

# 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-FRANCOISE

REVISION DE L'AVANT-PROJET DE REFERENCE – REVISIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO  
CUP C11J05000030001

GEOLOGIE – GEOLOGIA

GENERALE - GENERALE

COMPLEMENTS DE GEOLOGIE – COMPLEMENTI DI GEOLOGIA

Modele géothermique – Modello geotermico

Rapport de synthèse – Relazione di sintesi

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié 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

 **Technimont**  
Civil Construction  
Dot. Ing. Aldo Mancarella  
Ordine Ingegneri Piemonte n. 6271



CODE DOC	P	D	2	C	3	B	T	S	3	0	1	0	4	A
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

A	P	N	O	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED		//	//	00	05	01	10	01
------------------------------	--	----	----	----	----	----	----	----

ECHELLE / SCALA
-

  
**LYON TURIN FERROVAIRE**

LTF sas - 1091 Avenue de la Boisse - BP 80631 - F-73006 CHAMBERY CEDEX (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 LTF Tous droits réservés - Proprietà LTF Tutti i diritti riservati

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



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

## SOMMAIRE / INDICE

RESUME/RIASSUNTO .....	3
1. INTRODUZIONE .....	6
1.1 Obiettivi dello studio .....	6
2. DATI UTILIZZATI.....	6
3. TUNNEL DI BASE.....	7
3.1 Falda dei Gessi.....	7
3.1.1 Diagrafie di temperatura del sondaggio F140.....	8
3.2 Massiccio d’Ambin.....	11
3.3 Zona a Scaglie Tettoniche (settore di Venaus) .....	12
3.4 Zona Piemontese.....	12
4. GALLERIE D’INTERCONNESSIONE.....	14
4.1 Massiccio Dora Maira.....	15
5. RISULTATI DELLA MODELLIZZAZIONE GEOTERMICA .....	15
6. ANALISI DEI RISULTATI.....	16
ALLEGATO 1 – PRINCIPI DELLA MODELLIZZAZIONE GEOTERMICA ESEGUITA IN APR 2006 .....	18

## RESUME/RIASSUNTO

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 secteur du Val de Susse. 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

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 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.

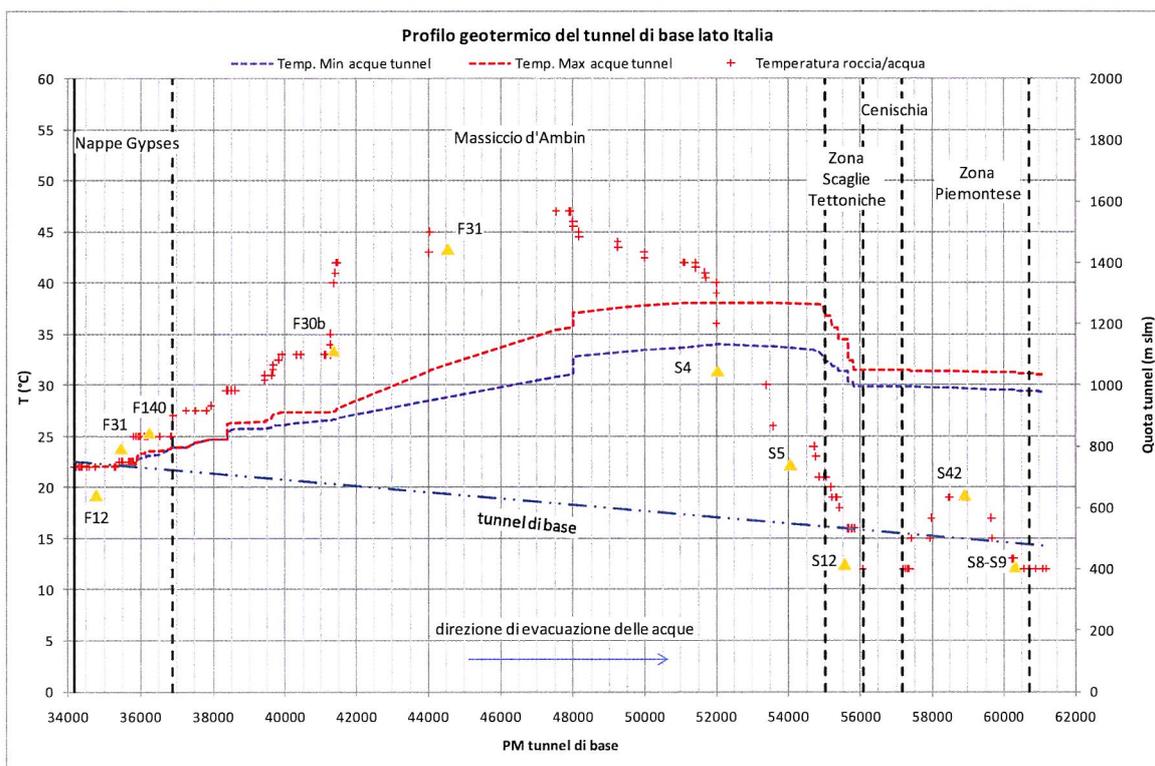
<i>Unità tettonica</i>	<i>Opera</i>	<i>Temperatura a quota tunnel</i>
		°C
Falda de Gessi		22 - 31
Massiccio d'Ambin	tunnel di base	21 - 47
Zona a Scaglie Tettoniche		12 - 22
Zona Piemontese	tunnel di base	10 - 20
Coperture Dora Maira	galleria. Int.	10 - 20

