

# LIAISON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne  
Traité du 29/01/2001

Tratta comune italo-francese  
Trattato del 29/01/2001

*Dott. Ing. Aldo Mancarella*  
Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

## NUOVA LINEA TORINO LIONE

### PARTE COMUNE ITALO FRANCESE - TRATTA IN TERRITORIO ITALIANO

CUP C11J05000030001

*Tecnimont*

*Dott. Ing. Aldo Mancarella*  
Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

### PROGETTO PRELIMINARE IN VARIANTE

### EQUIPEMENTS DE VENTILATION / IMPIANTI DI VENTILAZIONE

### NOTICE GENERALE SUR L'IMPACT DE L'ALLONGEMENT DU TUNNEL DE BASE NOTA GENERALE DEGLI EFFETTI DELL'ALLUNGAMENTO DEL TUNNEL DI BASE

| Indice | Date / Data | Modifications / Modifiche                | Etabli par / Concepito da | Vérifié par / Controllato da | Autorisé par / Autorizzato da |
|--------|-------------|--|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 0      | 26/04/2010  | PRIMA DIFFUSIONE / PREMIERE DIFFUSION    | F.HERVE<br>(SETEC)        | M. PIHOUEE<br>C.OGNIBENE     | M.FORESTA<br>A.MANCARELLA     |
| A      | 25/06/2010  | REVISIONE I N SEGUITO<br>AI COMMENTI LTF | F.HERVE<br>(SETEC)        | M. PIHOUEE<br>C.OGNIBENE     | M.FORESTA<br>A.MANCARELLA     |
|        |             |  |                           |                              |                               |
|        |             |  |                           |                              |                               |
|        |             |  |                           |                              |                               |
|        |             |  |                           |                              |                               |
|        |             |  |                           |                              |                               |
|        |             |  |                           |                              |                               |
|        |             |  |                           |                              |                               |

|     |              |   |                     |   |   |                      |   |   |        |   |   |        |   |                |   |             |   |   |   |
|-----|--------------|---|---------------------|---|---|----------------------|---|---|--------|---|---|--------|---|----------------|---|-------------|---|---|---|
| Cod | P            | P | 2                   | C | 2 | B                    | T | S | 3      | 0 | 0 | 5      | 9 | A              | A | P           | N | O | T |
| DOC | Phase / Fase |   | Sigle étude / Sigla |   |   | Émetteur / Emittente |   |   | Numero |   |   | Indice |   | Statut / Stato |   | Type / Tipo |   |   |   |

|                                |     |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| ADRESSE GED /<br>INDIRIZZO GED | C2B | // | // | 40 | 01 | 26 | 10 | 01 |
|--------------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|

|                 |
|-----------------|
| ECHELLE / SCALA |
| -               |



LTF sas - 1091 Avenue de la Boisse BP 80361 F-73006 CHAMBERY CEDEX (France)

Tél.: +33 (0) 4.79.68.56.50 - Fax: +33 (0) 4.79.68.56.59

RCS Chambéry 439 556 952 - TVA FR 03439556952

Propriété LTF Tous droits réservés - Proprietà LTF Tutti i diritti riservati

Ce projet  
est cofinancé par  
l'Union européenne  
(DG-TREN)



Questo progetto  
è cofinanziato  
dall'Unione europea  
(TEN-T)

## SOMMARIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1.</b>    | <b>RIASSUNTO / SINTHESE</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2.</b>    | <b>GENERALITÀ</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2.1</b>   | <b>CONTESTO GENERALE</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2.2</b>   | <b>OBIETTIVO DELLO STUDIO</b>   | <b>5</b>  |
| <b>2.3</b>   | <b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E BIBLIOGRAFIA</b>                        | <b>6</b>  |
| <b>2.3.1</b> | <b>Lotto C2</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2.3.2</b> | <b>Studi dell'APR/PD</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2.3.3</b> | <b>Studi di RPP</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2.3.4</b> | <b>Altri riferimenti</b>  | <b>6</b>  |
| <b>2.4</b>   | <b>STRUTTURA DEL RAPPORTO</b>   | <b>7</b>  |
| <b>3.</b>    | <b>PROGETTO LTF: DATI PRINCIPALI</b>                                  | <b>7</b>  |
| <b>3.1</b>   | <b>OSSERVAZIONI PRELIMINARI</b>                                       | <b>7</b>  |
| <b>3.2</b>   | <b>OPERE CIVILI</b>   | <b>7</b>  |
| <b>3.2.1</b> | <b>Descrizione generale</b>   | <b>7</b>  |
| <b>3.2.2</b> | <b>Galleria di base</b>   | <b>7</b>  |
| <b>3.2.3</b> | <b>By-pass (rami di comunicazione tra le canne)</b>                   | <b>8</b>  |
| <b>3.2.4</b> | <b>Discenderie, pozzi e gallerie</b>                                  | <b>9</b>  |
| <b>3.2.5</b> | <b>Stazioni di sicurezza</b>  | <b>9</b>  |
| <b>3.3</b>   | <b>IMPIANTI DI VENTILAZIONE</b>                                       | <b>9</b>  |
| <b>3.4</b>   | <b>MATERIALE ROTABILE</b>   | <b>10</b> |
| <b>3.4.1</b> | <b>Treni passeggeri</b>   | <b>10</b> |
| <b>3.4.2</b> | <b>Treni merci</b>  | <b>10</b> |
| <b>3.4.3</b> | <b>Treni d'autostrada ferroviaria</b>                                 | <b>10</b> |
| <b>3.4.4</b> | <b>Caratteristiche principali dei treni</b>                           | <b>11</b> |
| <b>3.4.5</b> | <b>Esercizio nominale</b>   | <b>11</b> |
| <b>3.4.6</b> | <b>Distanza dei treni al momento dell'arresto in caso d'incendio</b>  | <b>12</b> |
| <b>3.5</b>   | <b>FLUSSO ALL'INTERNO DELLA GALLERIA</b>                              | <b>12</b> |
| <b>3.5.1</b> | <b>Conclusioni</b>  | <b>12</b> |
| <b>4.</b>    | <b>INCENDIO E STRATEGIE D'ESTRAZIONE DEI FUMI</b>                     | <b>13</b> |
| <b>4.1</b>   | <b>OBIETTIVI DEL SISTEMA DI VENTILAZIONE</b>                          | <b>13</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>CARATTERISTICHE DEGLI INCENDI</b>                                  | <b>13</b> |
| <b>4.2.1</b> | <b>Potenza termica</b>  | <b>13</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Potenza sprigionata e potenza convettiva</b>                       | <b>14</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>STRATEGIA D'ESTRAZIONE DEI FUMI E D'EVACUAZIONE DEI PASSEGGERI</b> | <b>14</b> |
| <b>4.3.1</b> | <b>Principio d'evacuazione dei passeggeri</b>                         | <b>14</b> |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>4.3.2</b> | <b>Treno fermo ad una stazione di sicurezza</b>                                | <b>14</b> |
| <b>4.3.3</b> | <b>Treno fermo lungo la tratta</b>   | <b>15</b> |
| 4.3.3.1      | Incendio di una motrice di TGV   | 15        |
| 4.3.3.2      | Incendio di un treno merci   | 15        |
| 4.3.3.3      | Incendio di un treno d'AF  | 15        |
| <b>4.3.4</b> | <b>Riepilogo delle strategie di ventilazione da applicare</b>                  | <b>16</b> |
| <b>4.4</b>   | <b>TIMING DELLE PROCEDURE DI ESTRAZIONE DEI FUMI</b>                           | <b>16</b> |
| <b>4.4.1</b> | <b>Caso d'incendio di un treno passeggeri</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>4.4.2</b> | <b>Caso d'incendio di un treno merci o AF</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>5.</b>    | <b>SCENARI DI DIMENSIONAMENTO CONSIDERATI</b>                                  | <b>18</b> |
| <b>5.1</b>   | <b>TIPO D'INCENDIO</b>   | <b>18</b> |
| <b>5.2</b>   | <b>POSIZIONE DEI TRENI IN FIAMME</b>   | <b>18</b> |
| <b>5.3</b>   | <b>CONTRO-PRESSIONE</b>  | <b>19</b> |
| <b>6.</b>    | <b>METODOLOGIA DI STUDIO</b>   | <b>20</b> |
| <b>6.1</b>   | <b>IL CODICE DI CALCOLO TNT</b>  | <b>20</b> |
| <b>6.2</b>   | <b>DOMINIO DI CALCOLO</b>  | <b>21</b> |
| <b>6.3</b>   | <b>RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI</b>  | <b>21</b> |
| <b>7.</b>    | <b>INCENDIO DI UNA MOTRICE DI TGV (CANNA F → I)</b>                            | <b>23</b> |
| <b>7.1</b>   | <b>INTRODUZIONE</b>  | <b>23</b> |
| <b>7.2</b>   | <b>INCENDIO DI MOTRICE CENTRALE DI TGV: VELOCITÀ ELEVATA (DILUZIONE)</b>       | <b>23</b> |
| <b>7.2.1</b> | <b>Richiamo: potenza d'incendio e strategia di estrazione dei fumi</b>         | <b>23</b> |
| <b>7.2.2</b> | <b>Riepilogo dei risultati</b>   | <b>24</b> |
| 7.2.2.1      | Contro-pressione di -1000 Pa   | 24        |
| 7.2.2.2      | Contro-pressione di 0 Pa   | 24        |
| 7.2.2.3      | Contro-pressione di +1000 Pa   | 24        |
| <b>7.2.3</b> | <b>Discussione dei risultati</b>   | <b>25</b> |
| <b>7.3</b>   | <b>INCENDIO DI MOTRICE CENTRALE DI TGV: VELOCITÀ RIDOTTA (STRATIFICAZIONE)</b> | <b>25</b> |
| <b>7.3.1</b> | <b>Richiamo: potenza d'incendio e strategia d'estrazione dei fumi</b>          | <b>25</b> |
| <b>7.3.2</b> | <b>Riepilogo e discussione dei risultati</b>                                   | <b>25</b> |
| <b>8.</b>    | <b>INCENDIO D'UN TRENO MERCI / AF (CANNA F → I)</b>                            | <b>27</b> |
| <b>8.1</b>   | <b>INCENDIO E SCENARI DI DIMENSIONAMENTO</b>                                   | <b>27</b> |
| <b>8.1.1</b> | <b>Richiamo: potenza d'incendio e strategia di estrazione dei fumi</b>         | <b>27</b> |
| <b>8.2</b>   | <b>INCENDIO DI UN TRENO D'AF</b>   | <b>27</b> |
| <b>8.2.1</b> | <b>Riepilogo dei risultati</b>   | <b>27</b> |
| 8.2.1.1      | Contro pressione di -1000 Pa   | 27        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 8.2.1.2   | Contro-pressione di 0 Pa                              | 28        |
| 8.2.1.3   | Contre-pression de +1000 Pa                           | 28        |
| 8.2.2     | <b>Discussione dei risultati</b>                      | <b>28</b> |
| <b>9.</b> | <b>CONCLUSIONI</b>                                    | <b>29</b> |
| 9.1       | <b>STRATEGIA E VELOCITÀ CRITICA</b>                   | <b>29</b> |
| 9.2       | <b>STRATEGIA A VELOCITÀ ELEVATA (DILUIZIONE)</b>      | <b>29</b> |
| 9.3       | <b>STRATEGIA A VELOCITÀ RIDOTTA (STRATIFICAZIONE)</b> | <b>30</b> |

## 1. RIASSUNTO / SYNTHÈSE

L'estrazione dei fumi dal tunnel di base viene effettuata grazie ai mezzi meccanici messi in opera attraverso le discenderie (centrali di ventilazione esterne) ed all'interno del tunnel (acceleratori).

Indipendentemente dal tipo d'incendio (treno passeggeri o merci), dalla sua localizzazione, e dai parametri esterni (traffico, meteo, ...), il sistema deve essere in grado di controllare lo spostamento e l'estrazione dei fumi nel minor tempo possibile, in modo di garantire le migliori condizioni possibili nelle zone utilizzate per l'evacuazione.

Le désenfumage du tunnel de base s'effectue grâce aux moyens mécaniques mis en œuvre via les descenderies (usines de ventilation extérieures) et à l'intérieur du tunnel (accélérateurs).

Quels que soient le type d'incendie (train de voyageurs ou de marchandises), sa localisation, et les paramètres extérieurs (trafic, météo, ...), le système doit être capable de contrôler le déplacement et l'extraction des fumées dans un délai le plus réduit possible, afin de garantir les meilleures conditions possibles dans les zones utilisées pour l'évacuation.

## 2. GENERALITÀ

### 2.1 Contesto generale

Questo studio, realizzato dall'ufficio d'ingegneria GESTE Engineering SA di Losanna, sotto la direzione di SETEC TPI, s'inscrive nel quadro degli studi di Revisione del Progetto Preliminare (RPP) della galleria di base del collegamento ferroviario Lione-Torino. Esso si integra negli studi degli impianti non ferroviari del Lotto C2 e poggia sui risultati dell'APR/PD, Lotto B3 del 2005-2006 e degli studi funzionali realizzati nel quadro del lotto C1.

La revisione del progetto si è resa necessaria in seguito alle modifiche del tracciato intervenute dopo la fase dell'APR/PD nel 2006 che hanno portato a un prolungamento della galleria di base di circa 3 km.

### 2.2 Obiettivo dello studio

L'obiettivo dello studio, illustrato dettagliatamente nella nota metodologica [22], prevede la revisione degli scenari di estrazione dei fumi previsti negli studi dell'APR/PD in seguito alla modifica del tracciato della galleria.

Si tratta di verificare il funzionamento degli scenari nelle nuove condizioni considerando le nuove ipotesi del progetto (per esempio: nessun collegamento fra le due canne durante la fase d'evacuazione, nuove potenze d'incendio).

## 2.3 Documenti di riferimento e bibliografia

### 2.3.1 *Lotto C2*

- [1] Sans Objet.
- [2] Écartés APR\_PP-1.
- [3] PP2 TEC LTF 0001 A AP NOT - Cahier de charges techniques détaillé - Lot C2 – Equipements.
- [4] RPP, Lot C2, Etude thermique, refroidissement.

### 2.3.2 *Studi dell'APR/PD*

- [5] APR A2/ TS2 7.08A AP NOT - Dimensionnement des équipements de ventilation - Rapport final.
- [6] APR B3/TS2 0800D AP NOT - Etude de scénarios de désenfumage du tunnel de base.
- [7] APR B3/TS2 0801C PA NOT - Etude de la ventilation hygiénique du tunnel de base.
- [8] APR B3/TS2 0802C PA NOT - Etude de la ventilation et du désenfumage de descenderies.
- [9] APR B3/TS2 0814B PA NOT - Analyse fonctionnelle de la ventilation du tunnel de base.
- [10] APR B3/TS2 0815B PA NOT - Analyse fonctionnelle de la ventilation des descenderies.
- [11] APR B3/TS2 0816B PA NOT - Spécifications techniques des ventilateurs du tunnel de base et des descenderies.
- [12] APR B3/TS2 0818B PA NOT - Etude acoustique de la ventilation du tunnel de base.
- [13] APR B3/TS2 0819B PA NOT - Etude de robustesse de la ventilation du tunnel de base.
- [14] APR B3/TS2 0823C AP NOT - Etude de la mise en pression des rameaux.
- [15] APR A2/TS2 7.02C AP NOT - Influence de la vitesse longitudinale sur la puissance de l'incendie.

### 2.3.3 *Studi di RPP*

- [16] PP2 C1 TS3 0007-A PA NOT - Système de désenfumage du Tunnel de Base.
- [17] PP2 C1 TS3 0008-0 PA NOT - Système de contrôle de la vitesse longitudinale.
- [18] PP2 C2B TS3 0054-0 PA NOT – Ventilation : Notice Générale

### 2.3.4 *Altri riferimenti*

- [19] Les dossiers pilotes du CETU: Ventilation - Centre d'Etudes des tunnels 2003.
- [20] Subway Environmental Design Handbook Vol. 1 Principles and Applications.
- [21] Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers - France 25 août 2000.

## 2.4 **Struttura del rapporto**

I dati-chiave del progetto LTF e le ipotesi principali considerate in questo studio sono ricordati al Capitolo 2.

La problematica dello sviluppo di un incendio e le diverse strategie di estrazione dei fumi e di evacuazione dei passeggeri vengono descritte al Capitolo 3.

Il Capitolo 4 riassume gli scenari d'incendio di dimensionamento considerati.

Il Capitolo 5 descrive la metodologia utilizzata per lo studio di ventilazione.

I Capitoli 6 e 7 illustrano i risultati delle simulazioni numeriche e il dimensionamento degli impianti di estrazione dei fumi in caso d'incendio di una motrice di TGV, il primo, e di un treno merci o di un treno d'autostrada ferroviaria, il secondo.

Infine, il Capitolo 8 espone le conclusioni dello studio.

## 3. **PROGETTO LTF: DATI PRINCIPALI**

### 3.1 **Osservazioni preliminari**

I dati d'ingresso concernenti il progetto - e in particolare le opere civili, il materiale rotabile, il principio d'esercizio (traffico e cadenza), gli impianti di ventilazione, le strategie di estrazione dei fumi e i principi d'evacuazione delle persone - vengono ripresi essenzialmente dagli studi dell'APR/PD, tenendo conto dei nuovi dati e delle nuove ipotesi [23]. In questo capitolo vengono riassunti i valori principali necessari per lo studio della ventilazione.

### 3.2 **Opere civili**

#### 3.2.1 *Descrizione generale*

La galleria di base della linea ferroviaria fra Lione e Torino è costituita da 2 canne unidirezionali con dei by-pass (rami di comunicazione fra le canne) spaziate di 333 m circa. Essa comporta 3 stazioni di sicurezza (La Praz, Modane e Clarea). Queste ultime sono collegate alla superficie tramite pozzi e discenderie.

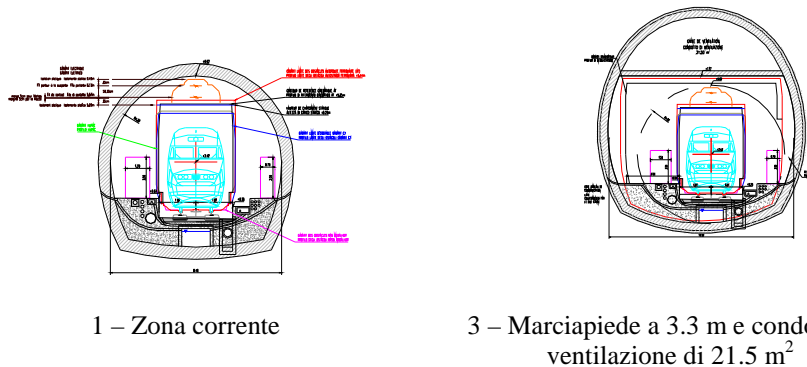
#### 3.2.2 *Galleria di base*

La galleria di base è composta da due canne lunghe 57'283 m (prolungate rispetto all'APR/PD) che presentano una pendenza media variabile fra +0.69 e -1.13% (cfr. Tableau 21).

