

LIAISON 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

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

GEOLOGIE – GEOLOGIA

GENERAL – GENERALE
COMPLEMENTS DE GEOLOGIE – COMPLEMENTI DI GEOLOGIA

NEOTECTONIQUE ET SISMICITE – NEOTETTONICA E SISMICITA'

RAPPORT NEOTECTONIQUE GENERAL – RELAZIONE NEOTETTONICA DI SINTESI

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	9/12/2012	Première diffusion / Prima emissione	I. STRINGA, G.W. BIANCHI (SEA)	R. TORRI C. OGNIENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	31/01/2013	Reception commentaires LTF / Recepimento commenti LTF	R. TORRI, G.W. BIANCHI (SEA)	R. TORRI C. OGNIENE	L. CHANTRON M. PANTALEO

 **Tecnimont
Civil Construction**
Dott. Ing. Aldo Marcarelle
Ordine Ingegneri Prov. CN n. 6471



CODE DOC	P	D	2	C	3	B	T	S	3	0	0	4	9	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	02	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

1. RESUME/RIASSUNTO	3
2. INQUADRAMENTO GENERALE	5
3. EVOLUZIONE POST-METAMORFICA DEL SETTORE DEL PROGETTO IN TERRITORIO ITALIANO	9
3.1 Sistemi di faglia principali.....	12
3.1.1 Sistema di faglie a direzione N20°E	12
3.1.2 Sistema di faglie a direzione N60°E	12
3.1.3 Sistema di faglie a direzione N100 - 120°E.....	12
3.2 Identificazione e definizione dei Domini Strutturali Omogenei.....	12
4. INQUADRAMENTO SISMO TETTONICO DEL SETTORE DEL PROGETTO IN TERRITORIO FRANCESE	22
4.1 Contesto neotettonico	22
4.2 Analisi morfotettonica	23
BIBLIOGRAFIA.....	25

1. RESUME/RIASSUNTO

En ce qui concerne les aspects liés à la sismicité et à la néotectonique, les études entreprises lors du projet de la ligne –Lyon - Turin (Séismotectonique et Néotectonique dans le secteur du tunnel Lyon - Turin, C. Sue, 2005) identifient des structures tectoniques potentiellement actives principalement dans la partie Ouest du tracé du Tunnel de Base, sur sol français, où elles constituent des failles principalement normales probablement liées en profondeur au front pennique. Dans ce secteur, le champ de contraintes actuel est dans l'ensemble de type extensif, avec une direction moyenne d'extension E - W.

Dans la partie orientale du tracé, en territoire italien, le champ de contraintes est également extensif. Une grande partie de la déformation mesurée par le GPS dans la zone se produit de manière asismique.

L'analyse de l'évolution du champ de contraintes montre une première phase extensive parallèle à la chaîne alpine et une deuxième phase extensive perpendiculaire à la chaîne, apparemment en continuité avec le champ de contraintes actuel.

Les études précédentes relatives à la néotectonique du secteur concerné par le tracé du Tunnel de Base (zone Venaus / Vallée de la Clarée / frontière d'État) indiquent qu'au sein de la zone en question deux phases de déformation en régime fragile se sont présentées l'une après l'autre, aux niveaux superficiels de la croûte.

La première phase (D1) est liée à des mouvements principalement décrochants, bien qu'avec une composante secondaire oblique ; la deuxième phase (D2) est une phase extensive, bien exprimée par la cinématique observée dans le socle cristallin, mais également dans les dépôts pliocènes - quaternaires. Il est raisonnablement possible de supposer que la phase D2 était active jusqu'au Pléistocène environ et que ses effets persistent encore de nos jours.

In relazione agli aspetti legati a sismicità e neotettonica, gli studi realizzati nell'ambito della progettazione della linea Torino – Lione (Sismotectonique et Néotectonique dans le secteur du tunnel Lyon – Turin, C. Sue, 2005) individuano delle strutture tettoniche potenzialmente attive principalmente nella parte occidentale del tracciato del Tunnel di Base, in territorio francese, dove costituiscono faglie prevalentemente normali probabilmente collegate in profondità al fronte pennidico. In questo settore il campo di stress attuale sarebbe nel complesso di tipo estensionale, con direzione media di estensione E - W.

Nella parte orientale del tracciato, in territorio italiano, il campo di stress sarebbe analogamente estensionale. Gran parte della deformazione misurata con GPS nell'area si produrrebbe in maniera asismica.

