

LIASON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

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

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

NUOVA LINEA TORINO LIONE PARTE COMUNE ITALO FRANCESE - TRATTA IN TERRITORIO ITALIANO CUP C11J05000030001



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

PROGETTO PRELIMINARE IN VARIANTE



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

EQUIPEMENTS DE REFROIDISSEMENT / IMPIANTI DI RAFFREDDAMENTO

NOTICE GENERALE NOTA GENERALE

| Indice | Date / Data | Modifications / Modifiche | Etabli par / Concepito da | Vérifié par / Controllato da | Validé par / Validato da |
|--------|-------------|---------------------------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 0 | 26/04/2010 | PRIMA DIFFUSIONE / PREMIERE DIFFUSION | F.HERVE (SETEC) | M. PIHOUEE C.OGNIBENE | M.FORESTA A.MANCARELLA |
| A | 25/06/2010 | REVISIONE IN SEGUITO AI COMMENTI LTF | F.HERVE (SETEC) | M. Pihouee C.Ognibene | M.Foresta A.Mancarella |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------------|---|---|---------------------|---|---|----------------------|---|---|--------|---|---|---|---|--------|---|----------------|---|-------------|--|--|
| Cod | P | P | 2 | C | 2 | B | T | S | 3 | 0 | 0 | 8 | 1 | A | A | P | N | O | T | | |
| DOC | Phase / Fase | | | Sigle étude / Sigla | | | Émetteur / Emittente | | | Numero | | | | | Indice | | Statut / Stato | | Type / Tipo | | |

| | | | | | | | | |
|--------------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| ADRESSE GED / INDIRIZZO GED | C2B | // | // | 70 | 00 | 00 | 10 | 01 |
|--------------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|

ECHELLE / SCALA



F 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 financé par
l'Union européenne
(DG-TREN)



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

INDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | RIASSUNTO / SYNTHESE | 3 |
| 2 | GENERALITÀ | 2 |
| 2.1 | CONTESTO GENERALE | 2 |
| 2.2 | DESCRIZIONE DEL SISTEMA | 2 |
| 2.3 | OBIETTIVO DELLO STUDIO | 3 |
| 2.4 | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E BIBLIOGRAFIA | 3 |
| 2.4.1 | <i>Lotto C2</i> | 3 |
| 2.4.2 | <i>Studi dell'APR/PD</i> | 3 |
| 2.4.3 | <i>Studi di RPP</i> | 3 |
| 2.4.4 | <i>Altre referenze</i> | 3 |
| 2.5 | STRUTTURA DEL RAPPORTO | 4 |
| 3 | PROGETTO LTF: DATI PRINCIPALI | 5 |
| 3.1 | OSSERVAZIONI PRELIMINARI | 5 |
| 3.2 | OPERE CIVILI | 5 |
| 3.2.1 | <i>Descrizione generale</i> | 5 |
| 3.2.2 | <i>Galleria di base</i> | 5 |
| 3.2.3 | <i>Discenderie, pozzi e gallerie</i> | 7 |
| 3.3 | MATERIALE ROTABILE | 8 |
| 3.3.1 | <i>Treni passeggeri</i> | 8 |
| 3.3.2 | <i>Treni merci</i> | 8 |
| 3.3.3 | <i>Treni d'autostrada ferroviaria</i> | 8 |
| 3.3.4 | <i>Caratteristiche principali dei treni</i> | 9 |
| 3.3.5 | <i>Regime di esercizio nominale</i> | 9 |
| 3.4 | DATI AERULICI E TERMICI | 10 |
| 3.4.1 | <i>Temperatura della roccia</i> | 10 |
| 3.4.2 | <i>Temperatura e umidità ai portali del tunnel</i> | 10 |
| 3.4.3 | <i>Portata d'aria nella galleria e nei pozzi</i> | 11 |
| 3.4.4 | <i>Evaporazione dell'acqua</i> | 13 |
| 3.4.5 | <i>Perdite ausiliarie</i> | 13 |
| 3.5 | TEMPERATURA DI CONSEGNA | 14 |
| 4 | MODELLO DI CALCOLO | 15 |
| 4.1 | UTILIZZO DEL MODELLO | 15 |
| 4.1.1 | <i>Condizione iniziale</i> | 15 |
| 4.1.2 | <i>Condizioni al contorno</i> | 15 |
| 5 | EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA SENZA SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO | 16 |
| 5.1 | CANNA 1 FRANCIA → ITALIA | 16 |
| 5.2 | CANNA 2 ITALIA → FRANCIA | 19 |
| 5.3 | ANALISI DI SENSIBILITÀ AI PARAMETRI D'INGRESSO | 22 |
| 5.4 | CONCLUSIONI | 22 |
| 6 | EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA CON RAFFREDDAMENTO AD ACQUA | 24 |
| 6.1 | POSIZIONAMENTO DEL CIRCUITO DI RAFFREDDAMENTO | 24 |
| 6.1.1 | <i>Soluzione presa in considerazione</i> | 24 |

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

| | | |
|----------|---|-----------|
| 6.2 | CONFIGURAZIONE 1: RISULTATI OTTENUTI UNICAMENTE COI DATI DEI NUOVI RIFERIMENTI..... | 25 |
| 6.2.1 | <i>Canna 1 Francia → Italia</i> | 25 |
| 6.2.2 | <i>Canna 2 Italia → Francia</i> | 29 |
| 6.2.3 | <i>Potenza assorbita dal raffreddamento</i> | 32 |
| 6.2.4 | <i>Conclusioni</i> | 32 |
| 6.3 | CONFIGURAZIONE 2: RISULTATI OTTENUTI INTEGRANDO I DATI DEL LOTTO C1 | 32 |
| 6.3.1 | <i>Canna 1 Francia → Italia</i> | 33 |
| 6.3.2 | <i>Canna 2 Italia → Francia</i> | 36 |
| 6.3.3 | <i>Potenza assorbita dal raffreddamento</i> | 39 |
| 6.3.4 | <i>Conclusioni</i> | 39 |
| 7 | CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI | 40 |
| 7.1 | EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA SENZA RAFFREDDAMENTO | 40 |
| 7.2 | EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA CON RAFFREDDAMENTO | 40 |
| 7.2.1 | <i>Configurazione 1</i> | 41 |
| 7.2.2 | <i>Configurazione 2</i> | 42 |
| 7.2.3 | <i>Scelta della configurazione</i> | 42 |

1 RIASSUNTO / SYNTHÈSE

Il tunnel di base attraversa il massiccio montagnoso ad una profondità che, su una parte significativa, può raggiungere i 2300 m. A tale profondità, la temperatura della roccia è elevata, localmente superiore a 45°C.

In assenza di sistema di raffreddamento, la temperatura nel tunnel può raggiungere 35 °C, su periodi e lunghezze significativi.

Allo scopo di stabilire un compromesso tra temperatura da mantenere e quantità di materiale da installare, la temperatura limite di 32 °C è stata presa in considerazione.

Fra le diverse soluzioni di raffreddamento possibili, il circuito d'acqua refrigerata è stato trattenuto in ragione della sua efficienza.

Il funzionamento dell'impianto è previsto soltanto sui mesi d'estate.

Le tunnel de base traverse le massif montagneux à une profondeur qui, sur une partie non négligeable, peut atteindre les 2300 m. À une telle profondeur, la température de la roche est élevée, localement supérieure à 45°C.

En l'absence de système de refroidissement, la température dans le tunnel peut atteindre 35 °C, sur des périodes et des longueurs non négligeables.

Afin d'établir un compromis entre température à maintenir et quantité de matériel à installer, la température limite de 32 °C a été retenue.

Parmi les différentes solutions de refroidissement possibles, le circuit d'eau réfrigérée a été retenu en raison de son efficacité.

Le fonctionnement de l'installation est envisagé uniquement sur les mois d'été.

2 GENERALITÀ

2.1 CONTESTO GENERALE

Questo studio s'iscrive nel quadro degli studi di Revisione del Progetto Preliminare (RPP) della galleria di base del collegamento ferroviario Lione e– Torino; s'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 nell'ambito del Lotto C1.

La revisione del progetto si è rivelata necessaria in seguito alle modifiche di tracciato intervenute dopo la fase dell'APR/PD nel 2006 che hanno portato ad un prolungamento della galleria di base di circa 4,5 km (da 52 900 m a 57 283 m).

2.2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA

La galleria di base LTF, lunga 57.3 km, attraversa il massiccio montagnoso franco-italiano ad una profondità che, su un tratto non trascurabile, può raggiungere i 2300 m. Ad una tale profondità la temperatura della roccia è elevata, localmente superiore a 45 °C (cfr Figure 21), come mostrato dagli studi geologici svolti durante la fase dell'APR/PD e atualizzati in questa fase di PP.

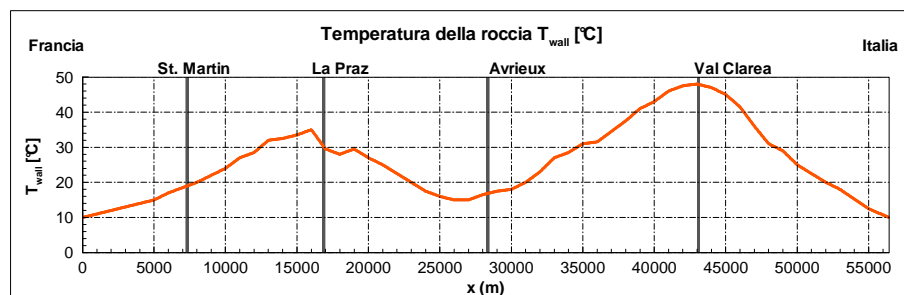


Figure 1 Profilo longitudinale di temperatura della roccia lungo la galleria di base secondo la nuova configurazione della galleria.

Lo studio termico realizzato nell'ambito dell'APR/PD aveva analizzato differenti soluzioni di raffreddamento e aveva proposto un sistema di raffreddamento ad acqua che permetteva di estrarre una potenza termica di circa 15 MW.

Il recente studio realizzato nell'ambito del Lotto C1 [19] sulla nuova configurazione della galleria di base, con delle nuove ipotesi, ha mostrato, inoltre, la necessità d'istallare un sistema di raffreddamento in grado di estrarre una potenza massima di 20.5 MW.

Considerati questi risultati, il calcolo preciso della potenza di raffreddamento e la scelta e il dimensionamento di un sistema di raffreddamento per tutto il tunnel di base, o per una parte di esso, sono necessari.

2.3 OBIETTIVO DELLO STUDIO

L'obiettivo di questo studio è la revisione del dimensionamento del sistema di raffreddamento in seguito alle modifiche di tracciato e alle nuove ipotesi e referenze del progetto.

Vengono verificate dapprima il dimensionamento del sistema di raffreddamento realizzato al momento APR/PD, rispetto alle modifiche del tracciato e alle nuove referenze del progetto. Ciò permette di verificare se il sistema previsto inizialmente risponde ancora alle esigenze stabilite e se le conclusioni dello studio dell'APR/PD sono sempre valide.

In seguito viene analizzata l'influenza di certi nuovi dati utilizzati nello studio termico del Lotto C1 (RPP) in modo da paragonare le conclusioni dei due studi e da valutarne la pertinenza.

2.4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO E BIBLIOGRAFIA

2.4.1 Lotto C2

- [1] PP2-TEC/-LTF-0001 – Cahier des charges techniques détaillé – Lot C2 - Equipements.
- [2] Écart APR_PP-1.

2.4.2 Studi dell'APR/PD

- [3] APR, Lot A2, Etudes fonctionnelles – Etudes de sécurité, Refroidissement du tunnel – Rapport final, APR/A2/TS2/7801-C/AP/NOT, 05/07/2006.
- [4] APR, Lot B3, Refroidissement, Etudes aéraulique et thermique, APR/B3/TS2/0900-C/AP/NOT, 12/01/2007.
- [5] APR, Lot B3, Refroidissement, Caractéristiques des équipements, APR/B3/TS2/0901-B/AP/NOT, 12/01/2007.
- [6] APR, Lot B2, Compléments Géologiques – Modèle Géothermique, APR/B2/TS2/0070-C/AP/PLA, 31/01/2007.

2.4.3 Studi di RPP

- [7] RPP, Lot C3, Section transversale descriptive avec installations, TMB, PP2/C3A/TS3/0009-0/PAPLA.
- [8] RPP, Lot C1, Etude aéraulique et thermique / Refroidissement, PP2/C1/TS3/0006-D.

2.4.4 Altre referenze

- [9] Gotthard-Basistunnel, Lüftung und Kühlung des GBT, Detailprojekt.
- [10] Lötschberg-Basislinie, Grundlagen-Dossier Aerodynamik / Klima / Lüftung.
- [11] Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation, A. E. Vardy, P. Reinke, IMechE 1999.

2.5 STRUTTURA DEL RAPPORTO

I dati-chiave del progetto LTF, come pure le ipotesi principali considerate in questo studio, vengono ripresi al Capitolo 2.

Il Capitolo 3 illustra il modello numerico utilizzato per calcolare l'evoluzione della temperatura dell'aria nella galleria e la potenza di raffreddamento.

Il calcolo dell'evoluzione della temperatura sull'arco dei primi 30 anni di utilizzo, considerando il caso in cui la galleria non fosse dotata di sistema di raffreddamento, viene presentato al Capitolo 4. Tenuto conto della soglia di temperatura fissata a 32°C, i risultati ottenuti in questo capitolo mostrano che il tunnel deve essere raffreddato.

La soluzione di raffreddamento tramite acqua refrigerata viene applicata nel Capitolo 5, dove se ne illustra l'efficacia.

Le conclusioni dello studio sono, infine, riassunte al Capitolo 6.

3 PROGETTO LTF: DATI PRINCIPALI

3.1 OSSERVAZIONI PRELIMINARI

I dati d'ingresso concernenti il progetto – con particolare attenzione alle opere civili, al materiale rotabile, al principio di esercizio (traffico e cadenza) – vengono ripresi principalmente dai rapporti dell'APR/PD tenendo conto delle modifiche intervenute [13]. I dati concernenti più direttamente la termica, comprese le fonti e le perdite di calore, provengono essenzialmente da studi dell'APR/PD [15] e della RPP Lotto C1 [19]. I valori principali necessari per lo studio termico sono riassunti in questo capitolo.

3.2 OPERE CIVILI

3.2.1 Descrizione generale

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

3.2.2 Galleria di base

La galleria di base è composta da due canne lunghe 56'240 m (prolungate rispetto all'APR/PD) che presentano una pendenza media variabile fra +0.69 e -1.13% (cfr Tableau 19).

La sezione della galleria è di 43 m² sulla totalità della lunghezza, tranne nei pressi delle stazioni di sicurezza, dove comunque i cambiamenti di geometria non hanno alcuna influenza sullo studio termico (cfr Figure 22).

Le pareti delle gallerie sono assimilate a del cemento standard con le caratteristiche termiche riassunte nella Tableau 20. Il profilo della temperatura iniziale è rappresentato nella Figure 21. Questo profilo è stato aggiornato secondo i nuovi riferimenti [17], e mostra una temperatura della roccia dal lato francese più elevata di quella utilizzata nello studio dell'APR/PD [15].

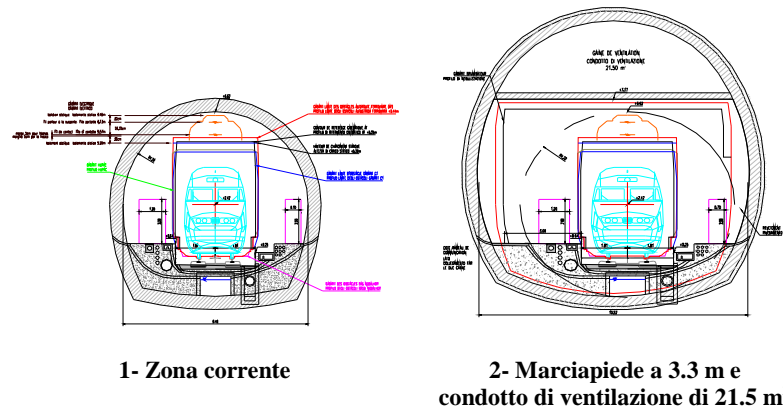


Figure 2 Sezione tipo della galleria di base in zona corrente (1) e zona di ventilazione (2).
 Fonte: APR/PD [15].

| Parametri della galleria | | Valori |
|--------------------------------|--|-------------------------|
| Lunghezza | | 57'283 m |
| Sezione | | 43 m² |
| 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 ad una risalita in direzione Ovest-Est, ossia Francia → Italia.

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

Tableau 2 Caratteristiche termiche del cemento.

Le caratteristiche del massiccio roccioso – in termini di massa volumica, calore massico, conduttività e diffusività termica – vengono indicate nella Tableau 21 in funzione del punto chilometrico. Questi valori tengono conto dei nuovi dati d'ingresso concernenti le caratteristiche del massiccio [17]. Il valore di conduttività termica della roccia tra i punti chilometrici (PK) 6.6 e 19 e i PK 20.6 e 22.4, è passato, più precisamente, da 0.18 a 3 W/m/K. Questo importante aumento su una lunghezza totale di circa 14 km ha un'influenza positiva sugli scambi termici fra l'aria e la roccia

(meno inerzia termica e più scambio di calore rispetto ai risultati dello studio dell'APR/PD Lotto B3 [15]).

| PK iniziale [km] | PK finale [km] | Massa volumica [kg/m ³] | Calore massico [J/kg/K] | Conducibilità [W/m/K] | Diffusività [m ² /s] |
|------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 0.0 | 3.4 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 3.4 | 3.6 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 3.6 | 3.9 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 3.9 | 4.0 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 4.0 | 4.2 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 4.2 | 4.4 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 4.4 | 5.0 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 5.0 | 5.2 | 2'734 | 880 | 7.00 | 2.91 |
| 5.2 | 6.1 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 6.1 | 6.3 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 6.3 | 6.6 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 6.6 | 19.0 | 2'720 | 879 | 3.00 | 1.25 |
| 19.0 | 20.6 | 2'755 | 835 | 2.87 | 1.25 |
| 20.6 | 22.4 | 2'720 | 879 | 3.00 | 1.25 |
| 22.4 | 22.7 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 22.7 | 23.2 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 23.2 | 24.4 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 24.4 | 29.7 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 29.7 | 34.0 | 2'895 | 886 | 5.47 | 2.13 |
| 34.0 | 45.3 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 45.3 | 50.1 | 2'800 | 822 | 2.01 | 0.87 |
| 50.1 | 51.3 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 51.3 | 57.3 | 2'720 | 879 | 3.18 | 1.33 |

Tableau 3 Localizzazione e caratteristiche dei tipi di roccia presenti lungo la galleria. In grassetto i valori modificati rispetto allo studio dell'APRD/PD [15].

3.2.3 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 vengono riassunte nella Tableau 22.

In regime d'esercizio normale, per la canna Francia → Italia, sono aperti solo i condotti di ventilazione delle discenderie di La Praz e di Val Clarea. Per la canna Italia → Francia, sono aperti i condotti del pozzo di Avrieux e della discenderia di St. Martin.

| Opera | Posizione [m] | Lunghezza [m] | Altitudine del portale [msnm] | Pendenze a partire dal portale | Sezione del condotto |
|---------------------------|---------------|---------------|-------------------------------|--|-----------------------|
| Discenderia di St. Martin | 7'307 m | 2'038 m | 695 m | +1 % su 800 m, -7.82 % su 1238 m | 20 m ² |
| Discenderia di La Praz | 16'856 m | 2'556 m | 969 m | -12 % | 20 m ² |
| Pozzi di Avrieux | 28'328 m | 860 m | 1'300 m | Verticale su 530 m, orizzontale su 330 m | 2 x 27 m ² |
| Pozzi di Val Clarea | 43'079 m | 4'522 m | 1'156 m | -12% | 42 m ² |

Tableau 4 Caratteristiche principali delle discenderie, dei pozzi e delle gallerie aventi un impatto sulla ventilazione del tunnel. La posizione è data a partire dal portale ovest.

3.3 MATERIALE ROTABILE

I treni che circoleranno nella galleria di base sono di 3 tipi: treni passeggeri, treni merci e treni d'autostrada ferroviaria.

3.3.1 Treni passeggeri

I diversi tipi di treni passeggeri atti a circolare nella galleria di base sono:

- treni ad alta velocità 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 ad esempio treni di pellegrinaggi.

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

3.3.2 Treni merci

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

La configurazione rimane, tuttavia, la stessa: sono tutti composti da vagoni trainati da una o più locomotive e eventualmente spinti da una locomotiva attaccata o meno, in coda al convoglio.

I carichi termici di questi tipi di treno possono essere molto differenti; lo studio prenderà in considerazione un valore massimo attorno al quale sarà realizzata un'analisi di sensibilità.

3.3.3 Treni d'autostrada ferroviaria

Il traffico di dimensionamento prevede, a medio termine, dei treni d'autostrada ferroviaria (AF) lunghi 750 m e, a lungo termine, la circolazione di treni d'AF di 1500 m. Date le previsioni attuali, lo studio considererà il caso dell'AF 750 m.

3.3.4 Caratteristiche principali dei treni

Le caratteristiche geometriche, aerodinamiche e termiche dei treni sono riassunte nella Tableau 23.

| Caratteristiche | TGV | Merci | AF |
|--|---------|-----------|-----------|
| Lunghezza L [m] | 400 | 750 | 750 |
| Sezione S_T [m ²] | 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 η [%] | 30 | 20 | 20 |
| Massa termica attiva φ [%] | 60 | 25 | 30 |
| Calore specifico C_T [J/kg/K] | 960 | 480 | 480 |

Tableau 5 Caratteristiche aerauliche e termiche dei treni in circolazione.

3.3.5 Regime di esercizio nominale

Il concetto di 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 riassunta nella Tableau 24.

| 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 |
|-------|---|---|---|---|----|----|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 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 |
| Merci | 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 6 Numero di treni e ripartizione oraria del traffico (traffico di dimensionamento per il sistema di raffreddamento).

3.4 DATI AERAILICI E TERMICI

Oltre ai valori presentati qui sopra concernenti le opere di genio civile e il materiale rotabile, un certo numero d'altri valori, essenzialmente aerailici e termici, sono stati utilizzati quali dati d'ingresso per la simulazione dell'evoluzione della temperatura dell'aria nella galleria.

3.4.1 Temperatura della roccia

Il profilo della temperatura iniziale della roccia è stato presentato nella Figure 21. Sono stati presi in considerazione i nuovi valori scaturiti da un'ulteriore campagna di sondaggi (considerata la temperatura più elevata dal lato francese).

3.4.2 Temperatura e umidità ai portali del tunnel

Si suppone che la temperatura dell'aria esterna in prossimità dei due portali del tunnel segua la stessa variazione temporale. I valori medi mensili T_{moy} , col loro scarto massimo fra giorno e notte $\Delta T_{j/n}$, sono rappresentati nella Tableau 25 e nella Tableau 26, per il lato francese e, rispettivamente, italiano, e descritti nella Figure 23. I valori di temperatura lato Italia rientrano nei nuovi riferimenti del progetto e non erano stati presi in considerazione nello studio dell'APR/PD, Lotto B3 [15].

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T_{moy} | -3 | 0 | 4 | 6 | 10 | 15 | 18 | 20 | 14 | 6 | 3 | -5 |
| $\Delta T_{j/n}$ | 3 | 4 | 6 | 7 | 10 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 6 | 5 |

Tableau 7 Valori medi mensili e ampiezza della variazione giornaliera (temperatura massima giornaliera - temperatura minima notturna) della temperatura al portale francese della galleria [15].

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T_{moy} | 3.2 | 6.3 | 9.5 | 11.2 | 16.1 | 15.9 | 21.2 | 22.6 | 16.8 | 10.3 | 9.3 | 3.7 |
| $\Delta T_{j/n}$ | 7.2 | 8.4 | 7.5 | 7.4 | 7.8 | 8.0 | 8.9 | 8.8 | 8.1 | 6.7 | 9.5 | 7.2 |

Tableau 8 Valori medi mensili e ampiezza della variazione giornaliera (temperatura massima giornaliera - temperatura minima notturna) della temperatura al portale italiano della galleria [19].

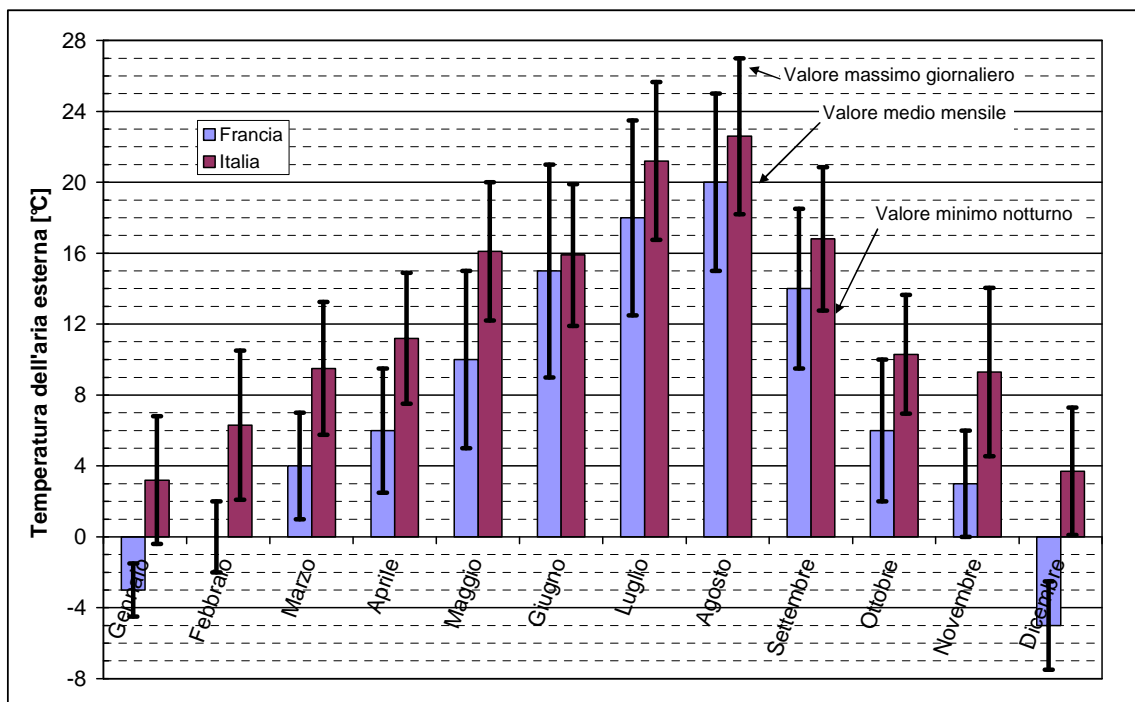


Figure 3 Temperatura media mensile dell'aria e minima notturna e massima diurna. Lato francese [15]; lato italiano [19].

I valori medi mensili d'umidità relativa sono dati nella Tableau 27. Gli stessi valori sono imposti da entrambi i lati.

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| HR | 70 | 62 | 56 | 62 | 62 | 66 | 61 | 59 | 70 | 71 | 75 | 75 |

Tableau 9 Valori medi mensili dell'umidità relativa ai portali della galleria, dei pozzi e delle discenderie [15].

3.4.3 Portata d'aria nella galleria e nei pozzi

Le caratteristiche dei treni come pure il concetto di esercizio nominale non sono cambiati in rapporto agli studi della fase APR/PD. Le portate d'aria nel tunnel e nei pozzi generate dalla circolazione dei treni sono state ricalcolate sulla base della nuova geometria senza riscontrare delle variazioni significative.

La circolazione dei treni nel tunnel, essendo monodirezionale, genera per "effetto pistone" una corrente d'aria di una certa importanza. Quest'ultima, dipendente dal traffico, varia in media oraria da circa 4 m/s (durante le ore di morbida) a quasi 10 m/s.

Anche la circolazione dei treni, a causa della compressione in testa e della depressione in coda, induce un movimento d'aria nei pozzi (o discenderie) aperti, ossia La Praz e Val Clarea per quel che riguarda la canna Francia → Italia, e Avrieux e St. Martin per la canna Italia → Francia.

