	0.0226	55	2.02E+06	117	12.45	1.05	16.3									
Confluence AV22	1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.00	0.0206	35	1.53E+06	117	6.50	1.05	0.0									
Galerie en pied de puits IV	1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.00	0.0206	35	1.53E+06	117	6.50	1.05	3.9									
Courbe en pied de puits	1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	1.50	0.0206	735	1.53E+06	117	6.50	1.05	33.3									
Puits	1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	0.00	0.0206	735	1.53E+06	117	6.50	1.05	81.6									
Sortie	1	-	-	-	-	17.50	4.11	18.00	1.00	0.0206	735	1.53E+06	117	6.50	1.05	22.2									
												Totale ΔP [Pa]		706.7											
												η (aérodynamique et électrique)		70%											
												Puissance requise [kW]		118											
												Réserve de 5% [kW]		6											
												Puissance installée [kW]		124											

Tab. 11.6: Pertes de charge pour une extraction de 117 m<sup>3</sup>/s (un seul ventilateur) et l'usine B existante hors service.

## 11.2 Centrale C - Coté Italie

Centrale de ventilation souterraine C (Italie)										Débit usine C			260 m <sup>3</sup> /s			Débit			180 m <sup>3</sup> /s			Densité d'air		Pertes de pression	
Données sections										Données canaux			Débit		Vitesse		Densité d'air		Pertes de pression						
Dénomination	No.	Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ	Rugosité k [mm]	Longueur [m]	rRe <sub>D</sub>	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes de pression [Pa]										
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	180	10.00	1.05	52.5										
Silencieux	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	180	10.00	1.05	92.9										
Buse d'entrée ventilateur	2	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	90	18.33	1.05	17.6										
Trappe ventilateur en amont	2	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	90	28.65	1.05	60.3										
Ventilateur	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-										
Diffuseur en aval	2	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	90	28.65	1.05	21.5										
Trappe ventilateur en aval	2	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	90	18.33	1.05	24.7										
Courbe en aval du ventilateur	1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	180	22.38	1.05	394.5										
Canal de connexion	1	-	-	1.60	17.00	4.24	18.00	-	5.00	0.0204	224	2.42E+06	180	10.00	1.05	56.8									
Confluence AV / Courbe	1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	0.33	-	-	-	440	21.57	1.05	80.6										
Galerie en pied de puits IV	1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	1.50	5.00	0.0195	35	6.28E+06	440	21.57	1.05	32.7									
Courbe en pied de puits	1	-	-	2.55	-	5.10	20.43	-	5.00	0.0195	735	6.27E+06	440	21.54	1.05	665.3									
Puits	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-										
Sortie	1	-	-	2.55	-	5.10	20.43	1.00	-	-	-	440	21.54	1.05	243.6										
										Totale ΔP [Pa]:		2129.6													
										η (aérodynamique et électrique):		70%													
										Puissance requise [kW]:		548													
										Reserve de 5% [kW]:		27													
										Puissance installée [kW]:		575													

Tab. 11.7: Pertes de charge pour une extraction de 180 m<sup>3</sup>/s (deux ventilateurs) et un débit de 260 m<sup>3</sup>/s de l'usine C existante (utilisation commune du puits).

Centrale de ventilation souterraine C (Italie)										Débit usine C			0 m <sup>3</sup> /s			Débit			180 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression	
Dénomination		No.	Données sections			Données canaux				Densité d'air			Pertes de pression										
Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coef. ζ	Rugosité k [mm]	Coef. λ	Longueur [m]	Re <sub>0</sub>	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes de pression [Pa]									
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	180	10.00	1.05	52.5									
Silencieux	1	6.00	3.00	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	180	10.00	1.05	92.9									
Buse d'entrée ventilateur	2	1.25	-	1.25	2.50	4.91	0.10	-	-	-	90	18.33	1.05	17.6									
Trappe ventilateur en amont	2	1.00	-	1.00	2.00	3.14	0.14	-	-	-	90	28.65	1.05	60.3									
Ventilateur	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-									
Diffuseur en aval	2	1.00	-	1.00	2.00	3.14	0.05	-	-	-	90	28.65	1.05	21.5									
Trappe ventilateur en aval	2	1.25	-	1.25	2.50	4.91	0.14	-	-	-	90	18.33	1.05	24.7									
Courbe en aval du ventilateur	1	-	-	1.60	3.20	8.04	1.50	-	-	-	180	22.38	1.05	394.5									
Canal de connection	1	-	-	17.50	4.11	18.00	-	5.00	0.0206	224	2.35E+06	180	10.00	1.05	58.8								
Confluence AV / Courbe	1	-	-	17.50	4.11	18.00	1.32	-	-	-	180	10.00	1.05	69.3									
Galerie en pied de puits	1	-	-	17.50	4.11	18.00	1.50	5.00	0.0206	35	2.35E+06	180	10.00	1.05	9.2								
Courbe en pied de puits	1	-	-	17.50	4.11	18.00	1.50	-	-	-	180	10.00	1.05	78.8									
Puits	1	-	-	2.55	5.10	20.43	-	5.00	0.0195	735	2.56E+06	180	8.81	1.05	114.7								
Sortie	1	-	-	2.55	5.10	20.43	1.00	-	-	-	180	8.81	1.05	40.8									
Totale ΔP [Pa]											1035.7												
η <sub>1</sub> (aéraulique et électrique)											70%												
Puissance requise [kW]											266												
Reserve de 5% [kW]											13												
Puissance installée [kW]											280												

Tab. 11.8: Pertes de charge pour une extraction de 180 m<sup>3</sup>/s (deux ventilateurs) et l'usine C existante hors service.