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.



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

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

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.

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

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 (Documenti “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) che, a sua volta, riprende aggiornato con i dati messi a disposizione da LTF In questa fase, il modello è stato aggiornato introducendo i dati di nuova acquisizione e in particolare quelli derivati dalle diagrafie del sondaggio F140 (cfr. § 3.1.1) perforato all’interno della Falda dei Gessi. Esso interseca la quota del tunnel di base alla pk 36+100 circa.

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 PD2 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.

Unità tettonica	Sondaggio	Opera	pk approssimativa	Temperatura
	codice		proiezione sull'asse delle opere	°C
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.

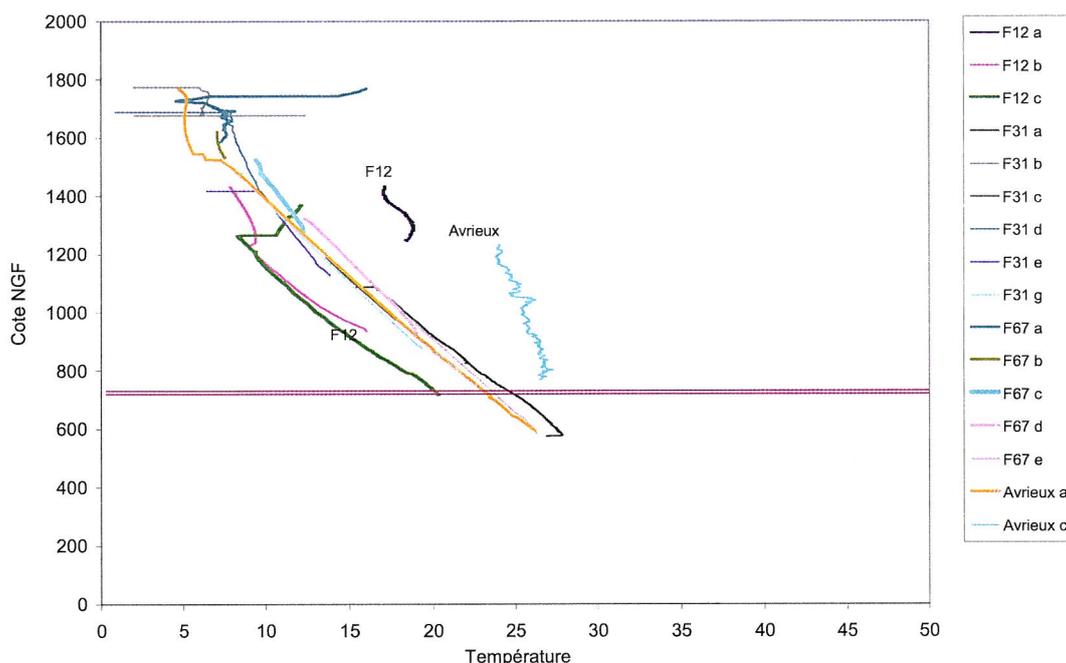


Figure 1 – Gradienti geotermici relativi alla zona della Falda dei Gessi. La linea orizzontale indica la quota approssimata del tunnel di base. In ogni sondaggio sono state realizzate più misurazioni contraddistinte dalle lettere a, b, c, ...

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.

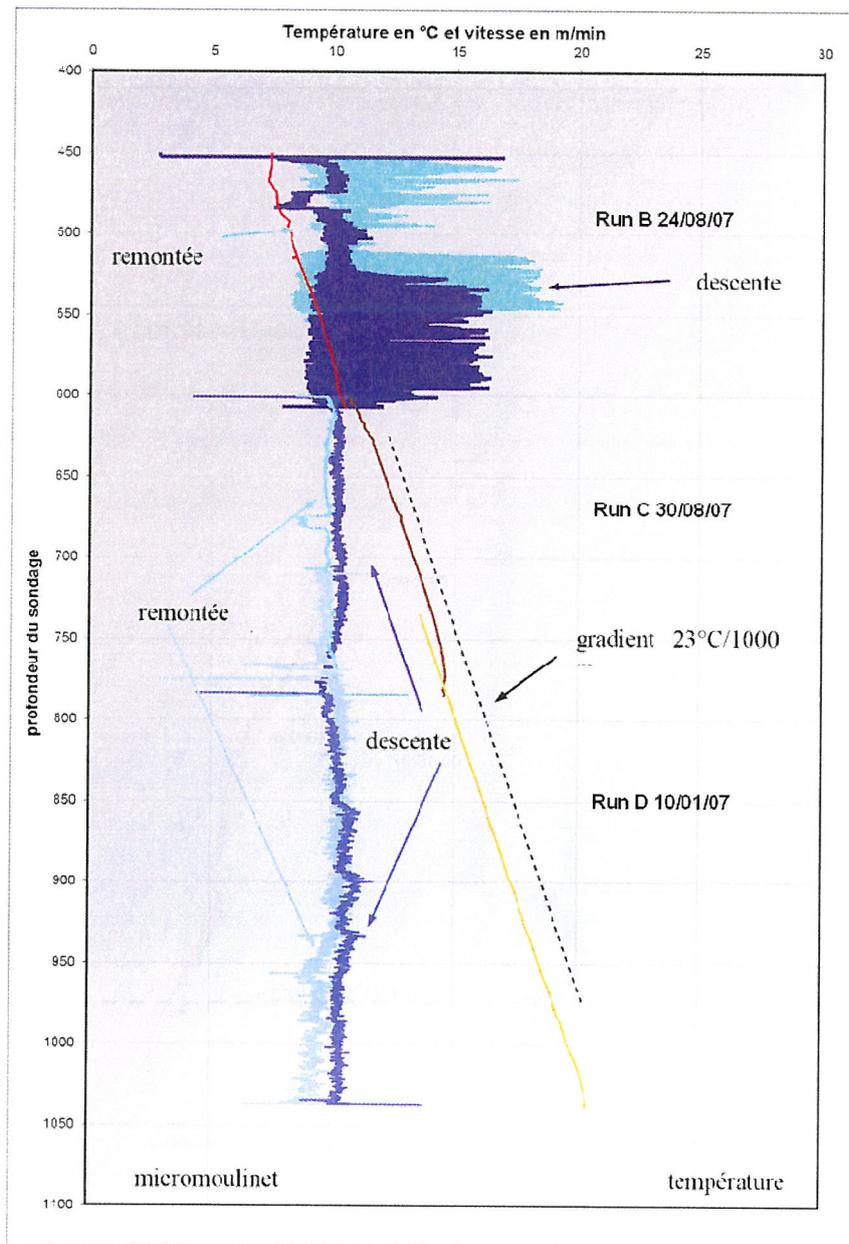


Figure 2 – Diagrafie eseguite nel sondaggio F140. Prova B :24/8/200 ; Prova C : 30/8/2007 ; Prova D : 10/1/2007