La media oraria delle portate indotte, tanto nel tunnel di base che nei pozzi, è riassunta nella Tableau 28 per la canna Francia → Italia e nella Tableau 29 per la canna Italia → Francia.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

Questi risultati sono stati ottenuti col codice di calcolo TNT di GESTE Engineering considerando la ripartizione oraria del traffico descritta nella Tableau 24 e una contropressione nulla.

| Ore | Portata media oraria [m ³ /s] | | | | | Ore | Portata oraria media [m ³ /s] | | | | |
|--------------|--|------------|---------|---------|------------|--------------|--|------------|---------|---------|------------|
| | Canna F → I | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea | | Canna F → I | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea |
| 00-01 | 189 | 0 | -20 | 0 | 50 | 12-13 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 01-02 | 189 | 0 | -20 | 0 | 50 | 13-14 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |
| 02-03 | 189 | 0 | -20 | 0 | 50 | 14-15 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |
| 03-04 | 186 | 0 | -20 | 0 | 50 | 15-16 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 04-05 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 16-17 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 05-06 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 17-18 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 06-07 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 18-19 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 07-08 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 19-20 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 08-09 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 | 20-21 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 09-10 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 | 21-22 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 10-11 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 22-23 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |
| 11-12 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 | 23-24 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |

Tableau 10 Canna Francia → Italia: media oraria delle portate d'aria (m³/s) prese in considerazione per lo studio termico. Dei valori negativi indicano una portata entrante nella galleria.

| Ore | Portata media oraria [m ³ /s] | | | | | Ore | Portata media oraria [m ³ /s] | | | | |
|-------|--|------------|---------|---------|------------|-------|--|------------|---------|---------|------------|
| | Canna I → F | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea | | Canna I → F | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea |
| 00-01 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 12-13 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 01-02 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 13-14 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |
| 02-03 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 14-15 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |
| 03-04 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 15-16 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 04-05 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 16-17 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 05-06 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 17-18 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 06-07 | 402 | 39 | 0 | 22 | 0 | 18-19 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 07-08 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 19-20 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 08-09 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 | 20-21 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 09-10 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 | 21-22 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 10-11 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 22-23 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |
| 11-12 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 | 23-24 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |

Tableau 11 Canna Italia → Francia: media oraria delle portate d'aria (m³/s) prese in considerazione per lo studio termico. Dei valori negativi indicano una portata entrante nella galleria.

3.4.4 Evaporazione dell'acqua

L'evaporazione dell'acqua presente nella galleria ed evacuata tramite la ventilazione (naturale o forzata) permette di esportare una certa quantità di calore (calore latente d'evaporazione). Nel presente studio si suppone che la portata massica d'evaporazione valga:

$$m_{H_2O} = 3.8 \times 10^{-5} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

Nuovi riferimenti utilizzati nello studio del Lotto C1 [19] mostrano che questo valore è abbastanza variabile. Non avendo dei nuovi dati specifici per la galleria di base della linea LTF, è stata fatta un'analisi di sensibilità su questo parametro. Quest'analisi è d'altra parte già stata effettuata nel precedente studio della fase APR/PD [15].

3.4.5 Perdite ausiliarie

Delle fonti di calore generiche tali l'illuminazione, la potenza termica dei trasformatori, la catenaria ecc. vengono considerate nel termine generico, valutato a 25 W/m.

Nello studio del Lotto C1 [19] è stata presa in considerazione una fonte di 57 W/m (40 W catenaria + 10 W per la terna di cavi a 132 kV + 7 W per gli impianti).

Uno studio complementare mostra che il valore di dissipazione della catenaria è sovrastimato e che inoltre, in accordo con LTF, il feeder 132 kV non è da prendere in considerazione.

In questo studio viene dunque mantenuto il valore iniziale di 25 W/m.

Tuttavia, su questo parametro è stata effettuata un'analisi di sensibilità (§ 5.3). Il valore finale esatto di questo parametro sarà messa a punto durante un'ulteriore fase in funzione degli impianti installati.

3.5 TEMPERATURA DI CONSEGNA

La temperatura di consegna da non superare nella galleria di base è stata fissata a 32 °C durante la fase d'APR/PD.

A titolo indicativo, la temperatura massima tollerata nella galleria di base del San Gottardo è stata fissata a 35°C.

4 MODELLO DI CALCOLO

Questo studio è stato realizzato col programma TunClim di GESTE Engineering, sviluppato e già utilizzato nel 2005-2006 per lo studio dell'APR/PD, Lotto B3 [15].

4.1 UTILIZZO DEL MODELLO

Lo studio dell'evoluzione della temperatura dell'aria all'interno della galleria di base è stato affrontato separatamente per le due canne, nella configurazione pari che prevede solamente due pozzi aperti: i pozzi di La Praz e di Val Clarea nella Canna 1 Francia → Italia e i pozzi di Avrieux e di St. Martin nella Canna 2 Italia → Francia.

4.1.1 Condizione iniziale

Nonostante la fase di scavo del tunnel modifichi la temperatura della roccia, la condizione iniziale presa in considerazione in questo studio suppone che, al momento dell'inaugurazione del tunnel, la temperatura dell'aria sia identica alla temperatura attuale della roccia (cfr Figure 24).

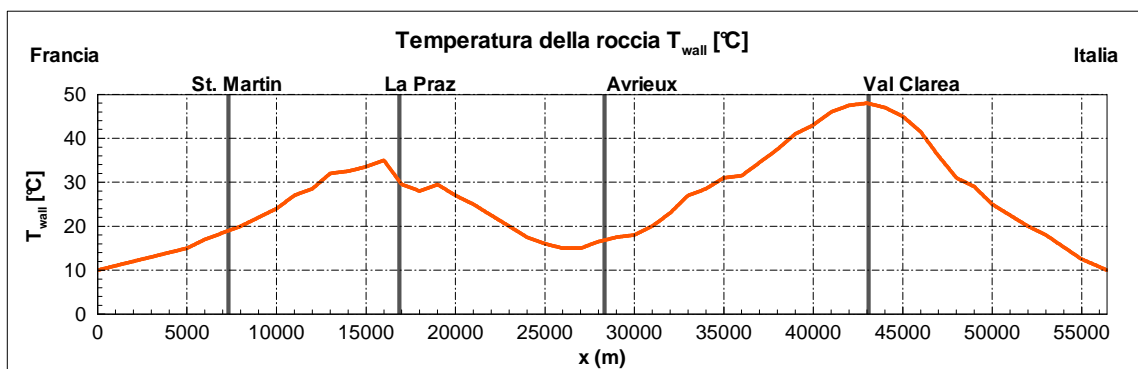


Figure 4 Profilo longitudinale di temperatura della roccia lungo la galleria di base. Aggiornato in base ai nuovi riferimenti [17].

Si suppone che la messa in esercizio della linea avvenga un 1° gennaio quando la temperatura dell'aria ai due portali della galleria è di -4.5 °C, per la Canna 1 Francia → Italia, e di -0.4 °C, per la Canna 2 Italia → Francia (cfr Tableau 25, Tableau 26 e Figure 23).

Il tasso d'umidità relativa iniziale è fissato a 60%.

4.1.2 Condizioni al contorno

La temperatura dell'aria che entra nella galleria tunnel varia in funzione del tempo: su un breve periodo, legato all'alternarsi del giorno e della notte, da un lato e su un periodo più importante, legato alla stagionalità, dall'altro. I dati necessari, presentati nella Tableau 25 e nella Tableau 26, per esprimere questa variazione, sono dunque: la temperatura media giornaliera e l'escursione termica giorno/notte sull'arco di tutto l'anno.

La frazione massica di vapore all'entrate della galleria è calcolata a partire dalla temperatura media T_{moy} e dall'umidità relativa media mensile descritta nella Tableau 27.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

5 EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA SENZA SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO

In una prima fase, l'evoluzione della temperatura dell'aria all'interno della galleria è stata calcolata senza sistema di raffreddamento, in modo da conoscere l'ampiezza delle temperature in gioco. L'evoluzione termica è stata calcolata su un periodo di 30 anni, largamente sufficiente per poter analizzare sia i fenomeni di corta durata, legati alle stagioni, che quelli di lunga durata, legati all'inerzia termica della roccia.

I risultati sono presentati qui di seguito dapprima per la Canna 1 Francia → Italia e in seguito per la Canna 2 Italia → Francia.

5.1 CANNA 1 FRANCIA → ITALIA

Si nota che la temperatura dell'aria, inizialmente identica a quella della roccia, si distanzia rapidamente da quest'ultima e si avvicina ad una distribuzione più uniforme.

A causa dell'inerzia termica della roccia e del debole traffico notturno, la differenza di temperatura tra il giorno e la notte è trascurabile.

La differenza fra estate e inverno è, invece, più marcata e, localmente, può raggiungere i 15°C. Questo comportamento viene illustrato nella Figure 25, dove il profilo della temperatura dell'aria all'interno della galleria d'esercizio viene annotato per ogni mese del 30° anno di esercizio.

Questa differenza oscillatoria fra estate e inverno s'istaura a partire dalla messa in esercizio della galleria: viene raggiunto rapidamente un equilibrio termico, grosso modo dopo 5 anni di utilizzo, in seguito la temperatura evolve periodicamente, a seconda del variare delle stagioni.

Senza sistema di raffreddamento, la temperatura dell'aria all'interno della galleria resta inferiore o vicina ai 32°C fra i mesi di ottobre e giugno (cfr Tableau 30).

Durante i mesi estivi, invece, il valore di consegna di 32°C viene superato su un tratto di galleria che aumenta e diminuisce regolarmente, da 14 km in luglio in un luogo centrato sul punto chilometrico 48, fino a circa 20 km in agosto, dal punto chilometrico 37 fino all'uscita lato Italia (cfr Figure 26). La temperatura massima raggiunta nel mese di agosto è di 35°C.

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 32 | 34 | 35 | 34 | 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 12 Temperature massime locali dopo 30 anni di esercizio. Canna 1 Francia → Italia. Senza raffreddamento.

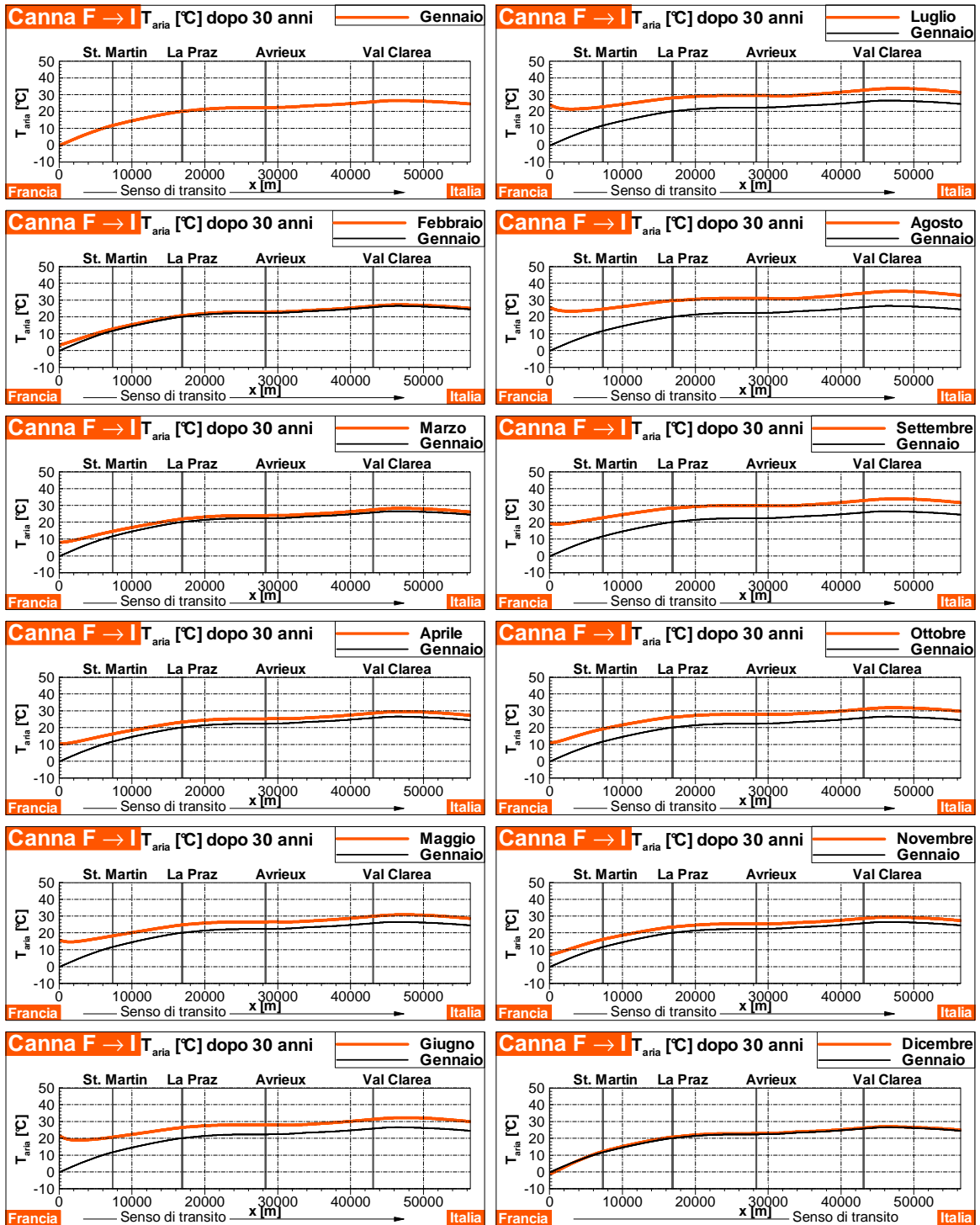


Figure 5 Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 1 F → I dopo 30 anni di esercizio. Non vi è installato alcun sistema di raffreddamento.



Figure 6 Nella Canna 1 F → I dopo 30 anni di esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C.

5.2 CANNA 2 ITALIA → FRANCIA

Gli stessi grafici illustrati sopra per la canna 1 Francia → Italia vengono qui presentati per la Canna 2 Italia → Francia.

La Tableau 31 riporta le temperature massime mensili stimate dopo 30 anni d'esercizio.

La Figure 27 illustra la temperatura media mensile durante il 30° anno di esercizio.

Infine, la Figure 28 mostra le zone della galleria in cui, nelle differenti ore della giornata e durante i 12 mesi del 30° anno d'esercizio, la temperatura dell'aria supera i 32°C.

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 32 | 34 | 33 | < 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 13 Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Canna 2 Italia → Francia.
Senza raffreddamento.

A parte delle leggere differenze dovute all'asimmetria del profilo della temperatura della roccia, l'evoluzione della temperatura e dell'umidità all'interno della Canna 2 Italia → Francia è sostanzialmente molto simile a quella osservata per la Canna 1 Francia → Italia. Di conseguenza sono valide le stesse osservazioni.

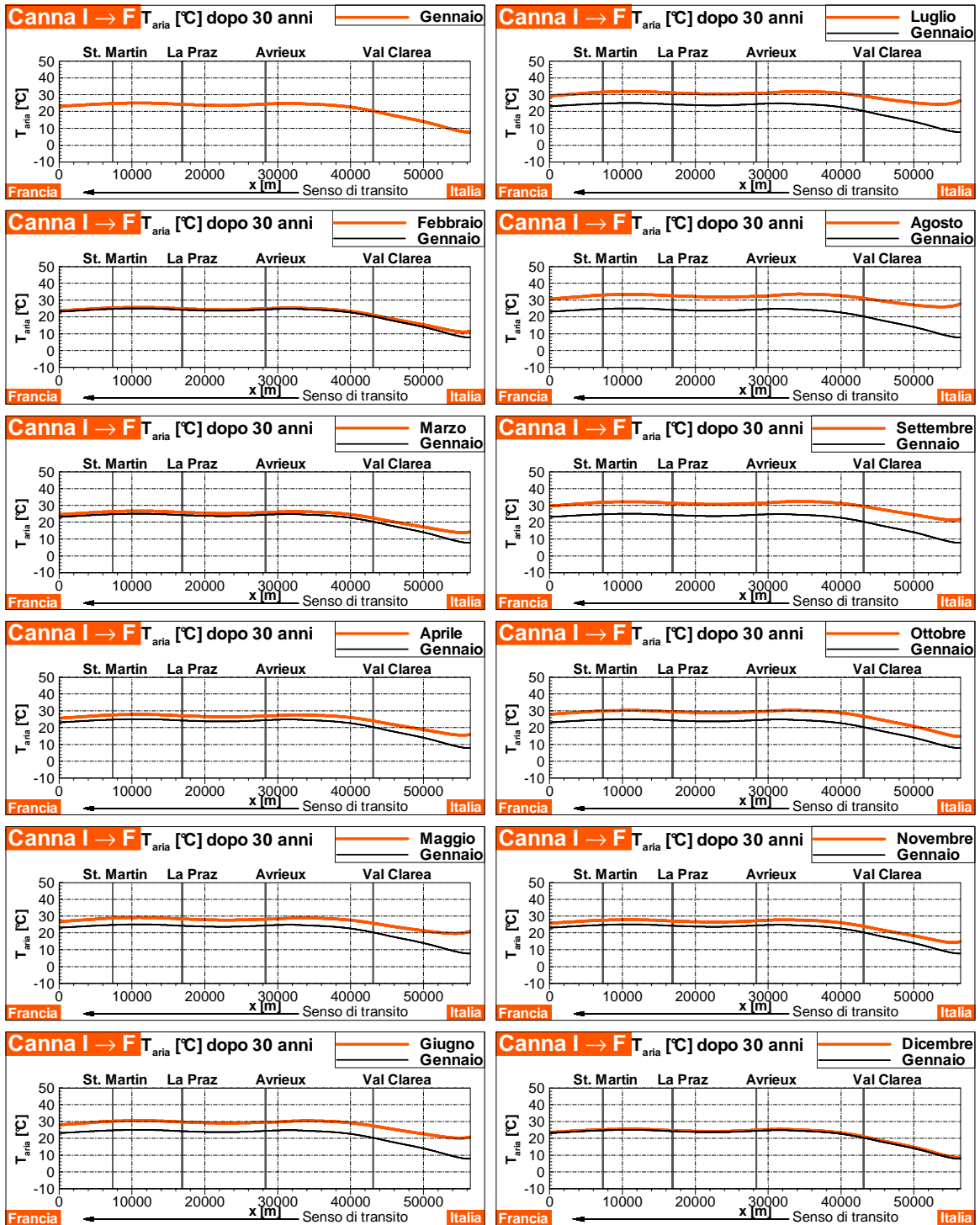


Figure 7 Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio. Non vi è installato nessun sistema di raffreddamento.



Figure 8 Nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C.

5.3 ANALISI DI SENSIBILITÀ AI PARAMETRI D'INGRESSO

Riportiamo qui di seguito i risultati dell'analisi di sensibilità realizzata nell'ambito dello studio termico dell'APR/PD, Lotto B3 [15]. La Figure 29 illustra l'ampiezza della variazione del profilo di temperatura in funzione della variazione dei parametri d'ingresso (portata d'acqua d'infiltrazione, capacità di scambio termico dei treni, aumento del traffico) Questa variazione è localmente dell'ordine di 2-3 °C.

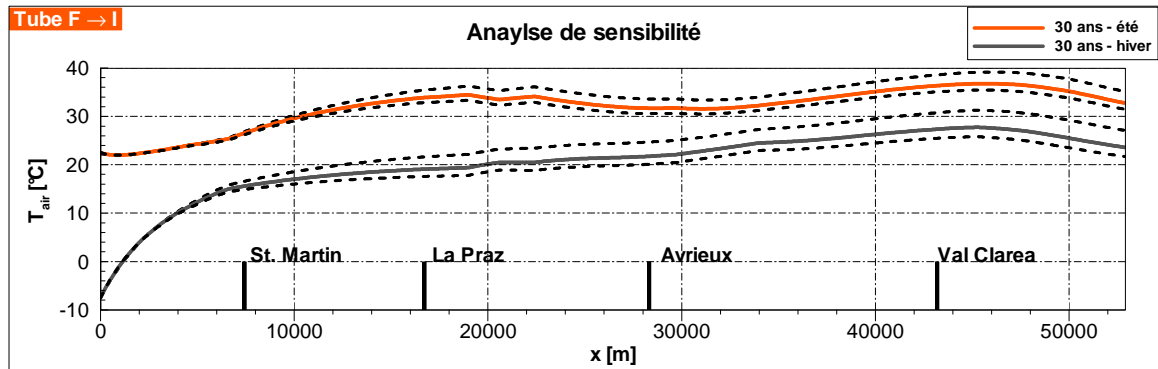


Figure 9 Esempio di sensibilità della soluzione ai parametri d'ingresso. Temperatura di riferimento e zona di variazione.

L'affidabilità dei dati d'ingresso concernenti la temperatura della roccia gioca ugualmente un ruolo importante sulla precisione dei risultati del modello. Le misurazioni nell'ambito di futuri sondaggi dovranno permettere di confermare o correggere il profilo utilizzato.

Globalmente si può comunque concludere che la precisione del modello sia più che soddisfacente e, in ogni caso, sia sufficiente a fornire gli elementi necessari onde prendere decisioni concernenti l'installazione di un eventuale sistema di raffreddamento.

Nel presente studio si è seguita la stessa procedura utilizzata nello studio dell'APR/PD. Così, al fine di prendere in considerazione un'ipotetica sottovalutazione della temperatura dell'aria a causa dell'imprecisione dei dati d'ingresso, si è deciso di aggiungere un margine d'errore di 1.5°C ai risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche. Questo margine, che potrà venir affinato grazie a dei sondaggi e a delle misure sperimentali, corrisponde alla metà della variazione dedotta dallo studio di sensibilità (cfr Figure 29) ed è già stato preso in considerazione nei risultati illustrati in questo studio.

5.4 CONCLUSIONI

La simulazione numerica dell'evoluzione del profilo della temperatura all'interno della galleria di base ha mostrato che, per la Canna 1 Francia → Italia la temperatura supera durante 3 mesi su 12 (da luglio a settembre) il valore soglia di 32 °C e che per la Canna 2 Italia → Francia la temperatura supera durante 2 mesi su 12 (da agosto a settembre) il valore soglia di 32 °C. Inoltre, nella Canna 1 Francia → Italia, la temperatura si avvicina molto ai 32 °C anche in giugno e in ottobre e nella Canna 2 Italia → Francia, la temperatura si avvicina molto ai 32 °C anche in luglio. La lunghezza del tratto lungo il quale la soglia viene superata è importante: durante il mese di agosto, quando l'aria può localmente raggiungere 35 °C, essa raggiunge i 20 km nella Canna 1 Francia → Italia e i 31 km nella Canna 2 Italia → Francia. Più precisamente:

- la Canna 1 Francia → Italia comprende una zona di superamento della soglia di 10 km centrata sul punto chilometrico 48;
- la Canna 2 Italia → Francia comprende una zona di superamento della soglia di 17 km centrata sul punto chilometrico 12 e una zona di 14 km centrata sul punto chilometrico 35.

Considerati i margini d'errore del modello utilizzato, il sistema di raffreddamento non dovrebbe essere fatto funzionare per più del 40% del tempo.

6 EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA CON RAFFREDDAMENTO AD ACQUA

Il sistema di raffreddamento ad acqua comprende una centrale di raffreddamento dell'acqua, composta da gruppi di raffreddamento e da torri di raffreddamento, e emette un'importante quantità di acqua fredda. Quest'acqua viene in seguito utilizzata per il raffreddamento della galleria, tramite circolazione in un condotto posto nelle zone calde.

Il sistema di raffreddamento ad acqua consiste in due circuiti distinti, che funzionano a due livelli di temperatura differenti:

- il primo permette il trasferimento di calore con l'atmosfera attraverso delle torri di raffreddamento;
- il secondo, installato all'interno della galleria, ha lo scopo di estrarre il calore dal tunnel.

6.1 POSIZIONAMENTO DEL CIRCUITO DI RAFFREDDAMENTO

Durante questa fase di Revisione del Progetto Preliminare (RPP) si studia la stessa soluzione considerata nello studio dell'APR/PD, Lotto B3 [15]. Questa soluzione consiste in:

- due centrali unicamente a Modane e circuiti che si sviluppano nelle due direzioni verso i portali Est (Italia) e Ovest (Francia);

Questa soluzione ha il vantaggio di concentrare le centrali in un solo luogo, ma implica, per contro, che un tratto del circuito si trovi in una zona che non è necessario raffreddare.

6.1.1 Soluzione presa in considerazione

La soluzione analizzata di seguito grazie al modello numerico prevede due circuiti indipendenti che si sviluppano, a partire dalla stazione di Modane, nel seguente modo:

- **Circuito 1:** andata nella Canna 2 Italia → Francia in direzione della Francia fino al punto chilometrico 14 e ritorno nella Canna 1 Francia → Italia (lunghezza totale 34 km);
- **Circuito 2:** andata nella Canna 1 Francia → Italia in direzione dell'Italia fino al punto chilometrico 45 e ritorno nella Canna 2 Italia → Francia (lunghezza totale 28 km).

Il posizionamento di questi due circuiti di raffreddamento è illustrato nella Figure 30, in parallelo con la curva della distribuzione della temperatura e dell'umidità dell'aria durante il mese più caldo (il mese d'agosto).

L'efficacia del sistema di raffreddamento è illustrata di seguito utilizzando gli stessi grafici di quelli presentati al Capitolo 4, dove l'evoluzione della temperatura dell'aria all'interno della galleria era stata calcolata senza l'aggiunta di sistemi di raffreddamento.

Due nuove configurazioni vengono analizzate in termini di dati d'ingresso:

- **Configurazione 1:** l'evoluzione della temperatura viene calcolata considerando unicamente l'effetto dei dati derivante dai nuovi riferimenti, ossia:
 - lunghezza del tunnel;
 - caratteristiche termiche e profilo della temperatura della roccia;
 - temperatura dell'aria esterna lato Italia.

- **Configurazione 2:** l'evoluzione della temperatura è calcolata considerando anche i nuovi dati utilizzati nello studio termico del Lotto C1 : fonte termica distribuita superiore (57 W/m) e portata d'acqua d'infiltrazione inferiore ($2.4 \cdot 10^{-5}$ kg/s/m).

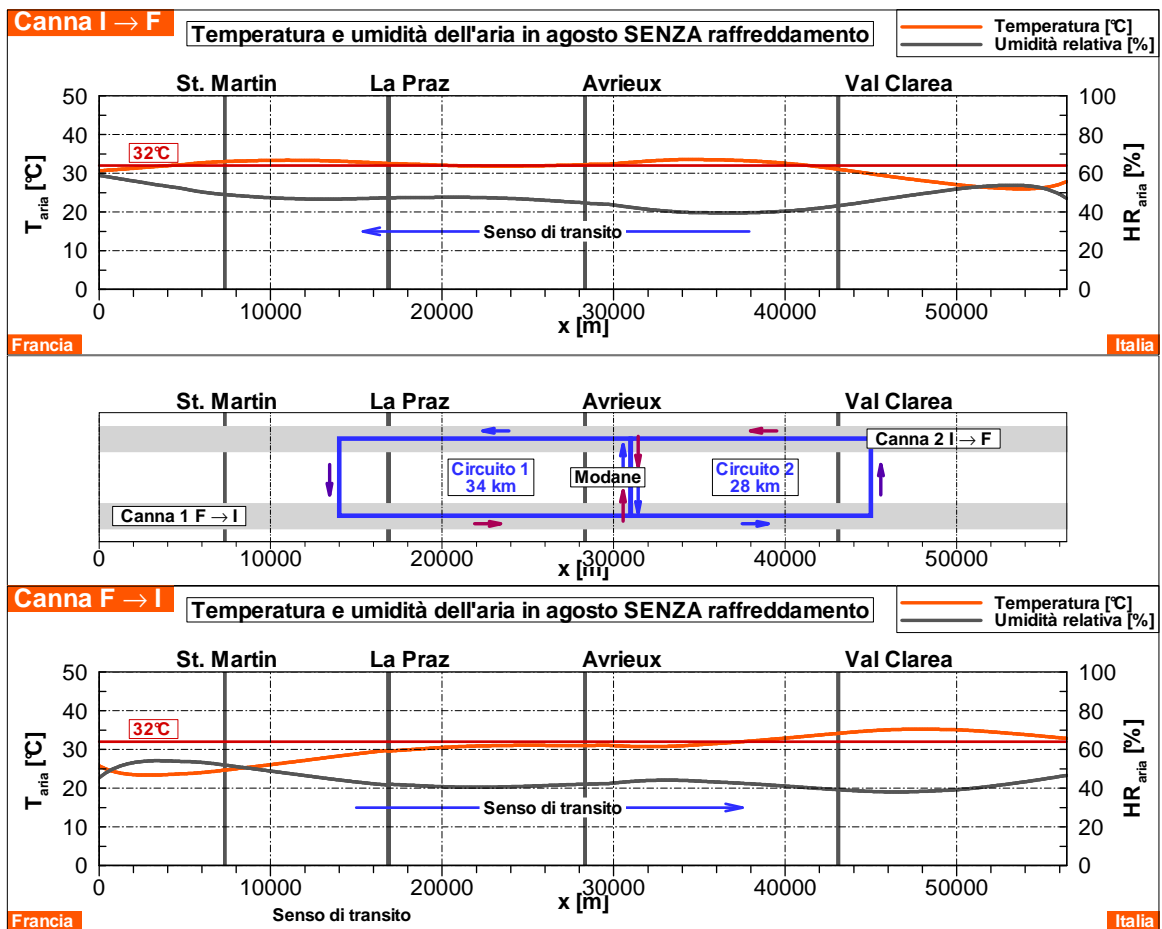


Figure 10 Distribuzione della temperatura e dell'umidità dell'aria nelle due Canne durante il mese d'agosto senza sistema di raffreddamento; posizionamento dei due circuiti di raffreddamento.

