

# LIASON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne  
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese  
Sezione transfrontaliera

## NOUVELLE LIGNE LYON TURIN – NUOVA LINEA TORINO LIONE PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE – PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE

### PARTE IN TERRITORIO ITALIANO – PROGETTO IN VARIANTE (OTTEMPERANZA ALLA PRESCRIZIONE N. 235 DELLA DELIBERA CIPE 19/2015)

CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO

#### GEOLOGIE – GEOLOGIA

#### GENERAL – GENERALE

#### COMPLEMENTS DE GEOLOGIE / COMPLEMENTI DI GEOLOGIA MODÈLE GÉOTHERMIQUE / MODELLO GEOTERMICO

#### RELAZIONE DI SINTESI (LATO ITALIA) RAPPORT GÉNÉRAL (COTE ITALIE)

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérfié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	09/11/2012	Première diffusion / Prima emissione	R. TORRI (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M PANTALEO
A	31/01/2013	Prise en compte des commentaires LTF / Recepimento dei commenti LTF Passage au status AP / Passaggio allo stato AP	R. TORRI (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M PANTALEO
B	11/11/2016	Première diffusion phase PRF-PRV Prima emissione fase PRF-PRV	G. RICCI (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A: MORDASINI
C	03/03/2017	Reception observations TELT Recepimento osservazioni TELT	G. RICCI (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A: MORDASINI
D	14/04/2017	Reception observations TELT Recepimento osservazioni TELT	G. RICCI (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A: MORDASINI

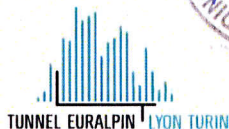


CODE DOC	<b>P</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>C</b>	<b>3</b>	<b>B</b>	<b>T</b>	<b>S</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>D</b>
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

<b>A</b>	<b>P</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>T</b>
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	<b>C3B</b>	//	//	<b>00</b>	<b>05</b>	<b>01</b>	<b>10</b>	<b>01</b>
------------------------------	------------	----	----	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

ECHELLE / SCALA
-



TELT sas – Savoie Technolac - Bâtiment "Homère"  
13 allée du Lac de Constance – 73370 LE BOURGET DU LAC (France)  
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75  
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952  
Propriété TELT Tous droits réservés – Proprietà TELT Tutti i diritti riservati

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



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

## SOMMAIRE / INDICE

1. INTRODUZIONE .....	7
1.1 Obiettivi dello studio .....	8
2. DATI UTILIZZATI.....	8
3. TUNNEL DI BASE.....	9
3.1 Falda dei Gessi.....	9
3.1.1 Diagrafie di temperatura del sondaggio F140.....	10
3.2 Massiccio d'Ambin.....	13
3.3 Zona a Scaglie Tettoniche (settore di Venaus) .....	16
3.4 Zona Piemontese.....	17
4. GALLERIE D'INTERCONNESSIONE .....	20
4.1 Massiccio Dora Maira.....	20
5. RISULTATI DELLA MODELLIZZAZIONE GEOTERMICA .....	20
6. ANALISI DEI RISULTATI.....	21

ALLEGATO 1 – Principi della modellizzazione geotermica eseguita in APR 2006

## LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

Figure 1 – Gradienti geotermici relativi alla zona della Falda dei Gessi. La linea orizzontale indica la quota approssimata del tunnel di base. In ogni sondaggio sono state realizzate più misurazioni contraddistinte dalle lettere a, b, c, ...	10
Figure 2 – Diagrafie eseguite nel sondaggio F140. Prova B :24/8/200 ; Prova C : 30/8/2007 ; Prova D : 10/1/2007	11
Figure 3 – Diagrafie eseguite nel sondaggio F140. Prova E :20/9/2007 Prova F : 1/10/2007. La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.	12
Figura 4 - Gradienti geotermici del Massiccio d'Ambin (SDE: sondaggio direzionale di Etache) La quota del tunnel di base nel settore indagato dall'SDE è indicata dalla linea tratteggiata nera.	13
Figura 5 – Sovrapposizione tracciato cunicolo esplorativo/Tunnel di Base, tratta pk 50–pk 52 e posizione delle stazioni fisse di misura	14
Figura 6 – Monitoraggio delle temperature. Sovrapposizione Cunicolo/TdB tratta pk 50 – pk 52,5.	15
Figura 7 – Tunnel di base, confronto dati di input delle temperatura tra PD2 e PRV.	16
Figura 8 - Gradienti geotermici del settore della Zona a Scaglie Tettoniche (Venaus). La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.	17
Figura 9 - Gradienti geotermici relativi alla Zona Piemontese. La quota del tunnel di base non è indicata in quanto i sondaggi sono stati realizzati distanti dall'asse del tracciato.	18
Figura 10 – Misure di temperatura misurate nel sondaggio S42. La testa del sondaggio è posto a quota 870 m slm circa. La quota del tunnel di base è circa pari a 500 m slm. La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.	19
Figura 11 - Gradienti geotermici relativi al Massiccio Dora Maira. La linea tratteggiata nera indica la quota della galleria d'interconnessione. Si evidenzia che le misure sono realizzate lungo il versante sinistro della Valle di Susa, opposto al versante interessato dalla galleria d'interconnessione.	20
Figura 12 - Profilo geotermico previsionale del Tunnel di Base tra il punto alto (pk 34+170) e il portale di Susa (pk 61+197)	23

## LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Temperature estrapolate alla quota galleria.	9
Tabella 2 – Variazione dei gradienti geotermici medi valutati per le unità tettoniche interessate dallo scavo delle opere. È inoltre indicato l'intervallo di variazione della temperatura a quota tunnel	21

## RESUME/RIASSUNTO

La phase actuelle du projet (PRV) est encadrée dans le Projet de Référence en Variante (variante de sécurité) de la Nouvelle ligne ferroviaire Turin-Lyon, suivant la prescription de 235 de résolution CIPE 19/2015. La variante de sécurité a déterminé la relocalisation du côté italien du point de début d'excavation de tunnel de base à La Maddalena, en Chiomonte, antérieurement prévue à Susa.

Ce document est basé sur les connaissances du Rapport précédent (Progetto Definitivo Approvato cod. PD2 C3B TS3 0097 B) qui est mis à jour et complété avec des données acquises dans l'excavation du tunnel exploratif de la Maddalena. Ces données ont permis non seulement d'affiner le modèle de référence hydrogéologique/geotermique et les implications dans le secteur Massif Ambin, mais aussi d'observer les températures de l'amas rocheux le long le tunnel de base ce qui a permis de actualiser le model géothermique par rapport à la phase antécédent.

Les études géothermiques ont été menées dans le but d'attribuer aux différentes formations géologiques traversées par les galeries des valeurs spécifiques de conductivité thermique sur la base des mesures effectuées dans les sondages carottés.

En particulier, pour chaque sondage les températures relatives au massif rocheux ont été extrapolées au niveau des ouvrages. Les températures enregistrées dans chaque sondage ont ensuite été reportées le long du tracé des ouvrages aux profondeurs correspondantes de manière à caractériser les tronçons thermiquement homogènes.

Les données disponibles sont cependant discontinues. Si, le long du tracé du Tunnel de Base, les données sont suffisamment détaillées pour établir un profil géothermique, en ce qui concerne la galerie d'interconnexion, il n'a été possible de se référer qu'aux données enregistrées au cours des sondages le long du versant gauche de ce

L'attuale fase progettuale (PRV) si inquadra nell'ambito del Progetto di Riferimento in Variante (variante sicurezza) della Nuova Linea Ferroviaria Torino-Lione, finalizzata alla progettazione di un nuovo scenario di costruzione del collegamento ferroviario lato Italia, a seguito della prescrizione 235 della delibera CIPE 19/2015. In particolare, la variante sicurezza delocalizzato il punto di attacco dello scavo del lato italiano del Tunnel di Base alla Maddalena di Chiomonte, in precedenza previsto a Susa.

Questo documento è basato sul precedente documento redatto in fase di Progetto Definitivo Approvato (cod. PD2 C3B TS3 0104 A) che è aggiornato ed integrato grazie ai dati acquisiti nello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena. Questi dati hanno permesso non solo di affinare il modello idrogeologico/geotermico di riferimento nel settore del Massiccio d'Ambin, ma anche di misurare le temperature dell'ammasso roccioso lungo il tunnel di base, permettendo di aggiornare lo scenario di riferimento atteso in fase di scavo del Tunnel di Base e delle opere a lui connesse.

Gli studi di geotermia sono stati condotti con lo scopo di attribuire alle differenti formazioni geologiche attraversate dalle gallerie valori specifici di conduttività termica sulla base delle misure effettuate nei carotaggi.

In particolare, per ogni sondaggio sono state estrapolate le temperature relative al massiccio roccioso alla quota delle opere. Le temperature rilevate in ogni singolo sondaggio sono quindi state riportate lungo il tracciato delle opere alle profondità corrispondenti e in modo da caratterizzare tratte termicamente omogenee.

I dati a disposizione sono comunque discontinui. Se lungo il tracciato del Tunnel di Base, i dati sono sufficientemente dettagliati per poter ricavare un profilo geotermico, per quanto riguarda la galleria d'interconnessione, non ci si è potuti riferire che ai dati registrati nei sondaggi presenti lungo il versante sinistro

Modello geotermico / Relazione di sintesi - Modele géothermique / Rapport general

secteur du Val de Suse. Elles ont été utilisées pour une évaluation qualitative des conditions thermiques du massif rocheux.