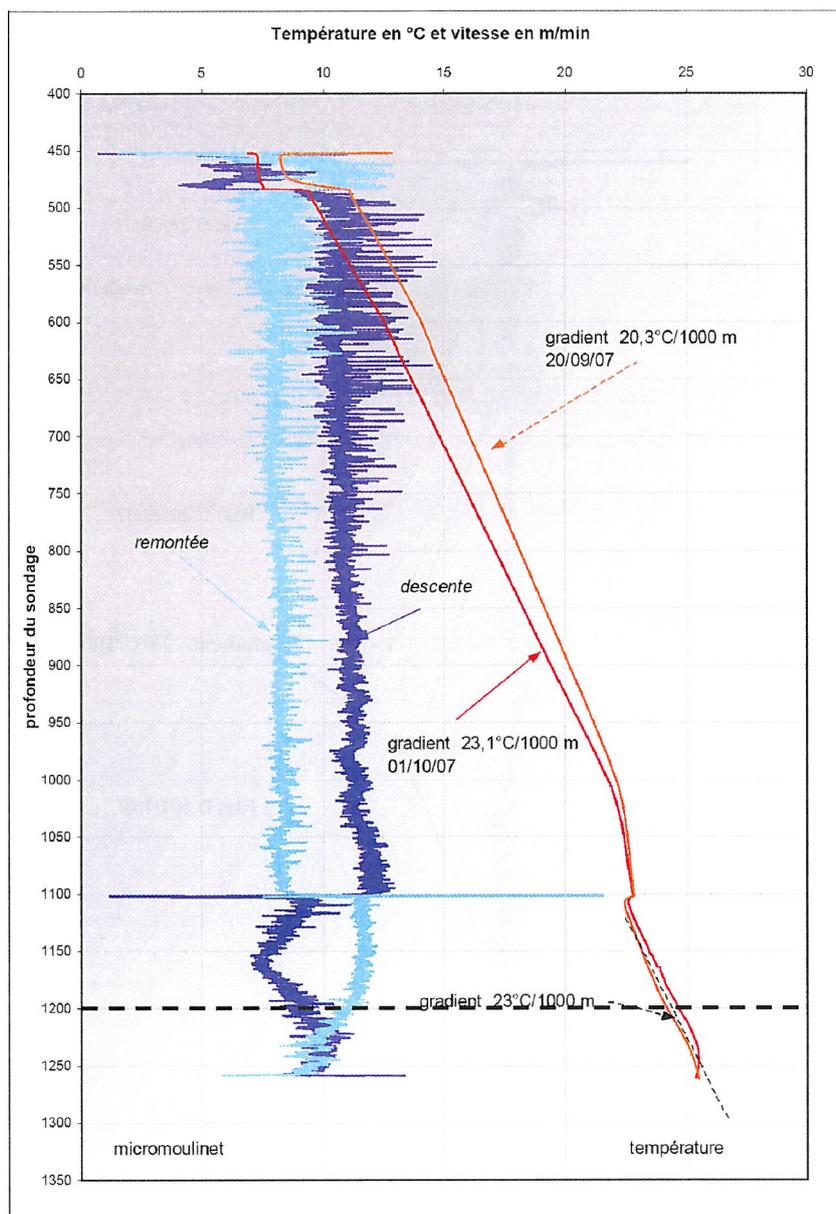


Figure 3 – Diagrafie eseguite nel sondaggio F140. Prova E :20/9/2007 Prova F : 1/10/2007. La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.