6.2 CONFIGURAZIONE 1: RISULTATI OTTENUTI UNICAMENTE COI DATI DEI NUOVI RIFERIMENTI

6.2.1 Canna 1 Francia → Italia

Si nota che il sistema di raffreddamento permette, molto rapidamente, di abbassare localmente la temperatura dell'aria e di controbilanciare così il flusso termico proveniente dalla roccia.

La distribuzione della temperatura lungo la galleria è più uniforme. Il sistema di raffreddamento permette di abbassare le temperature massime di circa 3-4°C, come evidenziato dalla Tableau 32.

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T_{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 29 | 31 | 32 | 31 | 28 | < 32 | < 32 |

Tableau 14 Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Con sistema di raffreddamento. Canna 1 Francia → Italia. Configurazione 1.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

Il sistema di raffreddamento proposto, permette di rispettare in ogni momento la temperatura di consegna di 32 °C, come illustrato dalla Figure 31. Questa figura evidenzia l'effettiva efficacia del sistema di raffreddamento siccome paragona il profilo della temperatura mensile, dopo 30 anni d'esercizio, con e senza sistema di raffreddamento. Essa mostra chiaramente che, dove è installato il sistema di raffreddamento, la temperatura dell'aria scende al di sotto dei 32 °C. Ciò è confermato dalla Figure 32, che mostra le zone della galleria in cui la temperatura dell'aria supera i 32 °C. Tuttavia, la temperatura si avvicina molto ai 32 °C attorno al punto chilometrico 51 in seguito all'aumento della lunghezza della galleria da 52.9 a 57.3 km.

Il sistema di raffreddamento non influenza la temperatura dell'aria a monte, mentre a valle il suo effetto è limitato a circa 5 km, cosa che sembra rispettare una certa logica. In effetti, la temperatura massima viene raggiunta in un punto (verso il PK 51) situato a circa 6 km dall'estremità del circuito d'acqua e distante ancora 5.4 km dal portale italiano della galleria.

Nonostante il fatto che un aumento della lunghezza del circuito 2 possa migliorare la situazione, sarebbe forse interessante analizzare la possibilità d'installare una centrale di produzione di freddo a Val Clarea o al portale dal lato italiano.

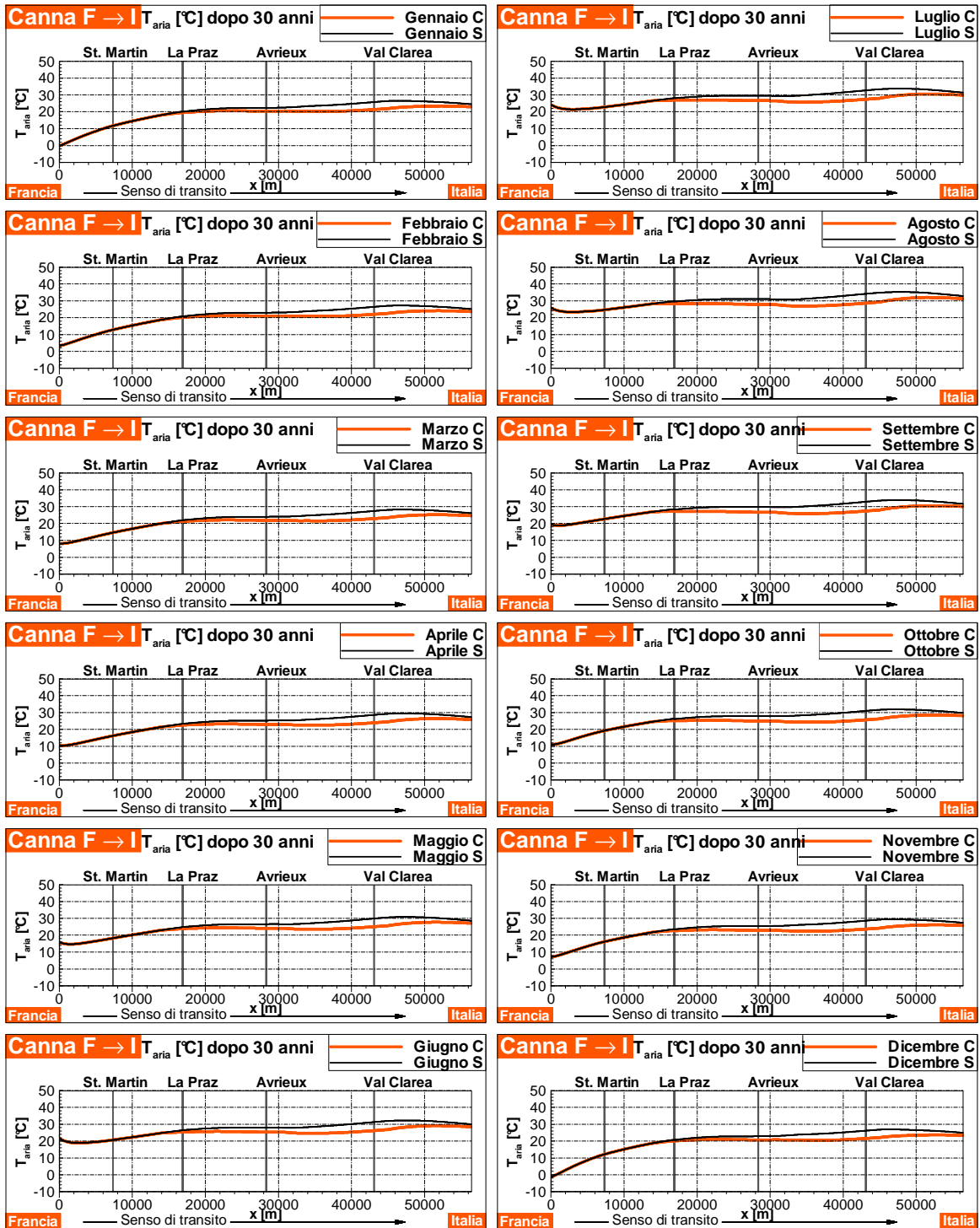


Figure 11 Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria all'interno della Canna 1 F → I dopo 30 anni d'esercizio. C: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 1.

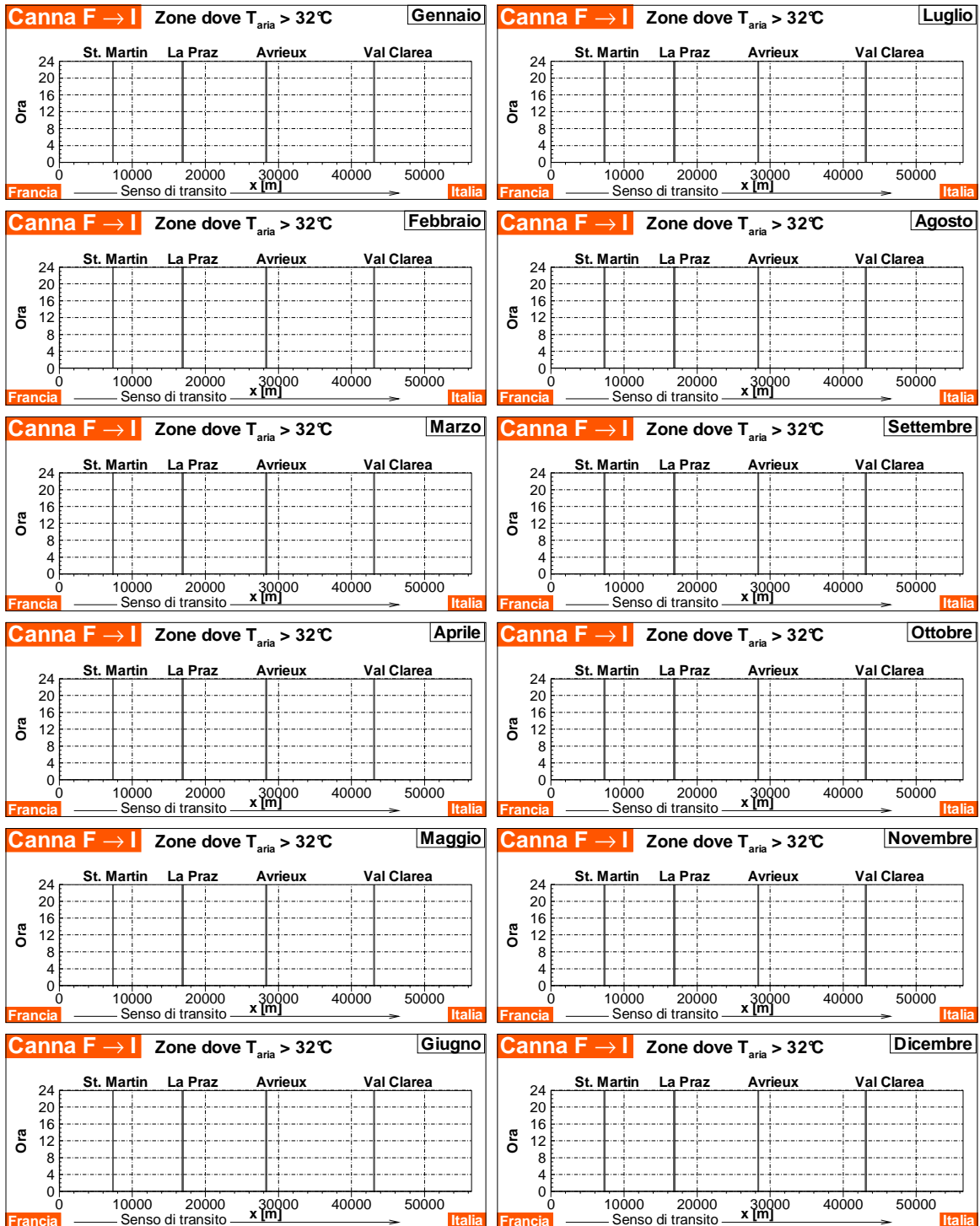


Figure 12 All'interno della Canna 1 F → I dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Nota: nessuna zona supera i 32°C. Configurazione 1.

6.2.2 Canna 2 Italia → Francia

Alla Canna 2 Italia → Francia, i cui risultati vengono qui presentati, possono essere applicate esattamente le stesse conclusioni tratte nel precedente paragrafo per la Canna 1 Francia → Italia.

La Tableau 33 riporta le temperature massime mensili stimate dopo 30 anni d'esercizio.

La Figure 33 illustra la temperatura media mensile durante il 30° anno d'esercizio, paragonata ai valori ottenuti senza sistema di raffreddamento.

Infine, la Figure 34 mostra le zone della galleria dove, nelle differenti ore della giornata e durante i 12 mesi del 30° anno d'esercizio, la temperatura dell'aria supera i 32 °C.

A parte delle lievi differenze dovute all'asimmetria del profilo della temperatura della roccia, l'evoluzione della temperatura nella Canna 2 Italia → Francia è sostanzialmente molto simile a quella osservata per la Canna 1 Francia → Italia.

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 29 | 31 | 29 | < 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 15 Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Con sistema di raffreddamento. Canna 2 Italia → Francia. Configurazione 1.

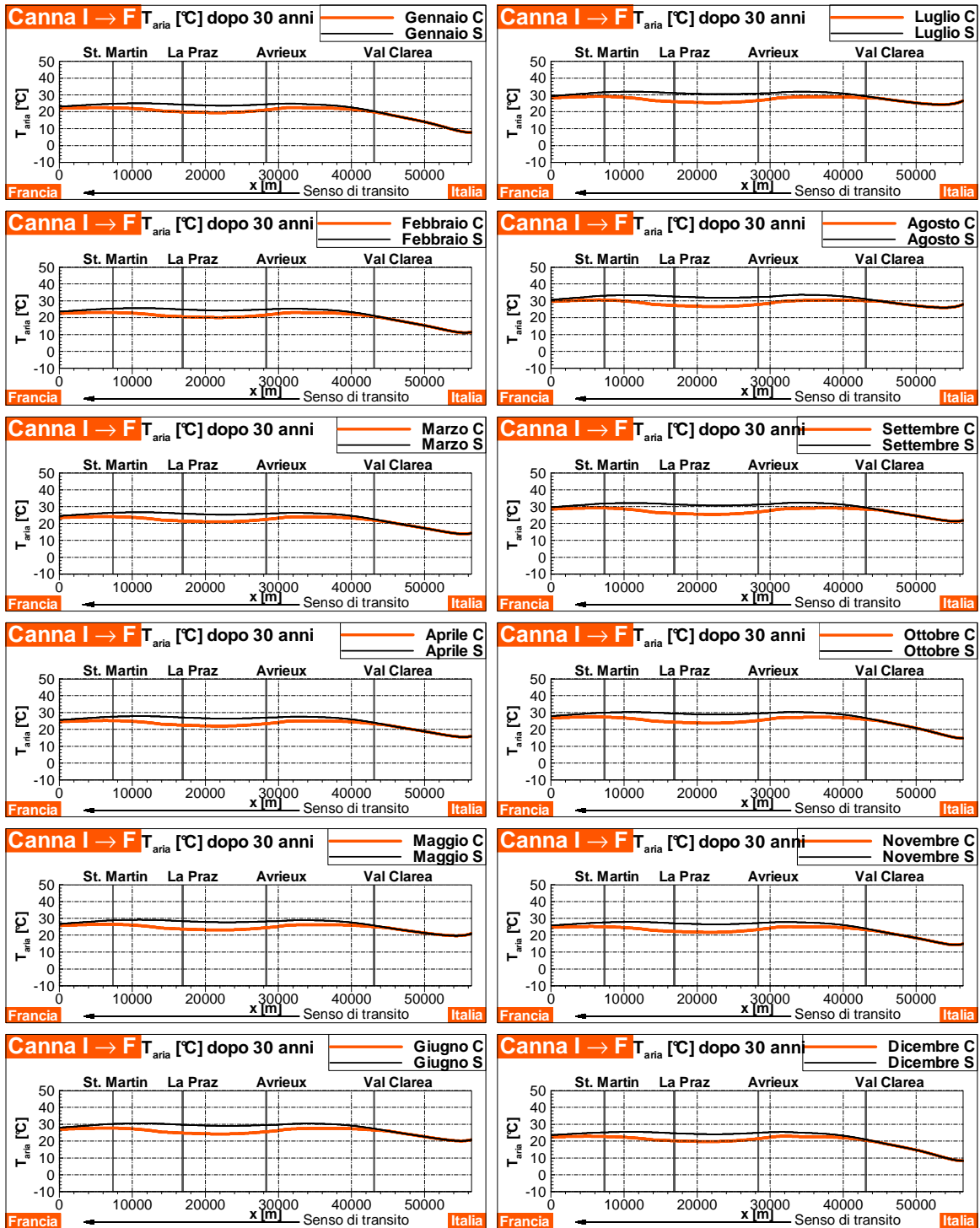


Figure 13 Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio. C: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 1.

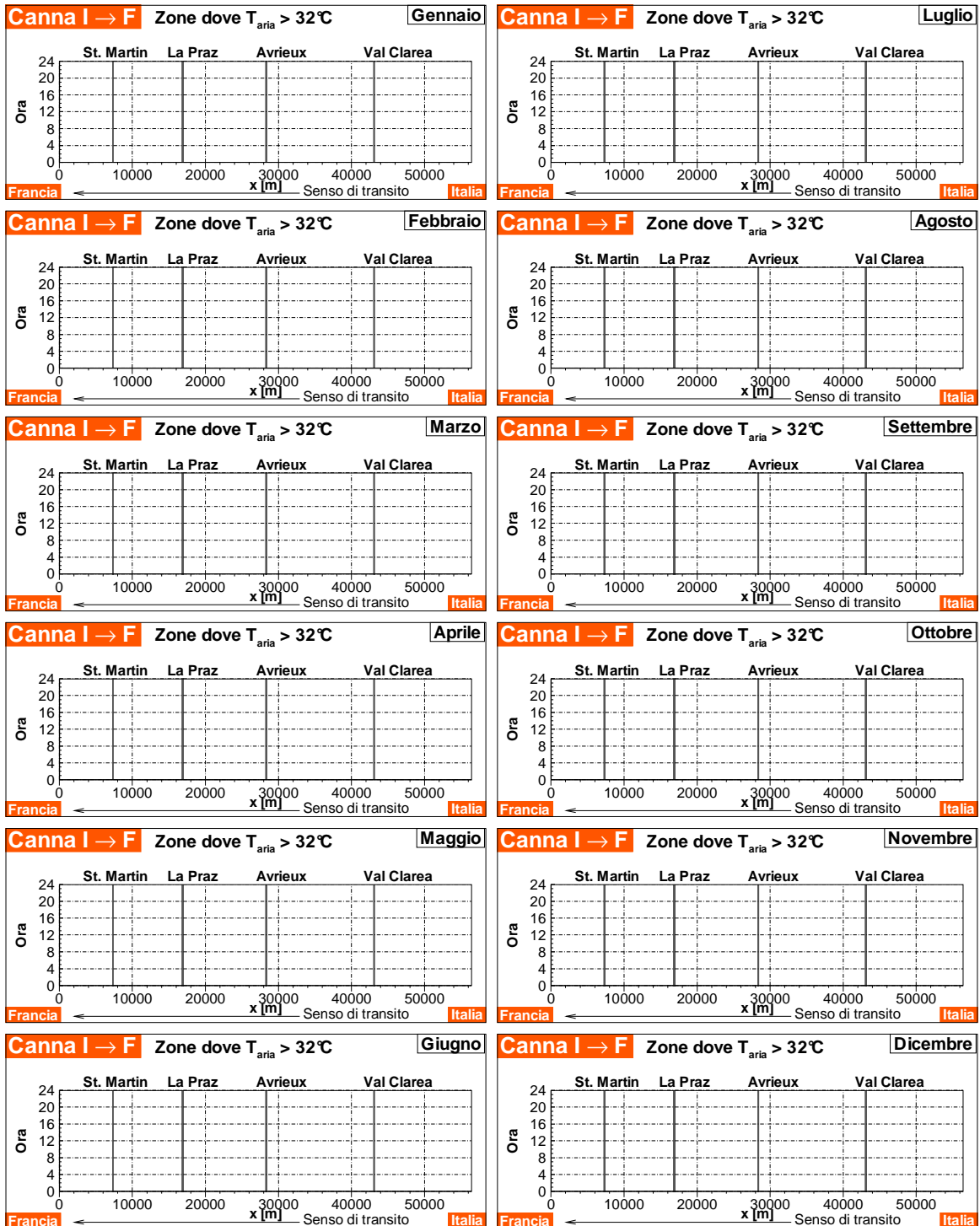


Figure 14 Nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Nota: nessuna zona supera i 32°C. Configurazione 1.

6.2.3 Potenza assorbita dal raffreddamento

A titolo indicativo, la Tableau 34 dà la potenza termica assorbita dal sistema di raffreddamento: 15.4 MW durante il periodo più caldo e 11.4 MW all'inizio e alla fine dell'estate.

| Potenza assorbita dal sistema di raffreddamento | Circuito 1 | | Circuito 2 | |
|---|-------------|--------|-------------|--------|
| | giugno/ott. | agosto | giugno/ott. | agosto |
| Temperatura acqua andata | 3°C | 3°C | 3°C | 3°C |
| Temperatura acqua ritorno | 13.5°C | 16.3°C | 13.2°C | 15.7°C |
| Potenza (MW) | 6.0 | 7.9 | 5.4 | 7.5 |

Tableau 16 Potenza termica assorbita dal sistema di raffreddamento. Circuito 1 posto tra il PK14 e Modane, Circuito 2 tra Modane e il PK45. Configurazione 1.

6.2.4 Conclusioni

In seguito all'aumento della lunghezza del tunnel di base da 52.9 a 57.3 km e all'introduzione delle nuove ipotesi e dei nuovi dati d'ingresso, il dimensionamento del sistema di raffreddamento proposto dallo studio dell'APR/PD, Lotto B3 [15] resta valido nonostante vi sia un aumento della potenza termica massima assorbita di circa 1 MW (15.4 MW durante il mese più caldo). Questo sistema permette di mantenere in qualsiasi momento e nell'insieme della galleria la temperatura dell'aria al di sotto della soglia di consegna fissata a 32 °C.

D'altra parte, lo studio della RPP, Lotto C1 [19] ha mostrato che è necessario un sistema dalle seguenti caratteristiche:

- **Circuito 1:** andata nella Canna 2 Italia → Francia in direzione della Francia per 24 km e ritorno nella Canna 1 Francia → Italia per 24 km (totale 48 km, partenza e arrivo a Modane);
- **Circuito 2:** andata nella Canna 1 Francia → Italia in direzione dell'Italia per 20 km e ritorno nella Canna 2 Italia → Francia per 20 km (totale 40 km, partenza e arrivo a Modane);

e che la potenza massima assorbita sia di 20.5 MW.

Tenuto conto di questi risultati è necessario verificare l'influenza dei dati d'ingresso utilizzati nello studio del Lotto C1.

6.3 CONFIGURAZIONE 2: RISULTATI OTTENUTI INTEGRANDO I DATI DEL LOTTO C1

Sulla base di nuovi riferimenti, lo studio termico svolto per il Lotto C1 utilizza i valori seguenti per la portata d'acqua d'infiltrazione e per la fonte termica distribuita nel tunnel:

- portata d'acqua: $2.4 \cdot 10^{-5}$ km/s/m;
- fonte termica: 57 W/m.

In seguito i risultati vengono presentati seguendo la stessa struttura utilizzata nella Sezione 5.2 per la Configurazione 1.

6.3.1 Canna 1 Francia → Italia

La Tableau 35 mostra le temperature massime raggiunte dopo 30 anni d'esercizio. In luglio e settembre la temperatura è uguale al valore soglia di 32 °C e in agosto questo valore è superato, anche in presenza di un sistema di raffreddamento.

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | Set. | ott. | nov. | dic. |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 31 | 32 | 34 | 32 | 30 | < 32 | < 32 |

*Tableau 17 Temperature massime locali dopo 30 d'esercizio. Con sistema di raffreddamento.
Canna 1 Francia → Italia. Configurazione 2.*

La Figure 35 mette in evidenza l'efficacia del sistema di raffreddamento lì dov'è presente ma in questo caso vi sono dei superamenti in certe zone più discoste dal circuito d'acqua ed in particolare nelle zone più profonde del tunnel, ossia dal lato italiano. Ciò è confermato dalla Figure 36, che mostra le zone della galleria dove la temperatura dell'aria supera i 32°C. Durante i mesi più caldi questa zona si estende dal PK 46 fino al portale della galleria tunnel dal lato italiano.

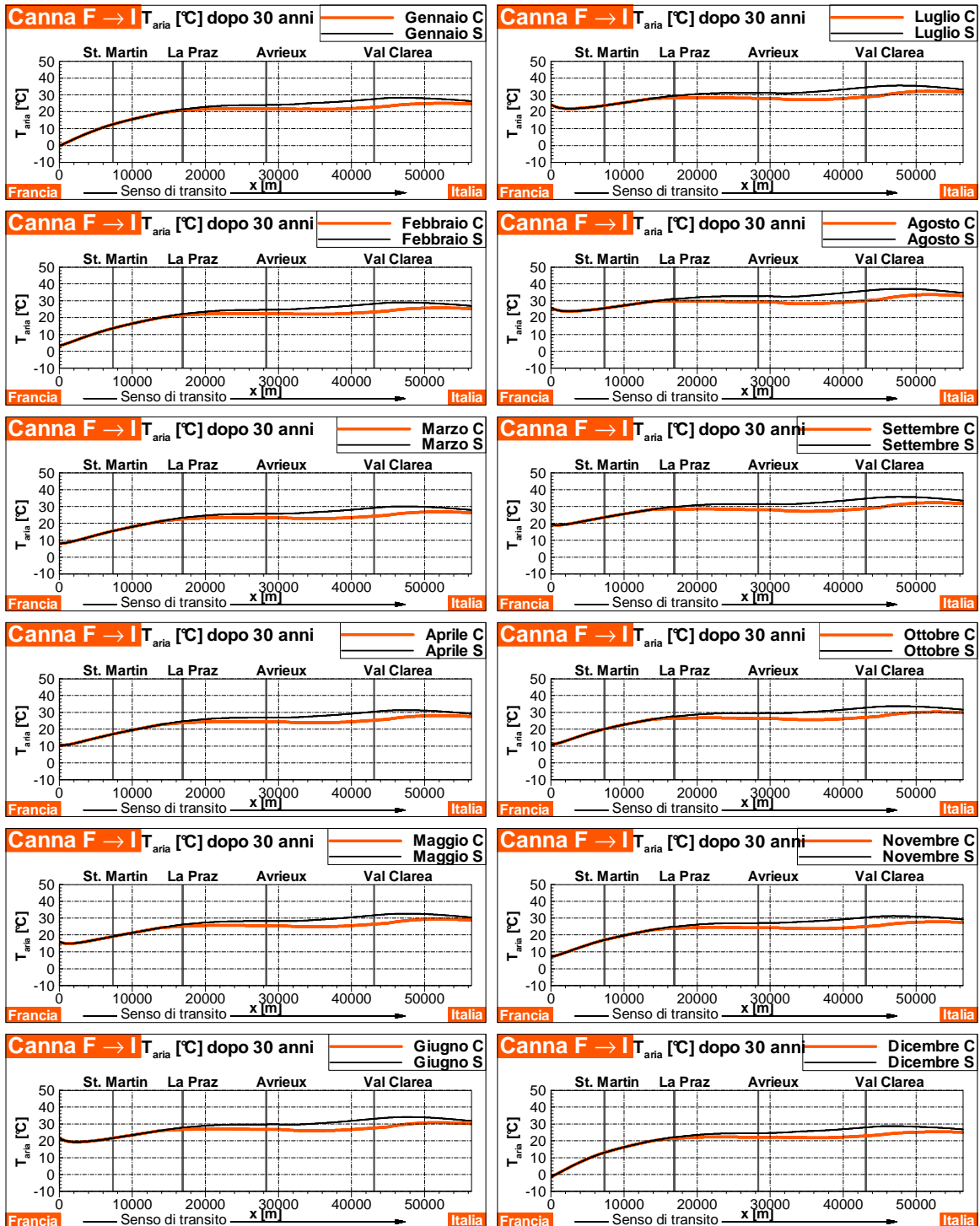


Figure 15 Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella canna 1 F → I dopo 30 anni d'esercizio. A: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 2.