La sezione della galleria è di 43 m<sup>2</sup> sulla totalità della lunghezza, tranne nei pressi dei siti d'intervento, dove però i cambiamenti di geometria hanno un'influenza limitata (cfr. Tableau 20).

Le pareti delle gallerie sono assimilate a del cemento standard con le caratteristiche termiche riassunte nella Tableau 22.

Per gli studi di ventilazione, la temperatura dell'aria esterna in prossimità dei due portali della galleria è supposta costante e pari a 10 °C.



**Figure 1** Sezione tipo della galleria di base in zona corrente (1) e condotto di ventilazione (2).  
 Fonte: APR/PD [27].

| Parametri della galleria |   | Valori            |
|--------------------------|---|-------------------|
| Lunghezza                |   | 57'283 m          |
| Sezione                  |   | 43 m <sup>2</sup> |
| Perimetro                |   | 26.4 m            |
| Coefficiente d'attrito   |   | 0.00625           |
| Quota altimetrica Ovest  |   | 560 m s n m       |
| Quota altimetrica Est    |   | 568 m s n m       |
| Pendenze                 | St. Jean de Maurienne – St. Martin la Porte | +0.67             |
|                          | St. Martin la Porte – La Praz               | +0.69             |
|                          | La Praz – Avrieux                           | +0.56             |
|                          | Avrieux – Clarea                            | -0.75             |
|                          | Clarea – Susa                               | -1.13             |

**Tableau 1** Caratteristiche geometriche principali della galleria di base. Una pendenza positiva corrisponde quindi ad una salita nel senso Ovest-Est, ossia Francia → Italia.

| Densità<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Conduttività termica<br>[W/(mK)] | Capacità termica massica<br>[J/(kgK)] |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 2'400                           | 1.60                             | 920                                   |

**Tableau 2** Caratteristiche termiche del cemento.

### 3.2.3 By-pass (rami di comunicazione tra le canne)

Ogni 333 m circa, le due canne della galleria di base sono collegate da by-pass o rami di comunicazione. Questi by-pass, secondo le nuove ipotesi prese in considerazione nel progetto LTF, sono sempre considerati come chiusi. Non se ne tiene dunque conto nella modellizzazione e nelle simulazioni numeriche che vengono effettuate su una sola canna.



### 3.2.4 Discenderie, pozzi e gallerie

La galleria è collegata alla superficie tramite 3 discenderie (St. Martin, La Praz e Modane), 2 pozzi (Avrieux e Val Clarea) e una galleria (Maddalena). Le caratteristiche principali di queste opere sono riassunte nella Tableau 23. Il coefficiente d'attrito alla parete dei condotti dei pozzi e delle discenderie è considerato pari a 0.00375.

| Opera                            | Posizione [m] | Lunghezza [m] | Altitudine del portale [msnm] | Pendenze a partire dal portale              | Sezione del condotto per la ventilazione |
|----------------------------------|---------------|---------------|-------------------------------|---|--|
| <b>Discenderia di St. Martin</b> | 7'307 m       | 2'038 m       | 695 m                         | +1% su 800 m,<br>-7.82% su 1238 m           | 20 m <sup>2</sup>                        |
| <b>Discenderia di La Praz</b>    | 16'856 m      | 2'556 m       | 969 m                         | -12 %                                       | 20 m <sup>2</sup>                        |
| <b>Discenderia di Modane</b>     | 29'059 m      | 4'049 m       | 1'087 m                       | +0.778 % su 1025 m,<br>-12.05 % su 3024 m   | -  |
| <b>Pozzi d'Avrieux</b>           | 28'328 m      | 860 m         | 1'300 m                       | Verticale su 530 m,<br>Orizzontale su 330 m | 2 x 27 m <sup>2</sup>                    |
| <b>Pozzi di Val Clarea</b>       | 43'079 m      | 4'522 m       | 1'156 m                       | -12%  | 42 m <sup>2</sup>                        |
| <b>Galleria della Maddalena</b>  | 43'454 m      | 7'541 m       | 570 m                         | +0.3 % su 1106 m,<br>+0.85 % su 9007 m      | -  |

*Tableau 3 Caratteristiche principali delle discenderie, dei pozzi e delle gallerie aventi un impatto sulla ventilazione della galleria. La posizione viene data a partire dal portale Ovest.*

### 3.2.5 Stazioni di sicurezza

All'interno della galleria sono previste 3 stazioni di sicurezza: La Praz, Modane e Clarea. Si tratta di luoghi specialmente attrezzati per gestire la situazione di un incendio su qualsiasi tipo di treno (passeggeri, merci, AF). Queste stazioni sono dotate di una sala d'accoglienza in grado di ricevere fino a 1100 persone. Ogni sala è collegata alle due canne della galleria di base tramite gallerie distanti fra di loro 50 m. Le stazioni di sicurezza sono i luoghi privilegiati per il trattamento dei treni passeggeri.

Oltre alle stazioni interne, la galleria di base è fornita di due stazioni di sicurezza esterne una a St. Jean de Maurienne e l'altra a Suze.

### 3.3 Impianti di ventilazione

I pozzi e le discenderie descritti nella Tableau 23 sono muniti di centrali di ventilazione che permettono di raggiungere le seguenti prestazioni:

- Discenderia di St. Martin: portata massima variabile fra -300 e +300 m<sup>3</sup>/s.
- Discenderia di La Praz: portata massima variabile fra -300 e +300 m<sup>3</sup>/s.
- Pozzo d'Avrieux: portata massima variabile fra -400 e +400 m<sup>3</sup>/s per ognuno dei due condotti.
- Pozzo di Val Clarea: portata massima variabile fra -400 e +400 m<sup>3</sup>/s.

Si prevede, inoltre, d'istallare, ad ogni portale della galleria, 12 acceleratori dalle seguenti caratteristiche:

- diametro interno: 1'000 mm;
- diametro esterno (senza silenziatore): 1'220 mm;
- spinta unitaria in campo libero: 1'130 N;
- velocità d'immissione: 35.7 m/s.

### 3.4 **Materiale rotabile**

I treni ammessi a circolare all'interno della galleria di base sono di 3 tipi: treni passeggeri (di seguito per semplicità chiamati TGV), treni merci e treni d'autostrada ferroviaria (chiamati treni d'AF).

#### 3.4.1 *Treni passeggeri*

I diversi tipi di treni passeggeri suscettibili di circolare all'interno della galleria di base sono:

- treni a velocità elevata tali l'ETR 500, il TGV Réseau e, eventualmente, il TGV Duplex;
- treni internazionali diurni o notturni;
- treni passeggeri regionali trainati da locomotiva o automotrici;
- treni speciali come i treni di pellegrinaggi.

Si è preso in considerazione il TGV-R in UM (2 convogli accostati) per rappresentare i treni passeggeri nelle modellizzazioni.

#### 3.4.2 *Treni merci*

I treni merci ammessi a circolare sul tracciato possono essere di più tipi (treni in lotti, treni completi, treni d'automobili, treni di trasporto combinato, treni a materiale vuoto, treni postali, treni di trasporto di merci pericolose ecc.).

La configurazione rimane tuttavia la stessa: sono tutti composti da vagoni trainati da una o più locomotive ed eventualmente spinti da una locomotiva attaccata o meno in coda al convoglio. Un treno merci non supera la lunghezza di 750 m.

#### 3.4.3 *Treni d'autostrada ferroviaria*

Il traffico di dimensionamento prevede, a medio termine, dei treni AF lunghi 750 m e, più a lungo termine, la circolazione di treni AF di 1500 m.

Viste le previsioni attuali, lo studio prenderà in considerazione il caso di AF da 750 m.

### 3.4.4 Caratteristiche principali dei treni

| Caratteristiche aerauliche             | TGV     | Merci     | AF        |
|--|---------|-----------|-----------|
| Lunghezza $L$ [m]                      | 400     | 750       | 750       |
| Sezione $S_T$ [m <sup>2</sup> ]        | 8.5     | 10.0      | 15.5      |
| Rapporto di bloccaggio                 | 0.20    | 0.25      | 0.36      |
| Perimetro $p$ [m]                      | 10.0    | 12.5      | 15.5      |
| Coefficiente d'attrito $c_f$           | 0.0056  | 0.023     | 0.0135    |
| Massa $M$ [kg]                         | 832'000 | 1'360'000 | 2'050'000 |
| Potenza alla ruota $P$ [MW]            | 17.6    | 6.76      | 11.3      |
| Velocità $v_T$ [km/h]                  | 220     | 120       | 120       |
| Coefficiente di resistenza $A$ [N]     | 6'080   | 12'000    | 23'200    |
| Coefficiente di resistenza $B$ [N/s/m] | 240     | 400       | 812       |
| Coefficiente di resistenza $C$ [kg/m]  | 28      | 72        | 183       |
| Perdite ausiliarie $\eta$ [%]          | 30      | 20        | 20        |
| Massa termica attiva $\phi$ [%]        | 60      | 25        | 30        |
| Calore specifico $C_T$ [J/kg/K]        | 960     | 480       | 480       |

*Tableau 4 Caratteristiche aerauliche e termiche dei treni in circolazione.*

### 3.4.5 Esercizio nominale

Il concetto d'esercizio nominale prevede una circolazione mista di treni passeggeri (al massimo 2 all'ora), di treni merci (al massimo 11 all'ora) e di treni d'autostrada ferroviaria (al massimo 3 all'ora).

La ripartizione oraria di questo traffico, utilizzata in questo studio per il calcolo dei carichi aerotermici, è riassunto nella Tableau 25.

| Ora          | 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <b>TGV</b>   | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 2 | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1  | 2  | 0  | 0  |
| <b>Merci</b> | 2 | 2 | 2 | 2 | 11 | 11 | 9 | 9 | 0 | 0  | 9  | 0  | 0  | 9  | 9  | 4  | 4  | 0  | 4  | 0  | 4  | 0  | 10 | 10 |
| <b>AF</b>    | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 1  | 3 | 3 | 3 | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 2  |

*Tableau 5 Numero di treni e ripartizione oraria del traffico.*

### 3.4.6 Distanza dei treni al momento dell'arresto in caso d'incendio

In caso di frenata d'urgenza in seguito ad un allarme incendio, per il dimensionamento delle installazioni di ventilazione, l'interdistanza e la successione dei tipi di treno proposti dal Lotto B3 nello studio de l'APR/PD [27] sono un'interpretazione degli scenari riportati dall'Allegato 4 del documento del Lotto A2 « 2.5 - Principe de traitement des diverses situations d'incident – Rapport final – V0b », ossia:

| Tipo di treno                           | TGV | TGV | AF | Merci | Merci | Merci | AF  | Merci | Merci | AF  |
|---|-----|-----|----|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-----|
| Interdistanza col treno precedente (km) | 30  | 7.5 | 13 | 9.5   | 9.5   | 9.5   | 9.5 | 9.5   | 9.5   | 9.5 |

*Tableau 6* Interdistanza dei treni all'arresto.

Questa sequenza verrà ripresa per tutti gli scenari d'incendio studiati e corrisponderà alla situazione di posizione relativa dei treni al momento in cui debutta la loro fase di rallentamento ( $t = 0$  delle modellizzazioni aerauliche).

### 3.5 Flusso all'interno della galleria

I calcoli aeraulici delle portate d'aria, generate dalla circolazione dei treni, realizzati al momento dello studio termico [25], considerando i nuovi dati geometrici dell'opera della galleria di base, hanno mostrato che queste variazioni non hanno un'influenza importante sul flusso all'interno della galleria. I risultati degli studi dell'APR/PD restano così validi e ne riportiamo qui le conclusioni.

#### 3.5.1 Conclusioni

Questi risultati permettono di concludere che, in regime d'esercizio normale, il pistonamento dovuto alla circolazione dei convogli sia sufficiente per assicurare la ventilazione igienica della galleria.

Tuttavia, in periodo di manutenzione e in assenza di circolazione dei treni, l'utilizzo degli impianti di ventilazione potrebbe rivelarsi necessario (in assenza di traffico prolungata, per evitare che la temperatura dell'aria all'interno della galleria superi i 32 °C, la ventilazione meccanica via i pozzi sarebbe necessaria in caso di condizioni climatiche esterne sfavorevoli). Inoltre, gli effetti presentati qui sopra possono avere un'influenza sull'efficacia di una o dell'altra strategia di estrazione dei fumi. Saranno dunque integrati negli scenari utilizzati per il dimensionamento degli impianti di ventilazione.

## 4. INCENDIO E STRATEGIE D'ESTRAZIONE DEI FUMI

### 4.1 Obiettivi del sistema di ventilazione

La problematica della ventilazione delle gallerie ferroviarie, e ancor più per le gallerie di una lunghezza considerevole, è strettamente legata agli effetti aerodinamici dovuti al pistonamento dei treni, agli effetti termici legati alle differenze di temperatura fra l'interno e l'esterno della galleria, come pure agli effetti dovuti ad una contro-pressione non nulla, che può potenzialmente superare il kilopascal.

D'altro canto, la problematica della ventilazione dei tunnel e quella dell'eventuale installazione di impianti di ventilazione, sono strettamente legate ai problemi relativi alla sicurezza delle persone, in particolar modo in caso d'incendio. In questo caso, la ventilazione deve essere tale da raggiungere i 3 obiettivi seguenti:

- controllare il tappo di fumo attraverso il controllo della corrente d'aria longitudinale, nel senso di marcia dei treni, qualunque sia la posizione dell'incendio sul convoglio e il tipo di convoglio;
- evacuare i passeggeri ed i membri dell'equipaggio verso le uscite di sicurezza nelle condizioni più sicure possibili;
- rinnovare l'aria nei locali tecnici dell'opera.

### 4.2 Caratteristiche degli incendi

#### 4.2.1 Potenza termica

Le potenze termiche di riferimento sprigionate da ogni tipo d'incendio sono riassunte nella Tableau 27. Le potenze di riferimento sono invariate rispetto agli studi dell'APRD/PD (15 MW per un treno passeggeri e 100 MW per un treno d'AF o merci), per contro un'interpretazione differente dell'influenza della ventilazione ha portato a una diminuzione della potenza considerata in funzione della strategia di ventilazione. Inoltre, lo studio del Lotto C1 [37] considera una velocità critica in galleria di 2.8 e 3.8 m/s per il treno passeggeri e, rispettivamente, per l'AF/merci: questi valori sono gli stessi di quelli utilizzati nell'APR/PD nonostante la potenza sia diminuita.

| Tipo di veicolo           | Potenza termica finale | Potenza termica all'arresto del treno | Tempo di crescita della potenza | Velocità dell'aria longitudinale in galleria |
|---------------------------|------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--|
| TGV (motrice centrale)    | 15.0 MW                | 1.5 MW                                | 120 s                           | 0.5 ± 0.5 m/s                                |
| TGV (motrice centrale)    | 30.0 MW                | 3.0 MW                                | 120 s                           | 6.0 m/s                                      |
| TGV (motrice d'estremità) | 25.5 MW                | 2.55 MW                               | 120 s                           | 2.8 m/s                                      |
| Treno d'AF                | 170.0 MW               | 17.0 MW                               | 120 s                           | 3.8 m/s                                      |
| Treno merci               | 170.0 MW               | 17.0 MW                               | 120 s                           | 3.8 m/s                                      |

Tableau 7 Caratteristiche degli incendi.

**NOTA: queste velocità devono essere raggiunte a T0+7, ossia 5 minuti dopo l'arresto del treno in fiamme, per i TGV, e il più velocemente possibile per i treni merci.**

L'incendio si sviluppa dal momento dell'arresto del treno a partire da una potenza pari al 10% della potenza totale. L'aumento di potenza è in seguito lineare fino a raggiungere la potenza finale, raggiunta in 120 s, che sarà mantenuta costante per il seguito della simulazione.

#### **4.2.2 Potenza sprigionata e potenza convettiva**

L'energia sprigionata dall'incendio viene in parte irraggiata e in parte trasportata per convezione dall'aria riscaldata e dai prodotti di combustione. Nel caso dell'incendio di un veicolo in galleria, la parte irraggiata è dell'ordine di 1/3 della potenza termica totale e viene direttamente assorbita dalla roccia. Tenuto conto della sua azione localizzata, spesso non viene simulata direttamente e viene sottratta dal bilancio energetico totale.

Nel presente studio, la potenza termica convettiva, ossia i 2/3 della potenza termica totale, viene simulata direttamente nella dinamica dell'incendio. Il 1/3 restante viene preso in considerazione per il calcolo dell'evoluzione della temperatura locale della roccia.

### **4.3 Strategia d'estrazione dei fumi e d'evacuazione dei passeggeri**

#### **4.3.1 Principio d'evacuazione dei passeggeri**

La galleria di base presenta 3 stazioni di sicurezza (La Praz, Modane e Val Clarea). Queste stazioni costituiscono dei punti d'arresto privilegiati per un treno accidentato e non più in grado di uscire dalla galleria. Un treno accidentato cercherà così, secondo l'ordine prioritario, di:

- uscire dalla galleria;
- se ciò non fosse possibile, fermarsi in una delle stazioni di sicurezza
- se ciò non fosse possibile, fermarsi dove può all'interno della galleria.

#### **4.3.2 Treno fermo ad una stazione di sicurezza**

Le stazioni di sicurezza sono dotate di due serrande d'estrazione massiccia, poste alle estremità della stazione, e di serrande d'estrazione ripartite fra le due. L'estrazione massiccia è utilizzata in caso di strategia a velocità critica (fumi estratti attraverso la serranda a monte o a valle in funzione della posizione dell'incendio) mentre l'estrazione ripartita viene utilizzata nella strategia a velocità ridotta (stratificazione). In caso di strategia di diluizione vengono utilizzati anche gli altri pozzi della galleria.

Nel caso della stazione di Modane, per evitare che i fumi invadano il binario di precedenza, quest'ultimo è posto in sovrappressione rispetto alla galleria utilizzando il secondo pozzo di ventilazione d'Avrieux. Questa soluzione, analizzata nello studio dell'APR/PD viene ripresa qui tale e quale per quel che riguarda i calcoli degli scenari con la nuova configurazione della galleria.

### **4.3.3    *Treno fermo lungo la tratta***

#### **4.3.3.1    *Incendio di una motrice di TGV***

##### **Incendio di motrice di coda**

In caso d'incendio di motrice di coda, la strategia d'utilizzo dei mezzi di ventilazione consiste nel respingere tutti i fumi verso la coda del treno imponendo un flusso longitudinale superiore alla velocità critica. Si suppone la potenza termica dell'incendio di 25.5 MW e la velocità critica è valutata a 2.8 m/s.