Le tableau suivant montre, par conséquent, les valeurs représentatives des gradients thermiques obtenus et les températures prévues à la cote du tunnel au niveau de la traversée en souterrain des principales unités lithologiques

dello stesso settore della Valle di Susa. Tali dati sono stati utilizzati al fine di una valutazione qualitativa delle condizioni termiche dell'ammasso roccioso.

Nella tabella che segue sono riportati, quindi, i valori rappresentativi dei gradienti termici ottenuti e le temperature attese a quota galleria in corrispondenza dell'attraversamento in sotterraneo delle unità litologiche principali.

<i>Unità tettonica</i>	<i>Opera</i>	<i>Temperatura a quota tunnel</i>
		°C
Falda de Gessi		22 - 31
Massiccio d'Ambin	tunnel di base	21 - 47
Zona a Scaglie Tettoniche		12 - 22
Zona Piemontese	tunnel di base	10 - 20
Coperture Dora Maira	galleria. Int.	10 - 20

Le profil thermique du Tunnel de Base, ci-dessous, résulte de la modélisation du contexte thermique déterminé pour les unités tectoniques concernées par le creusement des ouvrages.

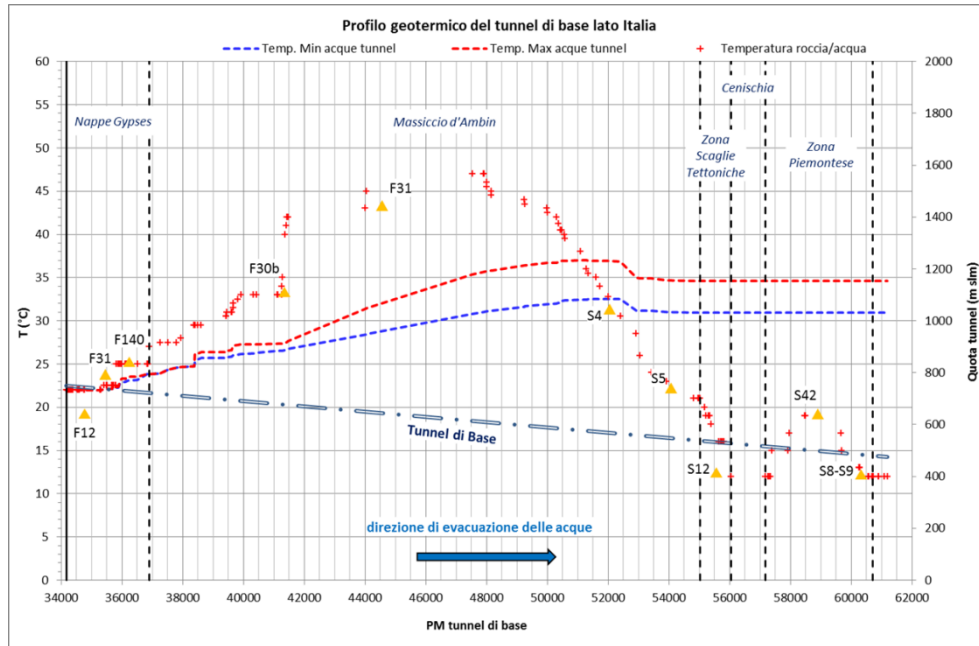
Les résultats de la modélisation s'accordent bien avec les mesures de température effectuées dans les sondages et permettent donc de définir un profil géothermique prévisionnel le long du tracé du tunnel.

Di seguito è riportato il profilo termico specifico per il Tunnel di Base ricavato dalla modellizzazione del contesto termico rilevato per le unità tettoniche interessate dallo scavo delle opere.

I risultati della modellizzazione ben si accordano con le misure di temperatura eseguite nei sondaggi permettendo quindi di definire un profilo geotermico previsionale lungo il tracciato del tunnel.



Modello geotermico / Relazione di sintesi - Modele géothermique / Rapport general



Les résultats montrent une zone d'environ 8 km du tracé (entre les pk 41 et 52 environ) pour la quelle la température est majeure de 40°C, avec une température max de 47-48°C entre les pk 44 e 48. Sur une tronçon de 14 km eviro, entre les pk 39 et 53, la températuree est plus élevée de 30°C.

Quant à la galerie d'interconnexion, les couvertures relativement faibles ne devraient pas déterminer de conditions critiques en terme de températures. Par analogie à ce qui était prévu pour le Tunnel de Bussoleno, dans le versant opposé, analysé lors des phases de conception précédentes des ouvrages de nouvelle ligne ferroviaire Turin-Lyon, la température est comprise entre 10 et 20°C. Cette valeur ne doit cependant être considérée qu'indicative en l'absence de mesures directes de la température le long du versant droit du Val de Suse au niveau du tunnel.

I risultati evidenziano una zona di circa 8 km del tracciato (tra le pk 41 e 52 circa) nella quale la temperatura è superiore a 40°C, con una temperatura massima di 47-48°C raggiunta nell'intorno delle pk 44 e 48. Su oltre 14 km, tra le pk 39 e 53 circa, la temperatura è superiore a 30°C.

Per quanto riguarda la galleria d'interconnessione, le coperture più ridotte non dovrebbero determinare condizioni di criticità per quanto concerne le temperature. Per analogia a quanto previsto per il Tunnel di Bussoleno sul versante opposto analizzato nelle fasi precedenti di progettazione delle opere connesse alla nuova linea ferroviaria Torino-Lione, la temperatura è compresa tra 10 e 20°C. Tale valore è comunque da ritenersi solamente indicativo in mancanza di misure dirette della temperatura lungo il versante destro della Valle di Susa a quota galleria.

## 1. Introduzione

L'attuale fase progettuale (PRV) si inquadra nell'ambito del Progetto di Riferimento in Variante (variante sicurezza) della Nuova Linea Ferroviaria Torino-Lione, finalizzata alla progettazione di un nuovo scenario di costruzione del collegamento ferroviario lato Italia, a seguito della prescrizione 235 della delibera CIPE 19/2015. In particolare, la variante sicurezza ha valutato una serie di scenari alternativi rispetto a quelli proposti nel precedente Progetto Definitivo approvato, coinvolgendo nuove aree e determinando la delocalizzazione del punto di attacco dello scavo del lato italiano del Tunnel di Base alla Maddalena di Chiomonte, in precedenza previsto a Susa.

Questo documento è basato sul precedente documento redatto in fase di Progetto Definitivo Approvato (cod. PD2 C3B TS3 0104 A) che è aggiornato ed integrato grazie ai dati acquisiti nello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena (cfr. PRF C3B TS3 7200 *Relazione ritorno di esperienza scavo Cunicolo Esplorativo Maddalena*). Questi dati hanno permesso non solo di affinare il modello idrogeologico/geotermico di riferimento nel settore del Massiccio d'Ambin, ma anche di osservare l'andamento del gradiente geotermico nel Massiccio d'Ambin, in una tratta coincidente con l'asse del Tunnel di Base, permettendo una chiara valutazione dello scenario di riferimento atteso in fase di scavo del Tunnel di Base e delle opere a lui connesse.

Il modello geotermico di riferimento per questa fase di studio si riferisce alla tratta del tunnel di base compresa tra il punto alto posto alla pk 34+170 e il portale di Susa alla pk 61+197.

Esso deriva dal modello elaborato lungo il tunnel di base nelle fasi precedenti di progettazione riportato nei documenti, con i dati messi a disposizione da TELT/LTF:

- "Modello geotermico generale", PD2 C3B TS3 0104 A
- "Modello geotermico del Tunnel di Base", APR-B2-TS2-0020-B
- "Modello geotermico – relazione descrittiva – Tunnel di Bussoleno e Tunnel d'Ambin", APR-B2-TS2-0070-C

In questa fase, il modello è stato aggiornato introducendo i dati di nuova acquisizione relativi al monitoraggio della temperatura dell'ammasso roccioso e dell'acqua di infiltrazione registrati nel cunicolo esplorativo della Maddalena, per la tratta in sovrapposizione con il Tunnel di Base, in pratica compreso (per la disponibilità alla data della redazione di questo rapporto) tra le pk 50 e pk 52.

Il monitoraggio del gradiente geotermico è stato realizzato tramite la misura della temperatura della roccia in foro (lunghezza 3m) eseguito sul paramento del cunicolo. Le stazioni di misura sono state realizzate ogni 50m. Ad agosto 2016 l'ultima installata è alla pk 5+500 (progressiva della galleria geognostica) corrispondente alla pk 50+100 del tunnel di Base. Inoltre, in stazioni fisse ogni 500m è eseguito il monitoraggio della temperatura, per monitorare la variazione termica dell'ammasso roccioso nel tempo.

Ad integrazione del dato relativo alla temperatura dell'ammasso roccioso, sono disponibili i dati di temperatura dell'acqua registrati nel monitoraggio delle venute con cadenza bimensile.

Nel complesso, quindi, il modello geotermico deriva dalle temperature misurate nei sondaggi (log di temperatura) che hanno permesso di tracciare i gradienti geotermici medi per ogni sondaggio e per ogni unità tettonica presente nell'area di studio.