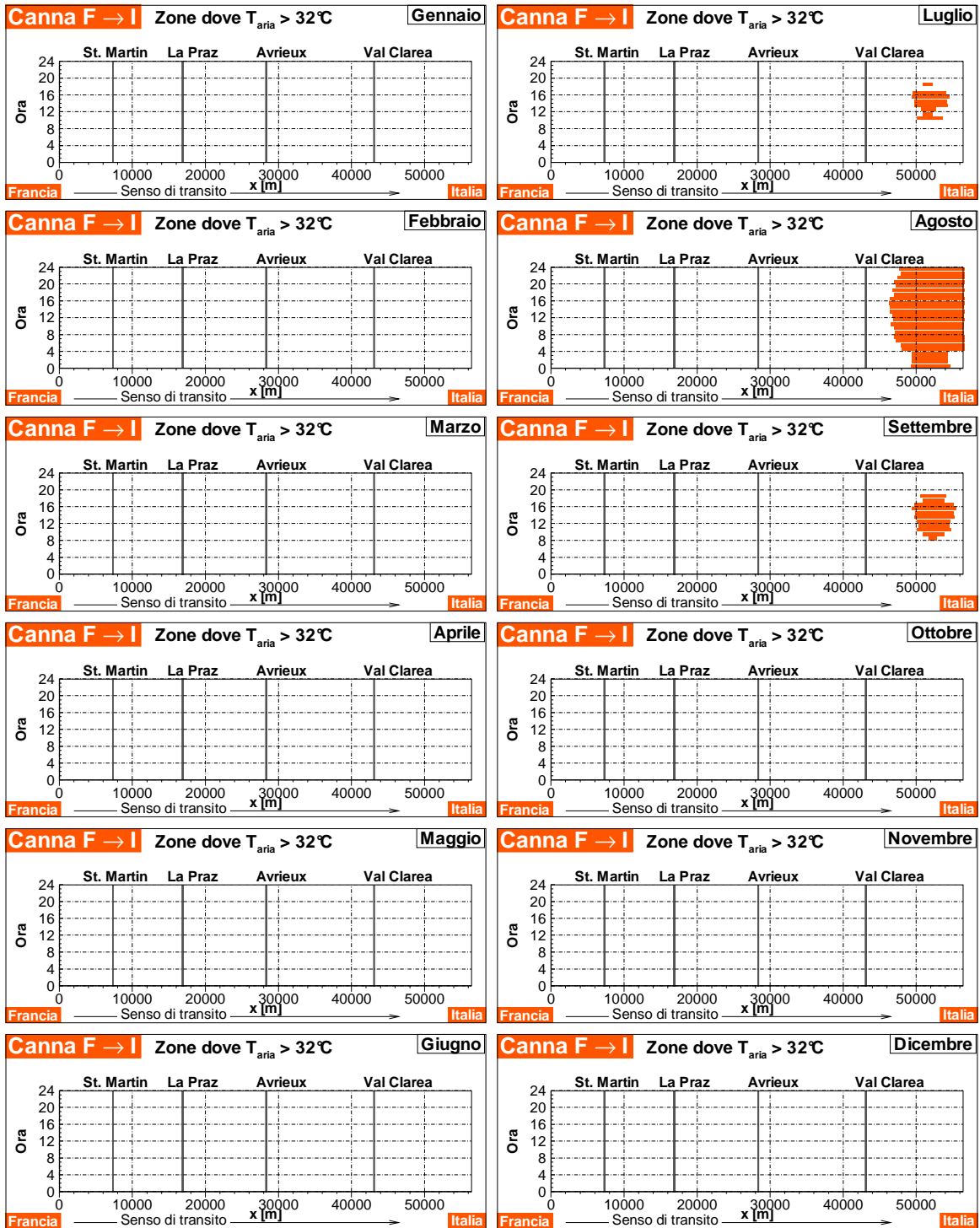


Figure 16 Nella Canna1 F → I dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Configurazione 2.

6.3.2 Canna 2 Italia → Francia

Alla Canna 2 Italia → Francia, i cui risultati vengono qui presentati, possono essere applicate esattamente le stesse conclusioni tratte nel paragrafo precedente per la Canna 1 Francia → Italia.

Il Tableau 36 riporta le temperature massime mensili stimate dopo 30 anni d'esercizio.

La Figure 37 illustra la temperatura media mensile durante il 30° anno d'esercizio, paragonata ai valori ottenuti senza sistema di raffreddamento.

Infine, la Figure 38 mostra le zone del tunnel in cui, nelle differenti ore della giornata e durante i 12 mesi del 30° anno d'esercizio, la temperatura dell'aria supera i 32 °C.

A parte delle lievi differenze dovute all'asimmetria del profilo di temperatura della roccia, l'evoluzione della temperatura nella Canna 2 Italia → Francia è sostanzialmente simile a quella osservata per la Canna Francia → Italia, ma con un valore medio leggermente inferiore.

| Mese | gen. | feb. | mar. | apr. | mag. | giu. | lug. | ago. | set. | ott. | nov. | dic. |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 31 | 33 | 31 | < 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 18 Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Con sistema di raffreddamento. Canna 2 Italia → Francia. Configurazione 2.

Nel mese più caldo si osserva un superamento della soglia durante le ore più calde della giornata, a livello del pozzo St. Martin, fra i PK 5 e 8.

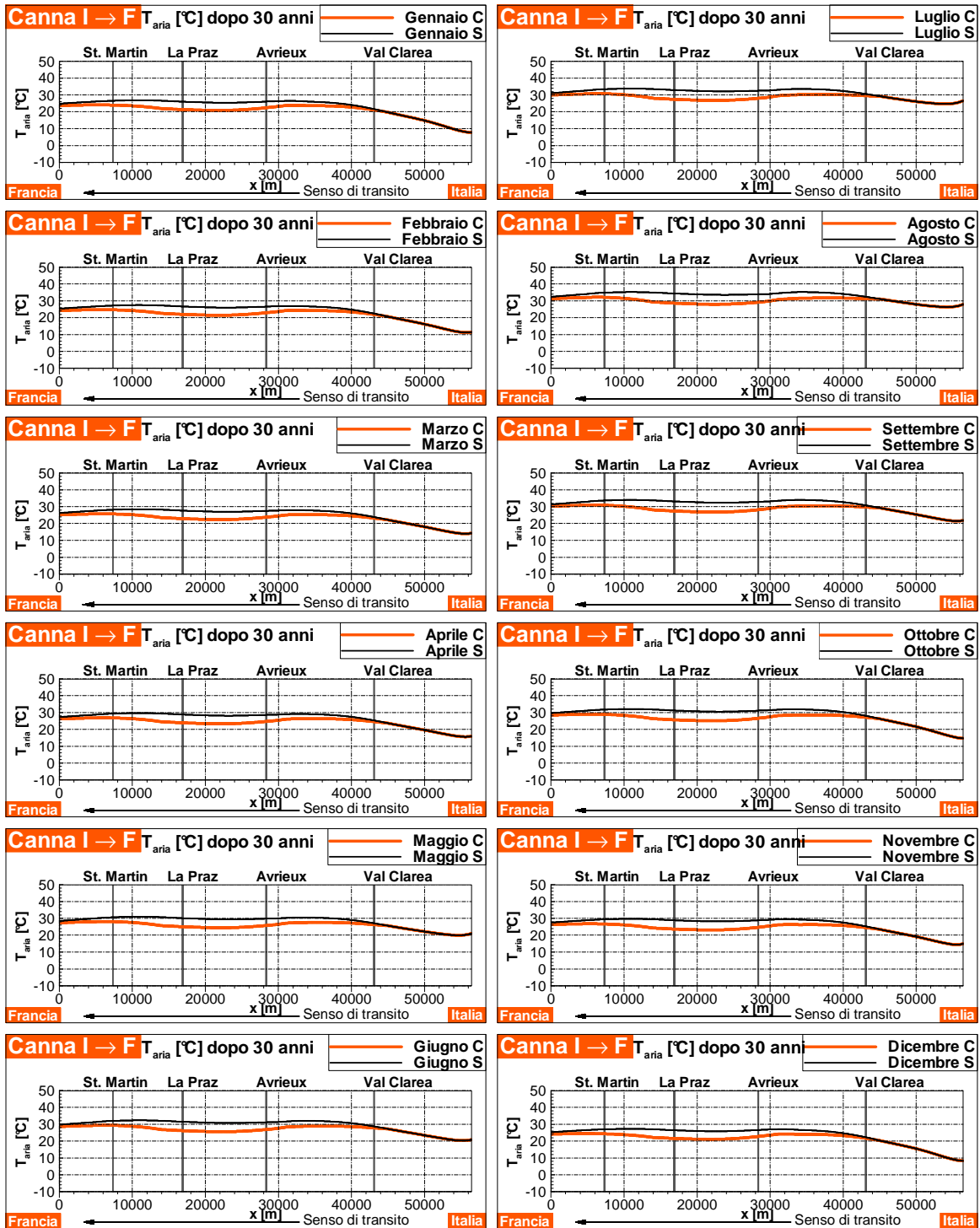


Figure 17 Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio. C: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 2.

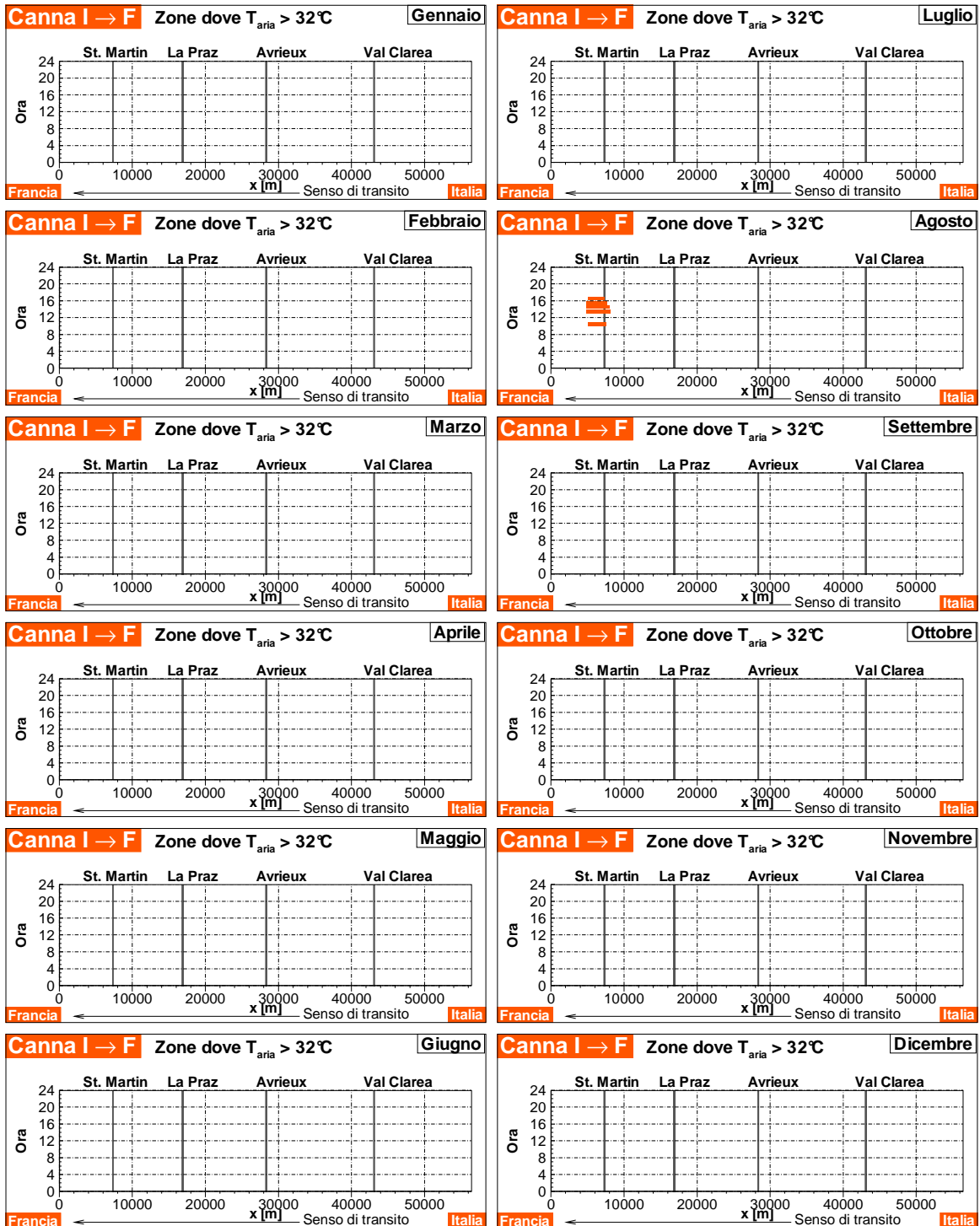


Figure 18 Nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Configurazione 2.

6.3.3 Potenza assorbita dal raffreddamento

La potenza assorbita dal sistema di raffreddamento non è sufficiente a garantire una temperatura inferiore a 32 °C nel corso di tutto l'anno e in ogni punto della galleria.

6.3.4 Conclusioni

In seguito all'aumento della lunghezza della galleria da 52.9 a 57.3 km, all'introduzione dei nuovi dati d'ingresso come pure alla presa in considerazione dei dati utilizzati per il Lotto C1 e al margine d'errore (§ 5.3), si osservano dei superamenti della soglia di temperatura fissata a 32 °C:

- nella Canna 1 Francia → Italia: tra il PK 46 e il portale della galleria lato italiano;
- nella Canna 2 Italia → Francia: tra il PK 5 e il PK 8 (unicamente durante le ore più calde della giornata).

7 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Il presente rapporto è stato consacrato allo studio, tramite simulazioni numeriche, dell'evoluzione della temperatura dell'aria nella galleria di base del collegamento ferroviario Lione – Torino. Lo studio rientra nel quadro degli studi tecnici del RPP, Lotto C2, in seguito alle modifiche del tracciato della galleria di base intervenute dopo gli studi della fase APR/PD nel 2005-2006.

7.1 EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA SENZA RAFFREDDAMENTO

Il modello è stato applicato al tunnel grezzo, senza sistemi di raffreddamento, per il calcolo della distribuzione della temperatura e dell'umidità dell'aria nelle due Canne. L'evoluzione temporale è calcolata su tutto l'arco dei primi 30 anni d'esercizio.

LTF ha chiesto che la temperatura dell'aria all'interno della galleria non superi la soglia dei 32 °C.

La simulazione numerica dell'evoluzione del profilo della temperatura all'interno della galleria di base ha mostrato che: per la Canna 1 Francia → Italia la temperatura supera durante 3 mesi su 12 (da luglio a settembre) il valore soglia di 32 °C e per la Canna Tubo 2 Italia → Francia la temperatura supera durante 2 mesi su 12 (agosto e settembre) il valore soglia di 32 °C. Inoltre, nella Canna 1 Francia → Italia, la temperatura si avvicina molto ai 32 °C anche in giugno e in ottobre e nella Canna 2 Italia → Francia, la temperatura si avvicina molto ai 32 °C anche in luglio.

La lunghezza del tratto lungo il quale la soglia è superata è notevole: durante il mese di agosto, quando l'aria può raggiungere localmente i 35 °C, raggiunge 20 km nella Canna 1 Francia → Italia e 31 km nella Canna 2 Italia → Francia. Più precisamente:

- **la Canna 1 Francia → Italia** comprende una zona di superamento della soglia di 20 km centrata sul punto chilometrico 48;
- **la Canna 2 Italia → Francia** comprende una zona di superamento della soglia di 17 km centrata sul punto chilometrico 12 e una zona di 14 km centrata sul punto chilometrico 35.

Per rispettare le temperature di consegna, è dunque necessario un sistema di raffreddamento durante i 3-4 mesi del periodo estivo. Un tale sistema non è per contro necessario in inverno.

7.2 EVOLUZIONE DELLA TEMPERATURA CON RAFFREDDAMENTO

Due nuove configurazioni sono state analizzate in termini di dati d'ingresso:

- **Configurazione 1:** l'evoluzione della temperatura è calcolata considerando unicamente l'effetto dei dati derivanti dai nuovi riferimenti, ossia:
 - lunghezza della galleria;
 - caratteristiche termiche e profilo di temperatura della roccia;
 - temperatura dell'aria esterna dal lato Italia;
 - dissipazione degli impianti (25 W/m).
- **Configurazione 2:** l'evoluzione della temperatura è calcolata considerando anche i nuovi dati utilizzati nello studio termico del Lotto C1:
 - fonte termica distribuita superiore (57 W/m);
 - portata d'acqua d'infiltrazione inferiore ($2.4 \cdot 10^{-5}$ kg/m/s).

7.2.1 Configurazione 1

È stato simulato l'effetto di due condotte di acqua refrigerata indipendenti di 28 e 34 km di lunghezza per 350 mm di diametro. Le condotte si sviluppano a partire dalla stazione di Modane nel seguente modo (cfr Figure 39):

- Circuito 1: andata nella Canna 2 Italia → Francia in direzione della Francia fino al punto chilometrico 14 e ritorno nella Canna 1 Francia → Italia;
- Circuito 2: andata nella Canna 1 Francia → Italia in direzione dell'Italia fino al punto chilometrico 45 e ritorno nella Canna 2 Italia → Francia.

L'acqua refrigerata, inizialmente a 3 °C, circola a 1.5 m/s; la temperatura di ritorno risultante è di circa 16 °C.

Il sistema di raffreddamento proposto è efficace e il suo dimensionamento è sufficiente a ridurre la temperatura dell'aria al di sotto della temperatura di consegna di 32 °C, sia in inverno che in estate. Tuttavia, in seguito all'aumento della lunghezza della galleria, esiste, nella Canna 1 Francia → Italia, una zona nei pressi del portale italiano in cui la temperatura si avvicina ai 32 °C. Questa zona non è coperta dal circuito d'acqua.

La potenza termica massima assorbita dal sistema è di 15.4 MW durante il periodo più caldo e 11.4 MW ad inizio e fine estate.

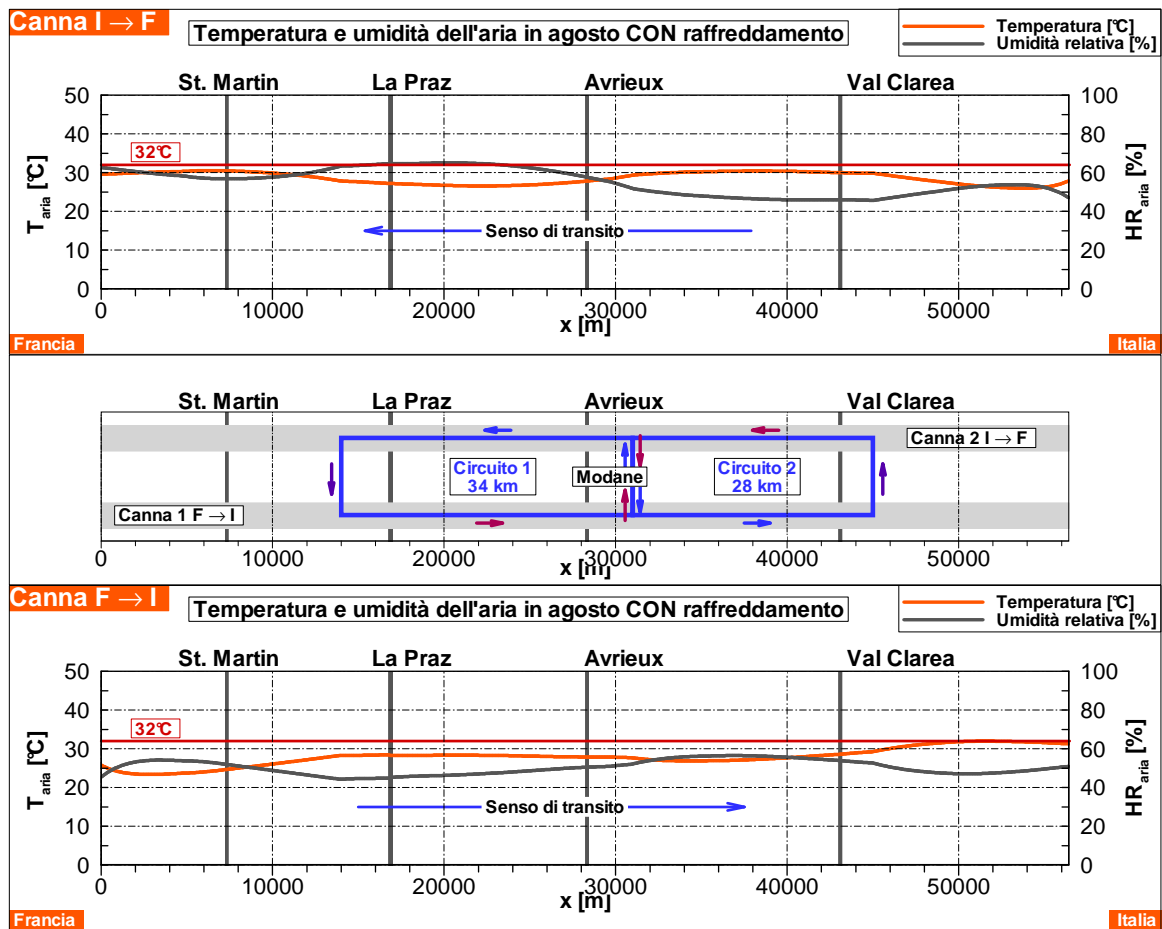


Figure 19 Profilo di temperatura e umidità dell'aria nel mese d'agosto (il mese più caldo) nelle due Canne con sistema di raffreddamento; posizionamento del circuito di raffreddamento. **Configurazione 1** tenendo conto unicamente dei nuovi dati d'ingresso del progetto.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

7.2.2 Configurazione 2

Lo stesso sistema di raffreddamento di quello analizzato nella configurazione 1 è stato simulato con l'integrazione delle ipotesi del Lotto C1.

In questo caso il sistema di raffreddamento non permette di mantenere la temperatura dell'aria al di sotto dei 32 °C in ogni punto della galleria e sull'arco di tutto l'anno. La soglia di 32 °C è superata:

- nella Canna 1 Francia → Italia: fra il PK 46 e il portale della galleria lato italiano;
- nella Canna 2 Italia → Francia: fra il PK 5 e il PK 8 (unicamente durante le ore più calde della giornata).

Tenuto conto della posizione delle zone di superamento della soglia e del margine d'errore preso in considerazione (§ 5.3), sarebbe forse interessante analizzare delle altre possibilità d'installazione di una centrale di produzione di freddo, in modo da raffreddare direttamente la zona della galleria più calda posizionando il circuito d'acqua là dove è necessario.

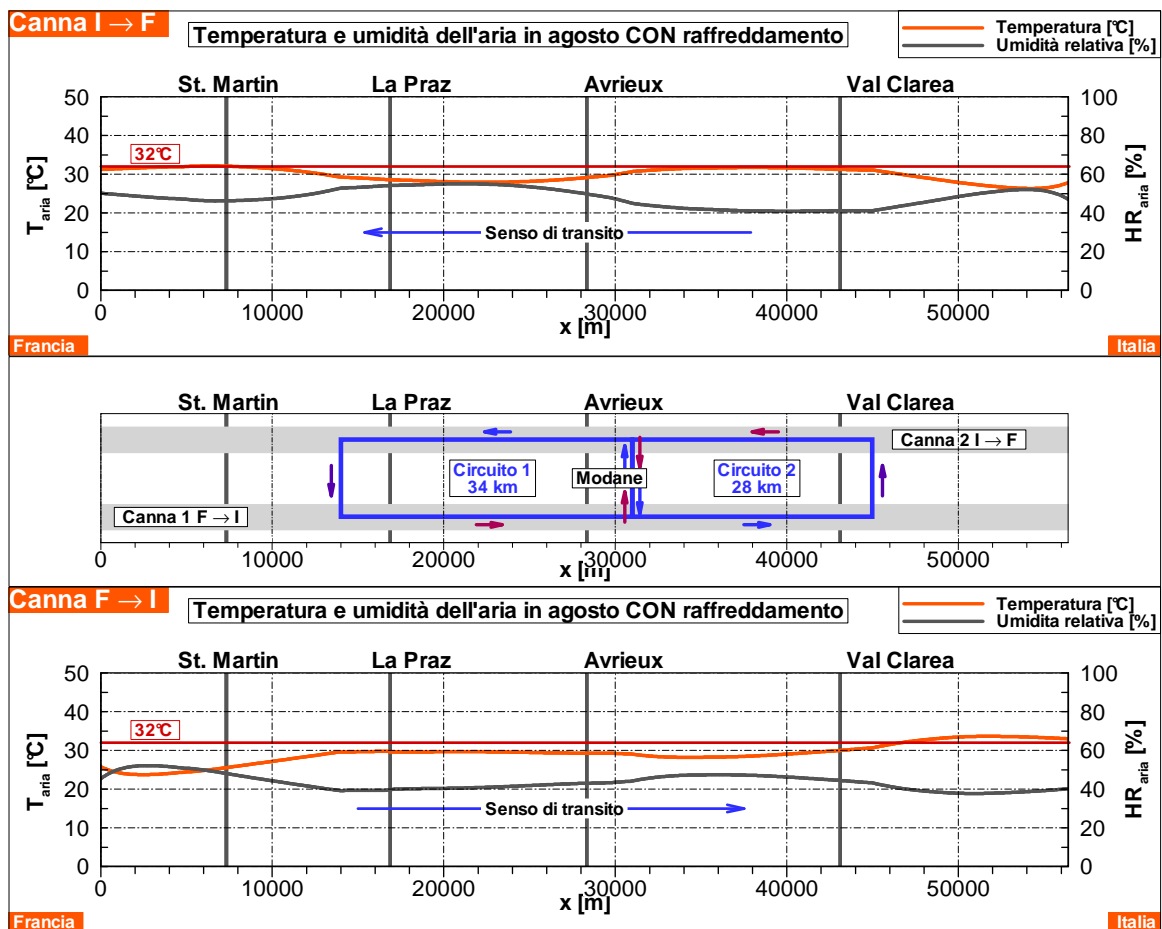


Figure 20 Profilo di temperatura e umidità dell'aria nel mese d'agosto (il mese più caldo) nelle due Canne con sistema di raffreddamento; posizionamento del circuito di raffreddamento. **Configurazione 2** tenendo conto dei nuovi dati d'ingresso del progetto e delle ipotesi dello studio termico del Lotto C1.

7.2.3 Scelta della configurazione

I dati d'ingresso del progetto dovranno essere affinati nel proseguo del progetto, sulla base di nuove informazioni che saranno disponibili.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

Per quel che concerne il valore della portata d'acqua d'infiltrazione, degli eventuali futuri sondaggi potranno fornire delle informazioni più precise.

La configurazione 1, che riprende i dati dell'APR aggiungendo unicamente le modifiche del tracciato e i nuovi riferimenti del progetto, sembra la più coerente con lo stato attuale del progetto.