##### **Incendio di motrice centrale**

In caso d'incendio al centro di un convoglio TGV, attualmente sono messe in concorrenza due strategie di estrazione dei fumi:

- la strategia di estrazione dei fumi per diluizione, che prevede di spingere i fumi nel senso di marcia del treno ad una velocità superiore ai 6 m/s; in questo caso si suppone una potenza termica d'incendio di 30 MW;
- la strategia a bassa velocità, che punta a mantenere un'eventuale stratificazione dei fumi in prossimità dell'incendio mantenendo la velocità del flusso a dei valori dell'ordine di  $0.5 \pm 0.5$  m/s; in questo caso si suppone una potenza termica d'incendio di 15 MW.

##### **Incendio di motrice di testa**

In caso d'incendio di motrice di testa, la strategia di utilizzo dei mezzi di ventilazione consiste nello spingere tutti i fumi verso la parte anteriore del treno imponendo un flusso d'aria longitudinale superiore alla velocità critica per proteggere l'evacuazione dei passeggeri.

Si suppone una potenza termica d'incendio di 25.5 MW e la velocità critica è valutata a 2.8 m/s.

#### **4.3.3.2    *Incendio di un treno merci***

Oltre al macchinista, un treno merci non trasporta passeggeri. La ventilazione viene usata per formare una corrente d'aria superiore alla velocità critica nel senso contrario a quello di marcia, in modo che il macchinista in fuga non sia avvolto dai fumi.

Si suppone una potenza termica d'incendio di 170 MW e la velocità critica viene valutata a 3.8 m/s.

#### **4.3.3.3    *Incendio di un treno d'AF***

I convogli di autostrada ferroviaria sono composti da un veicolo Sonia in testa + 1 locomotiva + 1 convoglio + 1 locomotiva. In caso d'incendio, lo scenario normale prevede che il Sonia si stacchi dal resto del convoglio ed esca dalla galleria in maniera autonoma. La probabilità di mancato funzionamento di questa procedura normale è molto ridotta.

La ventilazione viene utilizzata per creare una corrente d'aria alla velocità critica nel senso inverso a quello di marcia, in modo da allontanare i fumi dal Sonia.

Si suppone una potenza termica d'incendio di 170 MW e la velocità critica viene valutata a 3.8 m/s.

#### 4.3.4 Riepilogo delle strategie di ventilazione da applicare

Questo paragrafo riporta il riassunto delle strategie di ventilazione da applicare.

La Tableau 28 ricapitola le strategie di ventilazione prese in considerazione, in funzione del tipo di treno in fiamme, della posizione dell'incendio sul treno (unicamente TGV) e della fase considerata.

| Tipo di treno          | Localizzazione sul treno   | Fase  | Strategia: velocità del flusso d'aria longitudinale da raggiungere |
|------------------------|----------------------------|---|--|
| TGV                    | Motrice di testa           | 1: Evacuazione  | Velocità critica nel senso di marcia                               |
|                        |                            | 2: Lotta contro l'incendio                            | Velocità critica in un senso o nell'altro                          |
|                        | Motrice centrale           | 1: Evacuazione  | Velocità elevata o velocità ridotta nel senso di marcia            |
|                        |                            | 2: Lotta contro l'incendio                            | Velocità critica in un senso o nell'altro                          |
|                        | Motrice di coda            | 1: Evacuazione  | Velocità critica nel senso inverso a quello di marcia              |
|                        |                            | 2: Lotta contro l'incendio                            | Velocità critica in un senso o nell'altro                          |
| Treno merci            | 1: Evacuazione             | Velocità critica nel senso inverso a quello di marcia |  |
|                        | 2: Lotta contro l'incendio | Velocità critica in un senso o nell'altro             |  |
| Autostrada ferroviaria | 1: Evacuazione             | Velocità critica nel senso inverso a quello di marcia |  |
|                        | 2: Lotta contro l'incendio | Velocità critica in un senso o nell'altro             |  |

Tableau 8 Strategie di ventilazione considerate

#### 4.4 Timing delle procedure di estrazione dei fumi

La Tableau 29 e la Tableau 30 mostrano il timing delle procedure di estrazione dei fumi prese in considerazione negli studi dell'APRD/PD.

L'istante iniziale  $t_0$  dell'avvio della procedura di ventilazione corrisponde all'istante di lancio della fase d'arresto di un treno in fiamme. In tutti i casi, la velocità ridotta presa in considerazione è di 30 km/h.



#### 4.4.1 Caso d'incendio di un treno passeggeri

| Tempo (min) | Azioni   |   |
|-------------|--|---|
|             | Canna sinistrata   | Canna sana  |
| 0           | Lancio della procedura di arresto<br>Lancio della procedura di ventilazione fase 1   |   |
| 2           | Arresto del treno incendiato e dei treni seguenti  |   |
| 3           | Inizio del rallentamento dei treni precedenti  | Inizio frenata dei treni che non hanno ancora superato il luogo del sinistro<br>Inizio del rallentamento dei treni che hanno superato il luogo del sinistro |
| 5           | Treni precedenti a velocità ridotta  | Arresto dei treni che non hanno ancora superato il luogo del sinistro<br>Treni oltre il luogo del sinistro a velocità ridotta                               |
| 7           | Regime di ventilazione stabilito   |   |
| 10          | Inizio del rinvio a velocità ridotta dei treni seguenti<br>Inizio dell'evacuazione attraverso il/i by-pass presso il treno in fiamme | Inizio del rinvio dei treni che non hanno ancora superato il luogo del sinistro   |
| 30          | Fine dell'evacuazione attraverso il/i by-pass<br>Lancio della procedura di ventilazione fase 2                                       |   |

**Tableau 9** Timing delle procedure di estrazione dei fumi in caso d'incendio di un convoglio TGV.  
 Fonte: APRD/PD.

#### 4.4.2 Caso d'incendio di un treno merci o AF

| Tempo (min) | Azione   |   |
|-------------|--|---|
|             | Canna sinistrata   | Canna sana  |
| 0           | Lancio della procedura d'arresto<br>Lancio della procedura di ventilazione fase 1  |   |
| 2           | Arresto del treno incendiato e dei treni seguenti                                  |   |
| 3           | Inizio del rallentamento dei treni precedenti                                      | Inizio della frenata dei treni che non hanno ancora superato il luogo del sinistro<br>Inizio del rallentamento dei treni che hanno superato il luogo del sinistro |
| 5           | Treni precedenti a velocità ridotta  | Arresto dei treni che non hanno ancora superato il luogo del sinistro<br>Treni oltre il sinistro a velocità ridotta   |
| 10          | Inizio del rinvio dei treni seguenti a velocità ridotta<br>Inizio dell'evacuazione | Inizio del rinvio dei treni che non hanno ancora superato il luogo del sinistro   |
| 30          | Lancio della procedura di ventilazione fase 2                                      |   |

**Tableau 10** Timing delle procedure di estrazione dei fumi in caso d'incendio di un convoglio merci o d'AF. Fonte: APRD/PD.

## 5. SCENARI DI DIMENSIONAMENTO CONSIDERATI

Con lo scopo di verificare gli scenari di estrazione dei fumi con le modifiche intervenute nel progetto, tra gli scenari analizzati nello studio l'APR/PD Lotto B3 [27], sono stati scelti alcuni casi rappresentativi e dimensionanti.

La lista completa degli scenari dell'APR/PD viene riportata nelle tabelle che seguono (Tableau 31 e Tableau 32). Sono evidenziati unicamente i casi che sono stati ripresi e analizzati nella nuova configurazione, gli altri sono in grigio chiaro.

### 5.1 Tipo d'incendio

I tipi d'incendio considerati sono i seguenti (cfr. anche la Tableau 27).

| Tipo d'incendio        | Strategia d'estrazione dei fumi    | Velocità d'aria longitudinale | Potenza termica |
|------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| TGV (motrice di coda)  | velocità critica                   | -2.8 m/s                      | 25.5 MW (27 MW) |
| TGV (motrice centrale) | velocità elevata (diluzione)       | +6.0 m/s                      | 30 MW           |
| TGV (motrice centrale) | velocità ridotta (stratificazione) | 0.5 ± 0.5 m/s                 | 15 MW           |
| TGV (motrice di testa) | velocità critica                   | +2.8 m/s                      | 25.5 MW (27 MW) |
| Treno d'AF             | velocità critica                   | -3.8 m/s                      | 170 MW (215 MW) |
| Treno merci            | velocità critica                   | -3.8 m/s                      | 170 MW (215 MW) |

*Tableau 11* Tipi d'incendio e strategia d'estrazione dei fumi. Fra parentesi le potenze utilizzate nello studio dell'APR/PD, Lotto B3 [27].

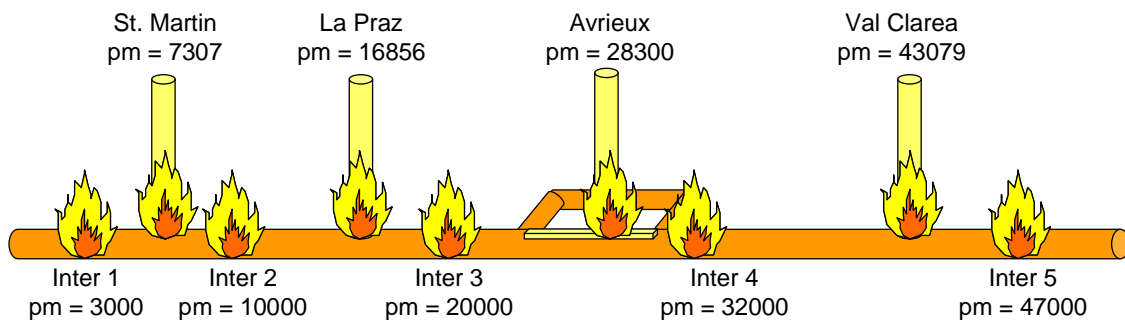
**NOTA : queste velocità devono essere raggiunte a T0+7, ossia 5 minuti dopo l'arresto del treno in fiamme, per i TGV, e il più in fretta possibile per i treni merci.**

### 5.2 Posizione dei treni in fiamme

Come indicato nella Tableau 32 (cfr. anche Tableau 33), sono state considerate 9 posizioni d'incendio, una in ognuno delle 3 stazioni di sicurezza o Saint Martin e in ognuna delle 5 zone intermedie. Vengono evidenziati unicamente i casi che sono stati ripresi e analizzati nella nuova configurazione, gli altri sono scritti in grigio chiaro. I casi considerati sono quelli ritenuti dimensionanti.

| Posizione dell'incendio                        | Coordinate metriche rispetto al portale Ovest |
|--|---|
| Inter 1 (fra il portale francese e St. Martin) | 3'000 m                                       |
| St Martin                                      | 7'307 m                                       |
| Inter 2 (fra St. Martin e La Praz)             | 10'000 m                                      |
| La Praz  | 16'856 m                                      |
| Inter 3 (fra La Praz e Modane-bis)             | 20'000 m                                      |
| Modane   | 29'059 m                                      |
| Inter 4 (fra Modane-bis e Val Clarea)          | 32'000 m                                      |
| Val Clarea                                     | 43'454 m                                      |
| Inter 5 (fra Val Clarea e il portale italiano) | 47'000 m                                      |

**Tableau 12** Posizione dell'incendio per i diversi scenari di studio (le coordinate sono date nel senso Francia - Italia, lo zero è fissato all'entrata del portale francese).



**Figure 2** Posizione dell'incendio secondo i diversi scenari di studio.

L'arresto di un treno in fiamme in uno delle 3 stazioni di sicurezza corrisponde ad una situazione eccezionale sotto controllo, siccome un treno in fiamme riesce a controllare la sua frenata e a posizionarsi in una zona dove l'evacuazione dei passeggeri e l'estrazione dei fumi sono facilitate.

L'arresto in una delle 5 zone intermedie rappresenta, per contro, una situazione eccezionale non controllata. In tal caso, non si può supporre che il treno riesca a controllare la frenata e che possa quindi posizionarsi in modo che le sue porte di testa e di coda si trovino praticamente di fronte ad un by-pass.

### 5.3 Contro-pressione

La differenza di pressione massima fra i portali della galleria di base è stata stimata a  $\pm 1000$  Pa. Di conseguenza il presente studio per il dimensionamento degli impianti, prende in considerazione le 3 seguenti contro-pressioni:

- -1000 Pa,
- 0 Pa,
- +1000 Pa.

In seguito ci limiteremo a presentare i risultati ottenuti per la canna Francia  $\rightarrow$  Italia. In questo caso si parlerà di:

- contro-pressione negativa di -1000 Pa quando il livello di pressione misurato al portale italiano sarà di 1000 Pa inferiore a quello misurato al portale francese (senza considerare la differenza di pressione dovuta all'altitudine);
- contro-pressione positiva di +1000 Pa quando il livello di pressione misurato al portale italiano sarà di 1000 Pa superiore a quello misurato al portale francese (senza considerare la differenza di pressione dovuta all'altitudine).

## 6. METODOLOGIA DI STUDIO

Gli scenari selezionati vengono simulati numericamente seguendo un approccio monodimensionale (1D). Quest'approccio, sistematico, relativamente semplice e rapido, è sufficiente per lo scopo del presente studio. Con riserva di validità dell'ipotesi di monodimensionalità del flusso, l'approccio 1D è in effetti in grado di riprodurre, tra le altre cose, il movimento dei diversi treni, gli effetti termici, gli effetti dovuti alla gravità e, naturalmente, lo sviluppo dell'incendio e la propagazione dei fumi integrando pure il sistema di ventilazione.

### 6.1 Il codice di calcolo TNT

I calcoli 1D sono stati realizzati con il codice di calcolo TNT, sviluppato e convalidato da GESTE Engineering in collaborazione con il Politecnico di Milano.

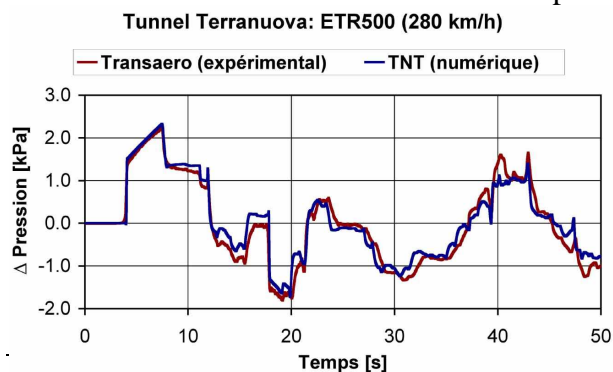
TNT, acronimo di Tunnel Nets & Trains, è un programma di calcolo sviluppato per la simulazione numerica di flussi comprimibili non stazionari indotti dal passaggio di veicoli a bassa o alta velocità in gallerie ferroviarie o stradali, a geometria complessa. Permette pure di simulare la propagazione dei fumi in galleria, integrando un eventuale sistema di ventilazione forzata.

TNT, basato sulla soluzione della formulazione monodimensionale (1D) delle equazioni di Navier-Stokes, calcola, in ogni istante ed in ogni punto di una rete di gallerie, la variazione temporale dei campi di pressione, di densità, di velocità, di temperatura, di concentrazione dei fumi, d'umidità dell'aria ecc. Gli effetti viscosi sono presi in considerazione esplicitamente grazie a dei coefficienti di attrito alle pareti e di perdita di carico. Viene pure considerata la forza gravitazionale.

TNT è stato sviluppato a partire dal 1994 principalmente presso il *Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano* il quale, in seguito, ha potuto beneficiare della collaborazione di GESTE Engineering che ha permesso di testare, di convalidare e di "industrializzare" il codice di calcolo.

Il programma di calcolo integra un modello correttivo ad hoc in modo da prendere in considerazione gli effetti tridimensionali legati alla testa, alla coda e alla scia dei veicoli. Questi effetti sono particolarmente importanti per i treni a alta velocità.

TNT può trattare un numero arbitrario di veicoli e di gallerie. Quest'ultime, a geometria complessa, possono integrare dei pozzi di ventilazione emergenti in superficie, essere collegate da by-pass di anti-pistonamento, avere delle biforcazioni ad angolo arbitrario e comprendere pure dei portali perforati alle estremità. Le condizioni atmosferiche alle estremità aperte dei tunnel e dei pozzi possono essere non-uniformi (effetto camino per esempio). I veicoli in movimento possono avere una velocità variabile a seconda di un profilo prescelto.



TNT, grazie ad uno schema numerico poco dissipativo, simula fedelmente la propagazione delle onde di pressione, permettendo di analizzare i carichi aerodinamici sulle strutture, le micro-onde di pressione in prossimità dei portali e gli effetti aereo-acustici (confort timpanico). A questo proposito, TNT è stato convalidato

Ventilazione: Nota generale sugli effetti dell'allungamento del tunnel di base

Ventilation : Notice générale sur l'impact de l'allongement du tunnel de base

con molteplici dati sperimentali ed in particolare con i risultati del programma di ricerca europeo Transaero: come illustrato dalla figura qui a sinistra, il programma di calcolo ha riprodotto con grandissima precisione i campi aerodinamici non-stazionari generati dal passaggio ad alta velocità (da 180 a 280 km/h) di uno o due treni ETR500 nella galleria di Terranuova Le Ville sulla linea italiana Firenze-Arezzo (binario doppio, lunghezza di 2'707 m).

TNT può simulare degli incendi in galleria, fissi o mobili sul veicolo, come pure la propagazione dei fumi generati, considerando l'effetto camino, il movimento del veicolo e anche un eventuale sistema di ventilazione.

TNT può esaminare delle reti complesse con dei sistemi di ventilazione diversi (ventilatori a getto per esempio) e calcola il loro effetto in termine di flusso di massa e di calore in funzione della loro curva caratteristica.

TNT può pure simulare l'evoluzione della temperatura dell'aria nella galleria considerando il trasferimento di calore alla roccia, dove il programma calcola la conduzione della temperatura su uno spessore di più metri.

In conclusione, TNT non permette solo di simulare i fenomeni legati alle onde di pressione, ma può pure simulare uno scenario completo d'incendio comprendente lo sviluppo di un incendio su un veicolo in movimento, il rallentamento e l'arresto del veicolo, la messa in funzione dei ventilatori, l'apertura di eventuali by-pass, l'evacuazione dei treni non sinistrati.

## 6.2 Dominio di calcolo

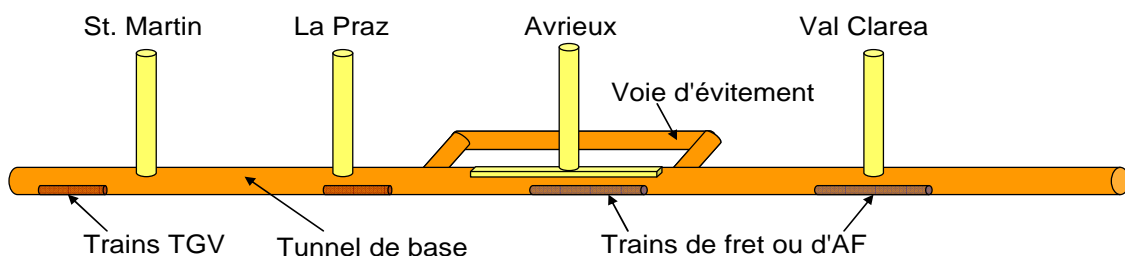
Il dominio di calcolo ritenuto per la simulazione 1D prende in considerazione l'insieme delle opere e dei treni.