Restano tuttavia alcuni settori per i quali sarebbe necessario implementare la banca dati sia perché restano le incertezze messe in evidenza nelle fasi precedenti di studio sia perché caratterizzate dalla lacuna di dati. In particolare, per il settore della galleria d'interconnessione

non esistono misure dirette che permettano di eseguire previsioni delle condizioni termiche a quota galleria. D'altro canto, se pur passando in destra orografica della media – bassa Valle di Susa, esso è per certe caratteristiche confrontabile con la tratta del tunnel di base che attraversa i calcescisti della Zona Piemontese per la quale è possibile recuperare i dati acquisiti per la galleria di Bussoleno che era stata studiata nell'APR 2006 a cui si fa comunque riferimento. Inoltre, le condizioni termiche osservate nella galleria Prapontin (A32) e nella galleria Tanze (Linea Ferroviaria Storica Torino-Modane) non evidenziano anomalie termiche.

Sulla base del modello geotermico è stata quindi possibile ricavare la temperatura delle acque drenate dalle opere sotterranee e calcolare in particolare la temperatura delle stesse acque al portale.

Inoltre, sono state evidenziate le tratte per le quali è probabile che si intercettino acque calde potenzialmente valorizzabili per il recupero di energia geotermica.

Tale aspetto è trattato specificatamente nel documento PRV C3B 0105 00-05-01 10-02 – “*Studio di valorizzazione delle acque calde*” a cui si rimanda.

### 1.1 Obiettivi dello studio

Per ogni sondaggio sono state estrapolate le temperature relative al massiccio roccioso alla quota delle opere. Le temperature rilevate in ogni singolo sondaggio sono quindi state riportate lungo il tracciato delle opere alle profondità corrispondenti, in modo da caratterizzare tratte termicamente omogenee e al fine di una valutazione qualitativa delle condizioni termiche dell'ammasso roccioso.

I risultati della modellizzazione ben si accordano con le misure di temperatura eseguite nei sondaggi permettendo quindi di definire un profilo geotermico previsionale lungo il tracciato del tunnel.

## 2. Dati utilizzati

Tra le finalità degli studi geotermici vi è quella di identificare quali gradienti geotermici caratterizzano le diverse unità tettoniche lungo le opere ed evidenziare eventuali zone di anomalia.

In particolare, per ogni sondaggio sono state estrapolate le temperature relative alla quota delle opere. Nella tabella che segue sono indicate le temperature valutate per ogni sondaggio a una quota paragonabile a quella delle opere. È riportata inoltre, approssimativamente, la pk e l'opera di riferimento.

In questa fase sono stati analizzati i dati a disposizione per la tratta di competenza ovvero a partire dal punto alto del Tunnel di Base posto in territorio francese alla pk 34+170 verso la tratta italiana.



Modello geotermico / Relazione di sintesi - Modele géothermique / Rapport general

<i>Unità tettonica</i>	<i>Sondaggio</i> <i>codice</i>	<i>Opera</i>	<i>pk approssimativa</i> <i>proiezione sull'asse delle opere</i>	<i>Temperatura</i> <i>°C</i>
Falda de Gessi	SDA		33+250	27
	F12		34+290	19
	F31		35+300	23.5
	F140		36+110	25
Massiccio d'Ambin	SDE		39+900	22.5
	F30bis	tunnel di base	41+250	33
	F16		44+400	43
	S4		51+900	31
Zona a Scaglie Tettoniche	S5		53+870	22
	S12		55+430	12
Zona Piemontese	S42		58+500	19
Zona Piemontese / Coperture Dora Maira	S8	tunnel di base	59+300	12
	S9	galleria. Int.	60+000	12

Tabella 1 – Temperature estrapolate alla quota galleria.

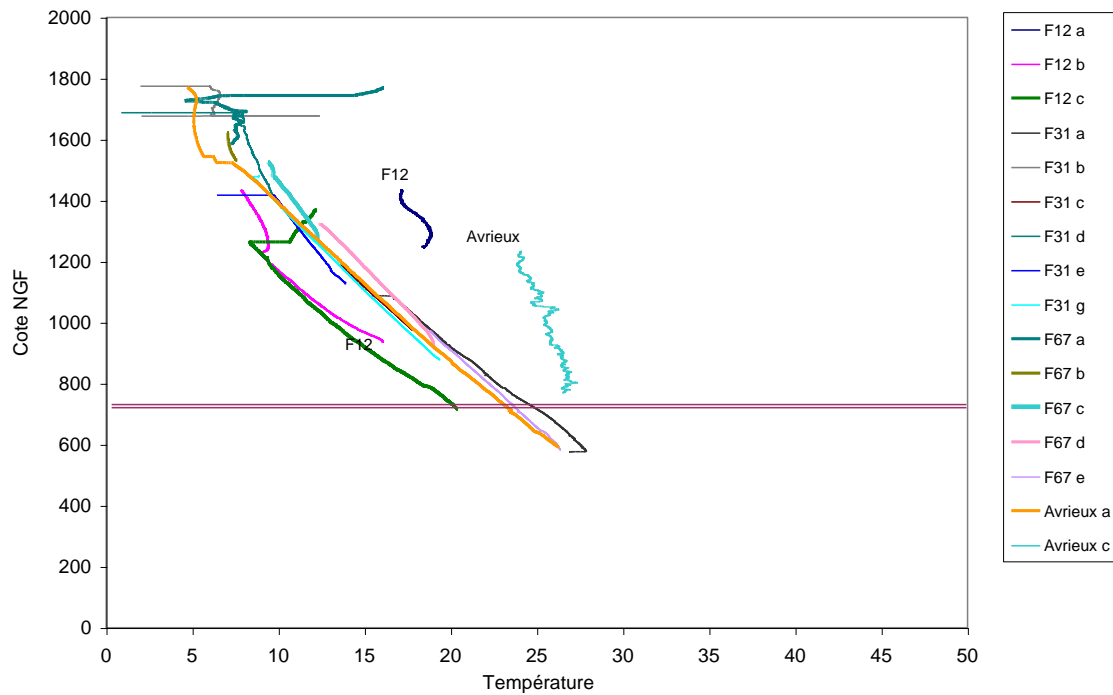
Di seguito è riportata una descrizione del contesto termico rilevato per le unità tettoniche interessate dallo scavo delle opere, a partire dalle diagrafie realizzate nei sondaggi.

### 3. Tunnel di Base

#### 3.1 Falda dei Gessi

Le temperature misurate nei primi 200 metri sono relativamente basse e corrispondono probabilmente a zone raffreddate da circuiti discendenti d'acque fredde. Oltre questa profondità, i gradienti geotermici si stabilizzano a circa 20°C/km. Alcune anomalie sono comunque riscontrate nei sondaggi F12 e SDA nei quali si osservano gradienti freddi (sub-verticali) ma con temperature elevate. Tali anomalie di misurazione sembrano sparire in profondità dove i gradienti si stabilizzano su valori di riferimento regionali.

Modello geotermico / Relazione di sintesi - Modele géothermique / Rapport general



**Figure 1 – Gradienti geotermici relativi alla zona della Falda dei Gessi. La linea orizzontale indica la quota approssimata del tunnel di base. In ogni sondaggio sono state realizzate più misurazioni contraddistinte dalle lettere a, b, c, ...**

I gradienti di temperatura misurati nei sondaggi permette, per questo settore, di estrapolare le temperature a quota galleria che sono comprese tra 19 e 25°C.

**3.1.1 Diagrafie di temperatura del sondaggio F140**

Dopo l’APR 2006, in questo settore è stato perforato il sondaggio F140 nel quale sono state eseguite diagrafie dei fluidi tra le quali le misurazioni di temperatura.

In particolare, sono state eseguite 5 campagne successive di misurazione in foro per profondità di perforazione crescenti :

Prova	Lunghezza perforata in asse al sondaggio(m)	Livello piezometrico (m)	Misura effettuata	Intervallo testato (da m a m)
B	609.70	452.5	Temperatura Conducibilità elettrica Potenziale redox Micromulinello	448 - 608 452 - 608 452 - 608 452 - 608
C	786.85	454.0	Temperatura Conducibilità elettrica Potenziale redox Micromulinello	600 - 785
D	1038.85	454.0	Temperatura Conducibilità elettrica Potenziale redox Micromulinello	734 - 1039
E	1261.00	452.0	Temperatura Conducibilità elettrica Potenziale redox Micromulinello	451 - 1261 451 - 1261 451 - 1261 451 - 1258
F	1261.00	451.0	Temperatura Conducibilità elettrica	451 - 1262

I log sintetici delle diagrafie eseguite sono riportati di seguito.