L'analisi dell'evoluzione del campo di stress mostrerebbe una prima fase estensionale in direzione parallela alla catena alpina e una seconda fase estensionale in direzione perpendicolare alla catena, apparentemente in continuità con il campo di stress attuale.

Gli studi precedenti sulla neotettonica del settore interessato dal tracciato del Tunnel di Base (zona Venaus/Val Clarea/Confine del Stato) indicano che nella zona presa in esame si sono succedute due fasi di deformazione in regime fragile, quindi a livelli crostali superficiali.

La prima fase (D1) è legata a movimenti prevalentemente trascorrenti, sia pur con una componente verticale; la seconda fase (D2) è una fase estensionale, ben espressa dai cinematismi osservabili nel basamento cristallino ma anche nei depositi pliocenico - quaternari. Si può ragionevolmente ipotizzare che la fase D2 sia stata attiva fino almeno al Pleistocene e che i suoi effetti perdurino a tutt'oggi.

Tutti gli elementi raccolti confermano, quindi, la presenza di un regime tettonico estensionale, con asse di compressione maggiore circa

Les éléments de l'étude, donc, confirment la présence d'un régime tectonique extensif avec l'axe de compression majeur quasiment vertical. L'orientation des deux axes horizontaux est plus incertaine, car ils tournent beaucoup d'un secteur à l'autre, ce qui pourrait lier l'orientation, variant d'une zone à l'autre, aux discontinuités contenant la déformation.

En général, il est probable qu'actuellement, dans la zone étudiée, un champ de déformation domine résultant de réajustements isostatiques, lesquels tendent à fractionner la lithosphère élastique en blocs de dimension de quelques dizaines de kilomètres carrés se soulevant en manière différenciée.

Sur la base des données relevées et de celles déjà disponibles dans la littérature, les systèmes de failles suivants caractérisant la zone d'étude ont été distingués :

- Système de failles en direction N20°E - Zone de cisaillement de Montpantero - Colle delle Finestre (ZTMF)
- Système de failles en direction N60°E - Moyenne Vallée de Susse et haute Vallée Chisone
- Système de failles en direction N100 - 120°E - Zone de faille du Sangone (ZFS)

verticale. L'orientation des deux axes horizontaux est plus incertaine, poiché essi ruotano sensibilmente passando da un settore all'altro, fatto da mettere in relazione con l'orientazione, variabile da zona a zona, delle discontinuità che accomodano la deformazione.

In generale sembra probabile che nell'area in esame domini attualmente un campo di deformazione effetto di riaggiustamenti isostatici, i quali tendono a frazionare la litosfera in blocchi della dimensione di alcune decine di chilometri quadrati che si sollevano in maniera differenziale.

Sulla base dei dati di rilevamento e di quelli già disponibili in letteratura, sono stati riconosciuti i seguenti sistemi di faglia che caratterizzano la zona di studio:

- Sistema di faglie a direzione N20°E - Zona di taglio Montpantero - Colle delle Finestre (ZTMF)
- Sistema di faglie a direzione N60°E - Media Val Susa e dell'alta Val Chisone
- Sistema di faglie a direzione N100 - 120°E - Zona di faglia del Sangone (ZFS)

2. Inquadramento generale

La sismicità delle Alpi è considerata essere di grado debole-moderato; in particolare, la sua estremità occidentale, in cui la zona di progetto è ubicata, è considerata di minore sismicità (Giardini et al., 1999). Tuttavia, gli studi di sismicità storica mostrano che le Alpi occidentali e la loro zona pedemontana sono state colpite da un certo numero di sismi distruttivi o potenzialmente distruttivi (Thouvenot et al., 1990, Fiih et al., 2003), le cui intensità epicentrali hanno potuto raggiungere grado IX (distruzioni maggiori) della scala MSK (Medvedev, Sponheuer, Kàrník) e le cui magnitudo stimate possono superare 6 (sisma di Basilea, Saint Niklaus o Lambesc, per esempio). Nella parte occidentale dell'arco alpino, le zone di sismicità più importanti, sono il Vallese ed i Grigioni sul territorio svizzero, il Brianzonese e la Provenza in Francia il Pinerolese, il Cuneese ed Imperiese in Italia mentre regioni appaiono quasi asismiche, come il Ticino in Svizzera ed il Vercors in Francia.