Secondo le nuove ipotesi considerate per il progetto LTF, le due canne sono separate l'una dall'altra da un punto di vista aeraulico siccome i by-pass sono dimensionati per accogliere tutti i passeggeri in modo che le porte verso la canna sana vengano aperte unicamente dopo la chiusura di quelle verso la canna incendiata. La simulazione considera dunque solo una canna, con i suoi pozzi (il secondo e il quarto sono aperti) e il suo binario di precedenza attorno alla stazione di sicurezza di Modane (cfr. Tableau 34).

## 6.3 Rappresentazione dei risultati

I risultati principali dei numerosi scenari d'incendio simulati vengono presentati nel Capitolo 6, per quel che concerne l'incendio di una motrice di TGV, e nel Capitolo 7, per quel che concerne l'incendio di un treno d'AF. Vengono illustrati unicamente gli scenari verificati attraverso i nuovi dati e le nuove ipotesi.

Le variabili prese in considerazione per descrivere questi risultati sono riassunte di seguito nella Tableau 35.



**Figure 3** Dominio di calcolo nel caso in cui le due canne sono separate dal punto di vista aeraulico.

| Variabile          | Significato  | Unità             |
|--------------------|--|-------------------|
| $\Delta P$         | Contro-pressione $\Delta P < 0 \Rightarrow$ flusso $F \rightarrow I$<br>$\Delta P > 0 \Rightarrow$ flusso $I \rightarrow F$  | Pa                |
| $x_{inc}$          | Posizione dell'incendio  | m                 |
| $\Phi_{St.Martin}$ | Portata volumetrica d'aspirazione ( $\Phi < 0$ ) o d'immissione ( $\Phi > 0$ ) dal pozzo di St. Martin   | m <sup>3</sup> /s |
| $\Phi_{La Praz}$   | Portata volumetrica d'aspirazione ( $\Phi < 0$ ) o d'immissione ( $\Phi > 0$ ) dal pozzo di La Praz  | m <sup>3</sup> /s |
| $\Phi_{Avrieux}$   | Portata volumetrica d'aspirazione ( $\Phi < 0$ ) o d'immissione ( $\Phi > 0$ ) dal pozzo d'Avrieux   | m <sup>3</sup> /s |
| $\Phi_{ValClarea}$ | Portata volumetrica d'aspirazione ( $\Phi < 0$ ) o d'immissione ( $\Phi > 0$ ) dal pozzo di Val Clarea   | m <sup>3</sup> /s |
| $v_{stop}$         | Velocità del flusso 20 m a valle (o a monte) del treno in fiamme al momento dell'arresto del treno.  | m/s               |
| $v_{10min}$        | Velocità del flusso 20 m a monte (rispetto al senso d'estrazione dei fumi) del treno in fiamme 10 minuti dopo il lancio della procedura d'arresto (ossia 8 minuti dopo l'arresto del treno).                             | m/s               |
| $v_{30min}$        | Velocità del flusso 20 m a monte (rispetto al senso d'estrazione dei fumi) del treno in fiamme 30 minuti dopo il lancio della procedura d'arresto (ossia 28 minuti dopo l'arresto del treno).                            | m/s               |
| $v_{retour}$       | velocità di ritorno a valle del punto d'estrazione più vicino all'incendio : questa velocità deve essere al minimo pari a 1 m/s in direzione del punto d'estrazione.   | m/s               |
| $t_{vc}$           | Tempo necessario, a partire dal lancio della procedura d'arresto di un treno, per raggiungere la velocità di consegna.   | min               |
| $T_{sortie}$       | Temperatura del miscuglio aria/fumi all'uscita della galleria o del ventilatore in aspirazione più vicino all'incendio.  | °C                |
| $T_{10min}$        | Temperatura del miscuglio aria/fumi 20 m a monte o a valle (rispetto al senso d'estrazione dei fumi) del treno in fiamme 10 minuti dopo il lancio della procedura d'arresto (ossia 8 minuti dopo l'arresto del treno).   | °C                |
| $T_{30min}$        | Temperatura del miscuglio aria/fumi 20 m a monte o a valle (rispetto al senso di estrazione dei fumi) del treno in fiamme 30 minuti dopo il lancio della procedura d'arresto (ossia 28 minuti dopo l'arresto del treno). | °C                |
| Pressione relativa | Aumento della pressione rispetto al valore atmosferico iniziale (valore di riferimento).   | Pa                |
| am                 | a monte  | -                 |
| av                 | a valle  | -                 |

**Tableau 13** Significato delle variabili prese in considerazione.

## 7. INCENDIO DI UNA MOTRICE DI TGV (CANNA F → I)

### 7.1 Introduzione

Prioritariamente, un treno passeggeri accidentato cercherà dapprima di uscire dalla galleria per fermarsi all'aria aperta. Nel caso in cui ciò non fosse possibile cercherà di fermarsi con una frenata controllata in una delle stazioni di sicurezza (La Praz, Modane, Clarea); infine, se l'arresto non potesse essere controllato, il veicolo in fiamme si fermerà in galleria lungo la tratta.

Nel caso di arresto controllato in una stazione di sicurezza, il concetto di ventilazione prevede una strategia di ventilazione basata sulla posizione dell'incendio: velocità critica per l'incendio di motrice di coda, con estrazione massiccia puntuale davanti o dietro; stratificazione per l'incendio di motrice centrale con estrazione ripartita. L'evacuazione dei passeggeri avviene tramite i by-pass posizionati lungo la stazione che collegano quest'ultima con la stazione d'accoglienza. Le condizioni di fuga sono dunque ideali.

Nel caso di arresto lungo la tratta, le strategie d'intervento messe in atto sono definite in modo da offrire ai passeggeri le migliori condizioni di sicurezza e di fuga. Esse prevedono, da un lato, il controllo della velocità di propagazione dei fumi all'interno della canna sinistrata e, dall'altro, l'evacuazione dei passeggeri verso la canna sana.

La velocità di propagazione dei fumi viene controllata grazie ai ventilatori posizionati in cima ai 4 pozzi di ventilazione: St. Martin, La Praz, Avrieux e Val Clarea. Le portate di ventilazione necessarie vengono presentate in questo capitolo in funzione dello scenario d'estrazione dei fumi, delle condizioni di contro-pressione e della posizione del veicolo in fiamme.

### 7.2 Incendio di motrice centrale di TGV: velocità elevata (diluzione)

#### 7.2.1 *Richiamo: potenza d'incendio e strategia di estrazione dei fumi*

In caso di un incendio sviluppatosi su una motrice centrale di un convoglio TGV fermo lungo la tratta, con un sistema di ventilazione longitudinale, non è possibile gestire l'estrazione dei fumi senza che la metà del treno, se non tutto il treno stesso, venga avvolto dai fumi. Per offrire comunque delle condizioni di fuga soddisfacenti, vengono messe in concorrenza due strategie d'estrazione dei fumi:

- la prima, presa in considerazione in questo paragrafo 6.2, ha lo scopo di diluire i fumi respingendoli nel senso di marcia dei treni a una velocità pari almeno a 6.0 m/s, che deve essere raggiunta al più tardi 5 minuti dopo l'arresto del treno;
- la seconda, analizzata nel paragrafo seguente (Paragrafo 6.3), mira a frenare il flusso nei pressi dell'incendio e a controllare la velocità dell'aria attorno a  $0.5 \pm 0.5$  m/s, in modo da attuare e mantenere le migliori condizioni possibili affinché i fumi possano stratificarsi e propagarsi unicamente lungo la volta, offrendo così delle condizioni di fuga soddisfacenti.

Nel caso in cui la strategia miri alla diluzione dei fumi, ossia quando la velocità di immissione sull'incendio è di 6 m/s, si suppone una potenza termica sviluppata pari a 30 MW, di cui 1/3

viene dissipato sotto forma di irraggiamento. Si suppone l'aumento della potenza dell'incendio quasi istantanea a partire dall'arresto del treno : da 3.0 a 30 MW in 2 minuti.

### 7.2.2 Riepilogo dei risultati

Sono stati analizzati unicamente i casi rappresentativi e dimensionanti rispetto alle modifiche del tracciato.

#### 7.2.2.1 Contro-pressione di -1000 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{v_c}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------------|--------|
| Inter 5   | 0                  | 0                | +350             | +150               | 12.9       | 8.0         | 8.3         | -            | 0.0       | 20           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 11.8       | 7.7         | 7.5         | -            | 0.0       | 20           | RPP    |

**Tableau 14** Confronto tra i risultati dello studio APR/PD, Lotto B3 [27] e la configurazione attuale. Portata di estrazione dei fumi necessaria in caso d'incendio di motrice centrale di TGV (cfr. Tableau 35 per la definizione dei simboli). Nel caso in cui, per la portata del pozzo di Avrieux, vi fossero 2 valori, il secondo concerne la ventilazione del binario di precedenza.

#### 7.2.2.2 Contro-pressione di 0 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{v_c}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------------|--------|
| Inter 1   | -200               | -200             | 0                | 0                  | 11.0       | 7.9         | 7.1         | -1.1         | 1.5       | 16           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 11.5       | 7.7         | 7.2         | -1.2         | 1.4       | 15           | RPP    |

**Tableau 15** Confronto fra i risultati dello studio APR/PD, Lotto B3 [27] e la configurazione attuale. Portata d'estrazione dei fumi necessaria in caso d'incendio di motrice centrale di TGV (cfr. Tableau 35 per la definizione dei simboli). Nel caso in cui, per il pozzo di Avrieux, venissero indicati due valori, il secondo concerne le ventilazione del binario di precedenza.

#### 7.2.2.3 Contro-pressione di +1000 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{v_c}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------------|--------|
| Inter 4   | 0                  | +300             | +300             | -400               | 8.1        | 7.8         | 6.7         | -1.2         | 4.5       | 23           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 8.9        | 7.4         | 6.4         | -1.6         | 1.3       | 22           | RPP    |

**Tableau 16** Confronto fra i risultati dello studio APR/PD, Lotto B3 [27] e la configurazione attuale. Portata di estrazione dei fumi necessaria in caso d'incendio di motrice centrale di TGV (cfr. Tableau 35 per la definizione dei simboli). Nel caso in cui, per le portate del pozzo d'Avrieux, venissero indicati 2 valori, il secondo concerne la ventilazione del binario di precedenza.



### 7.2.3 *Discussione dei risultati*

Riguardo a questi risultati, nel caso della strategia di diluizione, le conclusioni dello studio dell'APR/PD, Lotto B3 [27] relative a:

- il raggiungimento e il mantenimento della velocità di consegna all'interno della canna sinistrata;
- la pressione nei pressi dell'incendio;
- la pressione relativa ai ventilatori

restano valide.

Tuttavia, i problemi di messa in pressione della canna sana e di velocità nei by-pass non si pongono più visto che durante la fase d'evacuazione almeno una delle porte di questi by-pass rimane chiusa.

## 7.3 **Incendio di motrice centrale di TGV: velocità ridotta (stratificazione)**

### 7.3.1 *Richiamo: potenza d'incendio e strategia d'estrazione dei fumi*

Nel caso di un incendio sviluppatosi sulla motrice centrale di un convoglio TGV, quando la strategia di estrazione dei fumi mira alla stratificazione di questi ultimi, la potenza termica sviluppata è di 15 MW, di cui 1/3 è dissipata sotto forma di irraggiamento. Si suppone che l'aumento della potenza dell'incendio sia quasi istantaneo a partire dall'arresto del treno: da 1.5 a 15 MW in 2 minuti.

La strategia di estrazione dei fumi mira a mantenere i fumi stratificati controllando la velocità dell'aria a  $0.5 \pm 0.5$  m/s. Questo regime deve essere raggiunto al più tardi 5 minuti dopo l'arresto del treno.

### 7.3.2 *Riepilogo e discussione dei risultati*

Considerato che le portate necessarie sono limitate, l'ottenimento di una velocità ridotta non è un criterio dimensionante per gli impianti di ventilazione. Tuttavia, il controllo di una tale velocità è più delicato se effettuato unicamente attraverso dei pozzi di ventilazione.

In tutti i casi d'incendio studiati, è stato possibile soddisfare globalmente i vincoli e gli obiettivi richiesti dagli scenari di estrazione dei fumi utilizzando unicamente 1 o 2 pozzi, con solamente una parte della potenza disponibile.

Tuttavia, per certi scenari, le fluttuazioni generate dal movimento dei treni sono tali che la velocità può momentaneamente (per un periodo più o meno lungo), uscire dal dominio compreso fra 0 e 1 m/s. Quest'effetto è chiaramente più marcato nel caso di movimento di un treno d'AF.

Queste perturbazioni sono visibili sull'evoluzione della velocità a monte e a valle del treno, fra  $t = 2$  min (arresto del treno in fiamme e dei treni seguenti),  $t = 3$  min (inizio del rallentamento dei treni precedenti il treno in fiamme) e  $t = 5$  min (quando il treno precedente il treno in fiamme si dirige verso l'uscita della galleria ad una velocità ridotta di 30 km/h).

Il problema principale sollevato al momento dello studio dell'APR/PD era la possibilità di mettere in pressione, unicamente attraverso i pozzi, la canna sana rispetto alla canna sinistrata, controllando contemporaneamente la velocità attraverso le porte dei by-pass. Era stato

mostrato che una velocità troppo elevata aveva un effetto di destratificazione sui fumi in movimento lungo la volta della canna sinistrata a velocità ridotta. Questa problematica non esiste più per il fatto che secondo le nuove ipotesi del progetto i by-pass restano chiusi. È dunque possibile concludere che il dimensionamento dei pozzi e gli scenari di ventilazione in caso di velocità ridotta (stratificazione), così come definiti nello studio dell'APR/PD, Lotto B3 [27] restano validi.

## 8. INCENDIO D'UN TRENO MERCI / AF (CANNA F → I)

### 8.1 Incendio e scenari di dimensionamento

#### 8.1.1 *Richiamo: potenza d'incendio e strategia di estrazione dei fumi*

Come prima cosa, un treno merci o d'AF accidentato cercherà di uscire dalla galleria per fermarsi all'aria aperta. Se ciò non fosse possibile cercherà di fermarsi nelle stazioni di sicurezza attraverso una frenata controllata. Infine, se la frenata non potesse essere controllata, il veicolo accidentato si fermerà lungo la tratta all'interno della galleria.

Nel caso di una frenata controllata in una stazione di sicurezza, il concetto di ventilazione, identico per i 2 tipi di treni, prevede un'aspirazione dei fumi attraverso le serrande posizionate lungo la volta utilizzando i pozzi di ventilazione della stazione.

Nel caso d'arresto lungo la tratta, le strategie d'intervento applicate, identiche per i due tipi di treno, vengono definite in modo da respingere i fumi nel senso inverso a quello di marcia del treno, ad una velocità superiore o pari alla velocità critica (3.8 m/s). La velocità critica deve essere raggiunta entro un intervallo di tempo ragionevole.

Si suppone la potenza termica sprigionata dall'incendio identica per i 2 tipi di treni : essa è pari a 170 MW, di cui 1/3 è dissipata sotto forma d'irraggiamento. L'aumento di potenza dell'incendio viene supposto quasi istantaneo a partire dal momento dell'arresto del treno: da 17 a 170 MW in 2 minuti.

### 8.2 Incendio di un treno d'AF

Il treno d'AF, a causa del suo coefficiente d'attrito elevato (0.0135 contro 0.0056 per il treno merci) e della sua sezione (15.5 m<sup>2</sup> contro 8.5 m<sup>2</sup>) genera un importante effetto pistone e, in confronto a un treno merci, oppone una maggior resistenza all'inversione del flusso, necessaria per applicare la strategia di estrazione dei fumi. Di conseguenza, per la verifica degli scenari con la nuova configurazione del tunnel di base, verrà considerato solo l'incendio di un treno d'AF.

#### 8.2.1 *Riepilogo dei risultati*

Sono stati analizzati solo i casi rappresentativi e dimensionanti riferiti alle modifiche del tracciato.

##### 8.2.1.1 *Contro pressione di -1000 Pa*

| $x_{inc}$  | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{v_c}$ | $T_{sortie}$ |        |
|------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------------|--------|
| St. Martin | -300               | +300             | +150             | 0                  | 4.1        | -4.1        | -4.4        | 0.9          | 5.0       | 134          | APR/PD |
|            |                    |                  |                  |                    | 4.0        | -4.3        | -4.3        | 0.9          | 4.5       | 114          | RPP    |

**Tableau 17** Confronto fra i risultati dello studio APR/PD, Lotto B3 [27] e la configurazione attuale. Portata di estrazione dei fumi necessaria in caso d'incendio di un treno d'AF (cfr. Tableau 35 per la definizione dei simboli). Nel caso in cui, per quel che concerne le portate del pozzo di Avrieux, vi fossero 2 valori, il secondo concerne la ventilazione del binario di precedenza.

### 8.2.1.2 Contro-pressione di 0 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{vc}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|----------|--------------|--------|
| Inter 4   | 0                  | 0                | -400             | +300               | 2.5        | -4.5        | -6.5        | 1.8          | 5.5      | 36           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 2.1        | -4.7        | -6.5        | 2.0          | 5.6      | 29           | RPP    |

**Tableau 18** Confronto fra i risultati dello studio APR/PD, Lotto B3 [27] e la configurazione attuale. Portata di estrazione dei fumi necessaria in caso d'incendio di un treno d'AF (cfr. Tableau 35 per la definizione dei simboli). Nel caso in cui, per quel che concerne le portate del pozzo di Avrieux, vi fossero 2 valori, il secondo concerne la ventilazione del binario di precedenza.

### 8.2.1.3 Contre-pression de +1000 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{vc}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|----------|--------------|--------|
| Inter 5   | 0                  | 0                | +200             | -300               | -0.9       | -4.1        | -5.9        | 2.4          | 7.5      | 24           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 5.2        | -4.2        | -5.3        | 1.4          | 8.0      | 23           | RPP    |

**Tableau 19** Confronto fra i risultati dello studio APR/PD, Lotto B3 [27] e la configurazione attuale. Portata di estrazione dei fumi necessaria in caso d'incendio di un treno d'AF (cfr. Tableau 35 per la definizione dei simboli). Nel caso in cui, per quel che concerne le portate del pozzo di Avrieux, vi fossero 2 valori, il secondo concerne la ventilazione del binario di precedenza.

## 8.2.2 Discussione dei risultati

La modifica del tracciato e delle ipotesi del progetto non hanno apportato cambiamenti significativi ai risultati. Restano valide le stesse conclusioni tratte al momento dello studio dell'APR/PD.

In tutti i casi studiati è stato possibile soddisfare le esigenze richieste dagli scenari di estrazione dei fumi utilizzando le portate disponibili.