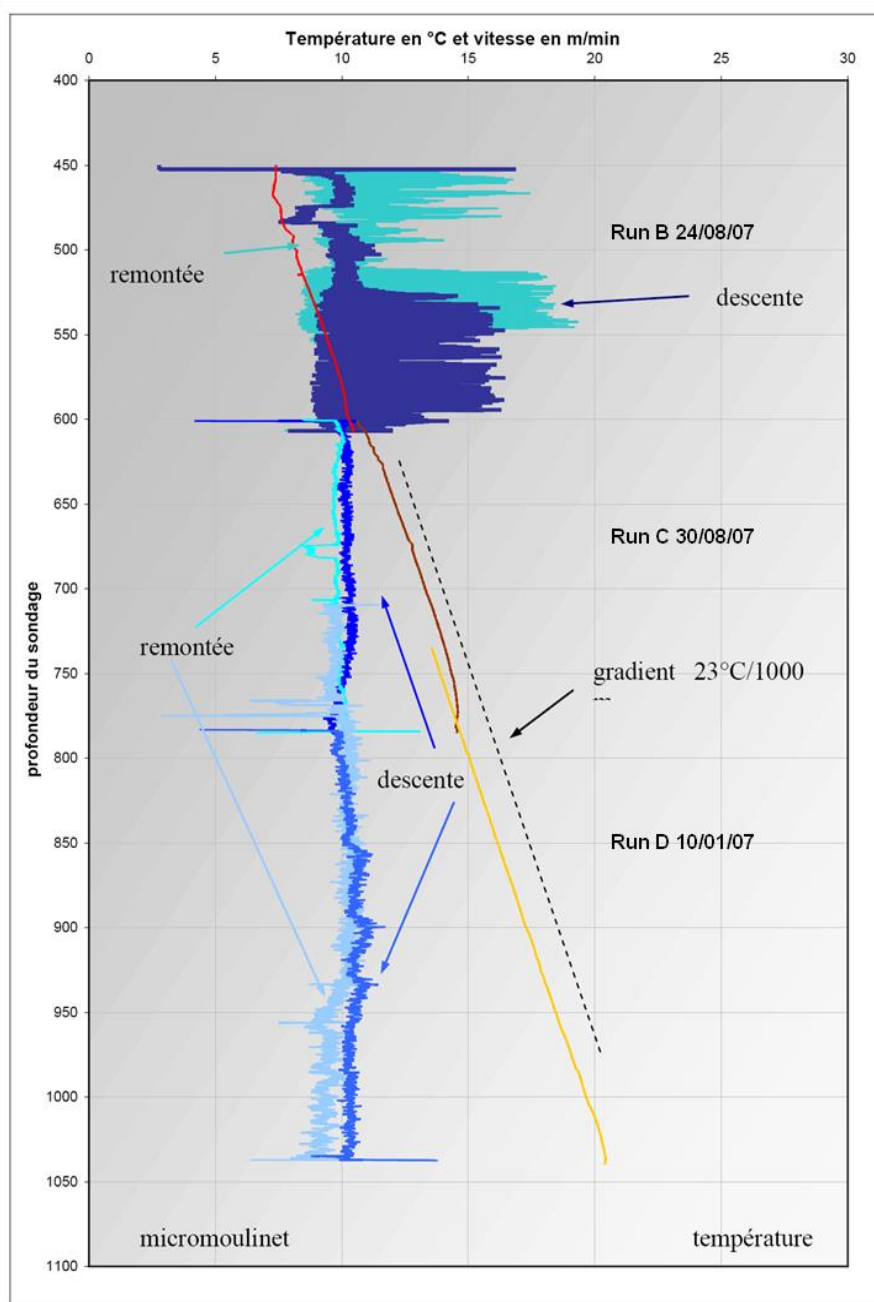
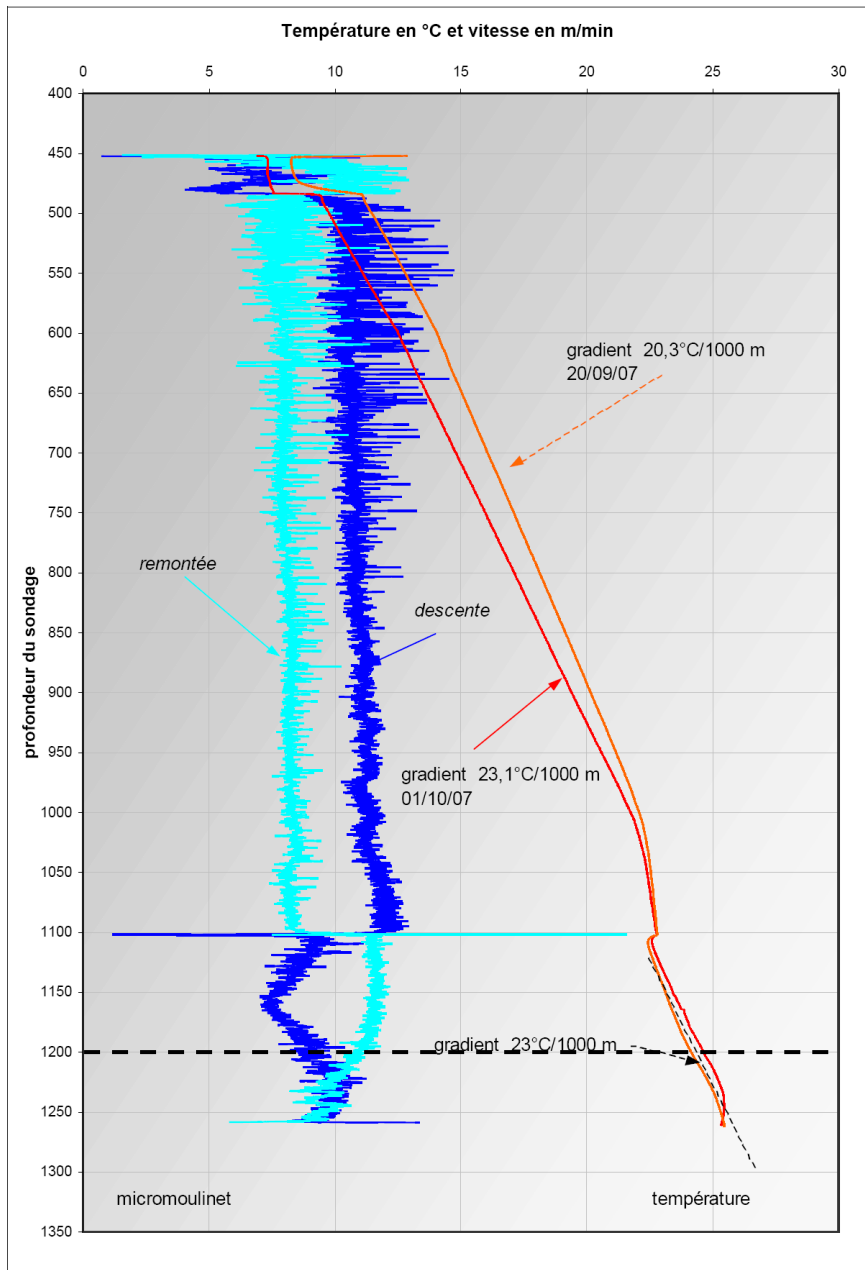


Figure 2 – Diagrafie eseguite nel sondaggio F140. Prova B :24/8/200 ; Prova C : 30/8/2007 ; Prova D :  
10/1/2007



**Figure 3 – Diagrafie eseguite nel sondaggio F140. Prova E :20/9/2007 Prova F : 1/10/2007. La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.**

Le prime misure con il micromulinello fino alla profondità di circa 600 metri sono molto disturbate probabilmente per problemi strumentali (prova B, Figure 2). Tuttavia, sembra che sia stato intercettato un flusso discendente fino alla profondità di 490 metri come testimoniano le prove effettuate anche successivamente a profondità minori (prove E ed F, Figure 3).

Solamente nella prova E è messo in evidenza un flusso ascendente tra 1100 e 490 metri e poi discendente fino a fondo foro (1291 m); è dunque possibile che vi sia una venuta in pressione alla profondità di circa 1100 metri. Al di sopra di questa non sembra vi siano zone con permeabilità rilevanti.

Questa interpretazione sembra confermata dai log di temperatura che presentano una variazione puntuale alla stessa quota (prove E ed F, Figure 3). I gradienti di temperatura sono di circa 23°C/km considerando la perturbazione dei flussi dovuta alla venuta intercettata alla quota di 1100 metri.

La venuta a profondità di 1100 metri è anche sottolineata dalle misure di conducibilità elettrica che raggiunge a questa profondità valori superiori a 175000 µS/cm indicando acque ad elevata salinità.

La temperatura attesa a quota galleria è di circa 25°C.