Da un punto di vista strumentale, i primi studi di sismicità alpina sono stati realizzati negli anni 20, con i lavori di Rothé, (1941). A partire dagli anni 80 (e soprattutto 90), con l'aumento delle reti sismologiche, è stato reso possibile lo studio meccanico della sismicità.

A partire dagli anni 90, gli studi sismotettonici regionali hanno evidenziato la presenza di un regime estensionale che caratterizza principalmente le zone interne della catena, ma anche settori situati in zone esterne, come il pianoro molassico svizzero (Maurer et al., 1997, Eva et al., 1998, Sue et al., 1999a, Baroux et al., 2001, Kastrup, 2002).

Se questo regime in estensione è bene caratterizzato, gli studi regionali hanno evidenziato l'occorrenza di sismi compressivi, esclusivamente localizzati in zone esterne della catena, a livello del fronte di Belledonne, della Provenza (nonché del margine Ligure), della pianura del Po e dell'est della Svizzera.

Dal punto di vista degli assi di deformazione pressione (assi P) e tensione (assi T) sismotettonica, tali fenomeni si integrano bene nei vari settori caratterizzati da un regime compressivo o estensivo. La coesistenza di strutture trascorrenti e di sovrascorrimenti indicherebbe che la regione è soggetta a movimenti a carattere transpressivo o transtensivo. Così, nei settori esterni, questi contribuiscono al riconoscimento di un ventaglio di assi compressivi (Eva and Solarino, 1998, Sue et al., 1999a, Baroux et al., 2001, Kastrup et al., 2004) perpendicolari all'asse di allungamento dell'arco alpino (già riconosciuto nei lavori di Fréchet, 1978, et Pavoni and Roth, 1990), a partire da una direzione NNW-SSE all'est della Svizzera fino ad una direzione NE-SW nel sud della Francia. Nelle zone interne, i fenomeni osservati sono compatibili con le direzioni regionali di estensione, N-S nel sud del Vallese ed E-W - NE-SW nel Brianzonnese e l'Argentera.

Gli studi di geodesia mostrano che l'attuale regime di deformazione della catena delle Alpi centrali/occidentali è caratterizzato da velocità ridotte di deformazione, dell'ordine di 1 a 2 mm all'anno (Gubler et al., 1981, Calais et al., 2002, Nocquet, 2002), sia nella dimensione verticale (tasso di sollevamento) che nella dimensione orizzontale (GPS). Le velocità orizzontali, misurate su una decina di anni tramite GPS (Calais, 1999, Calais et al., 2000, Calais et al., 2002, Vigny et al., 2002, Nocquet and Calais, 2003, 2004), mostrano velocità ridotte (dell'ordine di 1 - 2 mm all'anno) ed indicano sulla trasversale Lione-Torino, un regime di tipo estensivo ed una buona corrispondenza con il regime sismotettonico in estensione (Calais et al., 2002). Malgrado la buona corrispondenza qualitativa tra sismotettonica e geodesia, a tutt'oggi non è stata riconosciuta alcuna faglia in modo unanime tramite tecniche di geodesia, il che sottolinea l'importanza fondamentale delle analisi sismotettoniche.

Su più vasta scala, l'analisi delle misure GPS sembra indicare condizioni ai confini della catena di tipo rotazionali, con un polo di rotazione situato a nord di Milano ed una rotazione antioraria della

placca apula di 0.52"/Ma (Calais et al., 2002). Questo regime in rotazione, postulato sin dagli anni '70 da una parte dalla geometria ad arco della catena delle Alpi occidentali (Gidon, 1974, Anderson and Jackson, 1987, Ménard, 1988a, Vialon et al., 1989), e dall'altra dalle misure più recenti di paleomagnetismo e di modellizzazione analogica (Aubourg et al., 1999, Thomas et al., 1999, Collombet, 2001, Collombet et al., 2002), mostra che l'attuale regime tettonico e geodinamico dell'arco alpino deve essere analizzato con cautela.

La tettonica attiva è pertanto omogenea per zone ben individualizzate nella catena. E' globalmente caratterizzata da una zona in estensione che segue fedelmente la catena alpina, e da zone localmente in compressione ai piedi dell'orogene, nonché ovviamente sul suo fronte occidentale (prima di Belledonne), che nel retroterra (pianura del Po) (Delacou et al., 2004) (Figura 1).