A monte del treno, la velocità critica di respingimento dei fumi di 3.8 m/s è sempre stata raggiunta in un lasso di tempo ragionevole, in generale meno di 8 minuti dall'arresto del treno (i.e. a  $t = 10$  min).

All'equilibrio la velocità del flusso è superiore a 3.8 m/s, compresa fra 4.5 e 6 m/s; perciò le perturbazioni di velocità generate dal movimento degli altri treni non hanno alcuna influenza conseguente sul valore del campo di velocità a monte del treno: quest'ultimo resta sempre al di là dei 3.8 m/s.

In generale, in caso d'incendio in un inter-site, sono sufficienti 2 pozzi per respingere i fumi oltre la velocità critica.

Nel caso in cui il treno in fiamme venisse fermato nella stazione di sicurezza di Modane o di Clarea, i fumi vengono completamente aspirati attraverso il pozzo al di sopra del treno; questi pozzi permettono infatti di estrarre fino a 400 m<sup>3</sup>/s. Tuttavia, nel caso in cui il treno in fiamme venisse fermato a St. Martin o nella stazione di sicurezza di La Praz (i cui ventilatori permettono di estrarre unicamente 300 m<sup>3</sup>/s), per l'estrazione dei fumi sarebbero necessari 3 pozzi.

## 9. CONCLUSIONI

Questo studio s'iscrive nell'ambito della Revisione del Progetto Preliminare (RPP) degli impianti non ferroviari della galleria di base della linea LTF. Concerne la revisione e la verifica degli scenari d'estrazione dei fumi definiti durante la fase d'APR/PD, rispetto alle modifiche del tracciato (galleria allungata di circa 3 km) e alle nuove ipotesi del progetto (per esempio, distanza fra i by-pass, procedura di evacuazione dei passeggeri, gestione dell'apertura delle porte dei by-pass, potenza degli incendi).

Lo stesso modello di calcolo (TNT di GESTE Engineering) utilizzato nello studio dell'APR/PD è stato adattato alla nuova configurazione e alcuni scenari dimensionanti o significativi sono stati ricalcolati. I risultati ottenuti mostrano che il dimensionamento dei pozzi di ventilazione permette sempre di ottemperare alle strategie di ventilazione prese in considerazione per gli incendi di diversi tipi di treni aventi la possibilità di circolare all'interno della galleria di base. Le principali conclusioni sono riassunte qui di seguito.

### 9.1 Strategia e velocità critica

In tutti i casi d'incendio studiati, è stato possibile soddisfare i vincoli e gli obiettivi di velocità richiesti dagli scenari d'estrazione dei fumi utilizzando le portate di ventilazione disponibili.

La velocità critica di respingimento dei fumi di 2.8 m/s (treni passeggeri) e 3.8 m/s (treni d'AF o merci) è sempre stata raggiunta a monte del treno in un lasso di tempo ragionevole e in ogni caso inferiore ai 7 minuti richiesti per i treni passeggeri. In seguito essa è mantenuta superiore a questa soglia limite.

Le perturbazioni sul flusso legate ai movimenti dei treni non sono significative; esse non portano ad una diminuzione della velocità nei pressi del treno al di sotto della velocità di consegna.

Inoltre, la posizione del treno in fiamme all'interno della galleria, come pure la posizione d'arresto degli altri veicoli non sono elementi determinanti per la regolazione del sistema di ventilazione. Basta limitarsi al caso più contraignant. Una strategia di estrazione dei fumi semplice può venir dunque definita per tronconi, in funzione del tipo di veicolo in fiamme e della posizione dell'incendio sul veicolo.

### 9.2 Strategia a velocità elevata (diluizione)

Le stesse osservazioni effettuate per la strategia a velocità critica sono valide per un incendio di motrice centrale associato ad una strategia d'estrazione dei fumi che mira alla diluizione dei fumi stessi.

In tutti gli scenari studiati, è stato possibile soddisfare i vincoli e gli obiettivi richiesti dagli scenari di estrazione dei fumi utilizzando le portate di ventilazione disponibili. Le velocità

raggiunte sono comprese fra circa 6 e 7 m/s. Queste velocità hanno potuto essere raggiunte utilizzando 2 o 3 pozzi.

### 9.3 **Strategia a velocità ridotta (stratificazione)**

nel caso d'incendio di motrice centrale di TGV, oltre alla strategia di estrazione dei fumi che mira alla diluizione dei fumi stessi, viene studiata anche una seconda strategia. Questa strategia, che mira a conservare la stratificazione dei fumi, prevede il mantenimento della velocità del flusso nei pressi dell'incendio in una forchetta compresa fra 0 e 1 m/s.

Lo studio ha mostrato che, nei pressi dell'incendio, è sempre possibile raggiungere una velocità inferiore a 1 m/s utilizzando unicamente una parte della potenza dei pozzi disponibile e in tutte le diverse condizioni di contro-pressione. Le fluttuazioni generate dal movimento degli altri treni influenzano il flusso nei pressi dell'incendio: la velocità dell'aria può allora, momentaneamente (per un periodo più o meno lungo), uscire dal dominio compreso fra 0 e 1 m/s.

Il problema principale sollevato al momento degli studi dell'APR/PD era la possibilità di pressurizzare, unicamente attraverso i pozzi, la canna sana rispetto alla canna sinistrata controllando contemporaneamente la velocità attraverso le porte dei by-pass. Era stato mostrato che una velocità troppo elevata aveva un effetto di destratificazione sui fumi in movimento lungo la volta della canna sinistrata a una velocità ridotta. Questa problematica non esiste più siccome secondo le nuove ipotesi del progetto i by-pass restano chiusi.

## SOMMAIRE

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>GÉNÉRALITÉS</b>                                     | <b>33</b> |
| 1.1       | CONTEXTE GÉNÉRAL                                       | 33        |
| 1.2       | OBJECTIF DE L'ÉTUDE                                    | 33        |
| 1.3       | DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE ET BIBLIOGRAPHIE                | 33        |
| 1.3.1     | Lot C2   | 33        |
| 1.3.2     | Études d'APR/PD  | 33        |
| 1.3.3     | Études de RPP  | 34        |
| 1.3.4     | Autres références                                      | 34        |
| 1.4       | STRUCTURE DU RAPPORT                                   | 34        |
| <b>2.</b> | <b>PROJET LTF: DONNÉES PRINCIPALES</b>                 | <b>35</b> |
| 2.1       | REMARQUE PRÉLIMINAIRE                                  | 35        |
| 2.2       | OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL                                | 35        |
| 2.2.1     | Description générale                                   | 35        |
| 2.2.2     | Tunnel de base   | 35        |
| 2.2.3     | Rameau de communication inter-tubes                    | 36        |
| 2.2.4     | Descenderies, puits et galeries                        | 36        |
| 2.2.5     | Sites de sécurité                                      | 37        |
| 2.3       | EQUIPEMENTS DE VENTILATION                             | 37        |
| 2.4       | MATÉRIEL ROULANT                                       | 38        |
| 2.4.1     | Trains de voyageurs                                    | 38        |
| 2.4.2     | Trains de fret   | 38        |
| 2.4.3     | Trains d'autoroute ferroviaire                         | 38        |
| 2.4.4     | Caractéristiques principales des trains                | 39        |
| 2.4.5     | Exploitation nominale                                  | 39        |
| 2.4.6     | Espacement à l'arrêt en cas d'incendie                 | 40        |
| 2.5       | ÉCOULEMENT DANS LE TUNNEL                              | 40        |
| 2.5.1     | Conclusion   | 40        |
| <b>3.</b> | <b>INCENDIE ET STRATÉGIE DE DÉSENFUMAGE</b>            | <b>41</b> |
| 3.1       | OBJECTIFS DU SYSTÈME DE VENTILATION                    | 41        |
| 3.2       | CARACTÉRISTIQUES DES INCENDIES                         | 41        |
| 3.2.1     | Puissance thermique                                    | 41        |
| 3.2.2     | Puissance rayonnée et puissance convective             | 42        |
| 3.3       | STRATÉGIE DE DÉSENFUMAGE ET D'ÉVACUATION DES PASSAGERS | 42        |
| 3.3.1     | Principe d'évacuation des passagers                    | 42        |
| 3.3.2     | Train arrêté en site de sécurité                       | 42        |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3.3 | Train arrêté en pleine voie                                      | 43 |
| 3.3.4 | Résumés des stratégies de ventilation à appliquer                | 43 |
| 3.4   | TIMING DES PROCÉDURES DE DÉSENFUMAGE                             | 44 |
| 3.4.1 | Cas de l'incendie d'un train de voyageurs                        | 45 |
| 3.4.2 | Cas de l'incendie d'un train de fret ou AF                       | 45 |
| 4.    | SCÉNARIOS DE DIMENSIONNEMENT RETENUS                             | 46 |
| 4.1   | TYPE D'INCENDIE  | 46 |
| 4.2   | POSITIONNEMENT DES TRAINS INCENDIÉS                              | 46 |
| 4.3   | CONTRE-PRESSION  | 47 |
| 5.    | MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE   | 48 |
| 5.1   | LE LOGICIEL DE CALCUL TNT  | 48 |
| 5.2   | DOMAINE DE CALCUL  | 49 |
| 5.3   | REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS                                     | 49 |
| 6.    | INCENDIE D'UNE MOTRICE DE TGV (TUBE F → I)                       | 50 |
| 6.1   | INTRODUCTION   | 50 |
| 6.2   | FEU DE MOTRICE CENTRALE DE TGV: VITESSE ÉLEVÉE (DILUTION)        | 51 |
| 6.2.1 | Rappel: puissance d'incendie et stratégie de désenfumage         | 51 |
| 6.2.2 | Résumé des résultats   | 51 |
| 6.2.3 | Discussion des résultats   | 52 |
| 6.3   | FEU DE MOTRICE CENTRALE DE TGV: VITESSE RÉDUITE (STRATIFICATION) | 53 |
| 6.3.1 | Rappel: puissance d'incendie et stratégie de désenfumage         | 53 |
| 6.3.2 | Résumés et discussion des résultats                              | 53 |
| 7.    | INCENDIE D'UN TRAIN DE FRET / AF (TUBE F → I)                    | 53 |
| 7.1   | INCENDIE ET SCÉNARIOS DE DIMENSIONNEMENT                         | 53 |
| 7.1.1 | Rappel: puissance d'incendie et stratégie de désenfumage         | 53 |
| 7.2   | INCENDIE D'UN TRAIN D'AF   | 54 |
| 7.2.1 | Résumés des résultats  | 54 |
| 7.2.2 | Discussion des résultats   | 55 |
| 8.    | CONCLUSIONS  | 55 |
| 8.1   | STRATÉGIE À VITESSE CRITIQUE                                     | 56 |
| 8.2   | STRATÉGIE À VITESSE ÉLEVÉE (DILUTION)                            | 56 |
| 8.3   | STRATÉGIE À VITESSE FAIBLE (STRATIFICATION)                      | 56 |



# 1. GÉNÉRALITÉS

## 1.1 Contexte général

Cette étude a été réalisée par le bureau d'ingénieurs GESTE Engineering SA de Lausanne, sous la direction de SETEC TPI. Elle s'inscrit dans le cadre des études de Révision du Projet Préliminaire (RPP) du tunnel de base de la liaison ferroviaire Lyon-Turin (LTF). Elle s'intègre dans les études des équipements non ferroviaires du Lot C2 et s'appuie sur les résultats de l'APR/PD, Lot B3 de 2005-2006 et des études fonctionnelles réalisées dans le cadre du Lot C1.

La révision du projet s'est avérée nécessaire suite aux modifications du tracé intervenues après la phase de l'APR/PD en 2006 qui ont conduit à un prolongement du tunnel de base de 3 km environ.

## 1.2 Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est détaillé dans la note méthodologique [22]. Il prévoit la révision des scénarios de désenfumage préconisés dans les études de l'APRD/PD avec la modification du tracé du tunnel.

Il s'agit de vérifier le fonctionnement des scénarios dans les nouvelles conditions tout en considérant les nouvelles hypothèses du projet (par exemple, pas de mise en communication des deux tubes pendant la phase d'évacuation, nouvelles puissances d'incendie).

## 1.3 Documents de référence et bibliographie

### 1.3.1 Lot C2

[22] Sans Objet.

[23] Écarts APR\_PP-1.

[24] PP2 TEC LTF 0001 A AP NOT - Cahier de charges techniques détaillé - Lot C2 – Equipements.

[25] RPP, Lot C2, Etude thermique, refroidissement.

### 1.3.2 Etudes d'APR/PD

[26] APR A2/ TS2 7.08A AP NOT - Dimensionnement des équipements de ventilation - Rapport final.

[27] APR B3/TS2 0800D AP NOT - Etude de scenarii de désenfumage du tunnel de base.

[28] APR B3/TS2 0801C PA NOT - Etude de la ventilation hygiénique du tunnel de base.

[29] APR B3/TS2 0802C PA NOT - Etude de la ventilation et du désenfumage de descenderies.

[30] APR B3/TS2 0814B PA NOT - Analyse fonctionnelle de la ventilation du tunnel de base.

[31] APR B3/TS2 0815B PA NOT - Analyse fonctionnelle de la ventilation des descenderies.

- [32] APR B3/TS2 0816B PA NOT - Spécifications techniques des ventilateurs du tunnel de base et des descenderies.
- [33] APR B3/TS2 0818B PA NOT - Etude acoustique de la ventilation du tunnel de base.
- [34] APR B3/TS2 0819B PA NOT - Etude de robustesse de la ventilation du tunnel de base.
- [35] APR B3/TS2 0823C AP NOT - Etude de la mise en pression des rameaux.
- [36] APR A2/TS2 7.02C AP NOT - Influence de la vitesse longitudinale sur la puissance de l'incendie.

### ***1.3.3 Études de RPP***

- [37] PP2 C1 TS3 0007-A PA NOT - Système de désenfumage du Tunnel de Base.
- [38] PP2 C1 TS3 0008-0 PA NOT - Système de contrôle de la vitesse longitudinale.
- [39] PP2 C2B TS3 0054-0 PA NOT – Ventilation : Notice Générale

### ***1.3.4 Autres références***

- [40] Les dossiers pilotes du CETU: Ventilation - Centre d'Etudes des tunnels 2003.
- [41] Subway Environmental Design Handbook Vol. 1 Principles and Applications.
- [42] Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers - France 25 août 2000.

## **1.4 Structure du rapport**

Les données-clés du projet LTF ainsi que les hypothèses principales retenues dans cette étude sont rappelées au Chapitre 2.

La problématique du développement d'un incendie et les diverses stratégies de désenfumage et d'évacuation des passagers sont décrites au Chapitre 3.

Le Chapitre 4 résume les scénarios d'incendie de dimensionnement retenus.

Le Chapitre 5 décrit la méthodologie utilisée pour l'étude de ventilation.

Les Chapitres 6 et 7 illustrent les résultats des simulations numériques et le dimensionnement des équipements de désenfumage en cas d'incendie d'une motrice de TGV pour le premier et d'un train de fret ou d'autoroute ferroviaire pour le deuxième.

Enfin, le Chapitre 8 dresse les conclusions de l'étude.

## 2. PROJET LTF: DONNÉES PRINCIPALES

### 2.1 Remarque préliminaire

Les données d'entrée concernant le projet – et notamment les ouvrages de génie civil, le matériel roulant, le principe d'exploitation (trafic et carrousel), les installations de ventilation, les stratégies de désenfumage et les principes d'évacuation des personnes – sont principalement reprises des études de l'APR/PD, tout en prenant en compte les nouvelles données et hypothèses [23]. Les valeurs principales nécessaires pour l'étude de ventilation sont résumées dans ce chapitre.

### 2.2 Ouvrages de génie civil

#### 2.2.1 Description générale

Le tunnel de base de la ligne ferroviaire entre Lyon et Turin est constitué de 2 tubes unidirectionnels avec des rameaux de communication inter-tubes espacés de 333 m environ. Il comporte 3 sites de sécurité (La Praz, Modane et Clarea). Ces derniers sont connectés à la surface par le biais de puits et descenderies.

#### 2.2.2 Tunnel de base

Le tunnel de base est composé de deux tubes de 57'283 m (rallongés par rapport à l'APR/PD) de long présentant une pente moyenne variable entre +0.69 et -1.13% (cf. Tableau 21).

La section du tunnel est de 43 m<sup>2</sup> sur la totalité de la longueur, où toutefois les changements de géométrie n'ont qu'une influence limitée (cf. Tableau 20).

Les parois des tunnels sont assimilées à du béton standard avec les caractéristiques thermiques résumées au Tableau 22.

Pour les études de ventilation, la température de l'air extérieur en proximité des deux têtes du tunnel est supposée constante et égale à 10°C.



1 – Zone courante

3 – Trottoir à 3.3 m et gaine de ventilation de 21.5 m<sup>2</sup>

**Tableau 20** Coupes type du tunnel de base en zone courante (1) et gaine de ventilation (2). Source: APR/PD [27].

| Paramètre du tunnel                         | Valeur            |
|---|-------------------|
| Longueur                                    | 57'283 m          |
| Section                                     | 43 m <sup>2</sup> |
| Périmètre                                   | 26.4 m            |
| Coefficient de frottement                   | 0.00625           |
| Cote altimétrique Ouest                     | 560 m s n m       |
| Cote altimétrique Est                       | 568 m s n m       |
| Pentes                                      |                   |
| St. Jean de Maurienne – St. Martin la Porte | +0.67             |
| St. Martin la Porte – La Praz               | +0.69             |
| La Praz – Avrieux                           | +0.56             |
| Avrieux – Clarea                            | -0.75             |
| Clarea – Susa                               | -1.13             |

**Tableau 21** Principales caractéristiques géométriques du tunnel de base. Une pente positive correspond à une montée dans le sens Ouest-Est, soit France → Italie.

| Densité<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Conductivité thermique<br>[W/(mK)] | Capacité thermique massique<br>[J/(kgK)] |
|---------------------------------|------------------------------------|--|
| 2'400                           | 1.60                               | 920                                      |

**Tableau 22** Caractéristiques thermiques du béton.

### 2.2.3 Rameau de communication inter-tubes

Tous les 333 m environ, les deux tubes du tunnel de base sont reliés par des rameaux de communication. Ces rameaux sont considérés toujours fermés selon les nouvelles hypothèses prises en considération dans le projet LTF. Ils ne sont donc pas pris en compte dans la modélisation et dans les simulations numériques qui sont faites sur un seul tube.