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 cinque confermano le condizioni termiche ipotizzate nelle fasi precedenti in 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.

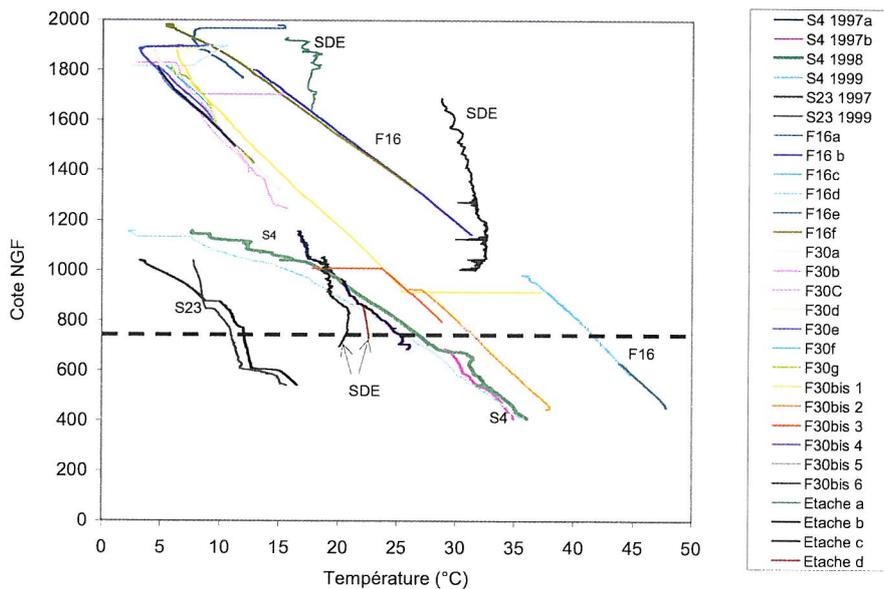


Figura 4 - Gradienti geotermici del Massiccio d'Ambin (SDE: sondaggio direzionale di Etache) La quota del tunnel di base nel settore indagato dall'SDE è indicata dalla linea tratteggiata nera..

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).

### 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.

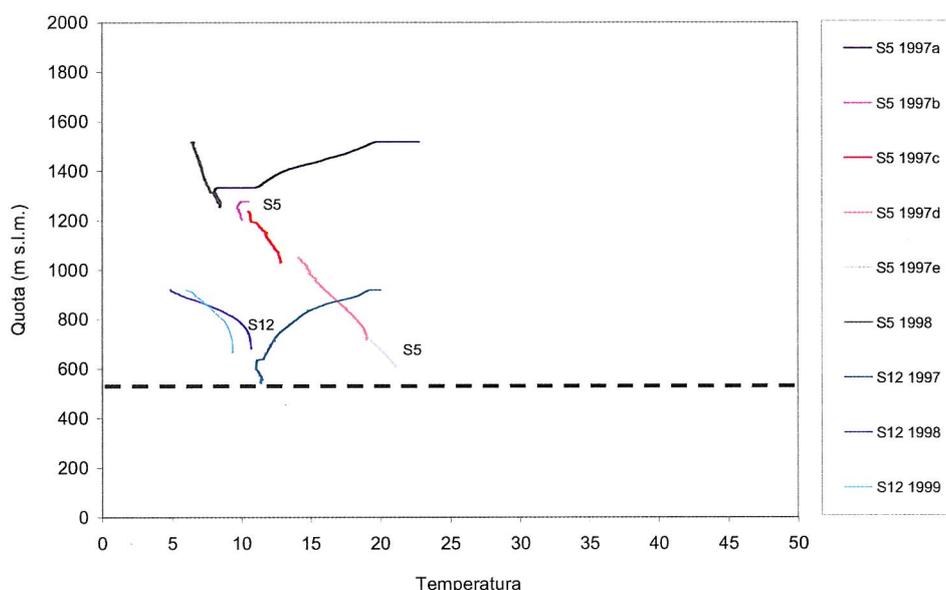


Figura 5 - Gradienti geotermici del settore della Zona a Scaglie Tettoniche (Venaus). La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.