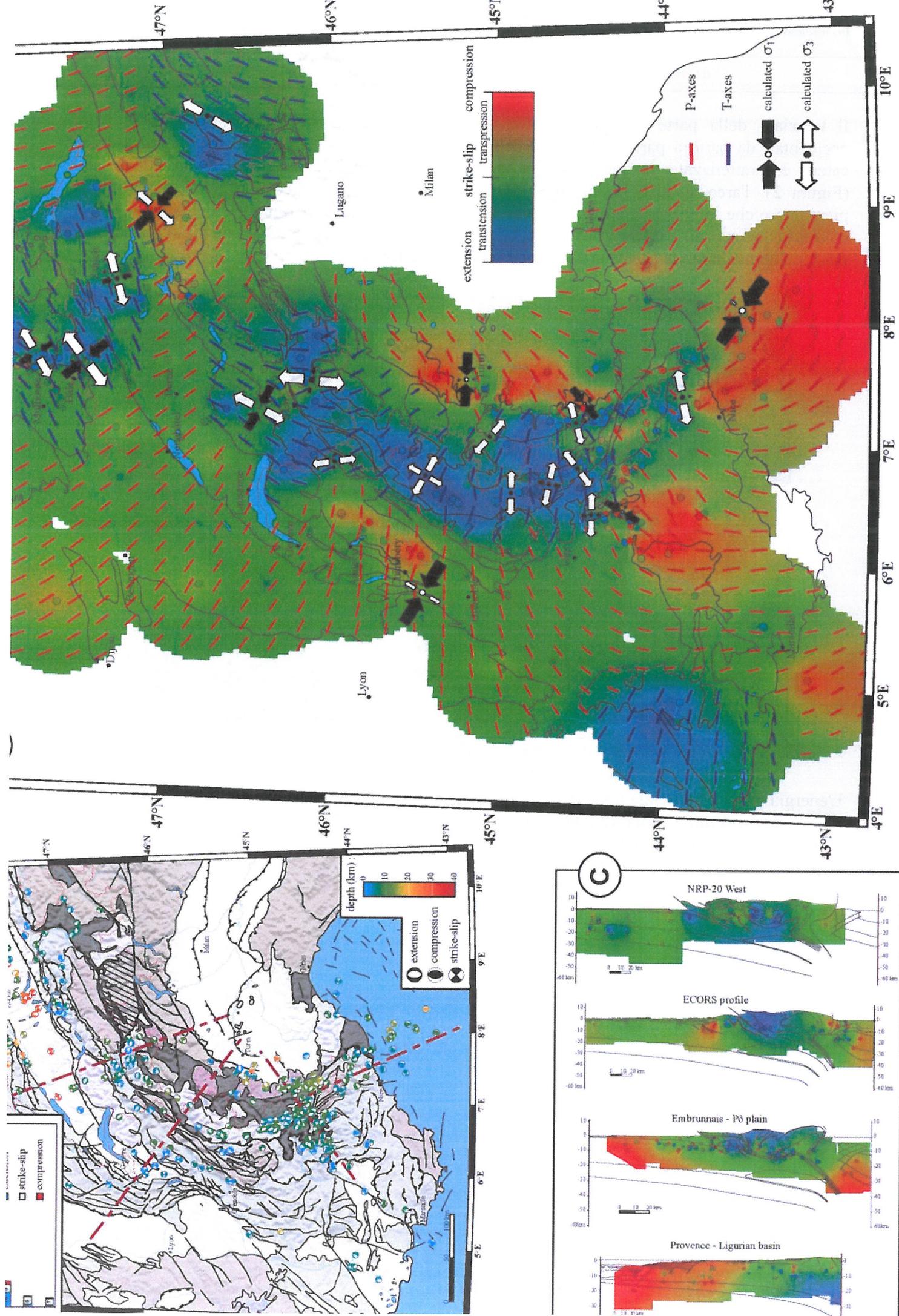


Figura 1 - Realizzazione della deformazione sismica e campi di deformazione/collocazione nell'arco alpino occidentale modificato secondo Delacroux et al (2004)

Il tracciato della parte comune italo-francese del progetto Lione-Torino attraversa le Alpi occidentali da parte a parte, dalla zona delfinese alla zona piemontese. L'attività sismica della catena è caratterizzata, in questo settore, da due archi sismici abbastanza ben individualizzati (Figura 2): l'arco sismico brianzonese, che segue il fronte pennidico a est, e l'arco sismico piemontese che interseca le strutture alpine di superficie, lungo il margine occidentale del corpo d'Ivrea (Sue et al., 1999a). Alla latitudine della galleria, l'attività sismica si concentra principalmente lungo la parte nord dell'arco sismico brianzonese.