### 2.2.4 Descenderies, puits et galeries

Le tunnel est connecté à la surface par le biais de 3 descenderies (St. Martin, La Praz et Modane), 2 puits (Avrieux et Val Clarea) et une galerie (Maddalena). Les principales caractéristiques de ces ouvrages sont résumées au Tableau 23. Le coefficient de frottement de la paroi des gaines des puits et descenderies est pris égal à 0.00375.

| Ouvrage                   | Position [m] | Longueur [m] | Altitude de la tête [msnm] | Pentes à partir de la tête                  | Section de gaine pour la ventilation |
|---------------------------|--------------|--------------|----------------------------|---|--------------------------------------|
| Descenderie de St. Martin | 7'307 m      | 2'038 m      | 695 m                      | +1% sur 800 m,<br>-7.82% sur 1238 m         | 20 m <sup>2</sup>                    |
| Descenderie de La Praz    | 16'856 m     | 2'556 m      | 969 m                      | -12 %                                       | 20 m <sup>2</sup>                    |
| Descenderie de Modane     | 29'059 m     | 4'049 m      | 1'087 m                    | +0.778 % sur 1025 m,<br>-12.05 % sur 3024 m | -                                    |
| Puits d'Avrieux           | 28'328 m     | 860 m        | 1'300 m                    | Vertical sur 530 m,<br>horizontal sur 330 m | 2 x 27 m <sup>2</sup>                |
| Puits de Val Clarea       | 43'079 m     | 4'522 m      | 1'156 m                    | -12%  | 42 m <sup>2</sup>                    |
| Galerie de la Maddalena   | 43'454 m     | 7'541 m      | 570 m                      | +0.3 % sur 1106 m,<br>+0.85 % sur 9007 m    | -                                    |

*Tableau 23* Caractéristiques principales des descenderies, puits et galerie ayant un impact sur la ventilation du tunnel. La position est donnée à partir de la tête Ouest.

### 2.2.5 Sites de sécurité

Trois sites de sécurité sont prévus dans le tunnel: La Praz, Modane et Clarea. Ce sont des lieux en tunnel spécialement équipés pour gérer la situation d'un incendie sur tout type de trains (voyageurs, fret, AF). Ces sites sont notamment dotés d'une salle d'accueil pouvant recevoir jusqu'à 1100 personnes. Chacune de ces salles est reliée aux deux tubes du tunnel de base par l'intermédiaire de galeries inter-distances de 50 m. Les sites de sécurité sont les lieux privilégiés pour le traitement des trains voyageurs.

Outre les sites intérieurs, le tunnel de base est entouré par deux sites de sécurité extérieurs l'un à St. Jean de Maurienne et l'autre à Suze.

### 2.3 Equipements de ventilation

Les puits et descenderies décrits dans le Tableau 23 sont équipés d'usines de ventilation permettant d'atteindre les prestations suivantes:

Descenderie de St. Martin: débit maximum variable entre -300 et +300 m<sup>3</sup>/s.

Descenderie de La Praz: débit maximum variable entre -300 et +300 m<sup>3</sup>/s.

Puits d'Avrieux: débit maximum variable entre -400 et +400 m<sup>3</sup>/s pour chacune des deux gaines.

Puits de Val Clarea: débit maximum variable entre -400 et +400 m<sup>3</sup>/s.

Il est également prévu d'installer 12 accélérateurs par tête de tunnel avec les caractéristiques suivantes:

diamètre intérieur: 1'000 mm;

diamètre extérieur (sans silencieux): 1'220 mm;

poussée unitaire en champ libre: 1'130 N;

vitesse d'éjection: 35.7 m/s.

## 2.4 Matériel roulant

Les trains amenés à circuler dans le tunnel de base sont de 3 types: trains de voyageurs (ci-après nommés pour simplicité TGV), trains de fret et trains d'autoroute ferroviaire (nommés ci-après trains d'AF).

### 2.4.1 Trains de voyageurs

Les divers types de trains de voyageurs susceptibles de circuler dans le tunnel de base sont:

- des trains à grande vitesse tels l'ETR 500, le TGV Réseau et, éventuellement, le TGV Duplex;
- des trains internationaux de jour ou de nuit;
- des trains de voyageurs régionaux en rames tractées ou en automotrices;
- des trains spéciaux comme les trains de pèlerinage.

Le TGV-R en UM (2 rames accolées) est retenu pour représenter les trains de voyageurs dans les modélisations.

### 2.4.2 Trains de fret

Les trains de fret amenés à circuler sur le tracé peuvent être de plusieurs types (trains de lotissement, trains complets, trains d'automobiles, trains de transport combiné, trains de matériel vides, trains de messagerie, trains transportant des marchandises dangereuses, etc.). Cependant, la configuration reste la même: ils sont tous composés de wagons remorqués par une ou plusieurs locomotives et éventuellement poussés par une locomotive, attelée ou non, en queue du convoi. Un train de fret ne dépasse pas la longueur de 750 m.

### 2.4.3 Trains d'autoroute ferroviaire

Le trafic de conception prévoit, à moyen terme, des trains d'autoroute ferroviaire (AF) de 750 m de long et, à plus long terme, la circulation de trains d'AF de 1500 m. Étant données les prévisions actuelles, l'étude retiendra le cas de l'AF 750 m.

### 2.4.4 Caractéristiques principales des trains

| Caractéristiques aérauliques          | TGV     | Fret      | AF        |
|---------------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Longueur $L$ [m]                      | 400     | 750       | 750       |
| Maître couple $S_T$ [m <sup>2</sup> ] | 8.5     | 10.0      | 15.5      |
| Rapport de blocage                    | 0.20    | 0.25      | 0.36      |
| Périmètre $p$ [m]                     | 10.0    | 12.5      | 15.5      |
| Coefficient de frottement $c_f$       | 0.0056  | 0.023     | 0.0135    |
| Masse $M$ [kg]                        | 832'000 | 1'360'000 | 2'255'000 |
| Puissance jante $P$ [MW]              | 17.6    | 6.76      | 11.3      |
| Vitesse $v_T$ [km/h]                  | 220     | 120       | 120       |
| Coefficient de résistance $A$ [N]     | 6'080   | 12'000    | 23'200    |
| Coefficient de résistance $B$ [N/s/m] | 240     | 400       | 812       |
| Coefficient de résistance $C$ [kg/m]  | 28      | 72        | 183       |
| Pertes auxiliaires $\eta$ [%]         | 30      | 20        | 20        |
| Masse thermique active $\varphi$ [%]  | 60      | 25        | 30        |
| Chaleur spécifique $C_T$ [J/kg/K]     | 960     | 480       | 480       |

**Tableau 24** Caractéristiques aérauliques et thermiques des trains en circulation.

### 2.4.5 Exploitation nominale

Le concept d'exploitation nominale prévoit une circulation mixte de trains de voyageurs (au maximum 2 par heures), de trains de fret (au maximum 11 par heures) et de trains d'autoroute ferroviaire (au maximum 3 par heure).

La répartition horaire de ce trafic, utilisée dans cette étude pour le calcul des charges aérothermiques, est résumée au Tableau 25.

| Heure | 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6  | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|-------|---|---|---|---|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| TGV   | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0 | 0 | 2 | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1  | 2  | 0  | 0  |
| Fret  | 2 | 2 | 2 | 2 | 11 | 11 | 9 | 9 | 0 | 0  | 9  | 0  | 0  | 9  | 9  | 4  | 4  | 0  | 4  | 0  | 4  | 0  | 10 | 10 |
| AF    | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 1  | 3 | 3 | 3 | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 2  |

**Tableau 25** Nombre de trains et répartition horaire du trafic.

## 2.4.6 Espacement à l'arrêt en cas d'incendie

En cas de freinage d'urgence suite à une alarme incendie, pour le dimensionnement des installations de ventilation, l'inter-distance et la succession des types de trains proposés par le Lot B3 dans l'étude de l'APR/PD [27] sont une interprétation des scénarios donnés en Annexe 4 du document du Lot A2 « 2.5 - Principe de traitement des diverses situations d'incident – Rapport final – V0b », à savoir:

| Type de train                              | TGV | TGV | AF | Fret | Fret | Fret | AF  | Fret | Fret | AF  |
|--|-----|-----|----|------|------|------|-----|------|------|-----|
| Interdistance avec le train précédent (km) | 30  | 7.5 | 13 | 9.5  | 9.5  | 9.5  | 9.5 | 9.5  | 9.5  | 9.5 |

**Tableau 26** Inter-distance des trains à l'arrêt.

Cette séquence sera reprise pour tous les scénarios d'incendie étudiés et correspondra à la situation de position relative des trains au moment où débute la phase de ralentissement des trains ( $t = 0$  des modélisations aérauliques).

## 2.5 Écoulement dans le tunnel

Les calculs aérauliques des débits d'air générés par la circulation des trains réalisés lors de l'étude thermique [25], en prenant en compte les nouvelles données géométriques de l'ouvrage du tunnel de bas, ont montré que ces variations n'ont pas une influence importante sur l'écoulement dans le tunnel. Les résultats des études de l'APR/PD restent ainsi valables et on en reporte ci-dessous les conclusions.

### 2.5.1 Conclusion

Ces quelques résultats permettent de conclure qu'en mode d'exploitation normale le pistonnement dû à la circulation des convois est suffisant pour assurer la ventilation hygiénique du tunnel.

Par contre, en période d'entretien / maintenance et en l'absence de circulation de trains, l'utilisation d'équipements de ventilation pourrait s'avérer nécessaire (en l'absence prolongée de trafic, pour éviter que la température de l'air dans le tunnel ne dépasse les 32°C, la ventilation mécanique via les puits serait nécessaire en cas de conditions climatiques externes défavorables).

De plus, les effets présentés ci-avant peuvent avoir une influence sur l'efficacité de l'une ou de l'autre stratégie de désenfumage. Ils seront donc intégrés dans les scénarios utilisés pour le dimensionnement des équipements de ventilation.



### 3. INCENDIE ET STRATÉGIE DE DÉSENFUMAGE

#### 3.1 Objectifs du système de ventilation

La problématique de la ventilation des tunnels ferroviaires, et d'autant plus pour les tunnels de longueur importante, est étroitement liée aux effets aérodynamiques dus au pistonement des trains, aux effets thermiques liés aux différences de température entre l'intérieur et l'extérieur du tunnel, ainsi qu'aux effets dus à une contre-pression non nulle, potentiellement pouvant dépasser le kilopascal.

D'autre part, la problématique de la ventilation des tunnels et celle de l'éventuelle installation d'équipements de ventilation sont également étroitement liées aux problèmes relatifs à la sécurité des personnes, particulièrement en cas d'incendie. Dans ce cas, la ventilation doit être telle d'assurer les 3 objectifs suivants:

- le contrôle du bouchon de fumées par la maîtrise du courant d'air longitudinal, dans le sens de la circulation des trains, quelque soit la position du feu dans la rame et le type de rame;
- l'évacuation des usagers et des membres d'équipage vers les issues de secours dans les conditions les plus sûres possibles;
- le renouvellement d'air dans les locaux techniques de l'ouvrage.

#### 3.2 Caractéristiques des incendies

##### 3.2.1 Puissance thermique

Les puissances thermiques de référence dégagées par chaque type d'incendie sont résumées au Tableau 27. Les puissances de référence n'ont pas changé par rapport aux études de l'APRD/PD (15 MW pour un train de voyageurs et 100 MW pour un train d'AF ou fret), par contre une interprétation différente de l'influence de la ventilation a conduit à une diminution de la puissance retenue en fonction de la stratégie de ventilation. En outre, l'étude du Lot C1 [37] considère une vitesse critique en tunnel de 2.8 et 3.8 m/s pour le train voyageurs et AF/fret respectivement: ces valeurs sont les mêmes que ceux utilisés dans l'APR/PD bien que les puissances aient diminuées.

| Type de véhicule          | Puissance thermique finale | Puissance thermique à l'arrêt du train | Temps de montée en puissance | Vitesse d'air longitudinale en tunnel |
|---------------------------|----------------------------|--|------------------------------|---------------------------------------|
| TGV (motrice centrale)    | 15.0 MW                    | 1.5 MW                                 | 120 s                        | 0.5 ± 0.5 m/s                         |
| TGV (motrice centrale)    | 30.0 MW                    | 3.0 MW                                 | 120 s                        | 6.0 m/s                               |
| TGV (motrice d'extrémité) | 25.5 MW                    | 2.55 MW                                | 120 s                        | 2.8 m/s                               |
| Train d'AF                | 170.0 MW                   | 17.0 MW                                | 120 s                        | 3.8 m/s                               |
| Train de fret             | 170.0 MW                   | 17.0 MW                                | 120 s                        | 3.8 m/s                               |

*Tableau 27 Caractéristiques des incendies.*

**NOTA : ces vitesses doivent être atteintes à T0+7, soit 5 minutes après l'arrêt du train incendié, pour les TGV, et dans le délai le plus court possible pour les trains de marchandises.**

L'incendie se développe dès l'arrêt du train à partir d'une puissance égale au 10% de la puissance totale. La montée en puissance est ensuite linéaire jusqu'à la puissance finale, atteinte en 120 s, laquelle sera maintenue constante pour la suite de la simulation.

### ***3.2.2 Puissance rayonnée et puissance convective***

L'énergie dégagée de l'incendie est en partie irradiée et en partie transportée par convection par l'air réchauffé et par les produits de combustions. Dans le cas de l'incendie d'un véhicule en tunnel, la partie irradiée est de l'ordre de 1/3 de la puissance thermique totale et est directement absorbée par la roche. Compte tenu de son action locale, elle n'est souvent pas simulée directement et elle est soustraite du bilan énergétique total.

Dans la présente étude, la puissance thermique convective, à savoir 2/3 de la puissance thermique totale, est simulée directement dans la dynamique de l'incendie. Le 1/3 restant est pris en considération pour le calcul de l'évolution de la température locale de la roche.

## **3.3 Stratégie de désenfumage et d'évacuation des passagers**

### ***3.3.1 Principe d'évacuation des passagers***

Le tunnel de base présente 3 sites de sécurité (La Praz, Modane et Val Clarea).

Ces sites constituent des points d'arrêt privilégiés pour un train incidenté et ne pouvant sortir du tunnel. Ainsi, un train incidenté cherchera, dans l'ordre prioritaire:

- à sortir du tunnel;
- si ceci n'est pas possible, à s'arrêter dans un des sites de sécurité
- si ceci n'est pas possible, à s'arrêter là où il peut dans le tunnel.

### ***3.3.2 Train arrêté en site de sécurité***

Les sites de sécurités sont équipés de deux trappes d'extraction massive aux extrémités du site et de trappes d'extraction répartie entre les deux. L'extraction massive est utilisée en cas de stratégie à vitesse critique (fumées extraites par la trappe en amont ou en aval en fonction de la position de l'incendie) alors que l'extraction répartie est utilisée dans la stratégie à vitesse faible (stratification). En cas de stratégie de dilution on utilise aussi les autres puits du tunnel. Dans le cas du site de Modane, pour éviter que les fumées envahissent la voie d'évitement, celle-ci est mise en surpression par rapport au tunnel en utilisant le deuxième puits de ventilation d'Avrieux.

### 3.3.3 Train arrêté en pleine voie

#### ➤ Incendie d'une motrice de TGV

##### ▪ Feu de motrice arrière

En cas de feu de motrice arrière, la stratégie d'utilisation des moyens de ventilation consiste à repousser toutes les fumées vers l'arrière du train en imposant un écoulement d'air longitudinal supérieur à la vitesse critique. La puissance thermique de l'incendie est supposée de 25.5 MW et la vitesse critique est évaluée à 2.8 m/s.

##### ▪ Feu de motrice centrale

En cas d'un incendie au centre d'une rame TGV, deux stratégies de désenfumage sont actuellement mises en concurrence:

la stratégie de désenfumage par dilution, qui prévoit de pousser les fumées dans le sens de marche du train avec une vitesse supérieure à 6 m/s; dans ce cas, la puissance thermique de l'incendie est supposée de 30 MW;

la stratégie à vitesse faible, qui vise à maintenir une éventuelle stratification des fumées en proximité de l'incendie, en maintenant la vitesse de l'écoulement à des valeurs de l'ordre de  $0.5 \pm 0.5$  m/s; dans ce cas, la puissance thermique de l'incendie est supposée de 15 MW.

##### ▪ Feu de motrice avant

En cas de feu de motrice avant, la stratégie d'utilisation des moyens de ventilation consiste à pousser toutes les fumées vers l'avant du train en imposant un écoulement d'air longitudinal supérieur à la vitesse critique pour protéger l'évacuation des voyageurs. La puissance de l'incendie est supposée de 25.5 MW et la vitesse critique est évaluée à 2.8 m/s.

#### ➤ Incendie d'un train de fret

Outre le mécanicien, un train de fret ne transporte aucun voyageur. La ventilation est utilisée pour former un courant d'air supérieur à la vitesse critique dans le sens inverse à la circulation, de manière à ce que le mécanicien évacuant ne soit pas impacté par les fumées. La puissance thermique de l'incendie est supposée de 170 MW et la vitesse critique est évaluée à 3.8 m/s.

#### ➤ Incendie d'un train d'AF

Les convois d'autoroute ferroviaire sont composés d'un véhicule Sonia en tête + 1 locomotive + 1 convoi + 1 locomotive. En cas d'incendie, le scénario normal prévoit que le Sonia se détache du reste du convoi et qu'il sorte du tunnel de manière autonome. La probabilité de défaillance de cette procédure normale est très faible.

La ventilation est utilisée pour former un courant d'air à la vitesse critique dans le sens inverse à la circulation, de manière à éloigner les fumées du module Sonia.

La puissance thermique de l'incendie est supposée de 170 MW et la vitesse critique est évaluée à 3.8 m/s.

### 3.3.4 Résumés des stratégies de ventilation à appliquer

Ce paragraphe reporte le résumé des stratégies de ventilation à appliquer.

Le Tableau 28 récapitule, en fonction du type de train incendié, de la position de l'incendie sur le train (TGV uniquement) et de la phase considérée, les stratégies de ventilation retenues.

| Type de train         | Localisation sur le train  | Phase  | Stratégie: vitesse visée du courant d'air longitudinal           |
|-----------------------|----------------------------|--|--|
| TGV                   | Motrice avant              | 1: Evacuation  | Vitesse critique dans le sens de la circulation                  |
|                       |                            | 2: Lutte contre l'incendie                             | Vitesse critique dans un sens ou dans l'autre                    |
|                       | Motrice centrale           | 1: Evacuation  | Vitesse élevée ou vitesse réduite dans le sens de la circulation |
|                       |                            | 2: Lutte contre l'incendie                             | Vitesse critique dans un sens ou dans l'autre                    |
|                       | Motrice arrière            | 1: Evacuation  | Vitesse critique dans le sens inverse à la circulation           |
|                       |                            | 2: Lutte contre l'incendie                             | Vitesse critique dans un sens ou dans l'autre                    |
| Train de fret         | 1: Evacuation              | Vitesse critique dans le sens inverse à la circulation |  |
|                       | 2: Lutte contre l'incendie | Vitesse critique dans un sens ou dans l'autre          |  |
| Autoroute ferroviaire | 1: Evacuation              | Vitesse critique dans le sens inverse à la circulation |  |
|                       | 2: Lutte contre l'incendie | Vitesse critique dans un sens ou dans l'autre          |  |

**Tableau 28** Stratégies de ventilation retenues.

### 3.4 Timing des procédures de désenfumage

Le Tableau 29 et le Tableau 30 montrent le timing des procédures de désenfumage retenues dans les études de l'APRD/PD.