### 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 6);

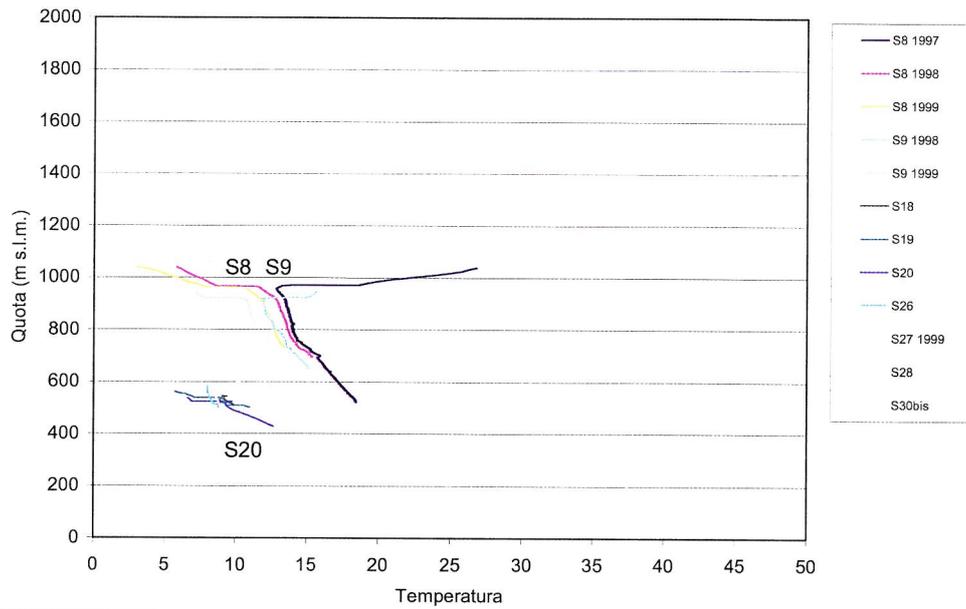


Figura 6 - Gradienti geotermici relativi alla Zona Piemontese. La quota del tunnel di base non è indicata in quanto i sondaggi sono stati realizzati distanti dall'asse del tracciato.

- 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.

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 7).