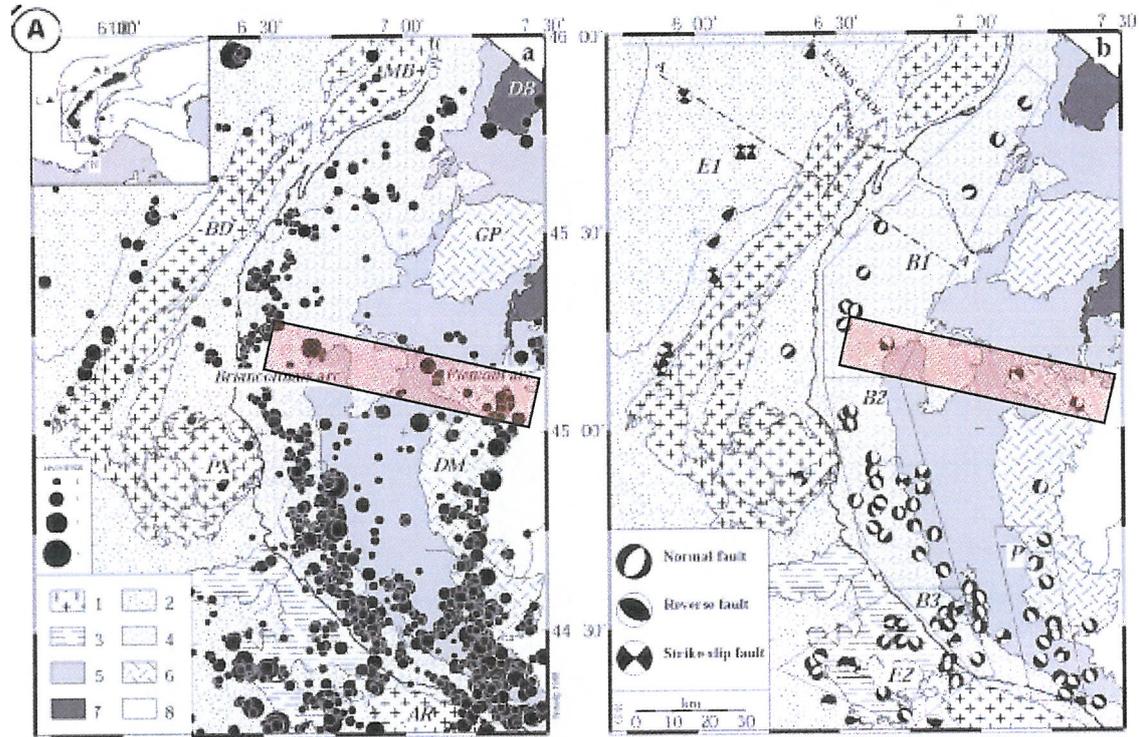


Figura 2 - Archi sismici brianzonnese e piemontese. Localizzazione e comportamento meccanico. Modificato secondo Sue et al. (1999a). Il rettangolo indica il settore di interesse del progetto NLTL.

L'energia sismica rilasciata nelle Alpi in generale e lungo l'arco brianzonnese in particolare rimane ridotta, e corrisponde in pratica a tassi di deformazione sismica dell'ordine del decimo di mm/anno al massimo (vedi qui di seguito per il confronto con i dati geodesici).

3. Evoluzione post-metamorfica del settore del progetto in territorio italiano

Secondo la Neotectonic Map of Italy il settore alpino in cui ricade il tracciato è caratterizzato da forti e continui movimenti a partire dal Pliocene fino al Quaternario con deformazioni normali e localmente trascorrenti. La realizzazione dei fogli della Carta Geologica d'Italia “Bardonecchia” (Polino et al., 2002) e “Susa” (Carraro et al., 2002) alla scala 1:50'000 e la tesi di dottorato di Perrone (2006) hanno individuato nel settore della Val Susa-Val Chisone alcune famiglie di faglie a carattere regionale che hanno dislocato l'assetto tettonostratigrafico e metamorfico preesistente.