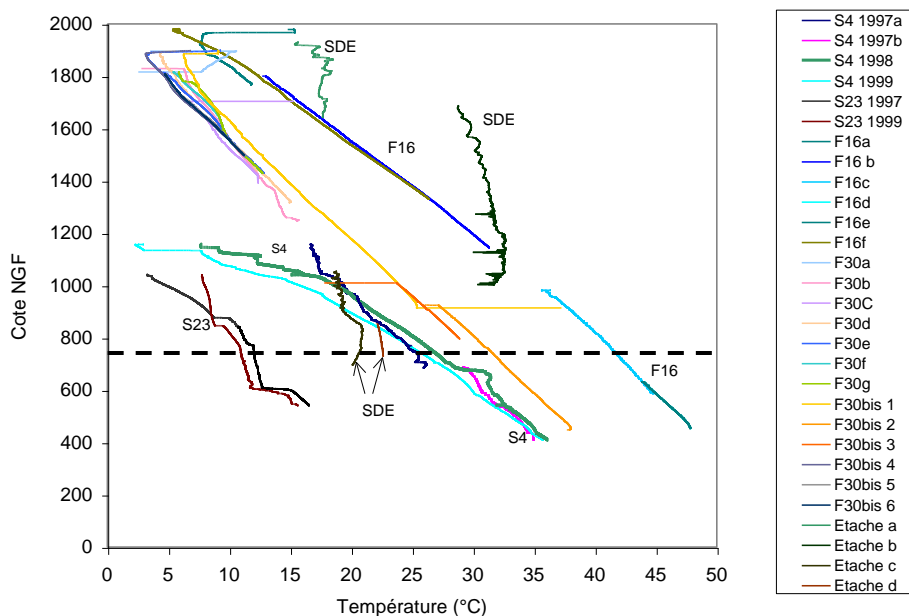
I dati permettono di precisare il modello geotermico precedentemente elaborato e comunque confermano le condizioni termiche ipotizzate nelle fasi precedenti di studio, per le tratte adiacenti del tunnel di base.

### 3.2 Massiccio d'Ambin

I gradienti geotermici misurati nei sondaggi sono regolari e si allineano su 25°C/km fatta eccezione per il sondaggio S4 che mostra un gradiente più elevato, superiore a 33°C/km.

Delle anomalie positive sono inoltre da segnalare a 650 - 750 m di quota nel sondaggio S4. A quote inferiori il gradiente misurato sembra ritornare nella norma (30°C/km).

Inoltre, nel sondaggio S23 a circa 600 m di quota il gradiente cresce bruscamente. In corrispondenza di questa anomalia non sono indicate strutture tettoniche nella stratigrafia del sondaggio, tuttavia questa è situata circa alla stessa quota del fondovalle della Dora Riparia, che potrebbe rappresentare il livello di base delle circolazioni fredde superficiali esistenti lungo il bordo del massiccio.



**Figura 4 - Gradienti geotermici del Massiccio d'Ambin (SDE: sondaggio direzionale di Etache) La quota del tunnel di base nel settore indagato dall'SDE è indicata dalla linea tratteggiata nera.**

La tratta è caratterizzata dunque da temperature a quota tunnel che variano fortemente e tra circa 21 e 47°C in funzione delle coperture topografiche e della presenza delle anomalie termiche misurate in profondità.

In particolare, nella tratta compresa tra le pk 41 e 51 circa, le temperature del massiccio attese a quota galleria superano i 40°C. Tale tratta corrisponde al settore di tunnel di base a più alte coperture (> 2000 metri).

Nella tratta compresa tra pk 50 e pk 52 (Figura 5), i recenti dati acquisiti dal cunicolo esplorativo della Maddalena evidenziano alcuni aspetti rilevanti.

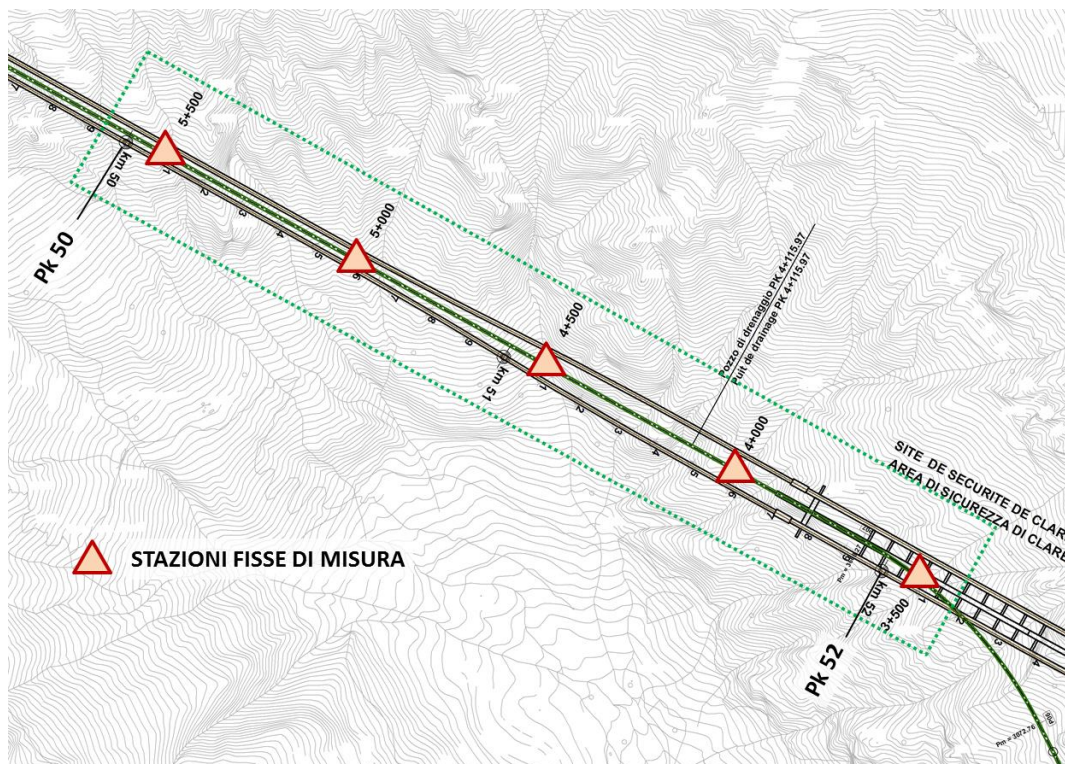


Figura 5 – Sovrapposizione tracciato cunicolo esplorativo/Tunnel di Base, tratta pk 50–pk 52 e posizione delle stazioni fisse di misura

I dati del cunicolo sono relativi a:

- temperatura dell'ammasso roccioso registrato in perforazioni sui fianchi del cavo galleria (lung.=3m): la misura della temperatura viene ripetuta nel tempo soltanto nelle stazioni "fisse" presenti ogni 500m (Figura 5);
- temperatura delle venute registrate con cadenza bimestrale.

Sono stati considerati i dati di temperatura dell'ammasso roccioso misurati immediatamente dopo l'installazione della stazione. I dati delle stazioni fisse hanno infatti evidenziato una diminuzione della temperatura nel tempo nell'arco di un anno che può variare da circa un grado °C (stazioni da pk TdB comprese tra pk 50-51,5) a 5°C stazione alla pk 52.

Il grafico della figura 6 riporta entrambi i dati registrati nel cunicolo, dove si evidenzia che:

- i dati delle venute idriche mostrano un trend di crescita regolare sostanzialmente parallelo a quello dell'ammasso roccioso; le venute idriche mostrano una differenza di qualche grado (1-2 °C) per effetto del raffreddamento esercitato dallo scavo della galleria;



- nella tratta pk 51+500÷52+200 si nota una anomalia termica positiva dell'ammasso roccioso alla quale al contrario corrisponde una anomalia termica negativa delle venute idriche. Il fenomeno è limitato (si rimanda alla *Relazione ritorno di esperienza scavo Cunicolo Esplorativo Maddalena* cod. PRV TS3 C3B 26 48 01 10 01 7200 per ulteriori dettagli) a un tratto di circa 800m, dopo il quale il gradiente misurato si riallinea secondo un trend regolare;
- se una spiegazione dell'anomalia positiva della temperatura dell'ammasso è difficile da identificare dai dati a disposizione, al contrario, una spiegazione della temperatura leggermente inferiore riscontrata nelle venute d'acqua potrebbe essere legata all'apporto di ricarica di acqua più fredda e veloce.

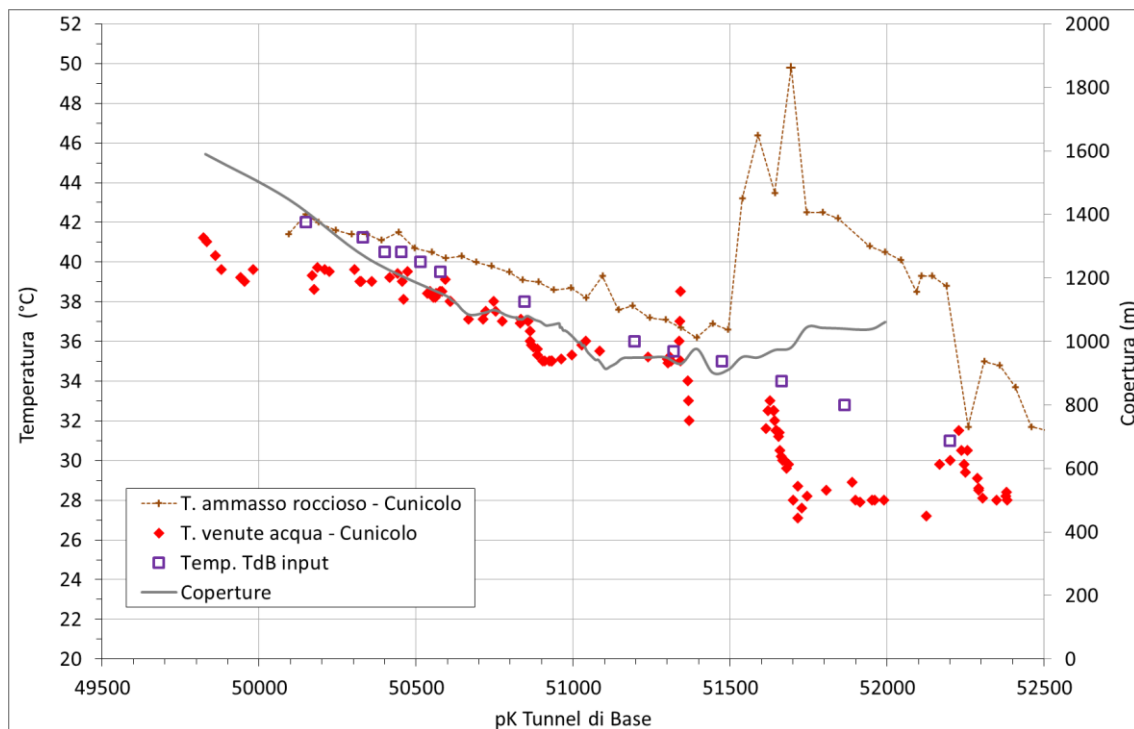


Figura 6 – Monitoraggio delle temperature. Sovrapposizione Cunicolo/TdB tratta pk 50 – pk 52,5.