ANNEXE A: LISTA DELLE FIGURE

| | | |
|------------------|--|----|
| Figura 1 | Profilo longitudinale di temperatura della roccia lungo la galleria di base secondo la nuova configurazione della galleria..... | 2 |
| Figura 2 | Sezione tipo della galleria di base in zona corrente (1) e zona di ventilazione (2). Fonte: APR/PD [4]. | 6 |
| Figura 3 | Temperatura media mensile dell'aria e minima notturna e massima diurna. Lato francese [4]; lato italiano [8]. | 11 |
| Figura 4 | Profilo longitudinale di temperatura della roccia lungo la galleria di base. Aggiornato in base ai nuovi riferimenti [6]. | 15 |
| Figura 5 | Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 1 F → I dopo 30 anni di esercizio. Non vi è installato alcun sistema di raffreddamento..... | 17 |
| Figura 6 | Nella Canna 1 F → I dopo 30 anni di esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C..... | 18 |
| Figura 7 | Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio. Non vi è installato nessun sistema di raffreddamento..... | 20 |
| Figura 8 | Nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C..... | 21 |
| Figura 9 | Esempio di sensibilità della soluzione ai parametri d'ingresso. Temperatura di riferimento e zona di variazione. | 22 |
| Figura 10 | Distribuzione della temperatura e dell'umidità dell'aria nelle due Canne durante il mese d'agosto senza sistema di raffreddamento ; posizionamento dei due circuiti di raffreddamento. | 25 |
| Figura 11 | Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria all'interno della Canna 1 F → I dopo 30 anni d'esercizio. A: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 1. .. | 27 |
| Figura 12 | All'interno della Canna 1 F → I dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Nota: nessuna zona supera i 32°C. Configurazione 1..... | 28 |
| Figura 13 | Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio. A: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 1. | 30 |
| Figura 14 | Nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Nota: nessuna zona supera i 32°C. Configurazione 1..... | 31 |
| Figura 15 | Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella canna 1 F → I dopo 30 anni d'esercizio. A: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 2. | 34 |
| Figura 16 | Nella Canna 1 F → I dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Configurazione 2. | 35 |
| Figura 17 | Evoluzione della temperatura media mensile dell'aria nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio. A: con sistema di raffreddamento; S: senza sistema di raffreddamento. Configurazione 2. | 37 |
| Figura 18 | Nella Canna 2 I → F dopo 30 anni d'esercizio, zone in cui la temperatura dell'aria supera la temperatura di consegna di 32°C. Con sistema di raffreddamento. Configurazione 2. | 38 |
| Figura 19 | Profilo di temperatura e umidità dell'aria nel mese d'agosto (il mese più caldo) nelle due Canne con sistema di raffreddamento ; posizionamento del circuito di raffreddamento. Configurazione 1 tenendo conto unicamente dei nuovi dati d'ingresso del progetto..... | 41 |
| Figura 20 | Profilo di temperatura e umidità dell'aria nel mese d'agosto (il mese più caldo) nelle due Canne con sistema di raffreddamento ; posizionamento del circuito di raffreddamento. Configurazione 2 tenendo conto dei nuovi dati d'ingresso del progetto e delle ipotesi dello studio termico del Lotto C1..... | 42 |

ANNEXE B: LISTA DELLE TABELLE

| | | |
|-------------------|---|----|
| Tabella 1 | Caratteristiche geometriche principali della galleria di base. Una pendenza positiva corrisponde ad una risalita in direzione Ovest-Est, ossia Francia → Italia. | 6 |
| Tabella 2 | Caratteristiche termiche del cemento. | 6 |
| Tabella 3 | Localizzazione e caratteristiche dei tipi di roccia presenti lungo la galleria. In grassetto i valori modificati rispetto allo studio dell'APRD/PD [4]. | 7 |
| Tabella 4 | Caratteristiche principali delle discenderie, dei pozzi e delle gallerie aventi un impatto sulla ventilazione del tunnel. La posizione è data a partire dal portale ovest. | 8 |
| Tabella 5 | Caratteristiche aerauliche e termiche dei treni in circolazione. | 9 |
| Tabella 6 | Numero di treni e ripartizione oraria del traffico (traffico di dimensionamento per il sistema di raffreddamento). | 9 |
| Tabella 7 | Valori medi mensili e ampiezza della variazione giornaliera (temperatura massima giornaliera - temperatura minima notturna) della temperatura al portale francese della galleria [4]. | 10 |
| Tabella 8 | Valori medi mensili e ampiezza della variazione giornaliera (temperatura massima giornaliera - temperatura minima notturna) della temperatura al portale italiano della galleria [8]. | 10 |
| Tabella 9 | Valori medi mensili dell'umidità relativa ai portali della galleria, dei pozzi e delle discenderie [4]. | 11 |
| Tabella 10 | Canna Francia → Italia: media oraria delle portate d'aria (m ³ /s) prese in considerazione per lo studio termico. Dei valori negativi indicano una portata entrante nella galleria. | 12 |
| Tabella 11 | Canna Italia → Francia: media oraria delle portate d'aria (m ³ /s) prese in considerazione per lo studio termico. Dei valori negativi indicano una portata entrante nella galleria. | 13 |
| Tabella 12 | Temperature massime locali dopo 30 anni di esercizio. Canna 1 Francia → Italia. Senza raffreddamento. | 16 |
| Tabella 13 | Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Canna 2 Italia → Francia. Senza raffreddamento. | 19 |
| Tabella 14 | Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Con sistema di raffreddamento. Canna 1 Francia → Italia. Configurazione 1. | 25 |
| Tabella 15 | Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Con sistema di raffreddamento. Canna 2 Italia → Francia. Configurazione 1. | 29 |
| Tabella 16 | Potenza termica assorbita dal sistema di raffreddamento. Circuito 1 posto tra il PK14 e Modane, Circuito 2 tra Modane e il PK45. Configurazione 1. | 32 |
| Tabella 17 | Temperature massime locali dopo 30 d'esercizio. Con sistema di raffreddamento. Canna 1 Francia → Italia. Configurazione 2. | 33 |
| Tabella 18 | Temperature massime locali dopo 30 anni d'esercizio. Con sistema di raffreddamento. Canna 2 Italia → Francia. Configurazione 2. | 36 |

SOMMAIRE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | GENERALITES | 48 |
| 1.1 | CONTEXTE GENERAL | 48 |
| 1.2 | DESCRIPTION DU SYSTEME | 48 |
| 1.3 | OBJECTIF DE L'ETUDE | 49 |
| 1.4 | DOCUMENTS DE REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE | 49 |
| 1.4.1 | <i>Lot C2</i> | 49 |
| 1.4.2 | <i>Études d'APR/PD</i> | 49 |
| 1.4.3 | <i>Études de RPP</i> | 49 |
| 1.4.4 | <i>Autres références</i> | 49 |
| 1.5 | STRUCTURE DU RAPPORT | 50 |
| 2 | PROJET LTF: DONNEES PRINCIPALES..... | 51 |
| 2.1 | REMARQUE PRELIMINAIRE | 51 |
| 2.2 | OUVRAGES DE GENIE CIVIL | 51 |
| 2.2.1 | <i>Description générale</i> | 51 |
| 2.2.2 | <i>Tunnel de base</i> | 51 |
| 2.2.3 | <i>Descenderies, puits et galeries</i> | 53 |
| 2.3 | MATERIEL ROULANT | 54 |
| 2.3.1 | <i>Trains de voyageurs</i> | 54 |
| 2.3.2 | <i>Trains de fret</i> | 54 |
| 2.3.3 | <i>Trains d'autoroute ferroviaire</i> | 54 |
| 2.3.4 | <i>Caractéristiques principales des trains</i> | 55 |
| 2.3.5 | <i>Exploitation nominale</i> | 55 |
| 2.4 | DONNEES AERAIQUES ET THERMIQUES | 56 |
| 2.4.1 | <i>Température de la roche</i> | 56 |
| 2.4.2 | <i>Température et humidité aux têtes du tunnel</i> | 56 |
| 2.4.3 | <i>Débits d'air dans le tunnel et les puits</i> | 57 |
| 2.4.4 | <i>Évaporation de l'eau</i> | 59 |
| 2.4.5 | <i>Pertes auxiliaires</i> | 59 |
| 2.5 | TEMPERATURE DE CONSIGNE | 59 |
| 3 | MODELE DE CALCUL..... | 60 |
| 3.1 | EXPLOITATION DU MODELE | 60 |
| 3.1.1 | <i>Condition initiale</i> | 60 |
| 3.1.2 | <i>Conditions aux limites</i> | 60 |
| 4 | ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR SANS SYSTEMES DE REFROIDISSEMENT | 61 |
| 4.1 | TUBE 1 FRANCE → ITALIE | 61 |
| 4.2 | TUBE 2 ITALIE → FRANCE | 64 |
| 4.3 | ANALYSE DE SENSIBILITE AUX PARAMETRES D'ENTREE | 67 |
| 4.4 | CONCLUSION | 67 |
| 5 | ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR AVEC REFROIDISSEMENT A EAU | 69 |
| 5.1 | POSITIONNEMENT DU CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT | 69 |
| 5.1.1 | <i>Solution retenue</i> | 69 |
| 5.2 | CONFIGURATION 1: RESULTATS OBTENUS UNIQUEMENT AVEC LES DONNEES DES NOUVELLES REFERENCES | 70 |
| 5.2.1 | <i>Tube 1 France → Italie</i> | 70 |
| 5.2.2 | <i>Tube 2 Italie → France</i> | 74 |
| 5.2.3 | <i>Puissance absorbée par le refroidissement</i> | 77 |
| 5.2.4 | <i>Conclusion</i> | 77 |
| 5.3 | CONFIGURATION 2: RESULTATS OBTENUS EN INTEGRANT LES DONNEES DU LOT C1 | 77 |

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3.1 | <i>Tube 1 France → Italie</i> | 78 |
| 5.3.2 | <i>Tube 2 Italie → France</i> | 81 |
| 5.3.3 | <i>Puissance absorbée par le refroidissement</i> | 84 |
| 5.3.4 | <i>Conclusion</i> | 84 |
| 6 | CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS | 85 |
| 6.1 | ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE SANS REFROIDISSEMENT..... | 85 |
| 6.2 | ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE AVEC REFROIDISSEMENT..... | 85 |
| 6.2.1 | <i>Configuration 1</i> | 86 |
| 6.2.2 | <i>Configuration 2</i> | 87 |

1 GENERALITES

1.1 CONTEXTE GENERAL

Cette étude s'inscrit dans le cadre des études de Révision du Projet Préliminaire (RPP) du tunnel de base de la liaison ferroviaire Lyon-Turin. 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 d'environ 4.5 km (de 52 900 à 57 283).

1.2 DESCRIPTION DU SYSTEME

Le tunnel de base LTF, d'une longueur de 57.3 km, traverse le massif montagneux franco-italien à une profondeur qui, sur une partie non négligeable, peut atteindre les 2300 m. À une telle profondeur, la température de la roche est élevée, localement supérieure à 45°C (cf. Figure 21), comme montré par les études géologiques menées dans la phase de l'APR/PD et actualisées dans cette phase de PP.

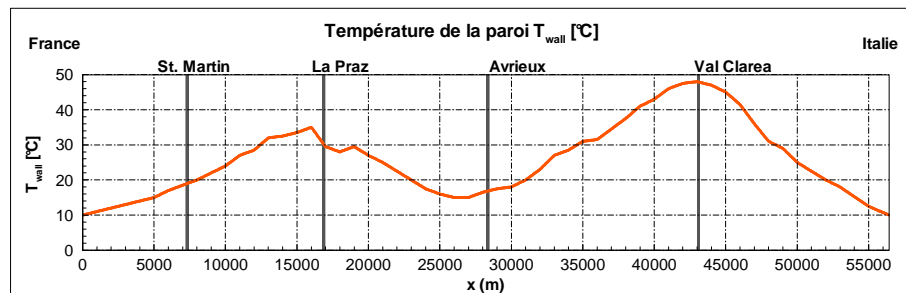


Figure 21 Profil longitudinal de température de la roche le long du tunnel de base selon [17] nouvelle configuration di tunnel.

L'étude thermique réalisée dans le cadre de l'APR/PD avait analysé différentes solutions de refroidissement et avait proposé un système de refroidissement à eau permettant d'extraire une puissance thermique d'environ 15 MW.

La récente étude réalisée dans le cadre du Lot C1 [19] sur la nouvelle configuration du tunnel de base et avec des nouvelles hypothèses, a aussi montré la nécessité d'installer un système de refroidissement capable d'extraire une puissance maximale de 20.5 MW.

Compte tenu de ces résultats, le calcul précis de la puissance de refroidissement et le choix et le dimensionnement d'un système de refroidissement pour tout ou partie du tunnel de base s'avèrent donc nécessaires.

1.3 OBJECTIF DE L'ETUDE

L'objectif de l'étude est la révision du dimensionnement du système de refroidissement suite aux modifications du tracé et aux nouvelles hypothèses et références du projet.

D'abord on vérifie le système de refroidissement dimensionné lors de l'APR/PD, vis-à-vis des modifications du tracé et des nouvelles références de projet. En suite on analyse l'influence de certaines données utilisées dans l'étude thermique du Lot C1 (RPP) afin de vérifier leur influence sur le dimensionnement du système de refroidissement.

1.4 DOCUMENTS DE REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE

1.4.1 Lot C2

- [12] PP2-TEC/-LTF-0001 – Cahier des charges techniques détaillé – Lot C2 - Equipements.
- [13] Écarts APR_PP-1.

1.4.2 Études d'APR/PD

- [14] APR, Lot A2, Etudes fonctionnelles – Etudes de sécurité, Refroidissement du tunnel – Rapport final, APR/A2/TS2/7801-C/AP/NOT, 05/07/2006.
- [15] APR, Lot B3, Refroidissement, Etudes aéraulique et thermique, APR/B3/TS2/0900-C/AP/NOT, 12/01/2007.
- [16] APR, Lot B3, Refroidissement, Caractéristiques des équipements, APR/B3/TS2/0901-B/AP/NOT, 12/01/2007.
- [17] APR, Lot B2, Compléments Géologiques – Modèle Géothermique, APR/B2/TS2/0070-C/AP/PLA, 31/01/2007.

1.4.3 Études de RPP

- [18] RPP, Lot C3, Section transversale descriptive avec installations, TMB, PP2/C3A/TS3/0009-0/PAPLA.
- [19] RPP, Lot C1, Etude aéraulique et thermique / Refroidissement, PP2/C1/TS3/0006-D.

1.4.4 Autres références

- [20] Gotthard-Basistunnel, Lüftung und Kühlung des GBT, Detailprojekt.
- [21] Lötschberg-Basislinie, Grundlagen-Dossier Aerodynamik / Klima / Lüftung.
- [22] Estimation of train resistance coefficients in tunnels from measurements during routine operation, A. E. Vardy, P. Reinke, IMechE 1999.

1.5 STRUCTURE DU RAPPORT

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

Le Chapitre 3 rappelle le modèle numérique utilisé pour calculer l'évolution de la température de l'air dans le tunnel et la puissance de refroidissement.

Le calcul de l'évolution de la température pendant les 30 premières années d'exploitation est présenté au Chapitre 4, dans le cas où le tunnel n'est pas équipé de systèmes de refroidissement. Compte tenu du seuil de température fixé à 32°C, les résultats obtenus dans ce chapitre montrent que le tunnel doit être refroidi.

La solution de refroidissement par eau réfrigérée est appliquée au Chapitre 5, où l'efficacité de cette solution est illustrée.

Enfin, les conclusions de l'étude sont résumées au Chapitre 6.

2 PROJET LTF: DONNEES PRINCIPALES

2.1 REMARQUE PRELIMINAIRE

Les données d'entrée concernant le projet – et notamment les ouvrages de génie civil, le matériel roulant, le principe d'exploitation (trafic et carrousel) – sont principalement reprises des rapports de l'APR/PD en prenant en compte les modifications intervenues [13]. Les données concernant plus directement la thermique, y compris les sources et les pertes de chaleurs, proviennent essentiellement des études de l'APR/PD [15] et du RPP Lot C1 [19]. Les valeurs principales nécessaires pour l'étude thermique sont résumées dans ce chapitre.

2.2 OUVRAGES DE GENIE 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-bis et Val 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 56'240 m (rallongés par rapport à l'APR/PD) de long présentant une pente moyenne variable entre +0.69 et -1.13% (cf. Tableau 19).

La section du tunnel est de 43 m² sur la totalité de la longueur, sauf au droit des sites de sécurité, où toutefois les changements de géométrie n'ont pas d'influence sur l'étude thermique (cf. Figure 22).

Les parois des tunnels sont assimilées à du béton standard avec les caractéristiques thermiques résumées au Tableau 20. Le profil de température initiale est représenté en Figure 21. Ce profil a été mis à jour selon les nouvelles références [17], montrant une température de la roche du côté français plus élevée que celle utilisée dans l'étude de l'APR/PD [15].

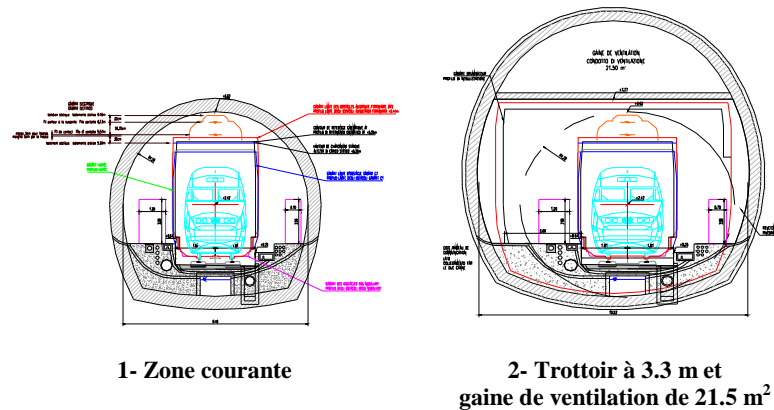


Figure 22 Coupes type du tunnel de base en zone courante (1et gaine de ventilation (2).
 Source: APR/PD [15].

| Paramètre du tunnel | | Valeur |
|----------------------------------|--|-------------------------|
| Longueur | | 57'283 m |
| Section | | 43 m² |
| 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 19 Principales caractéristiques géométriques du tunnel de base. Une pente positive correspond à une montée dans le sens Ouest-Est, soit France → Italie.

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

Tableau 20 Caractéristiques thermiques du béton.

Enfin, les caractéristiques du massif rocheux – en termes de masse volumique, chaleur massique, conductivité et diffusivité thermique – sont données au Tableau 21 en fonction du point kilométrique. Ces valeurs prennent en compte les nouvelles données d'entrée concernant les caractéristiques du massif [17]. Plus précisément, la valeur de conductivité thermique de la roche entre les points kilométriques (PK) 6.6 et 19 et les PK 20.6 et 22.4, est passée de 0.18 à 3 W/m.K. Cette augmentation importante sur une longueur totale d'environ 14 km a une influence positive sur

les échanges thermiques entre l'air et la roche (moins d'inertie thermique et plus d'échange de chaleur par rapport aux résultats de l'étude de l'APR/PD Lot B3 [15]).

| PK initial [km] | PK final [km] | Masse volumique [kg/m ³] | Chaleur massique [J/kg/K] | Conductivité [W/m/K] | Diffusivité [m ² /s] |
|-----------------|---------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------------|
| 0.0 | 3.4 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 3.4 | 3.6 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 3.6 | 3.9 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 3.9 | 4.0 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 4.0 | 4.2 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 4.2 | 4.4 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 4.4 | 5.0 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 5.0 | 5.2 | 2'734 | 880 | 7.00 | 2.91 |
| 5.2 | 6.1 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 6.1 | 6.3 | 2'734 | 880 | 3.37 | 1.40 |
| 6.3 | 6.6 | 2'842 | 898 | 4.15 | 1.63 |
| 6.6 | 19.0 | 2'720 | 879 | 3.00 | 1.25 |
| 19.0 | 20.6 | 2'755 | 835 | 2.87 | 1.25 |
| 20.6 | 22.4 | 2'720 | 879 | 3.00 | 1.25 |
| 22.4 | 22.7 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 22.7 | 23.2 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 23.2 | 24.4 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 24.4 | 29.7 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 29.7 | 34.0 | 2'895 | 886 | 5.47 | 2.13 |
| 34.0 | 45.3 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 45.3 | 50.1 | 2'800 | 822 | 2.01 | 0.87 |
| 50.1 | 51.3 | 2'844 | 852 | 2.68 | 1.11 |
| 51.3 | 57.3 | 2'720 | 879 | 3.18 | 1.33 |

Tableau 21 Localisation et caractéristiques des types de roches le long du tunnel. En gras les valeurs modifiées par rapport à l'étude de l'APRD/PD [15].

2.2.3 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 22.

En régime d'exploitation normale, seules les gaines de ventilation des descenderies de La Praz et de Val Clarea sont ouvertes pour le tube France → Italie. Pour le tube Italie → France, sont ouvertes les gaines du puits d'Avrieux et de la descenderie de St. Martin.

| 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, -7.82 % sur 1238 m | 20 m ² |
| Descenderie de La Praz | 16'856 m | 2'556 m | 969 m | -12 % | 20 m ² |
| Puits d'Avrieux | 28'328 m | 860 m | 1'300 m | Vertical sur 530 m, horizontal sur 330 m | 2 x 27 m ² |
| Puits de Val Clarea | 43'079 m | 4'522 m | 1'156 m | -12% | 42 m ² |

Tableau 22 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.

2.3 MATERIEL ROULANT

Les trains amenés à circuler dans le tunnel de base sont de 3 types: trains de voyageurs, trains de fret et trains d'autoroute ferroviaire.

2.3.1 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.

2.3.2 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 vide, 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.

Les charges thermiques de ce type de trains pouvant être très différentes, l'étude prendra en considération une valeur moyenne autour de laquelle sera réalisée une analyse de sensibilité.

2.3.3 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.

2.3.4 Caractéristiques principales des trains

Les caractéristiques géométriques, aérodynamiques et thermiques des trains sont résumées au Tableau 23.

| Caractéristiques aérauliques | TGV | Fret | AF |
|---------------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Longueur L [m] | 400 | 750 | 750 |
| Maître couple S_T [m ²] | 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 η [%] | 30 | 20 | 20 |
| Masse thermique active ϕ [%] | 60 | 25 | 30 |
| Chaleur spécifique C_T [J/kg/K] | 960 | 480 | 480 |

Tableau 23 Caractéristiques aérauliques et thermiques des trains en circulation.

2.3.5 Exploitation nominale

Le concept d'exploitation nominale prévoit une circulation mixte de trains de voyageurs (au maximum 2 par heure), de trains fret (au maximum 11 par heure) 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 aéro-thermiques, est résumée au Tableau 24.

| 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 24 Nombre de trains et répartition horaire du trafic (trafic de dimensionnement pour le système de refroidissement).

2.4 DONNEES AERAULIQUES ET THERMIQUES

Outre les valeurs présentées ci-avant concernant les ouvrages de génie civil et le matériel roulant, un certain nombre d'autres valeurs, essentiellement aérauliques et thermiques, ont été utilisées comme données d'entrée pour la simulation de l'évolution de la température de l'air dans le tunnel.

2.4.1 Température de la roche

Le profil de température initiale de la roche a été présenté en Figure 21. Les nouvelles valeurs ont été prises en compte (suite une nouvelle campagne de sondage, prise en compte d'une température plus élevée côté France).

2.4.2 Température et humidité aux têtes du tunnel

La température de l'air extérieur en proximité des deux têtes du tunnel est supposée suivre la même variation temporelle. Les valeurs moyennes mensuelles T_{moy} , avec leur écart maximal entre jour et nuit $\Delta T_{j/n}$, sont données aux Tableau 25 et Tableau 26 pour le côté français et italien respectivement ainsi que montrées dans la Figure 23. Les valeurs de température côté Italie rentrent dans les nouvelles références du projet et n'avaient pas été prises en compte dans l'étude de l'APR/PD, Lot B3 [15].

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août. | sept. | oct. | nov. | déc. |
|------------------|------|------|------|-------|-----|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| T_{moy} | -3 | 0 | 4 | 6 | 10 | 15 | 18 | 20 | 14 | 6 | 3 | -5 |
| $\Delta T_{j/n}$ | 3 | 4 | 6 | 7 | 10 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 6 | 5 |

Tableau 25 Valeurs moyennes mensuelles et amplitudes de la variation journalière (température maximale journalière – température minimale nocturne) de la température à la tête française du tunnel [15].

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août. | sept. | oct. | nov. | déc. |
|------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| T_{moy} | 3.2 | 6.3 | 9.5 | 11.2 | 16.1 | 15.9 | 21.2 | 22.6 | 16.8 | 10.3 | 9.3 | 3.7 |
| $\Delta T_{j/n}$ | 7.2 | 8.4 | 7.5 | 7.4 | 7.8 | 8.0 | 8.9 | 8.8 | 8.1 | 6.7 | 9.5 | 7.2 |

Tableau 26 Valeurs moyennes mensuelles et amplitudes de la variation journalière (température maximale journalière – température minimale nocturne) de la température à la tête italienne du tunnel [19].

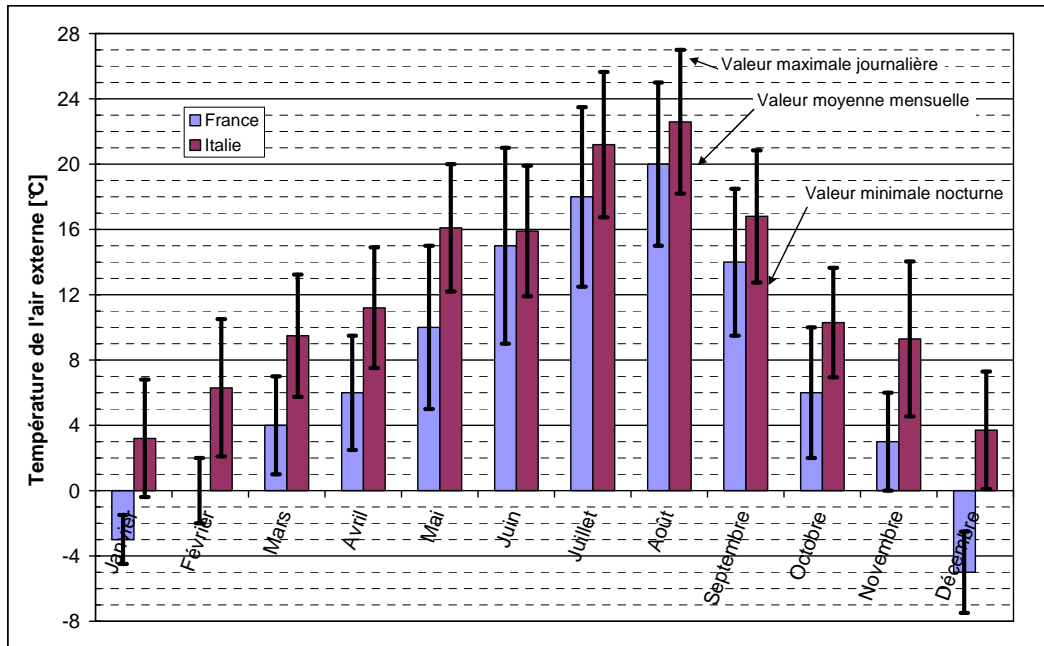


Figure 23 Température moyenne mensuelle de l'air ainsi que minimum nocturne et maximum diurne. Côté français [15]; côté italien [19].

Les valeurs moyennes mensuelles d'humidité relative sont données au Tableau 27. Les mêmes valeurs sont imposées des deux côtés.

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août. | sept. | oct. | nov. | déc. |
|------|------|------|------|-------|-----|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| HR | 70 | 62 | 56 | 62 | 62 | 66 | 61 | 59 | 70 | 71 | 75 | 75 |

Tableau 27 Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative aux têtes des tunnels, des puits et des descenderies [15].

2.4.3 Débits d'air dans le tunnel et les puits

Les caractéristiques des trains ainsi que le concept d'exploitation nominale n'ont pas changé par rapport aux études de la phase APR/PD. Les débits d'air dans le tunnel et les puits générés par la circulation des trains ont été recalculés sur la base de la nouvelle géométrie sans trouver des variations significatives.

La circulation des trains dans le tunnel, étant monodirectionnelle, génère par "effet piston" un écoulement d'air d'une certaine importance. Ce dernier, dépendant du trafic, varie en moyenne horaire d'environ 4 m/s (pendant les heures creuses) à presque 10 m/s.

La circulation des trains, par la compression en tête et la dépression en queue, induit également un mouvement d'air dans les puits (ou descenderies) ouverts, à savoir La Praz et Val Clarea pour le tube France → Italie ainsi que Avrieux et St. Martin pour le tube Italie → France.

La moyenne horaire des débits induits, tant dans le tunnel de base que dans les puits, est résumée au Tableau 28 pour le tube France → Italie et au Tableau 29 pour le tube Italie → France.

Ces résultats ont été obtenus avec le code de calcul TNT de GESTE Engineering en considérant la répartition horaire du trafic décrite par le Tableau 24 et une contre-pression nulle.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

| Heures | Débit moyen horaire [m ³ /s] | | | | | Heures | Débit moyen horaire [m ³ /s] | | | | |
|--------|---|------------|---------|---------|------------|--------|---|------------|---------|---------|------------|
| | Tube F → I | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea | | Tube F → I | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea |
| 00-01 | 189 | 0 | -20 | 0 | 50 | 12-13 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 01-02 | 189 | 0 | -20 | 0 | 50 | 13-14 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |
| 02-03 | 189 | 0 | -20 | 0 | 50 | 14-15 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |
| 03-04 | 186 | 0 | -20 | 0 | 50 | 15-16 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 04-05 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 16-17 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 05-06 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 17-18 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 06-07 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 18-19 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 07-08 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 19-20 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 08-09 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 | 20-21 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 09-10 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 | 21-22 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 |
| 10-11 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 | 22-23 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |
| 11-12 | 316 | 0 | 18 | 0 | 102 | 23-24 | 406 | 0 | 2 | 0 | 47 |

Tableau 28 Tube France → Italie: moyenne horaire des débits d'air (m³/s) retenus pour l'étude thermique. Des valeurs négatives indiquent un débit entrant dans le tunnel.

| Heures | Débit moyen horaire [m ³ /s] | | | | | Heures | Débit moyen horaire [m ³ /s] | | | | |
|--------|---|------------|---------|---------|------------|--------|---|------------|---------|---------|------------|
| | Tube I → F | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea | | Tube I → F | St. Martin | La Praz | Avrieux | Val Clarea |
| 00-01 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 12-13 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 01-02 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 13-14 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |
| 02-03 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 14-15 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |
| 03-04 | 179 | 34 | 0 | -1 | 0 | 15-16 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 04-05 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 16-17 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 05-06 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 17-18 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 06-07 | 402 | 39 | 0 | 22 | 0 | 18-19 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 07-08 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 19-20 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 08-09 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 | 20-21 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 09-10 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 | 21-22 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 |
| 10-11 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 | 22-23 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |
| 11-12 | 305 | 59 | 0 | 69 | 0 | 23-24 | 401 | 39 | 0 | 22 | 0 |

Tableau 29 Tube Italie → France: moyenne horaire des débits d'air (m³/s) retenus pour l'étude thermique. Des valeurs négatives indiquent un débit entrant dans le tunnel.

2.4.4 Évaporation de l'eau

L'évaporation d'eau présente dans le tunnel et évacuée par la ventilation (naturelle ou forcée) permet d'exporter une certaine quantité de chaleur (chaleur latente d'évaporation). Dans la présente étude, il est supposé que le débit massique d'évaporation vaut:

$$m_{H_2O} = 3.8 \times 10^{-5} \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

Des nouvelles références utilisées dans l'étude du Lot C1 [19] montrent que cette valeur est assez variable. N'ayant pas des nouvelles données spécifique au tunnel de base de la ligne LTF, une analyse de sensibilité a été faite sur ce paramètre. Cette analyse avait par ailleurs déjà été faite dans la précédente étude de la phase APR/PD [15].

2.4.5 Pertes auxiliaires

Des sources de chaleur génériques tels que l'éclairage, la puissance thermique des transformateurs, la caténaire, etc. sont prises en compte dans un terme générique, évalué à 25 W/m.

Dans l'étude du Lot C1 [19] une source de 57 W/m a été retenue (40W caténaire + 10W 132kV + 7 équipements).