Centrale de ventilation souterraine C (Italie)										Débit usine C			260 m <sup>3</sup> /s			Débit			112.5 m <sup>3</sup> /s			Densité d'air		Pertes de pression	
Dénomination										Données sections					Données canaux					Densité d'air		Pertes de pression			
No.	Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonfer. ence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ	Rugosité k [mm]	Coeff. λ	Longueur [m]	Re <sub>p</sub>	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes [Pa]										
1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	-	112.5	6.25	1.05	20.5										
1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	-	112.5	6.25	1.05	36.3										
2	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	-	56.3	11.46	1.05	6.9										
2	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	-	56.3	17.90	1.05	23.6										
2	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	-	56.3	17.90	1.05	8.4										
2	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	-	56.3	11.46	1.05	9.7										
1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	154.1										
1	-	-	1.60	17.00	4.24	18.00	-	5.00	0.0204	224	1.51E+06	112.5	6.25	1.05	22.2										
1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	0.33	-	-	-	-	372.5	18.26	1.05	57.6										
1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	1.50	5.00	0.0195	35	5.31E+06	372.5	18.26	1.05	23.5										
1	-	-	2.55	-	5.10	20.43	-	5.00	0.0195	7.35	5.31E+06	372.5	18.23	1.05	491.3										
1	-	-	2.55	-	5.10	20.43	1.00	-	-	-	-	372.5	18.23	1.05	174.6										
										Totale ΔP [Pa]					1291.2										
										η (aéraulique et électrique)					70%										
										Puissance requise [kW]					208										
										Reserve de 5% [kW]					10										
										Puissance installée [kW]					218										

Tab. 11.9: Pertes de charge pour une extraction de 112.5 m<sup>3</sup>/s (deux ventilateurs) et un débit de 260 m<sup>3</sup>/s de l'usine C existante (utilisation commune du puits).



Centrale de ventilation souterraine C (Italie)										Débit usine C			0 m <sup>3</sup> /s			Débit			112.5 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression	
Dénomination										Données sections					Données canaux					Densité d'air		Pertes de pression	
No.	Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ	Rugosité [mm]	Coeff. k	λ	Longueur [m]	Re <sub>p</sub>	Debit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes de pression [Pa]							
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	-	-	112.5	6.25	1.05	20.5							
Silencieux	1	6.00	3.00	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	-	-	112.5	6.25	1.05	36.3							
Buse d'entrée ventilateur	2	-	-	1.25	2.50	4.91	0.10	-	-	-	-	-	56.3	11.46	1.05	6.9							
Trappe ventilateur en amont	2	-	-	1.00	2.00	3.14	0.14	-	-	-	-	-	56.3	17.90	1.05	23.6							
Ventilateur	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-							
Diffuseur en aval	2	-	-	1.00	2.00	3.14	0.05	-	-	-	-	-	56.3	17.90	1.05	8.4							
Trappe ventilateur en aval	2	-	-	1.25	2.50	4.91	0.14	-	-	-	-	-	56.3	11.46	1.05	9.7							
Courbe en aval du ventilateur	1	-	-	1.60	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	-	112.5	13.99	1.05	154.1							
Canal de connection	1	-	-	1.60	17.00	4.24	18.00	-	5.00	0.0204	224	1.51E+06	112.5	6.25	1.05	22.2							
Confluence AV / Courbe	1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	1.32	-	-	-	-	112.5	5.51	1.05	21.1							
Galerie en pied de puits IV	1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	1.50	5.00	0.0195	35	1.60E+06	112.5	5.51	1.05	2.1							
Courbe en pied de puits	1	-	-	2.55	5.10	20.43	-	-	-	-	-	-	112.5	5.51	1.05	23.9							
Puits	1	-	-	2.55	5.10	20.43	-	-	5.00	0.0195	735	1.60E+06	112.5	5.51	1.05	44.8							
Sortie	1	-	-	2.55	5.10	20.43	1.00	-	-	-	-	-	112.5	5.51	1.05	15.9							
Totale ΔP [Pa]																389.5							
η <sub>1</sub> (aérodynamique et électrique)																70%							
Puissance requise [kW]																63							
Reserve de 5% [kW]																3							
Puissance installée [kW]																66							

Tab. 11.10: Pertes de charge pour une extraction de 112.5 m<sup>3</sup>/s et l'usine C existante hors service.