Sulla scorta dei dati a disposizione sono stati aggiornati i dati di temperatura previsti per il Tunnel di Base ("Temp. TdB input", nel grafico di Figura 6) relativi alla tratta di sovrapposizione con il cunicolo della Maddalena, tenendo conto, inoltre, di un lieve incremento dovuto alla maggior profondità del TdB rispetto al cunicolo, secondo il gradiente medio osservato nella tratta esaminata (circa 12-13°C/km).

Si tratta, nella sostanza di lievi modifiche a quanto era stato ipotizzato nella fase di Progetto Definitivo Approvato (PD2, aggiornata a gennaio 2013). Il grafico della Figura 7 riporta il confronto tra PD2 e attuale PRV dei dati di temperatura considerata nel bilancio delle temperature delle acque in uscita al portale Susa. I dati delle restanti tratte sono invariati rispetto alla fase progettuale precedente. Il confronto evidenzia un trend più regolare delle temperature di PRV rispetto al PD2.

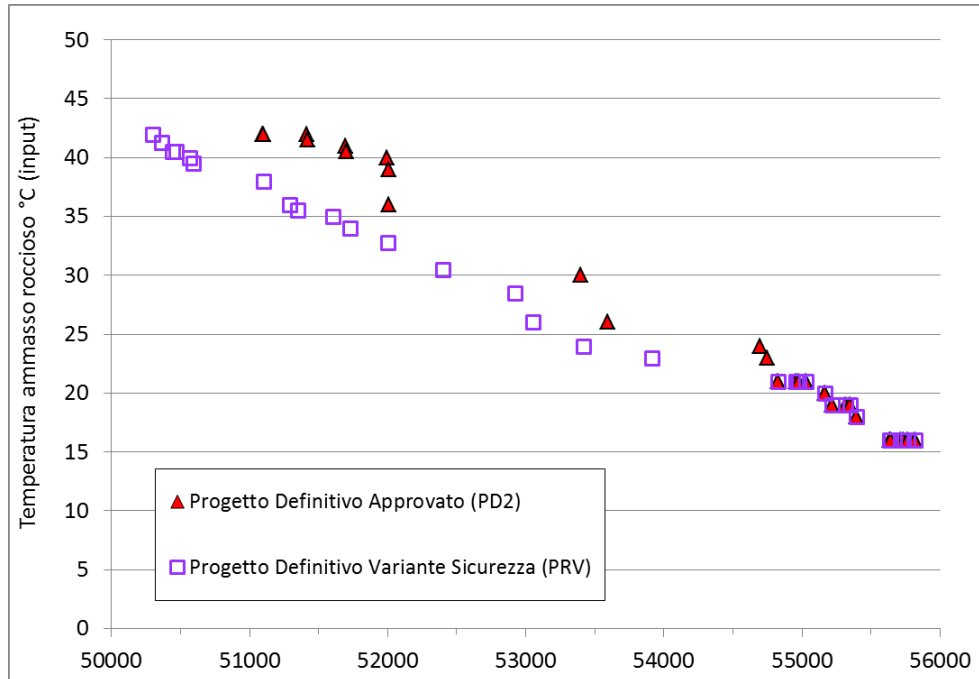
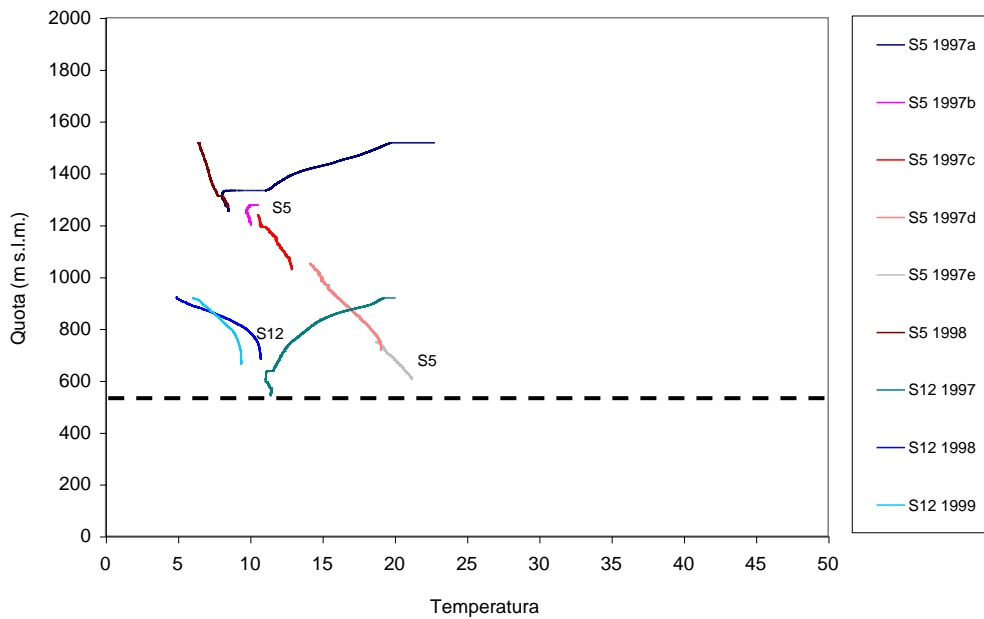


Figura 7 – Tunnel di base, confronto dati di input delle temperatura tra PD2 e PRV.

### 3.3 Zona a Scaglie Tettoniche (settore di Venaus)

In questa zona sono disponibili solo i dati relativi a due sondaggi, S5 e S12, questo non permette di estrapolare i dati dei gradienti geotermici di questo settore geologico. Inoltre, va segnalato che entrambi i sondaggi non arrivano al di sotto della quota del fondovalle (circa 600 m s.l.m.) che come si è visto nelle altre zone, rappresenta sovente un limite al di sotto del quale il gradiente geotermico si stabilizza.

Nel sondaggio S5 si osserva che il gradiente geotermico si stabilizza su valori di 16°C/km al di sotto di una profondità di circa 190 m. Per quanto riguarda il sondaggio S12, è probabile che i dati di temperatura siano stati misurati in condizioni di disequilibrio termico del sondaggio e quindi non sono utili per estrapolare un gradiente geotermico locale.



**Figura 8 - Gradienti geotermici del settore della Zona a Scaglie Tettoniche (Venaus). La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.**

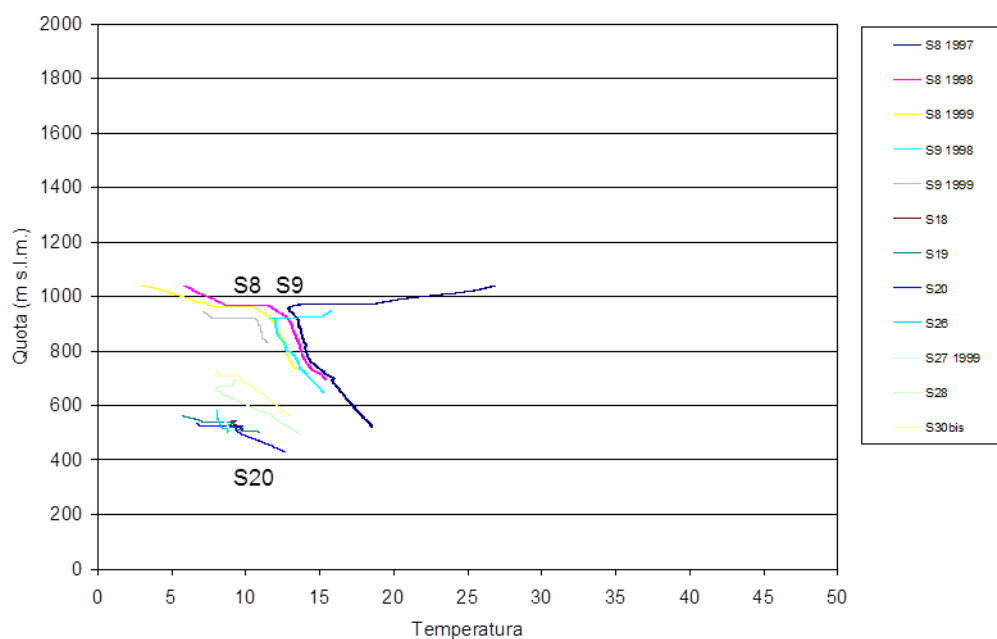
### 3.4 Zona Piemontese

In questo paragrafo sono descritti i sondaggi della Zona Piemontese ubicati sia in sinistra idrografica Cenischia (S42) e della Dora (S8, S9) che quelli in destra Dora (S26, S27, S28, S30). Sono inoltre inseriti anche i sondaggi del fondovalle del torrente Cenischia (S18, S19, S20).