Une étude complémentaire montre que la valeur de dissipation de la caténaire est surestimée et que de plus, en accord avec LTF, le feeder 132 kV n'est pas à prendre en compte.

La valeur initiale de 25W/m est donc conservée dans cette étude.

Une analyse de sensibilité a toutefois été réalisée sur ce paramètre (§ 6.2). La valeur finale exacte de ce paramètre sera calée dans une phase ultérieure en fonction des équipements installés.

2.5 TEMPERATURE DE CONSIGNE

La température de consigne à ne pas dépasser dans le tunnel de base a été fixée à 32 °C pendant la phase d'APR/PD.

A titre indicatif, la température maximale tolérée dans le tunnel de base du Gothard a été fixée à 35°C.

3 MODELE DE CALCUL

Cette étude a été réalisée avec le logiciel TunClim de GESTE Engineering, développé et déjà utilisé en 2005-2006 pour l'étude de l'APR/PD, Lot B3 [15].

3.1 EXPLOITATION DU MODELE

L'étude de l'évolution de la température de l'air dans le tunnel de base a été abordée séparément pour les deux tubes, dans la configuration paire qui prévoit seulement deux puits ouverts: les puits de La Praz et de Val Clarea dans le Tube 1 France → Italie et les puits d'Avrieux et de St. Martin dans le Tube 2 Italie → France.

3.1.1 Condition initiale

Bien que la phase d'excavation du tunnel modifie la température de la roche, la condition initiale retenue dans cette étude suppose que, au moment de l'inauguration du tunnel, la température de l'air soit identique à la température actuelle de la roche (cf. Figure 24).

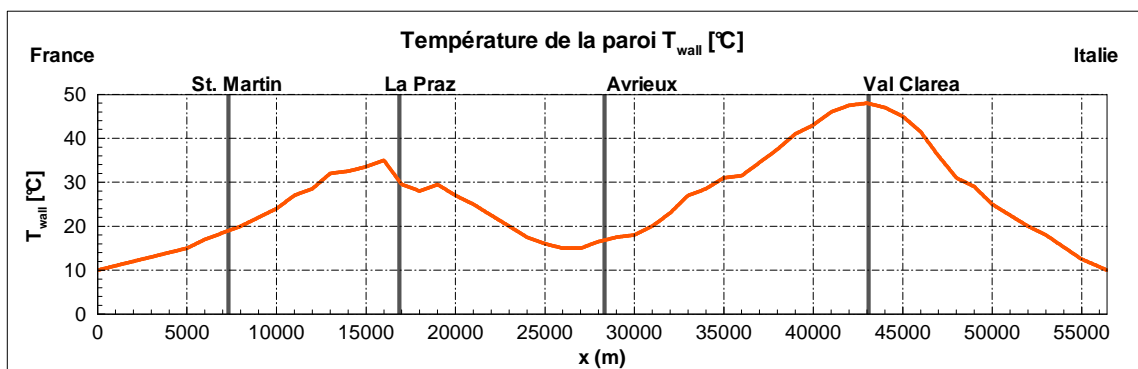


Figure 24 Profil longitudinal de température de la roche le long du tunnel de base. Mis à jour selon les nouvelles références [17].

Il est supposé que la mise en exploitation de la ligne advienne un 1^{er} janvier quand la température de l'air aux têtes du tunnel est de -4.5 °C pour le Tube 1 France → Italie et de -0.4 °C pour le Tube 2 Italie → France (cf. Tableau 25, Tableau 26 et Figure 23).

Le taux d'humidité relative initiale est fixé à 60%.

3.1.2 Conditions aux limites

La température de l'air entrant dans le tunnel varie en fonction du temps: d'une part, selon une courte période, liée à l'alternance du jour et de la nuit; d'autre part, selon une période importante liée aux saisonnalités. Les données nécessaires pour exprimer cette variation sont donc la température moyenne journalière et l'excursion thermique jour/nuit tout au long de l'année données aux Tableau 25 et Tableau 26.

La fraction massique de vapeur à l'entrée du tunnel est calculée à partir de la température moyenne T_{moy} et de l'humidité relative moyenne mensuelle donnée au Tableau 27.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

4 ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR SANS SYSTEMES DE REFROIDISSEMENT

Dans une première phase, l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du tunnel a été calculée sans systèmes de refroidissement, afin de connaître l'ampleur des températures en jeu. L'évolution thermique a été calculée sur une période de 30 ans, largement suffisante pour pouvoir analyser aussi bien les phénomènes de courte durée, liés aux saisons, que ceux de plus longue période, liés à l'inertie thermique de la roche.

Les résultats sont présentés ci-après d'abord pour le Tube 1 France → Italie et ensuite pour le Tube 2 Italie → France.

4.1 TUBE 1 FRANCE → ITALIE

On remarque que la température de l'air, initialement identique à la température de la roche, s'écarte rapidement de cette dernière et s'approche d'une distribution plus uniforme.

Par l'inertie thermique de la roche et le faible trafic nocturne, la différence de température entre nuit et jour est négligeable.

Par contre, la différence entre été et hiver est plus marquée et, localement, peut atteindre 15°C. Ce comportement est illustré en Figure 25, où le profil de température de l'air dans le tunnel d'exploitation est reporté pour chaque mois de la 30^{ème} année d'exploitation.

Cette différence oscillatoire entre été et hiver s'instaure dès la mise en exploitation du tunnel: un équilibre thermique est rapidement atteint, grosso modo après 5 ans d'exploitation, et ensuite la température évolue périodiquement, selon la variation des saisons.

Sans système de refroidissement, la température de l'air dans le tunnel reste inférieure ou proche de 32°C entre les mois d'octobre et juin (cf. Tableau 30).

Pendant les mois estivaux, par contre, la valeur de consigne de 32°C est dépassée sur un tronçon de tunnel qui croît et décroît régulièrement, de 14 km en juillet dans une zone centrée sur le point kilométrique 48, jusqu'à environ 20 km en août, du point kilométrique 37 jusqu'à la sortie côté Italie (cf. Figure 26). La température maximale atteinte au mois d'août est de 35°C.

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août | sept. | oct. | nov. | déc. |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 32 | 34 | 35 | 34 | 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 30 Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Tube 1 France → Italie. Sans refroidissement.

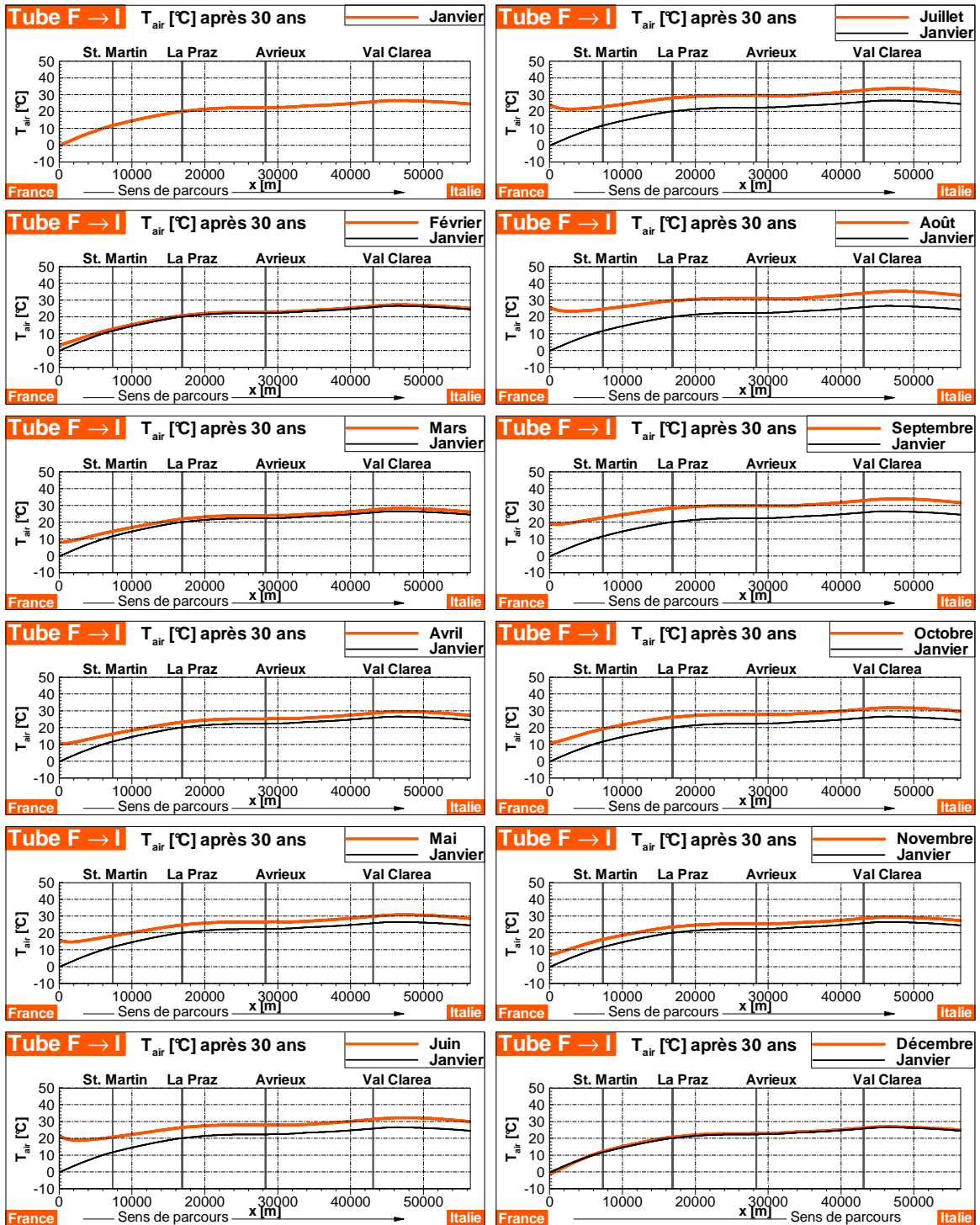


Figure 25 Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation. Aucun système de refroidissement n'est installé.

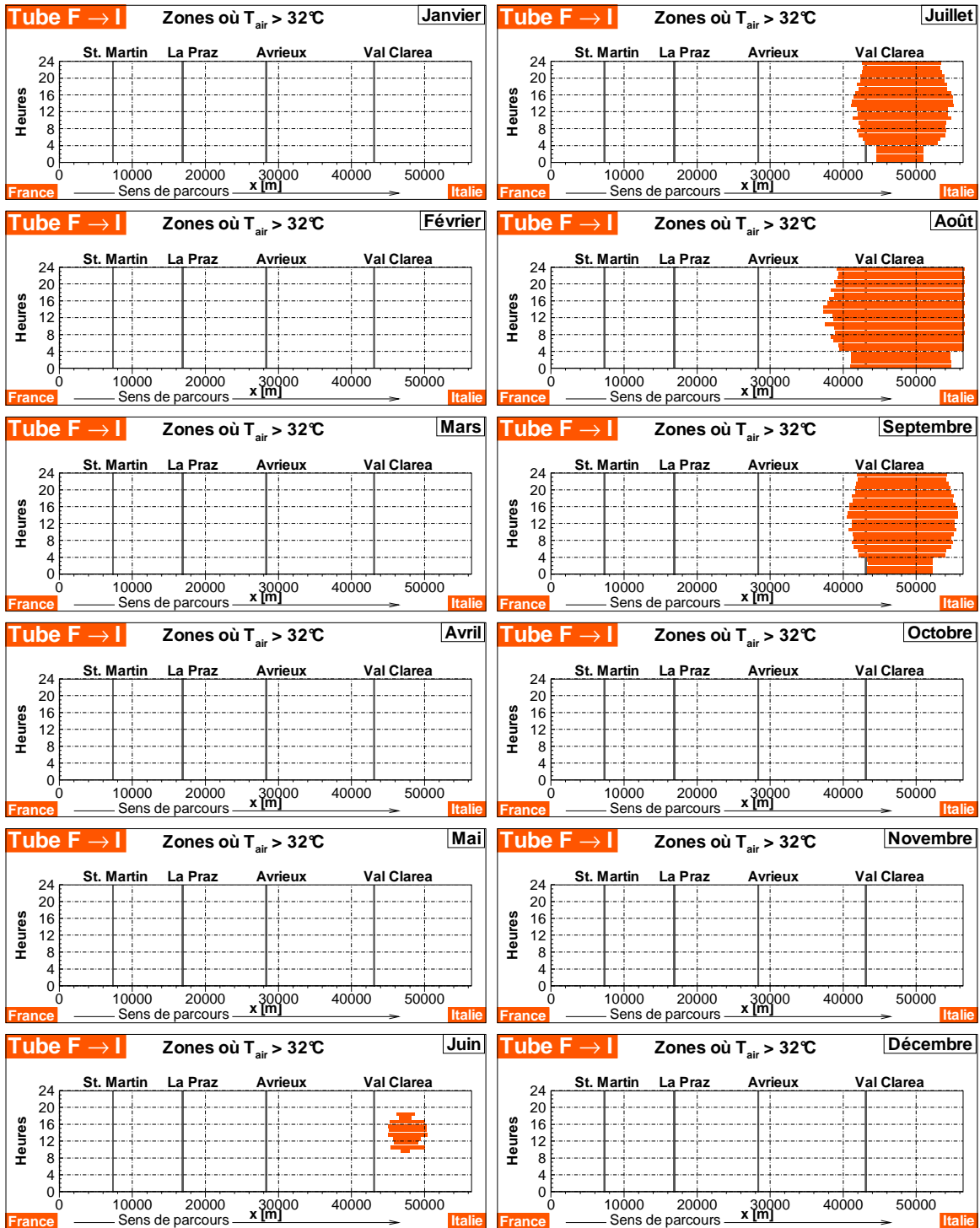


Figure 26 Dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C.

4.2 TUBE 2 ITALIE → FRANCE

Les mêmes graphiques présentés ci-avant pour le Tube 1 France → Italie sont présentés ici pour le Tube 2 Italie → France.

Le Tableau 31 reporte les températures maximales mensuelles estimées après 30 ans d'exploitation.

La Figure 27 illustre la température moyenne mensuelle pendant la 30^{ème} année d'exploitation.

Enfin, la Figure 28 montre les zones du tunnel où, aux différentes heures de la journée et pendant les 12 mois de la 30^{ème} année d'exploitation, la température de l'air dépasse les 32°C.

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août | sept. | oct. | nov. | déc. |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 32 | 34 | 33 | < 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 31 Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Tube 2 Italie → France. Sans refroidissement.

À part des légères différences dues à l'asymétrie du profil de température de la roche, l'évolution de la température et de l'humidité dans le Tube 2 Italie → France est substantiellement très proche de celle observée pour le Tube 1 France → Italie. Les mêmes remarques sont ainsi valables.

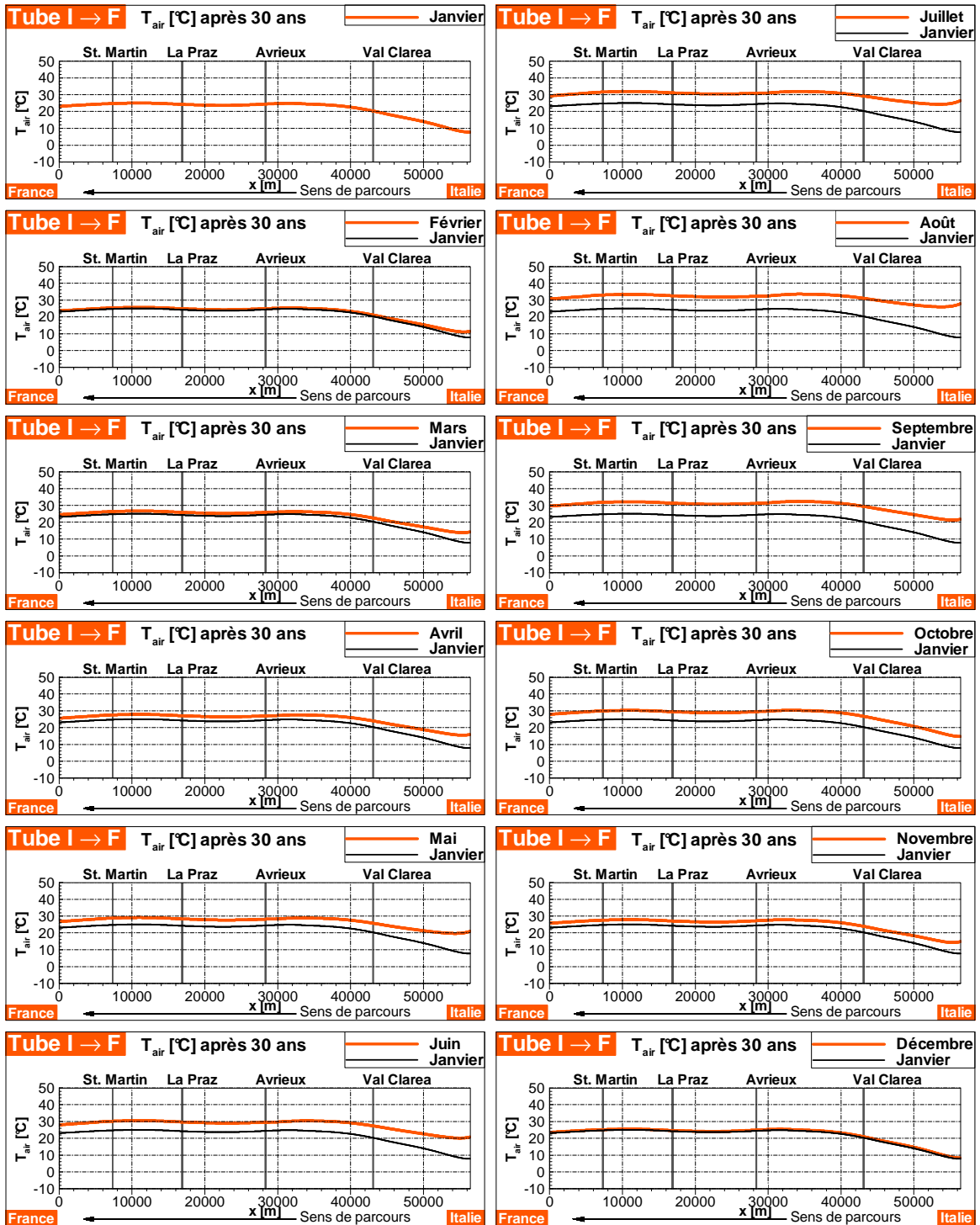


Figure 27 Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation. Aucun système de refroidissement n'est installé.



Figure 28 Dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C.

4.3 ANALYSE DE SENSIBILITE AUX PARAMETRES D'ENTREE

Les résultats de l'analyse de sensibilité réalisée dans l'étude thermique de l'APR/PD, Lot B3 [15] sont rappelés ici. La Figure 29 illustre l'ampleur de la variation du profil de température en fonction des variations des paramètres d'entrée (débit d'eau d'infiltration, capacité d'échange thermique des trains, augmentation du trafic). Cette variation est localement de l'ordre de 2-3°C.

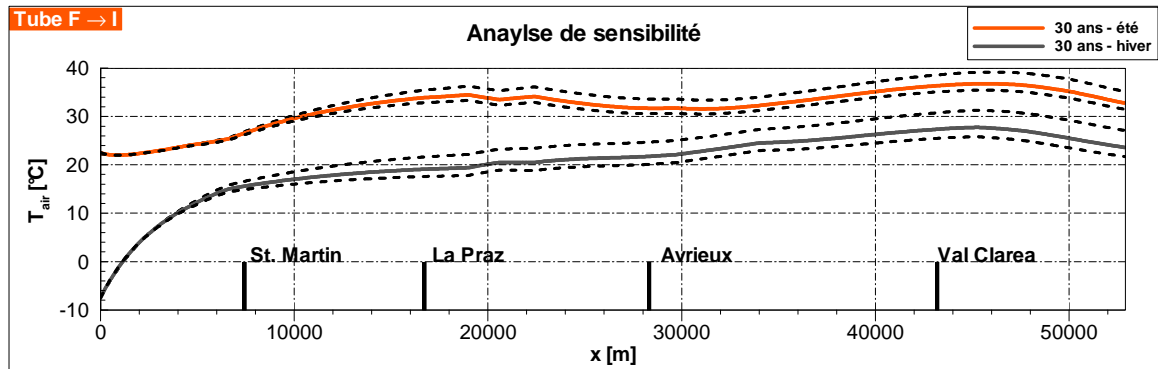


Figure 29 Exemple de sensibilité de la solution aux paramètres d'entrée. Température de référence et plage de variation.

La fiabilité des données d'entrée concernant la température de la roche joue également un rôle important sur la précision des résultats du modèle. Les mesures lors de sondages futurs devront permettre de confirmer ou de corriger le profil utilisé.

Globalement, on peut toutefois conclure que la précision du modèle est plus que satisfaisante et, en tout cas, est suffisante pour fournir les éléments nécessaires à la prise de décision concernant l'installation d'un éventuel système de refroidissement.

Dans la présente étude la même démarche que celle utilisée dans l'étude de l'APR/PD a été suivie. Ainsi, afin de prendre en considération une hypothétique sous-estimation de la température de l'air à cause de l'imprécision des données d'entrée, il a été décidé d'ajouter une marge d'erreur de 1.5°C aux résultats obtenus par les simulations numériques. Cette marge, qui pourra être affinée par des sondages et des mesures expérimentales, correspond à la moitié de la variation déduite de l'étude de sensibilité (cf. Figure 29). Elle a déjà été prise en considération dans les résultats illustrés dans cette étude.

4.4 CONCLUSION

La simulation numérique de l'évolution du profil de température dans le tunnel de base a montré que, pour le Tube 1 France → Italie la température dépasse pendant 3 mois sur 12 (de juillet à septembre) la valeur seuil de 32°C et que pour le Tube 2 Italie → France la température dépasse pendant 2 mois sur 12 (de août à septembre) la valeur seuil de 32°C. De plus, dans le Tube 1 France → Italie, la température est très proche de 32°C aussi en juin et en octobre et dans le Tube 2 Italie → France, la température est très proche de 32°C aussi en juillet. La longueur du tronçon le long duquel le seuil est dépassé est importante: pendant le mois d'août, lorsque l'air peut localement atteindre 35°C, elle atteint 20 km dans le Tube 1 France → Italie et 31 km dans le Tube 2 Italie → France. Plus précisément:

- le tube 1 France → Italie comprend une zone de dépassement du seuil de 20 km centrée sur le point kilométrique 48;

- le tube 2 Italie → France comprend une zone de dépassement du seuil de 17 km centrée sur le point kilométrique 12 et un zone de 14 km centrée sur le point kilométrique 35.

Compte tenu des incertitudes du modèle utilisé, le système de refroidissement ne devrait pas être amené à fonctionner plus de 40% du temps.

5 ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE DE L'AIR AVEC REFROIDISSEMENT A EAU

Le système de refroidissement à eau comprend une centrale de refroidissement d'eau, composée de groupes froids et de tours de refroidissement et délivrant une quantité importante d'eau froide. Cette eau est ensuite utilisée pour le refroidissement du tunnel, par circulation dans une conduite judicieusement placée dans les zones chaudes.

Le système de refroidissement à eau consiste en deux circuits distincts, travaillant à deux niveaux de température différents:

- le primaire permet le transfert de chaleur avec l'atmosphère via des tours de refroidissement;
- le secondaire, installé dans le tunnel, a pour but d'extraire la chaleur du tunnel.

5.1 POSITIONNEMENT DU CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT

Dans cette phase de Révision du Projet Préliminaire (RPP) on étudie la même solution retenue dans l'étude de l'APR/PD, Lot B3 [15]. Cette solution consiste en:

- deux usines uniquement à Modane et circuits se développant dans les deux directions vers le portail Est (Italie) et Ouest (France);

Cette solution a l'avantage de concentrer en un seul lieu les usines. Elle implique par contre qu'un tronçon de circuit se trouve dans une zone qu'il n'est pas nécessaire de refroidir.

5.1.1 Solution retenue

La solution analysée ci-après au moyen du modèle numérique prévoit deux circuits indépendants se développant à partir de la station de Modane de la manière suivante:

- **Circuit 1:** aller dans le Tube 2 Italie → France en direction de la France jusqu'au point kilométrique 14 et retour dans le Tube 1 France → Italie (longueur totale 34 km);
- **Circuit 2:** aller dans le Tube 1 France → Italie en direction de l'Italie jusqu'au point kilométrique 45 et retour dans le Tube 2 Italie → France (longueur totale 28 km).

Le positionnement de ces deux circuits de refroidissement est illustré en Figure 30, en parallèle avec la courbe de distribution de la température et de l'humidité de l'air pendant le mois le plus chaud (i.e. le mois d'août).

L'efficacité de ce système de refroidissement est illustrée ci-après en utilisant les mêmes graphiques que ceux présentés au Chapitre 4, où l'évolution de la température de l'air dans le tunnel avait été calculée sans l'ajout de systèmes de refroidissement.

Deux nouvelles configurations sont analysées en termes de données d'entrée:

- **Configuration 1:** l'évolution de la température est calculée en considérant uniquement l'effet des données dérivant des nouvelles références, à savoir:
 - longueur du tunnel;
 - caractéristiques thermiques et profil de température de la roche;
 - température de l'air externe côté Italie.
- **Configuration 2:** l'évolution de la température est calculée en considérant aussi les nouvelles données utilisées dans l'étude thermique du Lot C1: source thermique distribuée supérieure (57 W/m) et débit d'eau d'infiltration inférieur ($2.4 \cdot 10^{-5}$ kg/s/m).

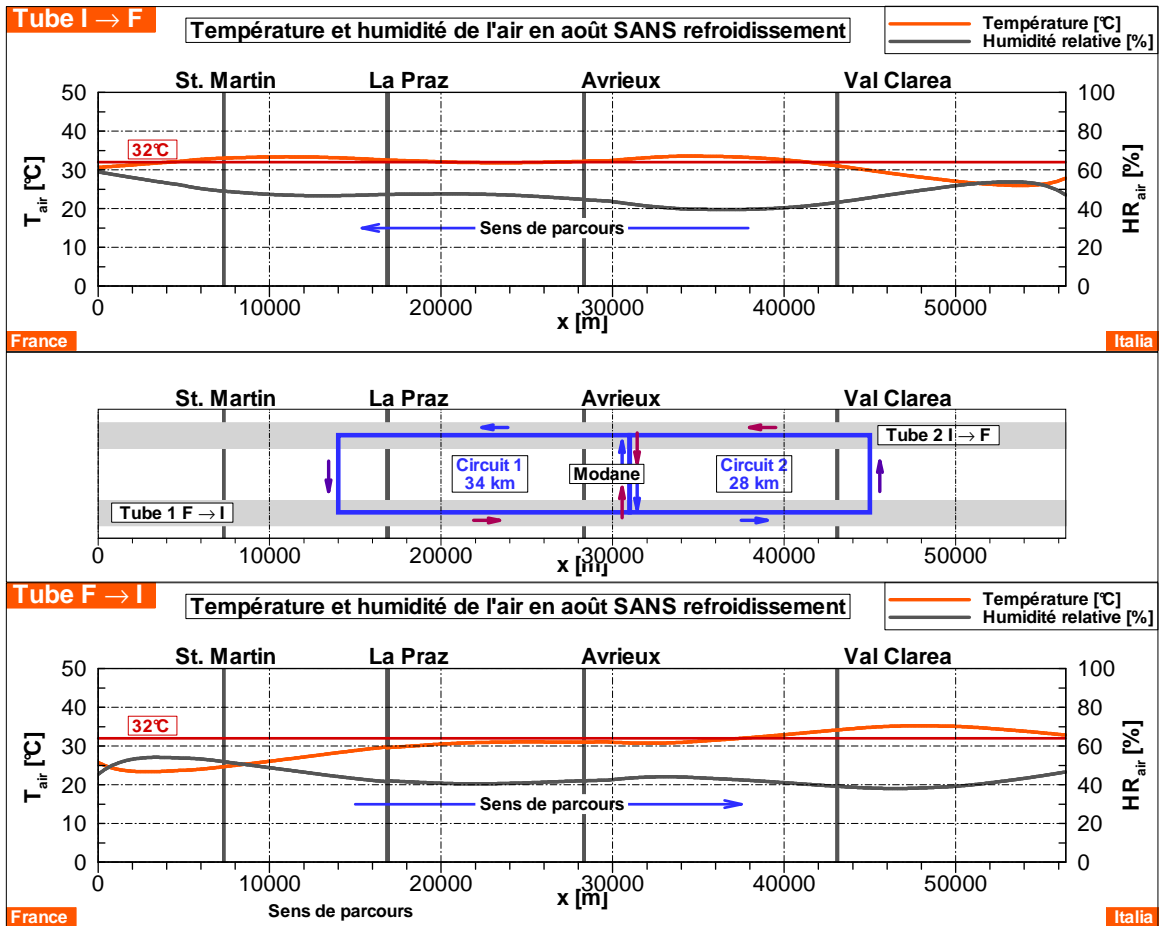


Figure 30 Distribution de la température et de l'humidité de l'air dans les deux tubes pendant le mois d'août sans système de refroidissement; positionnement des deux circuits de refroidissement.