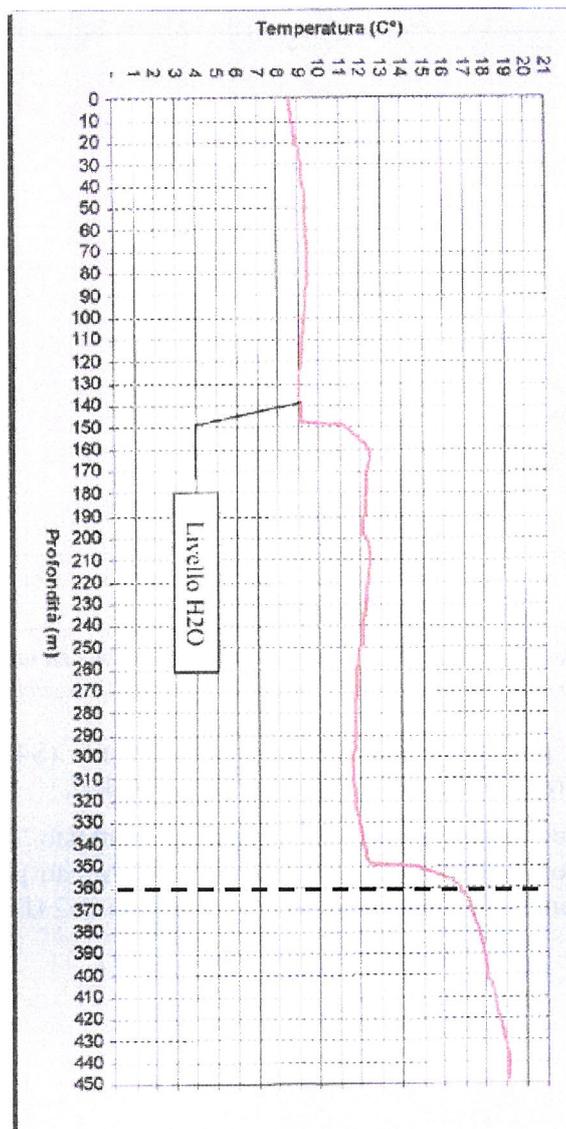


Figura 7 – Misure di temperatura misurate nel sondaggio S42. La testa del sondaggio è posto a quota 870 m slm circa. La quota del tunnel di base è circa pari a 500 m slm. La quota del tunnel di base è indicata dalla linea tratteggiata nera.

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.

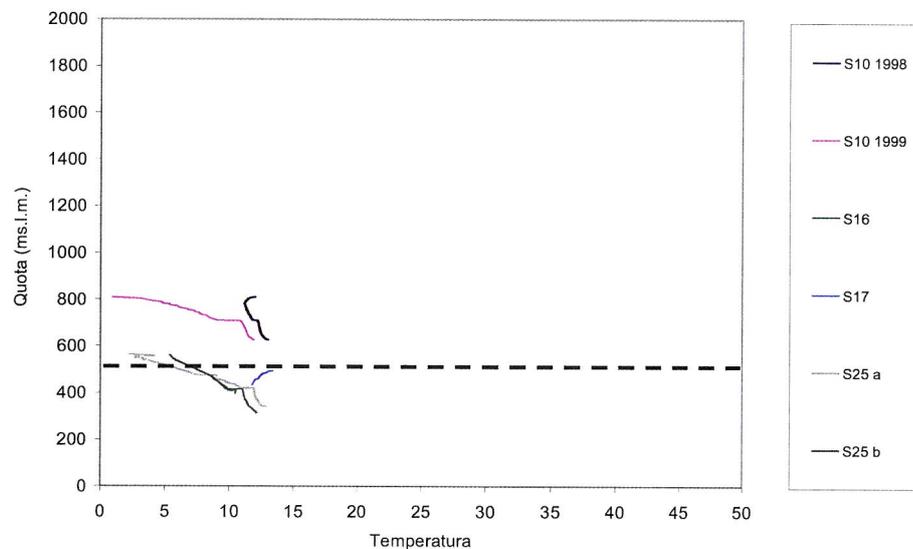


Figura 8 - Gradienti geotermici relativi al Massiccio Dora Maira. La linea tratteggiata nera indica la quota della galleria d'interconnessione. Si evidenzia che le misure rappresentate nel grafico sono realizzate lungo il versante sinistro della Valle di Susa opposto al versante interessato dalla galleria 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. 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 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.

In questa fase il modello è stato ripreso ed aggiornato. Lungo il profilo geotermico di Figura 9 la temperatura è stata estrapolata a partire da precedenti studi e risultati di sondaggi.

## 6. Analisi dei risultati

Gli elementi descritti nell'analisi che segue sono contenuti nella Figura 9.

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

Unità tettonica	Opera	Gradiente geotermico	Temperatura a quota tunnel
		°C/km	°C
Falda de Gessi		20 - 23	22 - 31
Massiccio d'Ambin	tunnel di base	25 - 33	21 - 47
Zona a Scaglie Tettoniche		16	12 - 22
Zona Piemontese	tunnel di base	17 - 25	10 - 20
Coperture Dora Maira	galleria. Int.	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 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.