L'instant initial  $t_0$  de démarrage de la procédure de ventilation correspond à l'instant de lancement de la phase d'arrêt du train incendié. Dans tous les cas, la vitesse réduite considérée est de 30 km/h.

### 3.4.1 Cas de l'incendie d'un train de voyageurs

| Temps<br>(min) | Actions  |  |
|----------------|--|--|
|                | Tube sinistré  | Tube sain  |
| 0              | Lancement de la procédure d'arrêt<br>Lancement de la procédure de ventilation phase 1  |  |
| 2              | Arrêt du train incendié et des trains suivants   |  |
| 3              | Début de ralentissement des trains précédents  | Début du freinage des trains n'ayant pas dépassé le sinistre<br>Début du ralentissement des trains ayant dépassé le sinistre |
| 5              | Trains précédents à vitesse réduite  | Arrêt des trains n'ayant pas dépassé le sinistre<br>Trains ayant dépassé le sinistre à vitesse réduite                       |
| 7              | Régime de ventilation établi   |  |
| 10             | Début du refoulement des trains suivants à vitesse réduite<br>Début de l'évacuation par le(s) rameau(x) au droit du train incendié | Début du refoulement des trains n'ayant pas dépassé le sinistre  |
| 30             | Fin de l'évacuation par le(s) rameau(x)<br>Lancement de la procédure de ventilation phase 2  |  |

Tableau 29 Timing des procédures de désenfumage en cas d'incendie d'une rame TGV. Source: APRD/PD.

### 3.4.2 Cas de l'incendie d'un train de fret ou AF

| Temps<br>(min) | Actions   |  |
|----------------|---|--|
|                | Tube sinistré   | Tube sain  |
| 0              | Lancement de la procédure d'arrêt<br>Lancement de la procédure de ventilation phase 1 |  |
| 2              | Arrêt du train incendié et des trains suivants  |  |
| 3              | Début de ralentissement des trains précédents   | Début du freinage des trains n'ayant pas dépassé le sinistre<br>Début du ralentissement des trains ayant dépassé le sinistre |
| 5              | Trains précédents à vitesse réduite   | Arrêt des trains n'ayant pas dépassé le sinistre<br>Trains ayant dépassé le sinistre à vitesse réduite                       |
| 10             | Début du refoulement des trains suivants à vitesse réduite<br>Début de l'évacuation   | Début du refoulement des trains n'ayant pas dépassé le sinistre  |
| 30             | Lancement de la procédure de ventilation phase 2                                      |  |

Tableau 30 Timing des procédures de désenfumage en cas d'incendie d'une rame de train de fret ou d'AF. Source: APRD/PD.

## 4. SCÉNARIOS DE DIMENSIONNEMENT RETENUS

Dans le but de vérifier les scénarios de désenfumage avec les modifications intervenues dans le projet, quelques cas représentatifs et dimensionnants ont été choisis parmi les scénarios analysés dans l'étude de l'APR/PD. Lot B3 [27].

La liste complète des scénarios de l'APR/PD est reportée dans les tableaux suivants (Tableau 31 et Tableau 32). Seulement les cas qui ont été repris et analysés dans la nouvelle configuration sont mis évidence, les autres étant grisés.

### 4.1 Type d'incendie

Les types d'incendie considérés sont les suivants (cf. également le Tableau 27).

| Type d'incendie        | Stratégie de désenfumage         | Vitesse d'air longitudinale | Puissance thermique |
|------------------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| TGV (motrice arrière)  | vitesse critique                 | -2.8 m/s                    | 25.5 MW (27 MW)     |
| TGV (motrice centrale) | vitesse élevée (dilution)        | +6.0 m/s                    | 30 MW               |
| TGV (motrice centrale) | vitesse réduite (stratification) | 0.5 ± 0.5 m/s               | 15 MW               |
| TGV (motrice avant)    | vitesse critique                 | +2.8 m/s                    | 25.5 MW (27 MW)     |
| Train d'AF             | vitesse critique                 | -3.8 m/s                    | 170 MW (215 MW)     |
| Train de fret          | vitesse critique                 | -3.8 m/s                    | 170 MW (215 MW)     |

*Tableau 31 Types d'incendie et stratégie de désenfumage. Entre parenthèses les puissances utilisées dans l'étude de l'APR/PD, Lot B3 [27].*

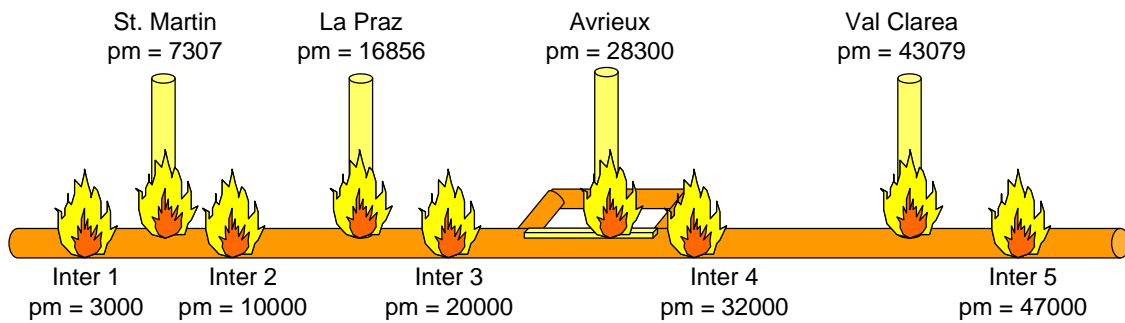
**NOTA : ces vitesses doivent être atteintes à T0+7, soit 5 minutes après l'arrêt du train incendié, pour les TGV, et dans le délai le plus court possible pour les trains de marchandises.**

### 4.2 Positionnement des trains incendiés

Comme indiqué par le Tableau 32 (cf. également Tableau 33), 9 emplacements d'incendie ont été retenus, un dans chacun des 3 sites de sécurité ou Saint Martin et un dans chacune des 5 zones intermédiaires.

| Emplacement de l'incendie                         | Coordonnée métrique par rapport au portail Ouest |
|---|--|
| Inter 1 (entre le portail français et St. Martin) | 3'000 m  |
| St Martin   | 7'307 m  |
| Inter 2 (entre St. Martin et La Praz)             | 10'000 m   |
| La Praz   | 16'856 m   |
| Inter 3 (entre La Praz et Modane-bis)             | 20'000 m   |
| Modane  | 29'059 m   |
| Inter 4 (entre Modane-bis et Val Clarea)          | 32'000 m   |
| Val Clarea  | 43'454 m   |
| Inter 5 (entre Val Clarea et le portail italien)  | 47'000 m   |

*Tableau 32 Emplacements de l'incendie pour les divers scénarios d'étude (les coordonnées sont données dans le sens France - Italie, le zéro étant fixé à l'entrée du portail français).*



**Tableau 33** Position de l'incendie selon les divers scénarios d'étude.

L'arrêt d'un train incendié dans l'un des 3 sites de sécurité correspond à une situation exceptionnelle maîtrisée, puisqu'un train en feu parvient à contrôler son freinage et à se positionner dans une zone où l'évacuation des passagers et l'extraction des fumées sont facilitées.

Par contre, l'arrêt dans l'une des 5 zones intermédiaires correspond à une situation exceptionnelle non maîtrisée. On ne peut donc pas supposer dans ce cas que le train puisse contrôler son freinage et se positionner de la sorte que ses portes de tête et de queue soient pratiquement en face à un rameau d'évacuation.

### 4.3 Contre-pression

La différence de pression maximale entre les têtes du tunnel de base a été estimée à  $\pm 1000$  Pa. Ainsi, pour le dimensionnement des équipements, les 3 contre-pressions suivantes sont considérées dans la présente étude:

- 1000 Pa,
- 0 Pa,
- +1000 Pa.

Dans la suite, on se limitera à présenter les résultats obtenus pour le tube France  $\rightarrow$  Italie. Dans ce, cas on parlera de:

contre-pression négative de -1000 Pa lorsque le niveau de pression mesuré au portail italien sera de 1000 Pa inférieur à celui mesuré au portail français (sans considérer la différence de pression due à l'altitude);

contre-pression positive de +1000 Pa lorsque le niveau de pression mesuré au portail italien sera de 1000 Pa supérieur à celui mesuré au portail français (sans considérer la différence de pression due à l'altitude).

## 5. MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE

Les scénarios sélectionnés sont simulés numériquement suivant une approche monodimensionnelle (1D). Cette approche, systématique, relativement légère et rapide, est suffisante pour le but de la présente étude. Sous réserve de validité de l'hypothèse de monodimensionnalité de l'écoulement, l'approche 1D est en effet en mesure de reproduire, entre autres, le mouvement des divers trains, les effets thermiques, les effets dus à la gravité et, naturellement, le développement de l'incendie et la propagation des fumées ainsi que le système de ventilation.

### 5.1 Le logiciel de calcul TNT

Les calculs 1D sont réalisés avec le logiciel TNT développé et validé par GESTE Engineering, en collaboration avec le Polytechnique de Milan

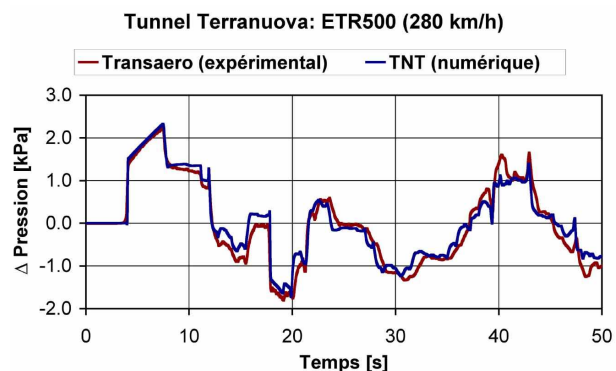
TNT, acronyme de Tunnel Nets & Trains, est un logiciel développé pour la simulation numérique d'écoulements compressibles instationnaires induits par le passage de véhicules à faible ou grande vitesse dans des tunnels ferroviaires ou routiers à géométries complexes. Il permet également de simuler la propagation de fumées en tunnel, tout en intégrant un éventuel système de ventilation.

TNT, basé sur la solution de la formulation monodimensionnelle (1D) des équations de Navier-Stokes, calcule à tout instant et en tout point d'un réseau de tunnels la variation temporelle des champs de pression, de densité, de vitesse, de température, de concentration des fumées, d'humidité de l'air, etc. Les effets visqueux sont pris en considération explicitement grâce à des coefficients de friction pariétale et de perte de charge. La force gravitationnelle est également considérée.

TNT a été développé à partir de 1994 principalement au *Département d'Ingénierie Aérospatiale de l'École Polytechnique de Milan* qui, ultérieurement, a pu bénéficier de la collaboration de GESTE Engineering qui a permis de tester, de valider et de "industrialiser" le code de calcul.

Le logiciel intègre un modèle correctif ad hoc afin de prendre en considération les effets tridimensionnels liés à la tête, au culot et au sillage des véhicules. Ces effets sont particulièrement importants pour des trains à grande vitesse.

TNT peut traiter un nombre arbitraire de véhicules et de tunnels. Les tunnels, de géométrie complexe, peuvent intégrer des puits de ventilation sortant en surface, être reliés par des rameaux d'anti-pistonnement, avoir des bifurcations d'angle arbitraire et même comprendre des portails perforés aux extrémités. Les conditions atmosphériques aux extrémités ouvertes des tunnels et des puits peuvent être non-uniformes (effet cheminée par exemple). Les véhicules en mouvement dans les tunnels peuvent avoir une vitesse variable selon un profil choisi.



TNT, grâce à un schéma numérique peu dissipatif, simule fidèlement la propagation des ondes de pression, permettant ainsi d'analyser les charges aérodynamiques sur les structures, les micro-ondes de pression à proximités des portails et les effets aéro-acoustiques (confort tympanique). A ce sujet, TNT a été validé avec plusieurs données expérimentales et notamment avec



les résultats du programme de recherche européen Transaero: comme illustré par la figure ci à gauche, le logiciel a reproduit avec une excellente précision les champs aérodynamiques instationnaires engendrés par le passage à grande vitesse (de 180 à 280 km/h) d'un ou deux trains ETR500 dans le tunnel de Terranuova Le Ville sur la ligne italienne Florence-Arezzo (double voie, longueur de 2'707 m).

TNT peut simuler des incendies en tunnel, fixes ou mobiles sur le véhicule, ainsi que la propagation des fumées générées, en prenant en considération l'effet cheminée, le mouvement de véhicules ainsi qu'un éventuel système de ventilation.

TNT peut examiner des réseaux complexes avec des systèmes de ventilation divers (ventilateurs à jet par exemple) et calcule leurs effets en termes d'écoulements de masse et de chaleur en fonction de leur courbe caractéristique.

TNT peut également simuler l'évolution de la température de l'air dans le tunnel en considérant le transfert de chaleur avec la roche, où le logiciel calcul la conduction de la température sur une épaisseur de plusieurs mètres.

En conclusion, TNT ne permet pas seulement de simuler les phénomènes liés aux ondes de pression, mais peut également simuler un scénario d'incendie complet comprenant le développement d'un incendie sur un véhicule en mouvement, le ralentissement et l'arrêt du véhicule, la mise en marche des ventilateurs, l'ouverture d'éventuels rameaux d'évacuation, l'évacuation des trains non sinistrés.

## 5.2 Domaine de calcul

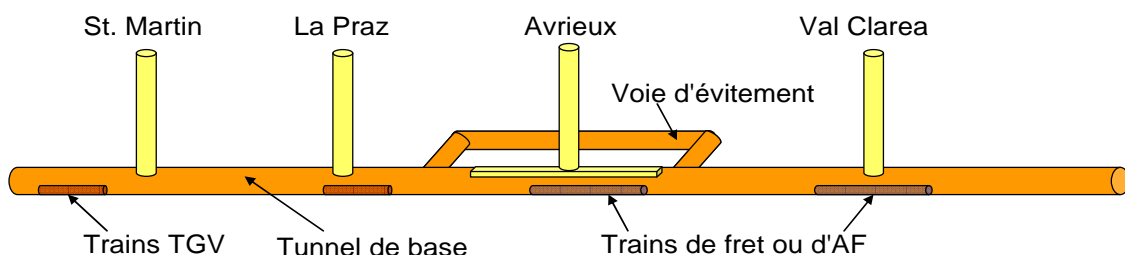
Le domaine de calcul retenu pour la simulation 1D prend en considération l'ensemble des ouvrages et des trains.

Selon les nouvelles hypothèses retenues pour le projet LTF, les 2 tubes sont séparés l'un de l'autre d'un point de vue aéraulique car les rameaux inter-tubes sont dimensionnés pour accueillir tous les passagers de façon à ce que le portes vers le tube sain ne soient ouverte qu'après la fermeture de celles vers le tube incendié. La simulation ne considère donc qu'un tube, avec ses puits (le deuxième et le quatrième sont ouverts) et sa voie d'évitement autour du site de sécurité de Modane (cf. Tableau 34).

## 5.3 Représentation des résultats

Les résultats principaux des nombreux scénarios d'incendie simulés sont présentés au Chapitre 6 pour ce qui concerne l'incendie d'une motrice de TGV et au Chapitre 7 pour ce qui concerne l'incendie d'un train d'AF. Seuls les scénarios vérifiés avec les nouvelles données et hypothèses sont illustrés.

Les variables retenues pour décrire ces résultats sont résumées ci-après au Tableau 35.



**Tableau 34** *Domaine de calcul lorsque les deux tubes sont séparés d'un point de vue aéraulique.*

| Variable           | Signification   | Unité             |
|--------------------|---|-------------------|
| $\Delta P$         | Contre-pression: $\Delta P < 0 \Rightarrow$ écoulement $F \rightarrow I$<br>$\Delta P > 0 \Rightarrow$ écoulement $I \rightarrow F$   | Pa                |
| $x_{inc}$          | Position de l'incendie  | m                 |
| $\Phi_{St.Martin}$ | Débit volumique d'aspiration ( $\Phi < 0$ ) ou de soufflage ( $\Phi > 0$ ) par le puits de St. Martin   | m <sup>3</sup> /s |
| $\Phi_{La Praz}$   | Débit volumique d'aspiration ( $\Phi < 0$ ) ou de soufflage ( $\Phi > 0$ ) par le puits de La Praz  | m <sup>3</sup> /s |
| $\Phi_{Avrieux}$   | Débit volumique d'aspiration ( $\Phi < 0$ ) ou de soufflage ( $\Phi > 0$ ) par le puits d'Avrieux   | m <sup>3</sup> /s |
| $\Phi_{ValClarea}$ | Débit volumique d'aspiration ( $\Phi < 0$ ) ou de soufflage ( $\Phi > 0$ ) par le puits de Val Clarea   | m <sup>3</sup> /s |
| $v_{stop}$         | Vitesse de l'écoulement 20 m en aval (ou en amont) du train incendié au moment de l'arrêt du train  | m/s               |
| $v_{10min}$        | Vitesse de l'écoulement 20 m en amont (par rapport au sens d'extraction des fumées) du train incendié 10 minutes après le lancement de la procédure d'arrêt (soit 8 min après l'arrêt du train)                       | m/s               |
| $v_{30min}$        | Vitesse de l'écoulement 20 m en amont (par rapport au sens d'extraction des fumées) du train incendié 30 minutes après le lancement de la procédure d'arrêt (soit 28 min après l'arrêt du train).                     | m/s               |
| $v_{retour}$       | Vitesse de retour en aval du point d'extraction le plus proche de l'incendie: cette vitesse doit être au minimum égale à 1 m/s en direction du point d'extraction.  | m/s               |
| $t_{vc}$           | Temps nécessaire à partir du lancement de la procédure d'arrêt du train pour atteindre la vitesse de consigne.  | min               |
| $T_{sortie}$       | Température du mélange air/fumées à la sortie du tunnel ou du ventilateur le plus proche de l'incendie.   | °C                |
| $T_{10min}$        | Température du mélange air/fumées 20 m en amont ou en aval (par rapport au sens d'extraction des fumées) du train incendié 10 minutes après le lancement de la procédure d'arrêt (soit 8 min après l'arrêt du train). | °C                |
| $T_{30min}$        | Température du mélange air/fumées 20 m en amont ou en aval (par rapport au sens d'extraction des fumées) du train incendié 10 minutes après le lancement de la procédure d'arrêt (soit 8 min après l'arrêt du train). | °C                |
| Pression relative  | Augmentation de pression par rapport à la valeur atmosphérique initiale (valeur de référence).  | Pa                |
| am                 | amont   | -                 |
| av                 | aval  | -                 |

**Tableau 35** Signification des variables retenues.

## 6. INCENDIE D'UNE MOTRICE DE TGV (TUBE $F \rightarrow I$ )

### 6.1 Introduction

De façon prioritaire, un train de voyageurs incidenté cherchera d'abord à sortir du tunnel pour s'arrêter à l'air libre. Si ceci n'est pas possible il cherchera à s'arrêter avec un freinage maîtrisé dans un des sites de sécurité (La Praz, Modane, Clarea); enfin, si le freinage ne peut pas être maîtrisé, le véhicule incidenté s'arrêtera dans le tunnel en pleine voie.