Centrale de ventilation souterraine C (Italie)										Débit usine C 260 m <sup>3</sup> /s			Débit 117 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression	
Dénomination	No.	Données sections				Données canaux				Densité d'air [kg/m <sup>3</sup> ]	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Pertes de pression [Pa]				
		Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonférence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ	Rugosité k [mm]					Coef. λ	Longueur [m]	Re <sub>0</sub>	
Ouverture extraction massive	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	-	117.0	6.50	22.2		
Silencieux	1	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	-	117.0	6.50	39.3		
Buse d'entrée ventilateur	1	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	-	117.0	23.84	29.8		
Trappe ventilateur en amont	1	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	-	117.0	37.24	101.9		
Ventilateur	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Diffuseur en aval	1	-	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	-	117.0	37.24	36.4		
Trappe ventilateur en aval	1	-	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	-	117.0	23.84	41.8		
Courbe en aval du ventilateur	1	-	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	117.0	14.55	166.7		
Canal de connexion	1	-	-	1.60	17.00	4.24	18.00	-	5.00	0.0204	224	1.57E+06	117.0	6.50	24.0		
Confluence AV / Courbe	1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	0.33	-	-	-	-	377.0	18.48	59.2		
Galerie en pied de puits IV	1	-	-	-	16.00	5.10	20.40	1.50	5.00	0.0195	35	5.38E+06	377.0	18.48	24.0		
Courbe en pied de puits	1	-	-	2.55	-	5.10	20.43	-	5.00	0.0195	735	5.37E+06	377.0	18.45	269.0		
Puits	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	377.0	18.45	503.2		
Sortie	1	-	-	2.55	-	5.10	20.43	1.00	-	-	-	-	377.0	18.45	178.8		
										Table VP [Pa]			1496.2				
										η <sub>1</sub> (aéraulique et électrique)			70%				
										Puissance requise [kW]			250				
										Reserve de 5% [kW]			13				
										Puissance installée [kW]			263				

Tab. 11.11: Pertes de charge pour une extraction de 117 m<sup>3</sup>/s (un seul ventilateur) et un débit de 260 m<sup>3</sup>/s de l'usine C existante (utilisation commune du puits).

Centrale de ventilation souterraine C (Italie)										Débit usine C			0 m <sup>3</sup> /s			Débit			117 m <sup>3</sup> /s			Pertes de pression	
Dénomination										Données sections					Données canaux					Densité d'air		Pertes de pression	
No.	Largeur [m]	Hauteur [m]	Rayon [m]	Circonfer. ence [m]	Diamètre hyd. [m]	Section [m <sup>2</sup> ]	Coeff. ζ	Rugosité k [mm]	Coeff. λ	Longueur [m]	Re <sub>D</sub>	Débit [m <sup>3</sup> /s]	Vitesse [m/s]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Pertes de pression [Pa]								
Ouverture extraction massive	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.00	-	-	-	-	117	6.50	1.05	22.2								
Silencieux	6.00	3.00	-	-	4.00	18.00	1.77	-	-	-	-	117	6.50	1.05	39.3								
Buse d'entrée ventilateur	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.10	-	-	-	-	117	23.84	1.05	29.8								
Trappe ventilateur en amont	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.14	-	-	-	-	117	37.24	1.05	101.9								
Ventilateur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-								
Diffuseur en aval	1.00	-	1.00	-	2.00	3.14	0.05	-	-	-	-	117	37.24	1.05	36.4								
Trappe ventilateur en aval	1.25	-	1.25	-	2.50	4.91	0.14	-	-	-	-	117	23.84	1.05	41.8								
Courbe en aval du ventilateur	1.60	-	1.60	-	3.20	8.04	1.50	-	-	-	-	117	14.55	1.05	166.7								
Canal de connection	1.60	-	1.60	17.00	4.24	18.00	-	5.00	0.0204	224	1.57E+06	117	6.50	1.05	24.0								
Confluence AV / Courbe	16.00	-	16.00	5.10	20.40	20.40	1.32	5.00	0.0195	35	1.67E+06	117	5.74	1.05	22.8								
Galerie en pied de puits	16.00	-	16.00	5.10	20.40	20.40	1.50	5.00	0.0195	735	1.67E+06	117	5.74	1.05	25.9								
Courbe en pied de puits	16.00	-	16.00	5.10	20.40	20.43	-	5.00	0.0195	735	1.67E+06	117	5.73	1.05	48.5								
Puits	2.55	-	2.55	-	5.10	20.43	1.00	-	-	-	-	117	5.73	1.05	17.2								
Sortie	2.55	-	2.55	-	5.10	20.43	1.00	-	-	-	-	117	5.73	1.05	17.2								
Totale ΔP [Pa]:															578.7								
η <sub>1</sub> (aéraulique et électrique)															70%								
Puissance requise [kW]:															87								
Reserve de 5% [kW]:															5								
Puissance installée [kW]:															102								

Tab. 11.12: Pertes de charge pour une extraction de 117 m<sup>3</sup>/s (un seul ventilateur) et l'usine C existante hors service.