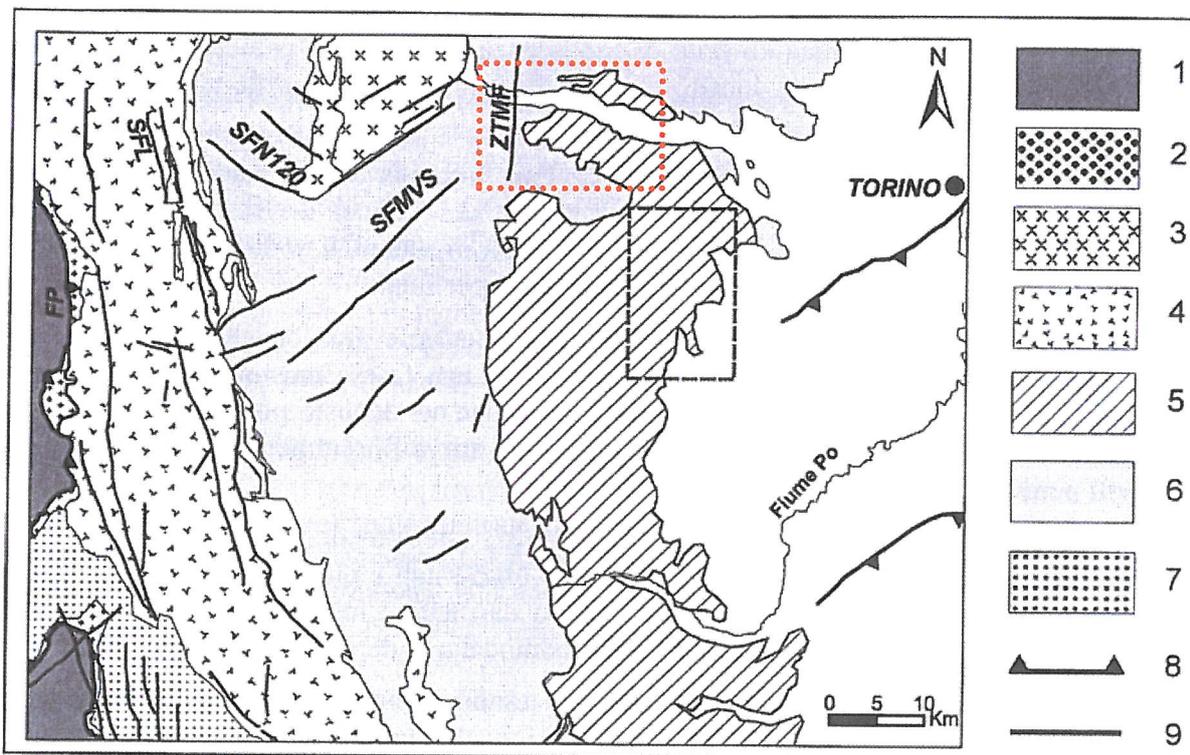


Figura 3 - Schema strutturale con i principali sistemi di faglie presenti nel settore delle Alpi Cozie-Marittime. 1) Dominio Elvetico; 2) Unità di copertura sub-brianzonesi; 3) Unità d'Ambin; 4) Unità Houiller; 5) Unità Dora-Maira; 6) Zona Piemontese; 7) Flysh a Elmintoidi; 8) sovrascorrimento; 9) faglie. SFL: Sistemi di faglie longitudinali; ZTMF: Zona di Taglio Mompantero-Colle delle Finestre; SFMVS: Sistema di faglie della Media Valle di Susa (N60°E); SFN120: sistema di faglie N100°E – N120°E. FP: Fronte Pennidico. (Tratto da Perrone, 2006). Il riquadro puntinato in arancione indica l'area di pertinenza del presente studio.

L'evoluzione post-metamorfica del settore può essere definita da tre principali fasi deformative (Perrone, 2006). Alla fase deformativa più antica oligocenica (datazione incerta) sono associate le faglie transtensive sinistre a direzione E - W (faglia del Sangone) e, più dubitativamente, le faglie parallele agli assi vallivi della Val Chisone e della bassa Val Susa. Alla seconda fase deformativa sono associati i movimenti destri lungo la faglia Pinasca - Gran Dubbione, i movimenti inversi lungo la faglia di Porte - Malanaggio e la trascorrenza destra lungo la Zona di Taglio Mompantero Colle delle Finestra (ZTMF); gli assi di raccorciamento sono orientati circa ENE - WSW e sono riferibili al periodo Chattiano - tardo Burdigaliano. L'ultima fase potrebbe essere interpretabile come un effetto della transpressione alla scala della catena alpina, che ha indotto il graduale sollevamento della catena ed il conseguente collassamento.