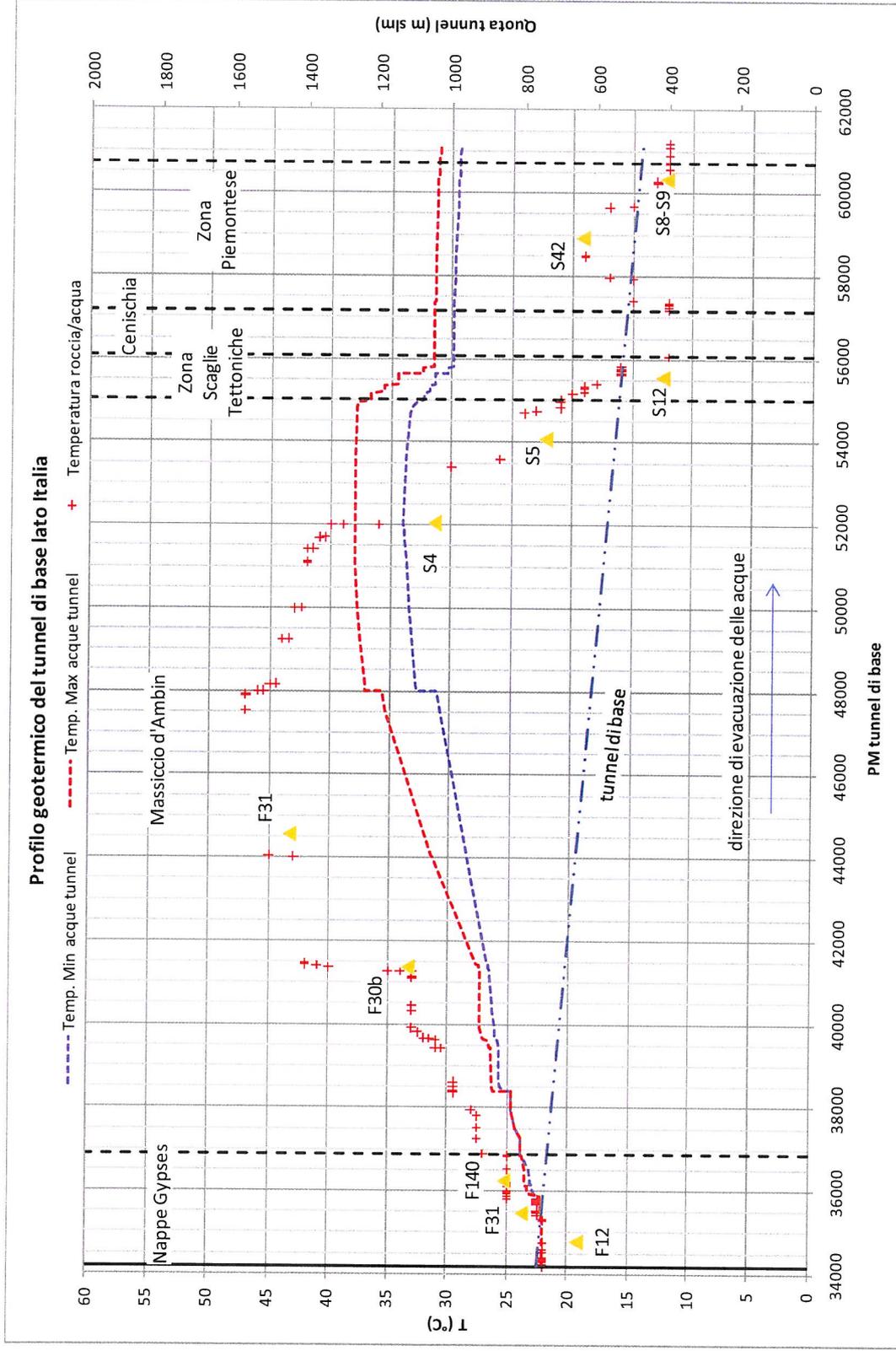


Figura 9 - Profilo geotermico previsionale del Tunnel di Base tra il punto alto (pk 34+170) e il portale di Susa (pk 61+197)

## 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-Etache, 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. Rock. Mech. Rock Engng*, 29 (1).