Dans le cas d'un arrêt contrôlé en site de sécurité, le concept de ventilation prévoit une stratégie de ventilation basée sur la position de l'incendie: vitesse critique pour l'incendie de

motrice d'extrémité, avec extraction massive ponctuelle en avant ou en arrière; stratification pour l'incendie de motrice centrale avec extraction répartie. L'évacuation des passagers se fait par les rameaux placés le long du site de sécurité et reliant celui-ci avec la station d'accueil. Les conditions de fuite sont donc idéales.

Dans le cas d'un arrêt en pleine voie, les stratégies d'intervention mises en place sont définies de façon à offrir aux passagers les meilleures conditions de sécurité et de fuite. Elles prévoient, d'une part, le contrôle de la vitesse de propagation des fumées dans le tube sinistré et, d'autre part, l'évacuation des passagers vers le tube sain.

La vitesse de propagation des fumées est contrôlée grâce aux ventilateurs placés au sommet des 4 puits de ventilation: St. Martin, La Praz, Avrieux et Val Clarea. Les débits de ventilation nécessaires sont présentés dans ce chapitre en fonction du scénario de désenfumage, des conditions de contre-pression et de la position du véhicule incendié.

## 6.2 Feu de motrice centrale de TGV: vitesse élevée (dilution)

### 6.2.1 Rappel: puissance d'incendie et stratégie de désenfumage

Dans le cas d'un feu se développant sur une motrice centrale d'une rame de TGV arrêtée en pleine voie, il n'est pas possible, avec un système de ventilation longitudinale, de gérer l'extraction des fumées sans qu'une moitié du train ou même que le train tout entier ne soit touché par les fumées. Pour offrir tout de même des conditions de fuite satisfaisantes, deux stratégies de désenfumage sont mise en concurrence:

la première, considérée dans ce Paragraphe 6.2, vise à diluer les fumées en les poussant dans le sens de la circulation des trains à une vitesse d'au moins 6.0 m/s, atteinte au plus tard 5 minutes après l'arrêt du train;

la deuxième, considérée dans le paragraphe suivant (Paragraphe 6.3), vise à freiner l'écoulement au droit de l'incendie et à contrôler la vitesse de l'air autour de  $0.5 \pm 0.5$  m/s, afin de mettre en place et de maintenir les meilleures conditions possibles pour que les fumées puissent se stratifier et se propager uniquement en voûte, en offrant ainsi des conditions de fuite satisfaisantes.

Dans le cas où la stratégie vise la dilution des fumées, c'est-à-dire lorsque la vitesse de soufflage sur l'incendie est de 6 m/s, la puissance thermique dégagée est supposée égale à 30 MW, dont 1/3 est dissipé sous forme de rayonnement. La montée en puissance de l'incendie est supposée quasi-instantanée à partir de l'arrêt du train: de 3.0 à 30 MW en 2 minutes.

### 6.2.2 Résumé des résultats

✓ Contre-pression de -1000 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{La Praz}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{vc}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|----------|--------------|--------|
| Inter 5   | 0                  | 0                | +350             | +150               | 12.9       | 8.0         | 8.3         | -            | 0.0      | 20           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 11.8       | 7.7         | 7.5         | -            | 0.0      |              | RPP    |

**Tableau 36** Comparaison entre les résultats de l'étude APR/PD, Lot B3 [27] et la configuration actuelle. Débit de désenfumage nécessaire en cas de feu de motrice centrale de TGV (cf. Tableau 35 pour la définition des symboles). Lorsque 2 valeurs sont données pour les débits du puits d'Avrieux, la deuxième concerne la ventilation de la voie d'évitement.

✓ Contre-pression de 0 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{v_c}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------------|--------|
| Inter 1   | -200               | -200             | 0                | 0                  | 11.0       | 7.9         | 7.1         | -1.1         | 1.5       | 16           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 11.5       | 7.7         | 7.2         | -1.2         | 1.4       | RPP          |        |

**Tableau 37** Comparaison entre les résultats de l'étude APR/PD, Lot B3 [27] et la configuration actuelle. Débit de désenfumage nécessaire en cas de feu de motrice centrale de TGV (cf. Tableau 35 pour la définition des symboles). Lorsque 2 valeurs sont données pour les débits du puits d'Avrieux, la deuxième concerne la ventilation de la voie d'évitement.

✓ Contre-pression de +1000 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{v_c}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------------|--------|
| Inter 4   | 0                  | +300             | +300             | -400               | 8.1        | 7.8         | 6.7         | -1.2         | 4.5       | 23           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 8.9        | 7.4         | 6.4         | -1.6         | 1.3       | RPP          |        |

**Tableau 38** Comparaison entre les résultats de l'étude APR/PD, Lot B3 [27] et la configuration actuelle. Débit de désenfumage nécessaire en cas de feu de motrice centrale de TGV (cf. Tableau 35 pour la définition des symboles). Lorsque 2 valeurs sont données pour les débits du puits d'Avrieux, la deuxième concerne la ventilation de la voie d'évitement.

### 6.2.3 Discussion des résultats

Vis-à-vis de ces résultats, dans le cas de la stratégie de dilution, les conclusions de l'étude de l'APR/PD, Lot B3 [27] relatives à:

- l'atteinte et maintien de la vitesse de consigne dans le tube sinistré;
- la pression au droit de l'incendie;
- la pression relative aux ventilateurs;

restent valables.

Par contre, les problématiques de mise en pression du tube sain et de vitesse dans les rameaux ne se posent plus étant donné qu'au moins une porte de ces rameaux reste fermée pendant la phase d'évacuation.

## 6.3 Feu de motrice centrale de TGV: vitesse réduite (stratification)

### 6.3.1 Rappel: puissance d'incendie et stratégie de désenfumage

Dans le cas d'un feu se développant sur la motrice centrale d'une rame TGV, lorsque la stratégie de désenfumage vise la stratification des fumées, la puissance thermique dégagée est de 15 MW, dont 1/3 est dissipé sous forme de rayonnement. La montée en puissance de l'incendie est supposée quasi-instantanée à partir de l'arrêt du train: de 1.5 à 15 MW en 2 minutes.

La stratégie de désenfumage vise à maintenir stratifiées les fumées en contrôlant la vitesse de l'air à  $0.5 \pm 0.5$  m/s. Ce régime doit être atteint au plus tard 5 minutes après l'arrêt du train.

### 6.3.2 Résumés et discussion des résultats

Par les débits nécessaires limités, l'obtention d'une vitesse faible n'est pas un critère dimensionnant pour les équipements de ventilation. Le contrôle d'une telle vitesse est par contre bien plus délicat avec des seuls puits de ventilation.

Dans tous les cas d'incendie étudiés, il a été possible de satisfaire globalement les contraintes exigées par les scénarios de désenfumage en n'utilisant que 1 ou 2 puits, avec seulement une partie de la puissance disponible.

Toutefois, pour certains scénarios, les fluctuations engendrées par le mouvement des trains sont telles que la vitesse peut, momentanément (pour une période plus ou moins longue), sortir du domaine compris entre 0 et 1 m/s. Cet effet est bien entendu plus marqué lors du mouvement d'un train d'AF.

Ces perturbations sont visibles sur l'évolution de la vitesse en amont et en aval du train, entre  $t = 2$  min (arrêt du train incendié et des trains suiveurs),  $t = 3$  min (début de ralentissement des trains précédent le train incendié) et  $t = 5$  min (lorsque les trains précédents le train incendié se dirigent vers la sortie du tunnel à la vitesse réduite de 30 km/h).

Le problème principal soulevé lors des études de l'APR/PD était la possibilité de mettre en pression, uniquement avec les puits, le tube sain par rapport au tube sinistré tout en contrôlant la vitesse à travers les portes des rameaux. Il avait été montré qu'une vitesse trop élevée avait un effet de déstratification sur les fumées se déplaçant en voûte à vitesse faible dans le tube sinistré. Cette problématique n'existe plus par le fait que selon les nouvelles hypothèses du projet les rameaux restent fermés. Il est donc possible de conclure que le dimensionnement des puits et les scénarios de ventilations en cas de vitesse faible (stratification), tels que définis dans l'étude de l'APR/PD, Lot B3 [27] restent valables.

## 7. INCENDIE D'UN TRAIN DE FRET / AF (TUBE F → I)

### 7.1 Incendie et scénarios de dimensionnement

#### 7.1.1 Rappel: puissance d'incendie et stratégie de désenfumage

De façon prioritaire, un train de fret ou d'AF incidenté cherchera d'abord à sortir du tunnel pour s'arrêter à l'air libre. Si ceci n'est pas possible il cherchera à s'arrêter avec un freinage

maîtrisé dans les sites de sécurité ; enfin, si le freinage ne peut pas être maîtrisé, le véhicule incidenté s'arrêtera dans le tunnel en pleine voie.

Dans le cas d'un arrêt contrôlé en site de sécurité, le concept de ventilation, identique pour les 2 types de trains, prévoit une aspiration des fumées par les trappes placées en voûte en utilisant les puits de ventilation du site.

Dans le cas d'un arrêt en pleine voie, les stratégies d'intervention mises en place, identiques pour les 2 types de trains, sont définies de façon à repousser les fumées dans le sens inverse à la circulation du train, à une vitesse supérieure ou égale à la vitesse critique (3.8 m/s). La vitesse critique doit être atteinte après un intervalle de temps raisonnable.

La puissance thermique dégagée par l'incendie est supposée identique pour les 2 types de trains: elle est égale à 170 MW, dont 1/3 est dissipé sous forme de rayonnement. La montée en puissance de l'incendie est supposée quasi-instantanée à partir de l'arrêt du train: de 17. à 170 MW en 2 minutes.

## 7.2 Incendie d'un train d'AF

Le train d'AF, par son coefficient de frottement élevé (0.0135 contre 0.0056 pour le train de fret) et par sa grande section (15.5 m<sup>2</sup> contre 8.5 m<sup>2</sup>) génère un effet piston important et, par rapport à un train de fret, oppose une plus grande résistance à l'inversion de l'écoulement, nécessaire pour appliquer la stratégie de désenfumage. Ainsi, seul l'incendie d'un train d'AF sera considéré pour la vérification des scénarios avec la nouvelle configuration du tunnel de base.

### 7.2.1 Résumés des résultats

✓ Contre-pression de -1000 Pa

| $x_{inc}$  | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{vc}$ | $T_{sortie}$ |        |
|------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|----------|--------------|--------|
| St. Martin | -300               | +300             | +150             | 0                  | 4.1        | -4.1        | -4.4        | 0.9          | 5.0      | 134          | APR/PD |
|            |                    |                  |                  |                    | 4.0        | -4.3        | -4.3        | 0.9          | 4.5      |              | RPP    |

**Tableau 39** Comparaison entre les résultats de l'étude APR/PD, Lot B3 [27] et la configuration actuelle. Débit de désenfumage nécessaire en cas d'incendie de train d'AF (cf. Tableau 35 pour la définition des symboles). Lorsque 2 valeurs sont données pour les débits du puits d'Avrieux, la deuxième concerne la ventilation de la voie d'évitement.

✓ Contre-pression de 0 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPr az}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{vc}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|----------|--------------|--------|
| Inter 4   | 0                  | 0                | -400             | +300               | 2.5        | -4.5        | -6.5        | 1.8          | 5.5      | 36           | APR/PD |
|           |                    |                  |                  |                    | 2.1        | -4.7        | -6.5        | 2.0          | 5.6      |              | RPP    |

**Tableau 40** Comparaison entre les résultats de l'étude APR/PD, Lot B3 [27] et la configuration actuelle. Débit de désenfumage nécessaire en cas d'incendie de train d'AF (cf. Tableau 35 pour la définition des symboles).

Lorsque 2 valeurs sont données pour les débits du puits d'Avrieux, la deuxième concerne la ventilation de la voie d'évitement.

✓ Contre-pression de +1000 Pa

| $x_{inc}$ | $\Phi_{St.Martin}$ | $\Phi_{LaPraz}$ | $\Phi_{Avrieux}$ | $\Phi_{ValClarea}$ | $v_{stop}$ | $v_{10min}$ | $v_{30min}$ | $v_{retour}$ | $t_{v_c}$ | $T_{sortie}$ |        |
|-----------|--------------------|-----------------|------------------|--------------------|------------|-------------|-------------|--------------|-----------|--------------|--------|
| Inter 5   | 0                  | 0               | +200             | -300               | -0.9       | -4.1        | -5.9        | 2.4          | 7.5       | 24           | APR/PD |
|           |                    |                 |                  |                    | 5.2        | -4.2        | -5.3        | 1.4          | 8.0       |              | RPP    |

**Tableau 41** Comparaison entre les résultats de l'étude APR/PD, Lot B3 [27] et la configuration actuelle. Débit de désenfumage nécessaire en cas d'incendie de train d'AF (cf. Tableau 35 pour la définition des symboles). Lorsque 2 valeurs sont données pour les débits du puits d'Avrieux, la deuxième concerne la ventilation de la voie d'évitement.

### 7.2.2 Discussion des résultats

La modification du tracé et des hypothèses du projet n'ont pas modifié les résultats de manière significative. Les mêmes conclusions tirées lors de l'étude de l'APR/PD restent valables.

Dans tous les cas de figure étudiés, il a été possible de satisfaire les contraintes exigées par les scénarios de désenfumage en utilisant les débits disponibles.

La vitesse critique de repoussement des fumées de 3.8 m/s a toujours été atteinte en amont du train dans un laps de temps raisonnable, en général moins de 8 minutes après l'arrêt du train (i.e. à  $t = 10$  min).

À l'équilibre, la vitesse de l'écoulement est supérieure au 3.8 m/s, comprise environ entre 4.5 et 6 m/s. De ce fait, les perturbations de vitesse générées par le mouvement des autres trains n'ont pas d'influence conséquente sur la valeur du champ de vitesse en amont du train: celui-ci reste toujours au-delà des 3.8 m/s.

En général, en cas d'incendie en inter-site, 2 puits sont suffisants pour repousser les fumées au-delà de la vitesse critique.

Dans le cas où le train incendié est arrêté dans le site de sécurité de Modane ou de Clarea, les fumées sont entièrement aspirées par le puits en dessus du train, ces puits permettant d'extraire jusqu'à 400 m<sup>3</sup>/s. Par contre, dans le cas où le train incendié est arrêté à St. Martin ou dans le site de sécurité de La Praz (dont les ventilateurs permettent d'extraire seulement 300 m<sup>3</sup>/s), 3 puits sont nécessaires pour l'extraction des fumées.

## 8. CONCLUSIONS

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la Révision du Projet Préliminaire (RPP) des équipements non ferroviaires du tunnel de base de la ligne LTF. Il concerne la révision et vérification des scénarios de désenfumage définis dans la phase d'APR/PD, vis-à-vis des modifications de tracé (tunnel allongé de 3 km environ) et des nouvelles hypothèses du projet (par exemple, distance entre les rameaux, procédure d'évacuation des passagers, gestion de l'ouverture des portes des rameaux, puissance des incendies).

Le même modèle de calcul (TNT de GESTE Engineering) utilisé dans l'étude de l'APR/PD a été adapté à la nouvelle configuration et quelques scénarios dimensionnants ou significatifs ont été recalculés. Les résultats obtenus montrent que le dimensionnement des puits de

ventilation permet toujours de satisfaire aux stratégies de ventilation retenues pour les incendies des divers trains pouvant circuler dans le tunnel de base. Les principales conclusions sont rappelées ci-dessous.

### 8.1 Stratégie à vitesse critique

Dans tous les cas d'incendie étudiés, il a été possible de satisfaire les contraintes de vitesse exigées par les scénarios de désenfumage en utilisant les débits de ventilation disponibles.

La vitesse critique de repoussement des fumées de 2.8 m/s (trains de voyageurs) et 3.8 m/s (trains d'AF ou fret) a toujours été atteinte en amont du train dans un intervalle de temps raisonnable et en tout cas inférieur aux 7 minutes requises pour les trains de voyageurs. Ensuite elle est maintenue supérieure à ce seuil limite.

Les perturbations sur l'écoulement liées aux mouvements des trains ne sont pas significatives; elles ne conduisent pas à une diminution de la vitesse au droit du train en dessous de la vitesse de consigne.

De plus, la position du train incendié dans le tunnel ainsi que la position d'arrêt des autres véhicules ne sont pas des éléments déterminants pour le réglage du système de ventilation. Il suffit de se limiter au cas le plus contraignant. Une stratégie de désenfumage simple peut donc être définie par tronçon, en fonction du type de véhicule incendié et de la position de l'incendie sur le véhicule.

### 8.2 Stratégie à vitesse élevée (dilution)

Les mêmes remarques décrites pour une stratégie à vitesse critique sont valables pour un feu de motrice centrale associé à une stratégie de désenfumage visant la dilution des fumées.

Dans tous les scénarios étudiés, il a été possible de satisfaire les contraintes exigées par les scénarios de désenfumage en utilisant les débits de ventilation disponibles. Les vitesses atteintes sont comprises entre environ 6 et 7 m/s. Ces vitesses ont pu être atteintes en utilisant 2 voire 3 puits.

### 8.3 Stratégie à vitesse faible (stratification)

Dans le cas d'un incendie de motrice centrale de TGV, outre la stratégie de désenfumage visant la dilution des fumées, une deuxième stratégie a été étudiée. Cette stratégie, visant à conserver la stratification des fumées, prévoit le maintien de la vitesse de l'écoulement au droit de l'incendie dans une plage comprise entre 0 et 1 m/s.

L'étude a montré qu'il est toujours possible d'atteindre une vitesse au droit de l'incendie en dessous de 1 m/s en n'utilisant qu'une partie de la puissance des puits disponible. Les fluctuations engendrées par le mouvement des autres trains influencent l'écoulement au droit de l'incendie: la vitesse de l'air peut alors, momentanément (pour une période plus ou moins longue), sortir du domaine compris entre 0 et 1 m/s.

Le problème principal soulevé lors des études de l'APR/PD était la possibilité de mettre en pression, uniquement avec les puits, le tube sain par rapport au tube sinistré tout en contrôlant la vitesse à travers les portes des rameaux. Il avait été montré qu'une vitesse trop élevée avait un effet de déstratification sur les fumées se déplaçant en voûte à vitesse faible dans le tube sinistré. Cette problématique n'existe plus par le fait que selon les nouvelles hypothèses du projet les rameaux restent fermés.