5.2 CONFIGURATION 1: RESULTATS OBTENUS UNIQUEMENT AVEC LES DONNEES DES NOUVELLES REFERENCES

5.2.1 Tube 1 France → Italie

On remarque que le système de refroidissement permet, très rapidement, de baisser la température de l'air localement et de contrebalancer ainsi le flux thermique provenant de la roche.

La distribution de la température le long du tunnel est plus uniforme. Le système de refroidissement permet d'abaisser les températures maximales d'environ 3-4°C, comme le met en évidence le Tableau 32.

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août | sept. | oct. | nov. | déc. |
|----------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| T_{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 29 | 31 | 32 | 31 | 28 | < 32 | < 32 |

Tableau 32 Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 1 France → Italie. Configuration 1.

Refroidissement : notice générale

Raffreddamento: nota generale

Le système de refroidissement proposé, permet de respecter en tout temps la température de consigne de 32°C, comme l'illustre la Figure 31. Cette figure met en évidence la véritable efficacité du système de refroidissement car elle compare le profil de température mensuel, après 30 ans d'exploitation, sans et avec système de refroidissement. Elle montre clairement que, là où le système de refroidissement est installé, la température de l'air descend en dessous de 32°C. Ceci est confirmé par la Figure 32, montrant les zones du tunnel où la température de l'air dépasse les 32°C. Cependant, la température est très proche de 32 °C autour du point kilométrique 51 suite à l'augmentation de la longueur du tunnel de 52.9 à 57.3 km.

Le système de refroidissement n'influence pas la température de l'air en amont, tandis qu'en aval son effet est limité à quelques 5 km, ce qui semble respecter une certaine logique. En effet, la température maximale est atteinte dans un point (environ pk 51) se trouvant à quelque 6 km de l'extrémité du circuit d'eau et encore distant 5.4 km de la tête italienne du tunnel.

Bien qu'une augmentation de la longueur du circuit 2 puisse améliorer la situation, il serait peut-être intéressant d'investiguer la possibilité d'installer une centrale de production de froid à Val Clarea ou au portail du côté italien.

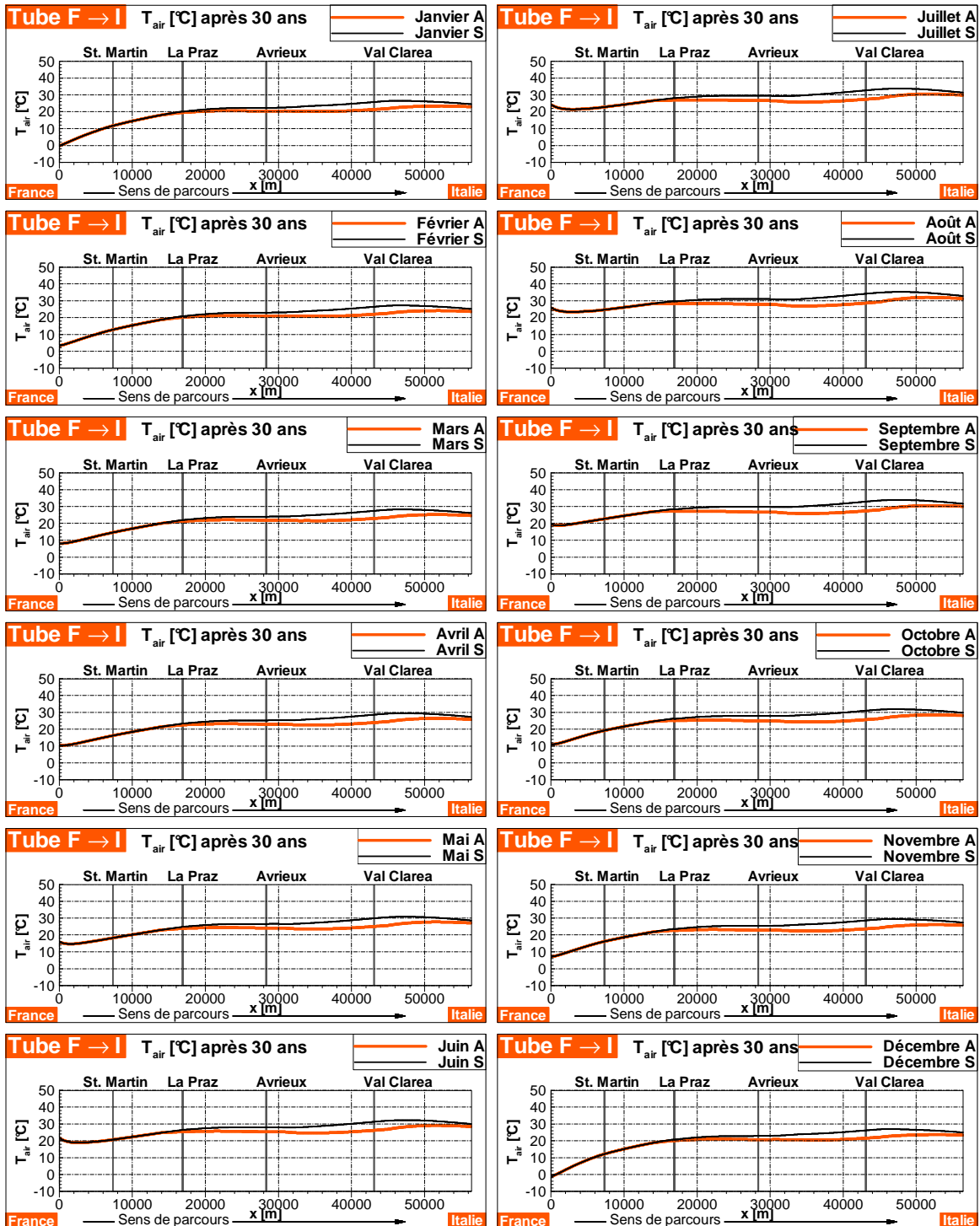


Figure 31 Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 1.

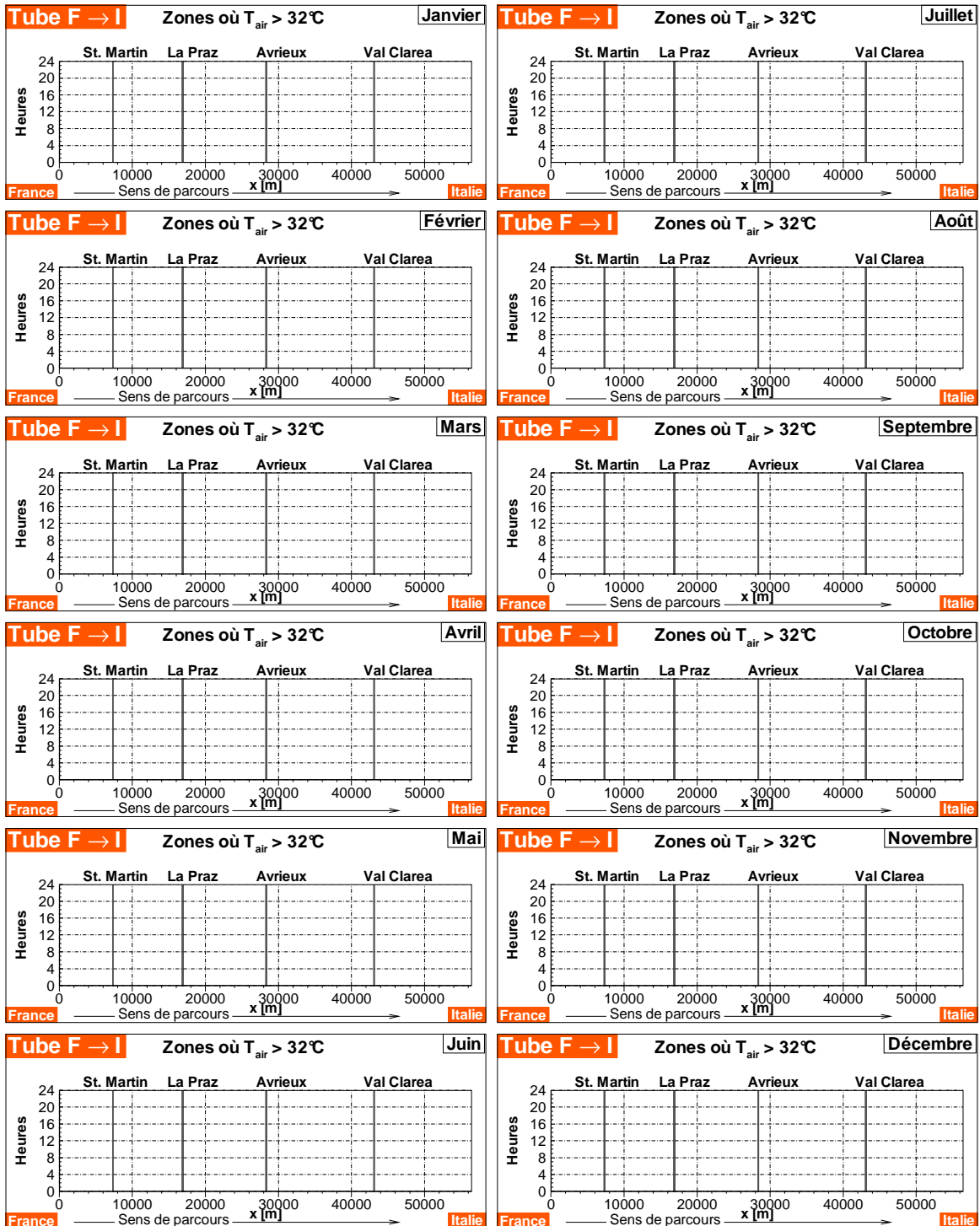


Figure 32 Dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Note: aucune zone ne dépasse les 32°C. Configuration 1.

5.2.2 Tube 2 Italie → France

Exactement les mêmes conclusions tirées au paragraphe précédent pour le Tube 1 France → Italie peuvent être appliquées au Tube 2 Italie → France, dont les résultats sont ici présentés.

Le Tableau 33 reporte les températures maximales mensuelles estimées après 30 ans d'exploitation.

La Figure 33 illustre la température moyenne mensuelle pendant la 30^{ème} année d'exploitation, comparée aux valeurs obtenues sans système de refroidissement.

Enfin, la Figure 34 montre les zones du tunnel où, aux différentes heures de la journée et pendant les 12 mois de la 30^{ème} année d'exploitation, la température de l'air dépasse les 32°C.

À part de légères différences dues à l'asymétrie du profil de température de la roche, l'évolution de la température dans le Tube 2 Italie → France est substantiellement très proche de celle observée pour le Tube 1 France → Italie.

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août | sept. | oct. | nov. | déc. |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 29 | 31 | 29 | < 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 33 Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 2 Italie → France. Configuration 1.

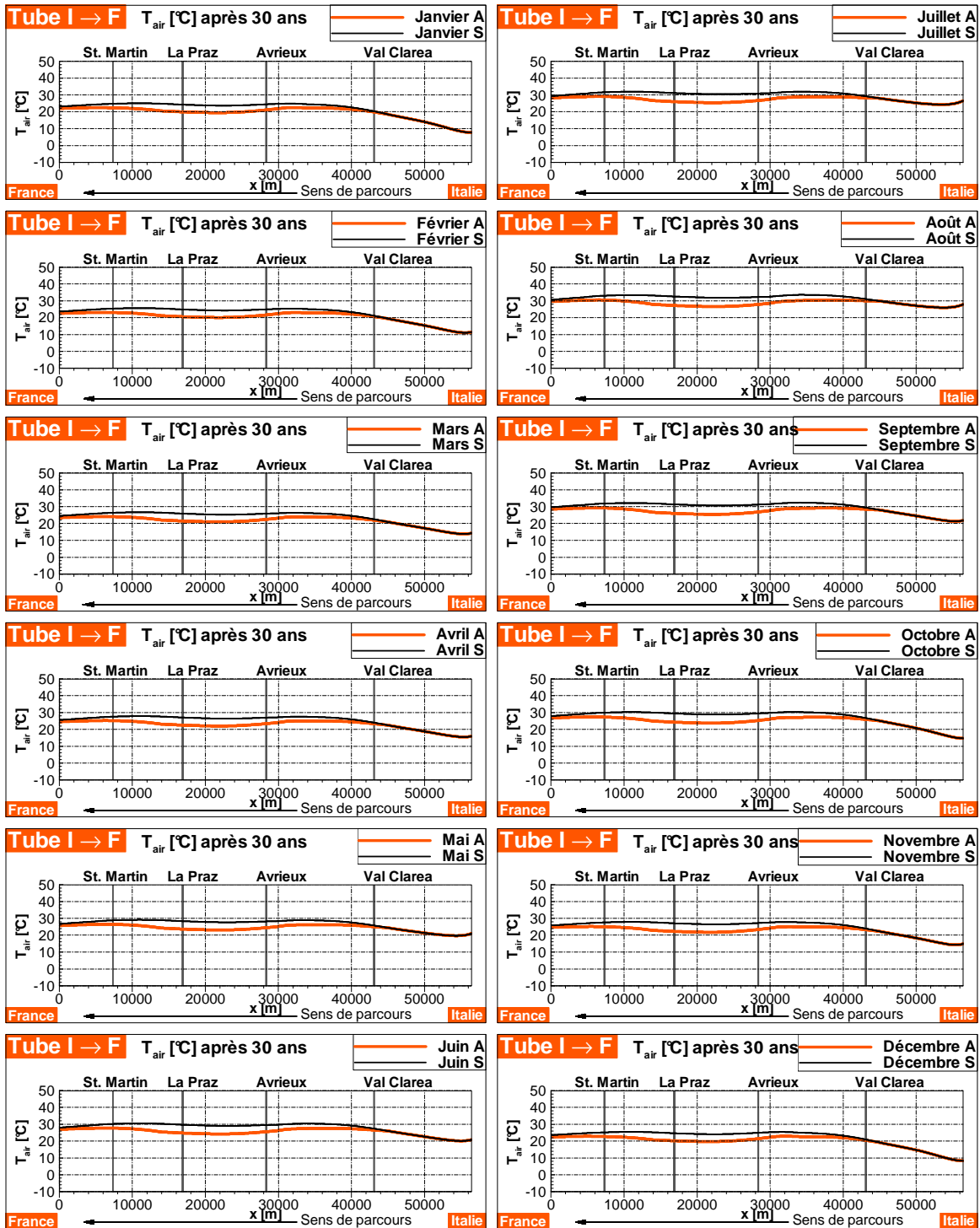


Figure 33 Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 1.

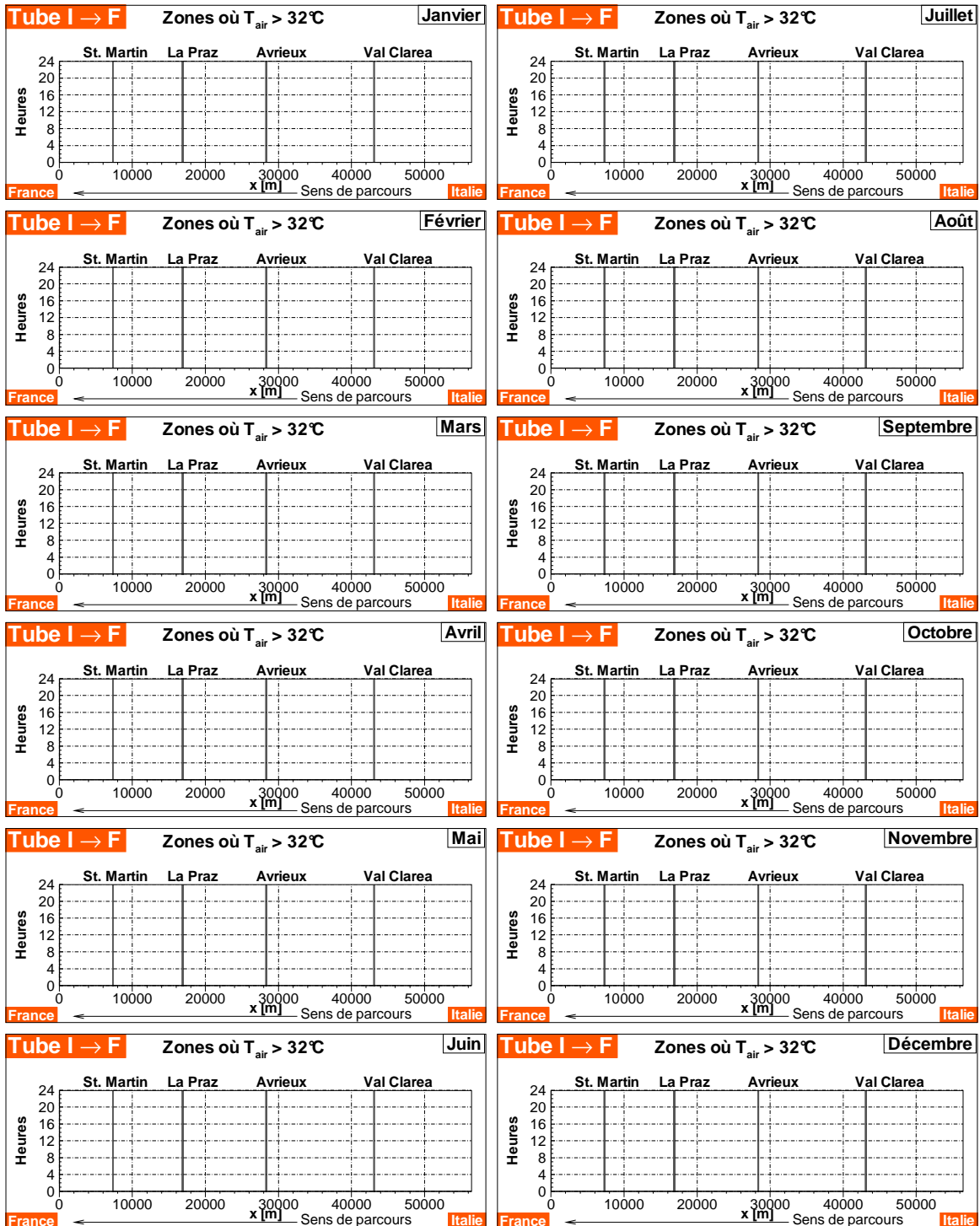


Figure 34 Dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Note: aucune zone ne dépasse les 32°C. Configuration 1.

5.2.3 Puissance absorbée par le refroidissement

À titre indicatif, le Tableau 34 donne la puissance thermique absorbée par le système de refroidissement: 15.4 MW durant la période la plus chaude et 11.4 MW en début et en fin de l'été.

| Puissance absorbée par le système de refroidissement | Circuit 1 | | Circuit 2 | |
|--|-----------|--------|-----------|--------|
| | Juin/Oct. | Août | Juin/Oct. | Août |
| Température eau aller | 3°C | 3°C | 3°C | 3°C |
| Température eau retour | 13.5°C | 16.3°C | 13.2°C | 15.7°C |
| Puissance (MW) | 6.0 | 7.9 | 5.4 | 7.5 |

Tableau 34 Puissance thermique absorbée par le système de refroidissement. Circuit 1 placé entre le pk14 et Modane, Circuit 2 entre Modane et le pk45. Configuration 1.

5.2.4 Conclusion

Suite à l'augmentation de la longueur du tunnel de base de 52.9 à 57.3 km ainsi qu'à l'introduction des nouvelles hypothèses et données d'entrée, le dimensionnement du système de refroidissement proposé dans l'étude de l'APR/PD, Lot B3 [15] reste valable bien qu'il y ait une augmentation de la puissance thermique maximale absorbée d'environ 1 MW (15.4 MW pendant le mois le plus chaud). Ce système permet de maintenir en tout temps et dans l'ensemble du tunnel la température de l'air en-dessous du seuil de consigne fixé à 32°C.

Par ailleurs, l'étude de la RPP, Lot C1 [19] a montré qu'un système avec les caractéristiques suivantes:

- **Circuit 1:** aller dans le Tube 2 Italie → France en direction de la France pour 24 km et retour dans le Tube 1 France → Italie pour 24 km (total 48 km, départ et arrivée à Modane);
- **Circuit 2:** aller dans le Tube 1 France → Italie en direction de l'Italie pour 20 km et retour dans le Tube 2 Italie → France pour 20 km (total 40 km, départ et arrivée à Modane);

est nécessaire et que la puissance maximale absorbée est de 20.5 MW.

Compte tenu de ces résultats il est nécessaire de vérifier l'influence des données d'entrée utilisées dans l'étude du Lot C1.

5.3 CONFIGURATION 2: RESULTATS OBTENUS EN INTEGRANT LES DONNEES DU LOT C1

Sur la base de nouvelles références, l'étude thermique menée par le Lot C1 utilise les valeurs suivantes pour le débit d'eau d'infiltration et pour la source thermique distribuée dans le tunnel:

- débit d'eau: $2.4 \cdot 10^{-5}$ km/s/m;
- source thermique: 57 W/m.

Dans la suite les résultats sont présentés en suivant la même structure utilisée dans la Section 5.2 pour la Configuration 1.

5.3.1 Tube 1 France → Italie

Le Tableau 35 montre les températures maximales atteintes après 30 ans d'exploitation. En juillet et septembre la température est égale à la valeur seuil de 32 °C et en août cette valeur est dépassée, même en présence du système de refroidissement.

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août | sept. | oct. | nov. | déc. |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 31 | 32 | 34 | 32 | 30 | < 32 | < 32 |

Tableau 35 Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 1 France → Italie. Configuration 2.

La Figure 35 met en évidence l'efficacité du système de refroidissement là où il est présent mais dans ce cas il y a des dépassements dans certaines zones plus éloignées du circuit d'eau et en particulier dans la zone la plus profonde du tunnel, c'est-à-dire du côté italien. Cela est confirmé par la Figure 36, montrant les zones du tunnel où la température de l'air dépasse les 32°C. Pendant le mois le plus chaud cette zone s'étend du pk 46 jusqu'à la tête du tunnel côté Italie.

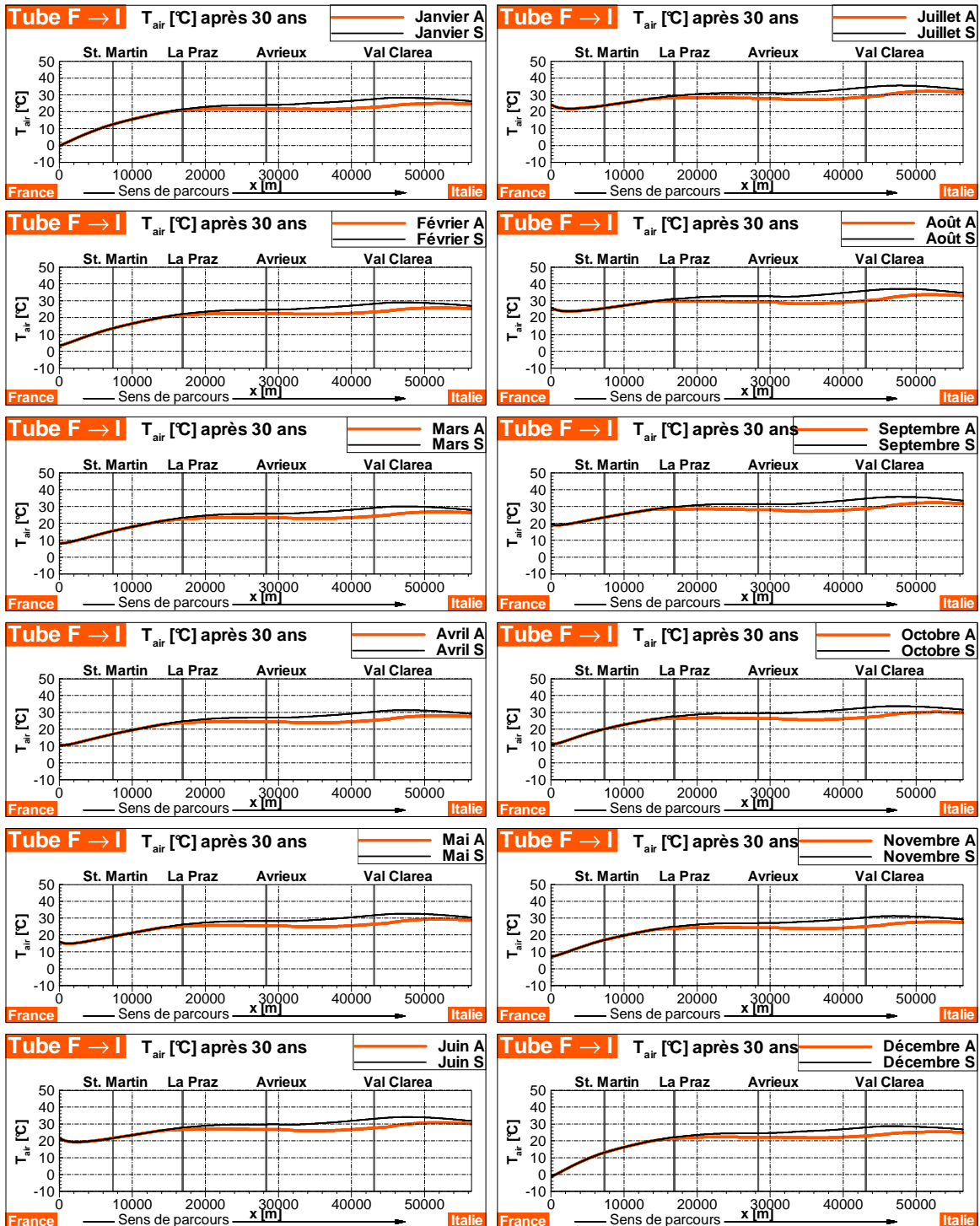


Figure 35 Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 2.

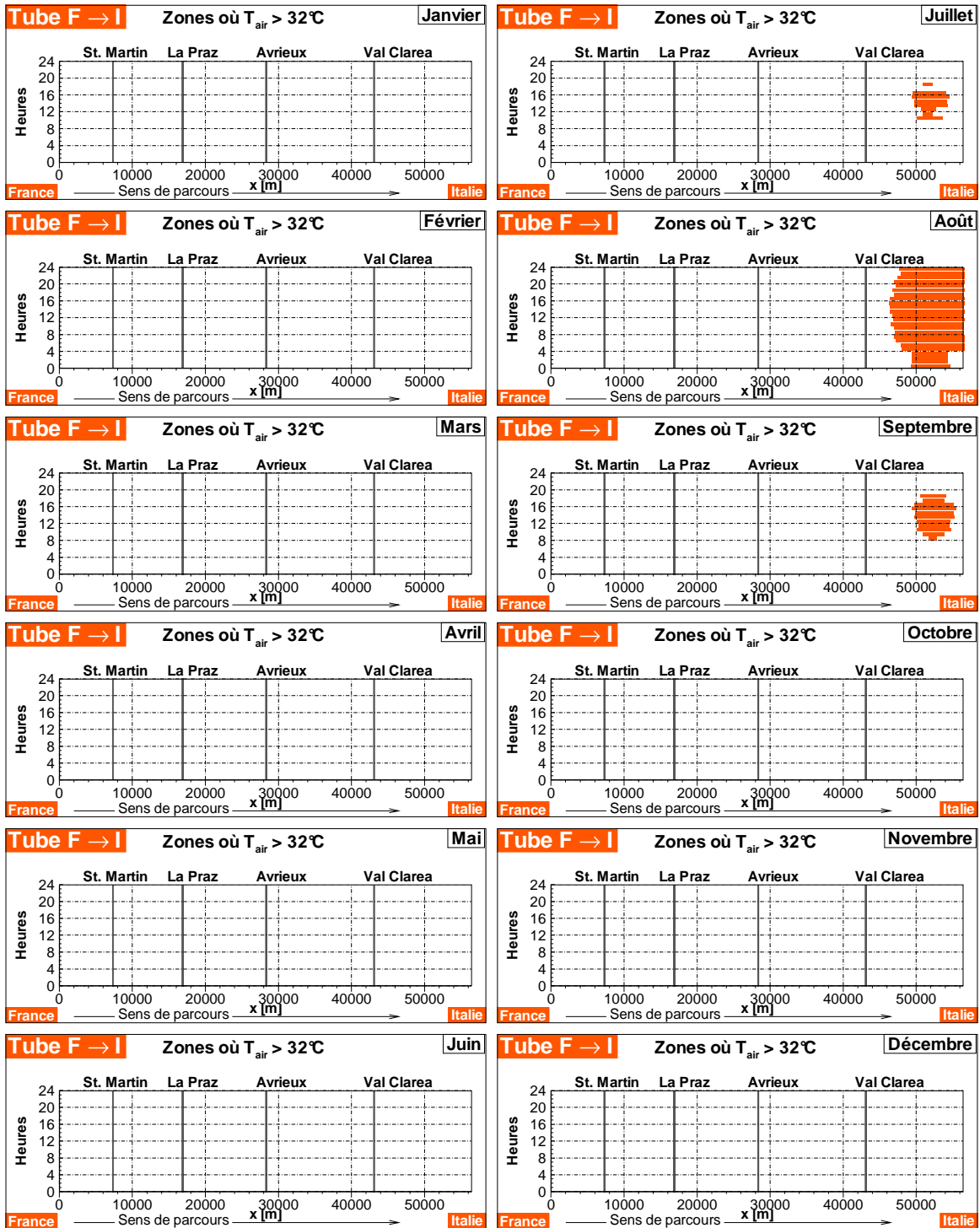


Figure 36 Dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Configuration 2.