Solo le zone di faglia del Sangone e di Pinasca - Gran Dubbione possono essere associate, anche se la profondità degli ipocentri impone una certa cautela, alla sismicità osservata in quanto le risoluzioni focali sono compatibili con l'evoluzione post-metamorfica individuata sul terreno (Perrone, 2006).

Nella parte italiana dell'opera in progetto, il campo di stress sarebbe estensionale. Gran parte della deformazione misurata con GPS nell'area si produrrebbe in maniera asismica con tassi di deformazione estremamente bassi (Perrone, 2006).

L'evoluzione del campo di stress sembra mostrare una prima fase estensionale in direzione parallela alla catena alpina (movimenti trascorrenti con compressione lungo assi con direzione da NNE-SSW a NE-SW ed estensione NW-SE / E-W) e una seconda fase estensionale in direzione perpendicolare alla catena (con faglie normali con compressione lungo piani subverticali ed estensione E-W / NW-SE), apparentemente in continuità con il campo di stress attuale.

I dati presentati, che rappresentano lo stato di conoscenza attuale, sono comunque molto generali, e potrebbero beneficiare, a livello locale, di un'analisi cinematica approfondita sulle principali strutture tettoniche affioranti nel settore di studio.

I dati presentati nello studio eseguito nel 1999 da Pont Ventoux S.c.r.l. per conto di Alpetunnel sulla neotettonica del settore interessato dal tracciato del Tunnel di Base (zona Venaus/Val Clarea/Confine dei Stato) indicano che nella zona presa in esame si sono succedute due fasi di deformazione in regime fragile, quindi a livelli crostali superficiali.

La prima fase (D1) è legata a movimenti prevalentemente trascorrenti, sia pur con una componente secondaria obliqua; la seconda fase (D2) è una fase estensionale, ben espressa dai cinematismi osservabili nel basamento cristallino ma anche nei depositi pliocenico - quaternari. Si può ragionevolmente ipotizzare che la fase D2 sia stata attiva fino almeno al Pleistocene e che i suoi effetti perdurino a tutt'oggi.

Lo studio conferma la presenza di un regime tettonico estensionale, con asse di compressione maggiore circa verticale. L'orientazione dei due assi orizzontali è più incerta, poiché essi ruotano sensibilmente passando da un settore all'altro, fatto da mettere in relazione con l'orientazione, variabile da zona a zona, delle discontinuità che accomodano la deformazione.

In generale sembra probabile che nell'area in esame domini attualmente un campo di deformazione effetto di riaggiustamenti isostatici, i quali tendono a frazionare la litosfera in blocchi della dimensione di alcune decine di chilometri quadrati che si sollevano in maniera differenziale.

In particolare sembra probabile che il settore più esterno del massiccio di Ambin, come già proposto da Polino et al. (1999) si sollevi rispetto a quello più interno e al versante destro della Valle di Susa. Le discontinuità che svincolano questi sollevamenti differenziali sono rappresentate dalle zone di taglio con orientazione N100E - N120E della zona del Monte Seguret, e dalla zona di taglio con orientazione N60E di Salbertrand - Exilles, nonché dai sistemi di faglie con direzione analoga del settore di Venaus. Verso est la discontinuità con direzione N - S di Colle delle Finestre - Mompantero sembra inoltre separare due settori con comportamento deformativo differente. Ciò suggerisce che questa discontinuità costituisca un'importante fascia di svincolo strutturale, che probabilmente accomoda movimenti di abbassamento relativo del blocco ovest rispetto a quello est. L'importanza di questa fascia sembra anche testimoniata dalla sismicità di questo settore, l'unico dell'area di studio a presentare epicentri noti.

Le conclusioni di questo studio contrastano con i dati di stress in sito ottenuti con le prove di fratturazione idraulica nel sondaggio S4 realizzato da Alpetunnel, che testimoniano compressione sul piano orizzontale in direzione NE - SW. I dati ottenuti dall'analisi strutturale non contrastano invece con i risultati ottenuti dalle prove di fratturazione nei sondaggi S5, S8 e S9, dove però si ha una forte influenza della topografia essendo tali sondaggi localizzati in posizione parietale lungo versanti montani.