Si possono evidenziare principalmente due diversi gradienti geotermici:

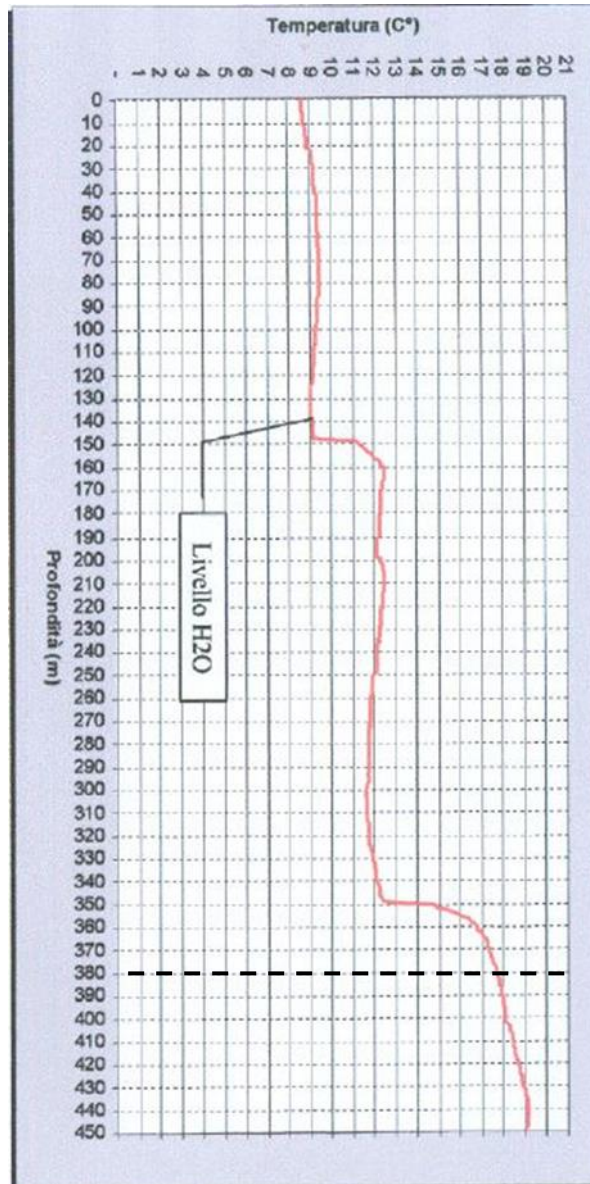
- un gradiente relativamente basso compreso tra, circa 17 - 18°C/km, osservabile a quote superiori al fondovalle nei sondaggi S8 e S9 lungo il tracciato in progetto (Figura 9);
- un gradiente più elevato al di sotto del fondovalle (S42), che in questa zona si trova all'incirca a 580 m s.l.m., pari a circa 25°C/km.

Modello geotermico / Relazione di sintesi - Modele géothermique / Rapport general



**Figura 9 - Gradienti geotermici relativi alla Zona Piemontese. La quota del tunnel di base non è indicata in quanto i sondaggi sono stati realizzati distanti dall'asse del tracciato.**

E' possibile infatti che queste misure si riferiscano piuttosto al passaggio tra la zona raffreddata da circolazioni superficiali e la zona profonda meno permeabile e quindi meno raffreddata. Questo fenomeno è stato misurato nel sondaggio S42 (Figura 10).



**Figura 10 – Misure di temperatura misurate nel sondaggio S42. La testa del sondaggio è posto a quota 870 m slm circa. La quota del tunnel di base è circa pari a 500 m slm. La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.**

Si osserva un aumento della temperatura dell'acqua gradini per effetto della presenza di venute d'acqua puntuale in corrispondenza delle tratte di maggiore fratturazione (a circa 148 metri e 360 metri di profondità). L'aumento puntuale di temperatura indica come nelle parti in cui la roccia non è fratturata, il massiccio è sostanzialmente impermeabile. Il gradiente termico misurato su tutta la lunghezza del sondaggio è di circa 16°C/km; nell'ultimo tratto del sondaggio alla profondità corrispondente alla profondità del tunnel (circa 360 m) è dunque più elevato e circa di 25°C/km mentre la temperatura alla profondità del tunnel è di circa 19°C.

Le temperature attese a quota del tunnel nella tratta della Zona Piemontese sono comprese tra 10 e 20°C.

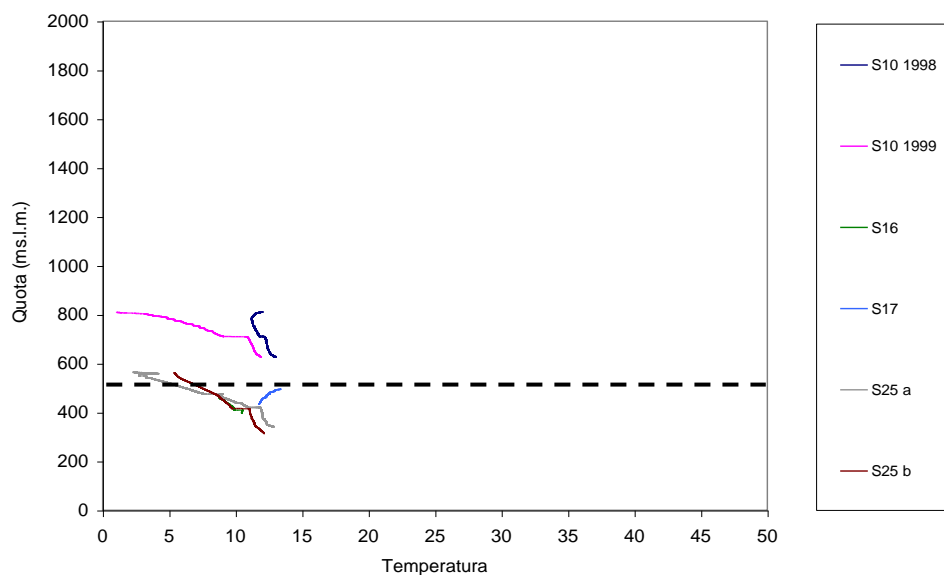
## 4. Gallerie d'Interconnessione

Le temperature relative alla quota delle gallerie d'interconnessione sono state dedotte dalla consultazione dei dati dei sondaggi realizzati sul versante sinistro della Valle di Susa, opposto a quello interessato dallo scavo della galleria d'interconnessione, e realizzati nelle precedenti fasi di studio e relativi al tunnel di Bussoleno. Questi sondaggi attraversano litotipi afferenti alle unità del Massiccio Dora Maira anche se non coincidenti con quelle che saranno interessate dallo scavo delle canne della galleria d'interconnessione.

Malgrado non esistano dati di misurazione diretta in corrispondenza della tratta d'interesse, bisogna sottolineare come durante e dopo lo scavo delle gallerie autostradali e ferroviarie adiacenti al tracciato della galleria d'interconnessione non sono state rilevate anomalie termiche.

### 4.1 Massiccio Dora Maira

I dati a disposizione sono insufficienti per trarre delle conclusioni generiche sullo stato termico di questa unità tettonica. Tuttavia, le temperature misurate nei primi 100 - 150 m di profondità dei sondaggi corrispondono ad una zona perturbata, con un gradiente medio elevato, mentre al di sotto di tale profondità, in tutti i sondaggi analizzati in questa zona, si registra una diminuzione di tale gradiente.



**Figura 11 - Gradienti geotermici relativi al Massiccio Dora Maira. La linea tratteggiata nera indica la quota della galleria d'interconnessione. Si evidenzia che le misure sono realizzate lungo il versante sinistro della Valle di Susa, opposto al versante interessato dalla galleria d'interconnessione.**

In corrispondenza del sondaggio S10, la temperatura estrapolata a quota galleria risulta pari a circa 16 - 17°C.

## 5. Risultati della modellizzazione geotermica

La modellizzazione geotermica è stata realizzata per il solo Tunnel di Base per il quale i dati a disposizione permettono di ricostruire le temperature alla quota delle opere. I risultati sono inoltre validi anche per la galleria Maddalena 1bis, che sarà scavata a fianco del cunicolo esplorativo ad una distanza di 50m per una lunghezza complessiva di 1100m.



Per la galleria d'interconnessione è stata fatta una valutazione qualitativa sulla base dei dati misurati in sondaggi presenti in contesti simili e paragonabili. I valori considerati possono essere confermati dalle temperature misurate nelle gallerie Prapontin.