5.3.2 Tube 2 Italie → France

Exactement les mêmes conclusions tirées au paragraphe précédent pour le Tube 1 France → Italie peuvent être appliquées au Tube 2 Italie → France, dont les résultats sont ici présentés.

Le Tableau 36 reporte les températures maximales mensuelles estimées après 30 ans d'exploitation.

La Figure 37 illustre la température moyenne mensuelle pendant la 30^{ème} année d'exploitation, comparée aux valeurs obtenues sans système de refroidissement.

Enfin, la Figure 38 montre les zones du tunnel où, aux différentes heures de la journée et pendant les 12 mois de la 30^{ème} année d'exploitation, la température de l'air dépasse les 32°C.

À part de légères différences dues à l'asymétrie du profil de température de la roche, l'évolution de la température dans le Tube 2 Italie → France est substantiellement très proche de celle observée pour le Tube 1 France → Italie, mais avec une valeur moyenne légèrement plus faible.

| Mois | jan. | fév. | mars | avril | mai | juin | juil. | août | sept. | oct. | nov. | déc. |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| T _{max} [°C] | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | < 32 | 31 | 33 | 31 | < 32 | < 32 | < 32 |

Tableau 36 Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 2 Italie → France. Configuration 2.

Pendant le mois le plus chaud un dépassement du seuil est observé pendant les heures les plus chaudes de la journée, au niveau du puits St. Martin, entre les pk 5 et 8.

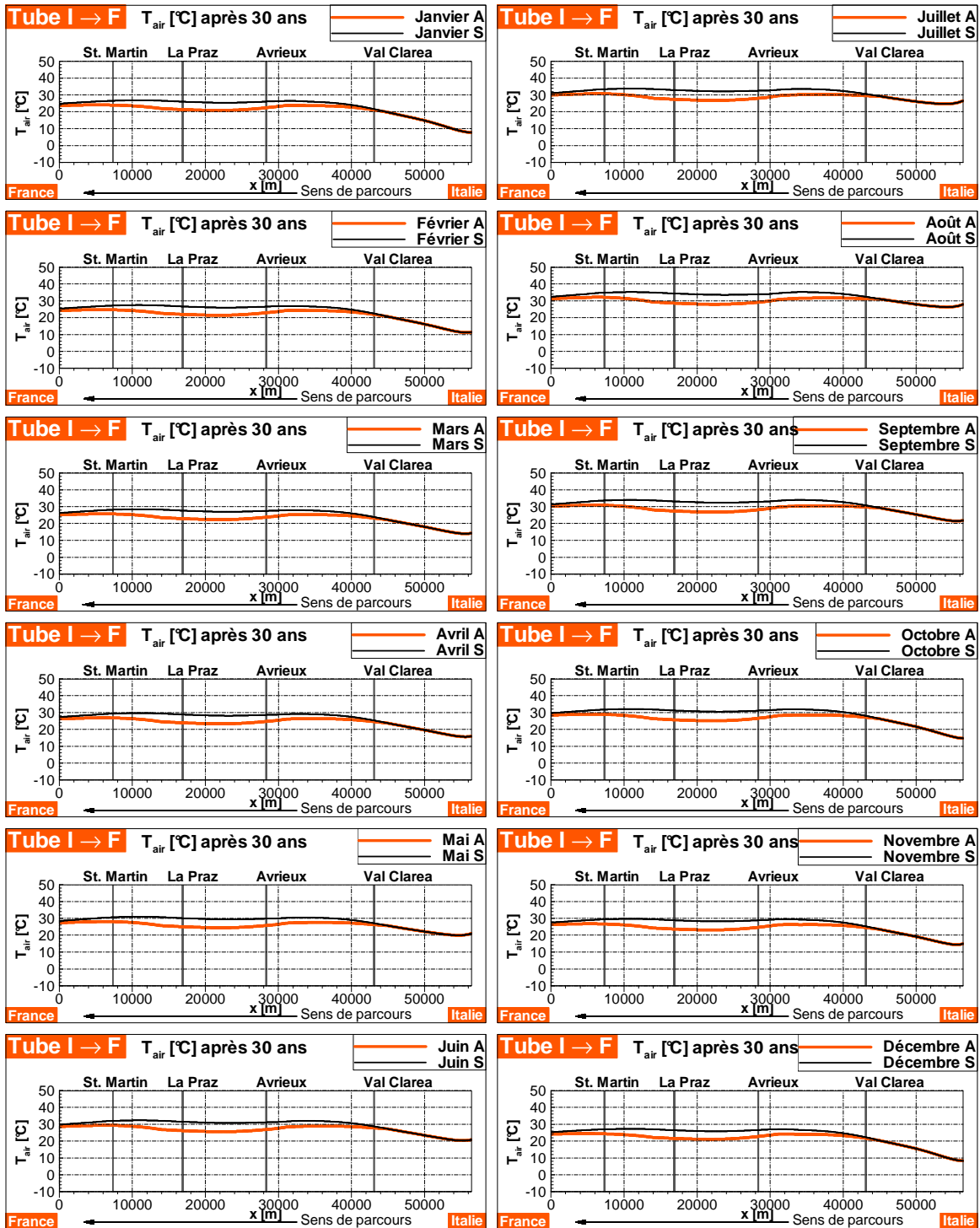


Figure 37 Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 2.

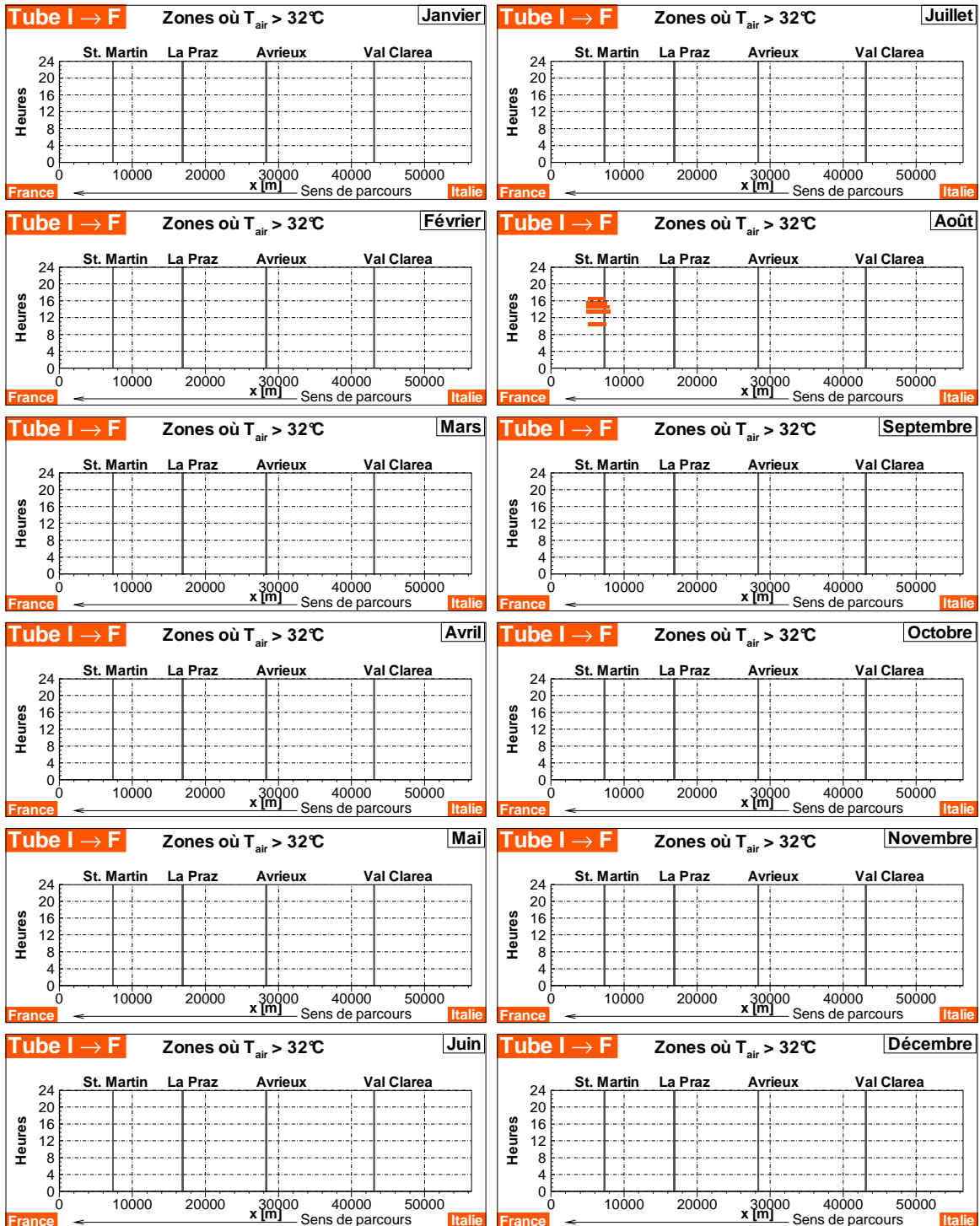


Figure 38 Dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Configuration 2.

5.3.3 Puissance absorbée par le refroidissement

La puissance absorbée par le système de refroidissement n'est pas suffisante à garantir une température inférieure à 32 °C tout le long de l'année et en tout point du tunnel.

5.3.4 Conclusion

Suite à l'augmentation de la longueur du tunnel de base de 52.9 à 57.3 km, à l'introduction des nouvelles données d'entrée ainsi qu'à la prise en compte des données utilisés par le Lot C1 et la marge d'erreur (§ 4.3), des dépassement du seuil de température fixé à 32 °C sont observés:

- dans le tube 1 France → Italie: entre le pk 46 et la tête du tunnel côté Italie;
- dans le tube 2 Italie → France: entre le pk 5 et le pk 8 (uniquement pendant les heures les plus chaudes de la journée).

Comme on avait déjà observé auparavant, bien qu'une augmentation de la longueur des circuits d'eau puisse améliorer la situation, il serait peut-être intéressant d'investiguer la possibilité d'installer une centrale de production de froid à Val Clarea ou au portail du côté italien, afin de refroidir directement la zone du tunnel la plus chaude en plaçant le circuit d'eau là où il est nécessaire.

6 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le présent rapport a été consacré à l'étude de l'évolution de la température de l'air dans le tunnel de base de la liaison ferroviaire Lyon-Turin par le biais de simulations numériques. L'étude s'inscrit dans le cadre des études techniques du RPP, Lot C2, suite aux modifications du tracé du tunnel de base intervenues après les études de la phase APR/PD en 2005-2006.

6.1 ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE SANS REFROIDISSEMENT

Le modèle a été appliqué au tunnel brut, sans systèmes de refroidissement, pour le calcul de la distribution de la température et de l'humidité de l'air dans les deux tubes. L'évolution temporelle est calculée tout au long des 30 premières années d'exploitation.

LTF a demandé que la température de l'air dans le tunnel ne dépasse pas le seuil de 32°C.

La simulation numérique de l'évolution du profil de température dans le tunnel de base a montré que, pour le Tube 1 France → Italie la température dépasse pendant 3 mois sur 12 (de juillet à septembre) la valeur seuil de 32°C et que pour le Tube 2 Italie → France la température dépasse pendant 2 mois sur 12 (août et septembre) la valeur seuil de 32°C. De plus, dans le Tube 1 France → Italie, la température est très proche de 32°C aussi en juin et en octobre et dans le Tube 2 Italie → France, la température est très proche de 32°C aussi en juillet.

La longueur du tronçon le long duquel le seuil est dépassé est importante: pendant le mois d'août, lorsque l'air peut localement atteindre 35°C, elle atteint 20 km dans le Tube 1 France → Italie et 31 km dans le Tube 2 Italie → France. Plus précisément:

- **le tube 1 France → Italie** comprend une zone de dépassement du seuil de 20 km centrée sur le point kilométrique 48;
- **le tube 2 Italie → France** comprend une zone de dépassement du seuil de 17 km centrée sur le point kilométrique 12 et un zone de 14 km centrée sur le point kilométrique 35.

Pour respecter les températures de consignes, un système de refroidissement est donc nécessaire pendant la période estivale de 3-4 mois. Un tel système n'est par contre pas nécessaire en hiver.

6.2 ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE AVEC REFROIDISSEMENT

Deux nouvelles configurations ont été analysées en termes de données d'entrée:

- **Configuration 1:** l'évolution de la température est calculée en considérant uniquement l'effet des données dérivant des nouvelles références, à savoir:
 - longueur du tunnel;
 - caractéristiques thermiques et profil de température de la roche;
 - température de l'air externe côté Italie.
 - dissipation des équipements (25 W/m)

- **Configuration 2:** l'évolution de la température est calculée en considérant aussi les nouvelles données utilisées dans l'étude thermique du Lot C1: source thermique distribuée supérieure (57 W/m) et débit d'eau d'infiltration inférieur ($2.4 \cdot 10^{-5}$ kg/m/s).

6.2.1 Configuration 1

L'effet de deux conduites d'eau réfrigérée indépendantes de 28 et 34 km de long pour 350 mm de diamètre a été simulé. Les conduites se développent à partir de la station de Modane de la manière suivante (cf. Figure 39):

- Circuit 1: aller dans le Tube 2 Italie → France en direction de la France jusqu'au point kilométrique 14 et retour dans le Tube 1 France → Italie;
- Circuit 2: aller dans le Tube 1 France → Italie en direction de l'Italie jusqu'au point kilométrique 45 et retour dans le Tube 2 Italie → France.

L'eau réfrigérée, initialement à 3 °C, circule à 1.5 m/s; la température de retour résultante est d'environ 16 °C.

Le système de refroidissement proposé est efficace et son dimensionnement est suffisant pour réduire la température de l'air en dessous de la température de consigne de 32°C, que ce soit en hiver ou en été. Cependant, suite à l'augmentation de la longueur du tunnel il existe, dans le Tube 1 France → Italie, une zone proche de la tête italienne où la température est proche de 32 °C. Cette zone n'est pas couverte par le circuit d'eau.

La puissance thermique maximale absorbée par le système est de 15.4 MW durant la période la plus chaude et 11.4 MW en début et en fin de l'été.

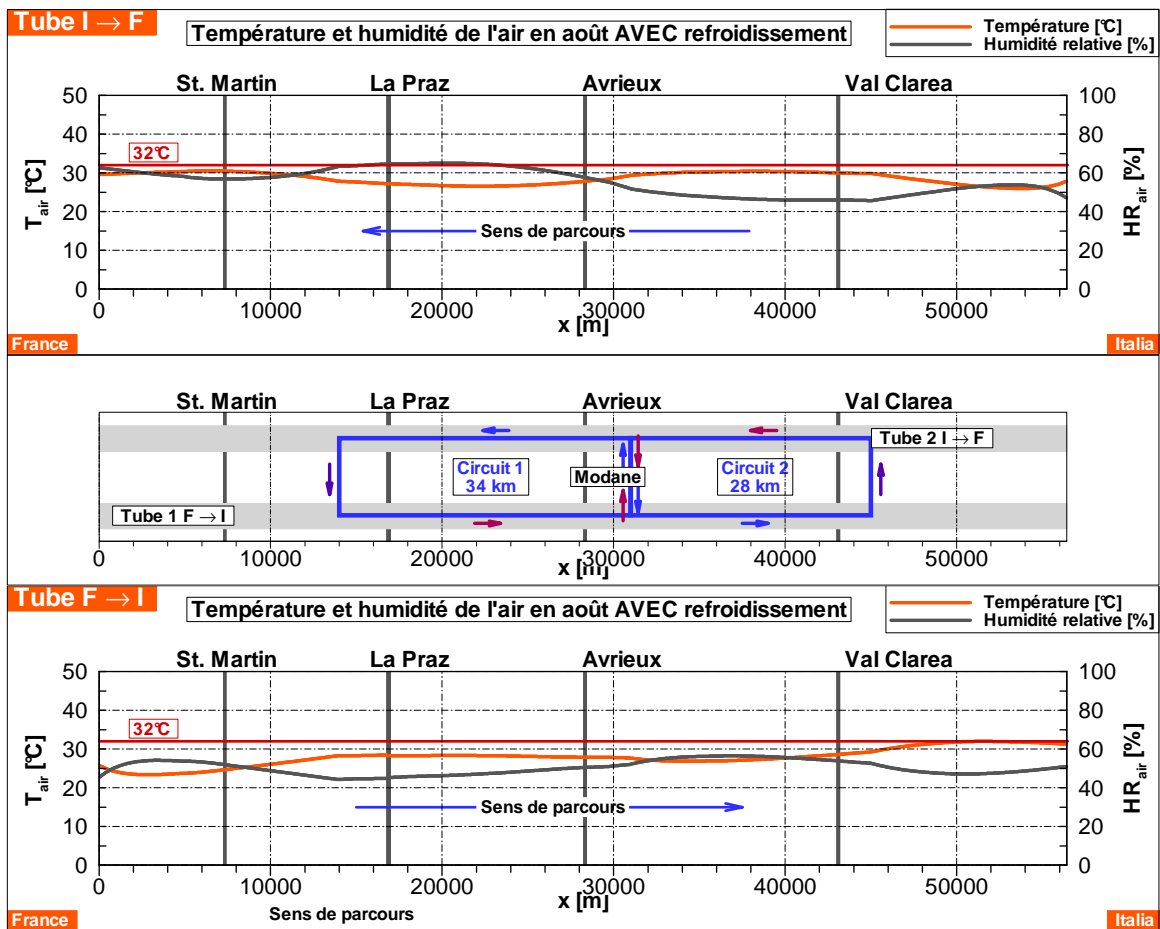


Figure 39 Profil de température et d'humidité de l'air au mois d'août (le mois le plus chaud) dans les deux tubes avec système de refroidissement; emplacement du circuit de refroidissement. Configuration 1 prenant en compte uniquement les nouvelles données d'entrée du projet. Configuration 1.

6.2.2 Configuration 2

Le même système de refroidissement que celui analysé dans la configuration 1 a été simulé avec aussi l'intégration des hypothèses du Lot C1.

Dans ce cas le système de refroidissement ne permet pas de maintenir la température de l'air au dessous de 32 °C en tout point du tunnel et pendant toute l'année. Le seuil de 32 °C est dépassé:

- dans le tube 1 France → Italie: entre le pk 46 et la tête du tunnel côté Italie;
- dans le tube 2 Italie → France: entre le pk 5 et le pk 8 (uniquement pendant les heures les plus chaudes de la journée).

Compte tenu de la position des zones de dépassement du seuil et de la marge d'erreur prise en compte (§ 4.3), il serait peut-être intéressant d'investiguer la possibilité d'installer une centrale de production de froid à Val Clarea ou au portail du côté italien, afin de refroidir directement la zone du tunnel la plus chaude en plaçant le circuit d'eau là où il est nécessaire.

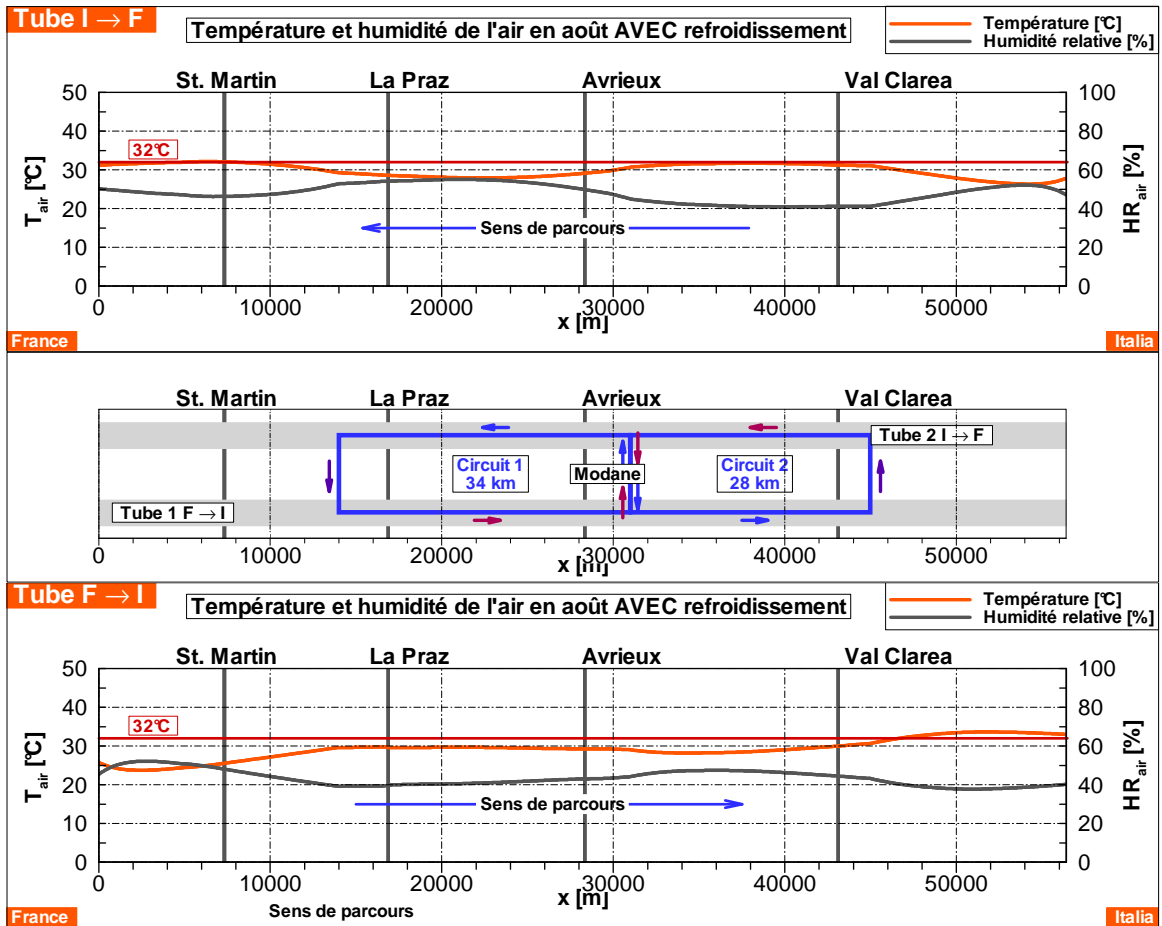


Figure 40 Profil de température et d'humidité de l'air au mois d'août (le mois le plus chaud) dans les deux tubes avec système de refroidissement; emplacement du circuit de refroidissement. Configuration 2 prenant en compte les nouvelles données d'entrée du projet ainsi que les hypothèses de l'étude thermique du Lot C1: configuration 2.

ANNEXE C: LISTE DES FIGURES

| | | |
|------------------|--|----|
| Figure 1 | Profil longitudinal de température de la roche le long du tunnel de base selon [6]. | 48 |
| Figure 2 | Coupes type du tunnel de base en zone courante (1) et en site d'intervention avec trottoir (2) et gaine de ventilation (3). Source: APR/PD [4]. | 52 |
| Figure 3 | Température moyenne mensuelle de l'air ainsi que minimum nocturne et maximum diurne. Côté français [4]; côté italien [8]. | 57 |
| Figure 4 | Profil longitudinal de température de la roche le long du tunnel de base. Mis à jour selon les nouvelles références [6]. | 60 |
| Figure 5 | Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation. Aucun système de refroidissement n'est installé. | 62 |
| Figure 6 | Dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. | 63 |
| Figure 7 | Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation. Aucun système de refroidissement n'est installé. | 65 |
| Figure 8 | Dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. | 66 |
| Figure 9 | Exemple de sensibilité de la solution aux paramètres d'entrée. Température de référence et plage de variation. | 67 |
| Figure 10 | Distribution de la température et de l'humidité de l'air dans les deux tubes pendant le mois d'août sans système de refroidissement ; positionnement des deux circuits de refroidissement. | 70 |
| Figure 11 | Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 1. | 72 |
| Figure 12 | Dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Note: aucune zone ne dépasse les 32°C. Configuration 1. | 73 |
| Figure 13 | Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 1. | 75 |
| Figure 14 | Dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Note: aucune zone ne dépasse les 32°C. Configuration 1. | 76 |
| Figure 15 | Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 2. | 79 |
| Figure 16 | Dans le Tube 1 F → I après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Configuration 2. | 80 |
| Figure 17 | Évolution de la température moyenne mensuelle de l'air dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation. A: avec système de refroidissement; S: sans système de refroidissement. Configuration 2. | 82 |
| Figure 18 | Dans le Tube 2 I → F après 30 ans d'exploitation, zones où la température de l'air dépasse la température de consigne de 32°C. Avec système de refroidissement. Configuration 2. | 83 |
| Figure 19 | Profil de température et d'humidité de l'air au mois d'août (le mois le plus chaud) dans les deux tubes avec système de refroidissement ; emplacement du circuit de refroidissement. Configuration 1 prenant en compte uniquement les nouvelles données d'entrée du projet. Configuration 1. | 87 |
| Figure 20 | Profil de température et d'humidité de l'air au mois d'août (le mois le plus chaud) dans les deux tubes avec système de refroidissement ; emplacement du circuit de refroidissement. Configuration 2 prenant en compte les nouvelles données d'entrée du projet ainsi que les hypothèses de l'étude thermique du Lot C1: configuration 2. | 88 |

ANNEXE D: LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tableau 1 | Principales caractéristiques géométriques du tunnel de base. Une pente positive correspond à une montée dans le sens Ouest-Est, soit France → Italie. | 52 |
| Tableau 2 | Caractéristiques thermiques du béton. | 52 |
| Tableau 3 | Localisation et caractéristiques des types de roches le long du tunnel. En gras les valeurs modifiées par rapport à l'étude de l'APRD/PD [4]. | 53 |
| Tableau 4 | 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. | 54 |
| Tableau 5 | Caractéristiques aérauliques et thermiques des trains en circulation. | 55 |
| Tableau 6 | Nombre de trains et répartition horaire du trafic (trafic de dimensionnement pour le système de refroidissement). | 55 |
| Tableau 7 | Valeurs moyennes mensuelles et amplitudes de la variation journalière (température maximale journalière – température minimale nocturne) de la température à la tête française du tunnel [4]. | 56 |
| Tableau 8 | Valeurs moyennes mensuelles et amplitudes de la variation journalière (température maximale journalière – température minimale nocturne) de la température à la tête italienne du tunnel [8]. | 56 |
| Tableau 9 | Valeurs moyennes mensuelles de l'humidité relative aux têtes des tunnels, des puits et des descenderies [4]. | 57 |
| Tableau 10 | Tube France → Italie: moyenne horaire des débits d'air (m ³ /s) retenus pour l'étude thermique. Des valeurs négatives indiquent un débit entrant dans le tunnel. | 58 |
| Tableau 11 | Tube Italie → France: moyenne horaire des débits d'air (m ³ /s) retenus pour l'étude thermique. Des valeurs négatives indiquent un débit entrant dans le tunnel. | 58 |
| Tableau 12 | Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Tube 1 France → Italie. Sans refroidissement. | 61 |
| Tableau 13 | Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Tube 2 Italie → France. Sans refroidissement. | 64 |
| Tableau 14 | Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 1 France → Italie. Configuration 1. | 70 |
| Tableau 15 | Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 2 Italie → France. Configuration 1. | 74 |
| Tableau 16 | Puissance thermique absorbée par le système de refroidissement. Circuit 1 placé entre le pk14 et Modane, Circuit 2 entre Modane et le pk45. Configuration 1. | 77 |
| Tableau 17 | Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 1 France → Italie. Configuration 2. | 78 |
| Tableau 18 | Températures maximales locales après 30 ans d'exploitation. Avec système de refroidissement. Tube 2 Italie → France. Configuration 2. | 81 |