La modellizzazione generale è stata realizzata durante la fase di progettazione APR e riguarda tutto il Tunnel di Base dal portale di St. Jean de Maurienne alla pk 56+000 circa che corrisponde all'attuale Tunnel di Base; è esclusa la tratta di attraversamento del fondovalle Cenischia in terreni sciolti e il tratto che si sviluppa lungo il versante sinistro della Val Cenischia nei calcescisti della Zona Piemontese a basse coperture fino all'imbocco di Susa, pK 60+900 circa. Una sintesi dei principi di base della metodologia utilizzata in APR per la definizione del modello geotermico è riportata in allegato 1.

Nella fase attuale di PRV, il modello geotermico, inteso come previsione della temperatura dell'ammasso roccioso e del totale delle infiltrazione idriche, è stato aggiornato considerando:

- le temperature misurate dal monitoraggio del cunicolo esplorativo della Maddalena solamente per la tratta di sovrapposizione con il TdB (pk 50-52);
- le portate definitive aggiornate secondo le indicazioni ricevute dalla galleria della Maddalena;
- il contributo delle acque delle gallerie di Maddalena 1 e 2 (portata e temperatura).

In Figura 12 si riporta il grafico delle temperature previste dell'ammasso roccioso e della temperatura dell'acqua di infiltrazione (min-max) calcolato con i contributi delle gallerie di Maddalena 1 e 2.

## 6. Analisi dei risultati

Gli elementi descritti nell'analisi che segue sono contenuti nella Figura 12.

Nella tabella che segue sono indicati per ogni unità tettonica i gradienti geotermici misurati nei sondaggi e nella galleria della Maddalena e l'intervallo di temperatura atteso in galleria.

Unità Tettonica	Opera	Gradiente geotermico	Temperatura a quota tunnel
		°C/km	°C
Falda dei Gessi	Tunnel di Base	20- 23	22 - 31
Massiccio d'Ambin		13 - 30	21 - 47
Zone a scaglie tettoniche		16	12 - 22
Zona Piemontese		17 - 25	10 - 20
Coperture Dora Maira	Galleria di interconnessione	17 - 18	10 - 20

**Tabella 2 – Variazione dei gradienti geotermici medi valutati per le unità tettoniche interessate dallo scavo delle opere. È inoltre indicato l'intervallo di variazione della temperatura a quota tunnel**

I risultati evidenziano una zona di circa 8 km del tracciato, compresa tra le pk 41 e 52 circa, nella quale la temperatura della roccia è superiore a 40°C, con una temperatura massima di 47°- 48°C raggiunta nell'intorno delle pk 44 e 48. Su oltre 14 km, tra le pk 39 e 53 circa, la temperatura è superiore a 30°C.

Per quanto riguarda la temperatura dell'acqua di infiltrazione, costituita da una portata che si accumula dal punto alto vero il portale Susa, si nota una crescita fino alla pk 52. Alla Pk

Modello geotermico / Relazione di sintesi - Modele géothermique / Rapport general

---

52+600 si evidenzia l'effetto di raffreddamento costituito dall'apporto più freddo dell'acqua delle gallerie di Maddalena 1 e 2 sul totale. Il totale delle portate, non ricevendo più contributi a partire dalla pk 54+800, per l'installazione del rivestimento impermeabilizzato *full-round*, mantiene teoricamente la stessa temperatura raggiunta in quella progressiva fino al portale Susa.

Modello geotermico / Relazione di sintesi - Modele géothermique / Rapport general

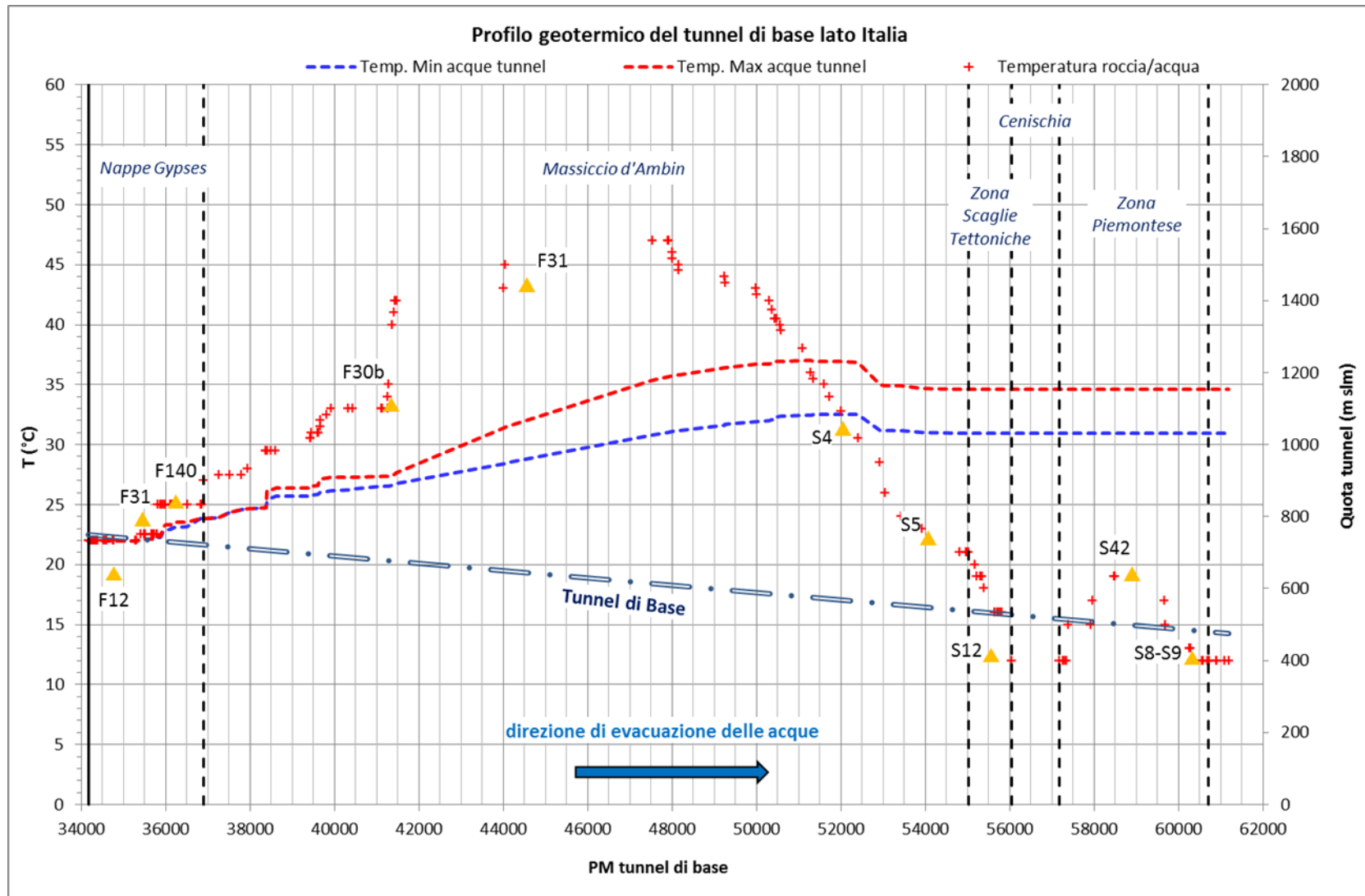


Figura 12 - Profilo geotermico previsionale del Tunnel di Base tra il punto alto (pk 34+170) e il portale di Susa (pk 61+197)

## Allegato 1 – Principi della modellizzazione geotermica eseguita in APR 2006

Avvalendosi dei risultati dei precedenti studi (Arcadis-SEA-Silène-Baptendier 2002-2004), PRO-TSE2 ha realizzato un modello numerico, introducendo i seguenti miglioramenti:

- Calcolo di effetti in pseudo-3D per mezzo di un modello numerico di terreno,
- Migliore presa in considerazione della configurazione geologica, in particolare nella parte Arc-Étache, grazie alle nuove interpretazioni dell'estate 2005,
- Presa in considerazione di una zona superficiale di circolazione rapida spessa 200 m, dove la temperatura viene imposta da quella della superficie,
- Introduzione dei risultati dei nuovi sondaggi di cui sopra,
- Migliore precisione riguardante le conduttività termiche delle rocce.

Il modello è stato realizzato con il software FLAC, versione 5 in 2D, editato da ITASCA; per lo studio dell'APR ci si è avvalsi delle equazioni termiche implementate nel software.

Si è scelto di trattare il problema usando le ipotesi di conduzione vera e propria e di regime permanente. Quindi, l'equazione del calore nell'ambiente è la seguente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

dove  $T$  è la temperatura nell'ambiente e  $\lambda_x$  e  $\lambda_z$  rappresentano rispettivamente le conduttività termiche orizzontali e verticali.

Per condurre a buon fine la modellizzazione della temperatura, sono state seguite le 5 fasi proposte da Goy et al. (1996<sup>1</sup>):

- Determinazione del profilo topografico per mezzo del metodo d'Andreae e del MNT;
- Caratterizzazione della temperatura di superficie;
- Integrazione degli orizzonti geologici attraversati;
- Determinazione delle conduttività termiche associate ai vari orizzonti geologici;
- Calcolo del flusso geotermico terrestre.

<sup>1</sup> Goy L. et al. (1996). *Modelling of Rock Temperature for Deep Alpine Tunnel Projects. Roch. Mech. Rock Engng*, 29 (1).