RAPPORT NEOTECTONIQUE GENERAL – RELAZIONE NEOTETTONICA DI SINTESI

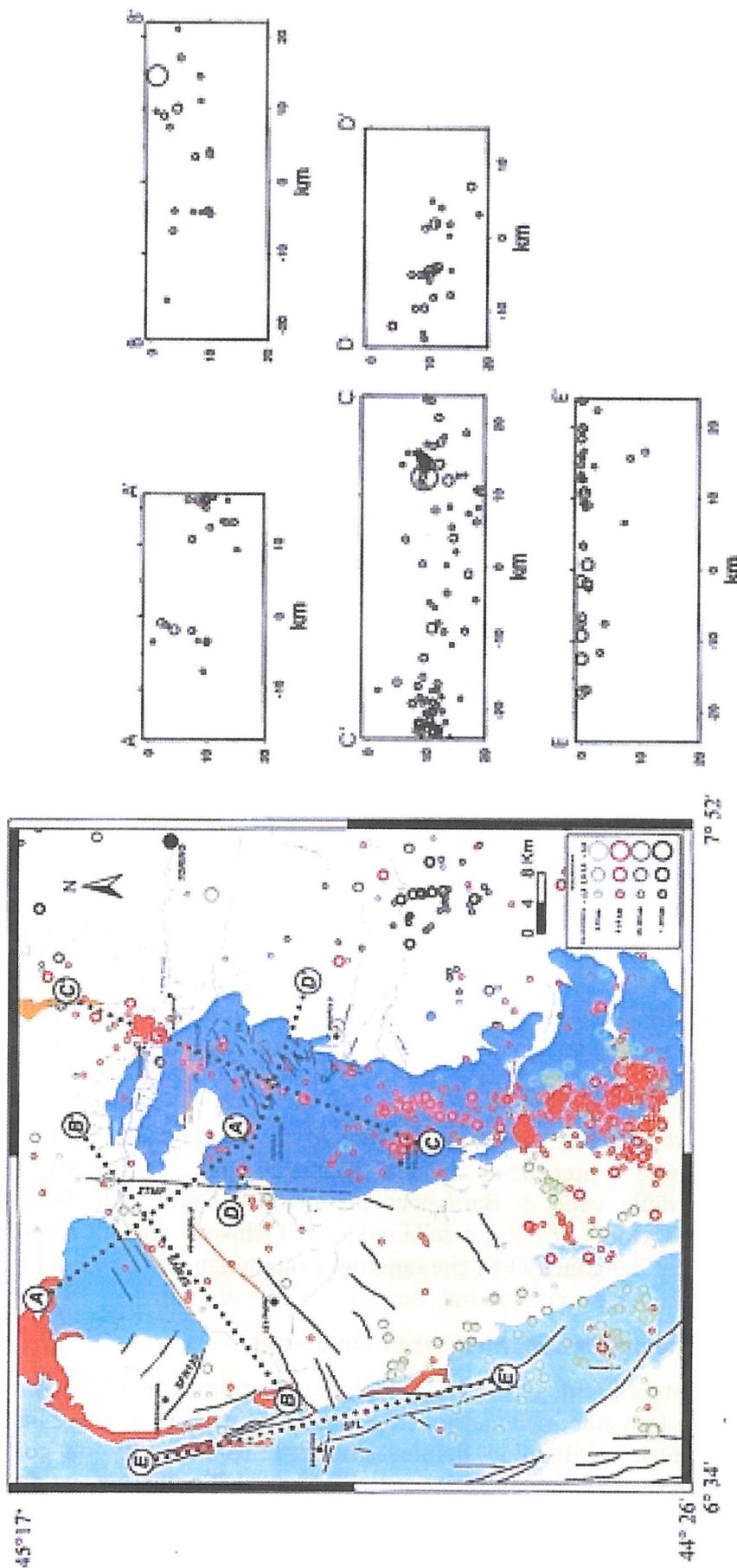


Figura 4 - Mappa della sismicità con errore di localizzazione minore di 3 km e principali sistemi di faglie presenti nelle Alpi Cozie. Linee nere: faglie incerte; linee rosse: faglie con indizi morfotettonici di attività recente. Gli epicentri sono stati indicati con cerchi di dimensione e colore diversi secondo la magnitudo (minore di 2,5, da 2,5 a 3,5 e maggiore di 3,5) e la profondità (tra 0 e 5 km, tra 5 e 15 km, tra 15 e 30 km e oltre 30 km) dell'evento sismico. Le linee a punti neri indicano le tracce delle sezioni sismiche riportate a lato della mappa.

3.1 Sistemi di faglia principali

3.1.1 Sistema di faglie a direzione N20°E

La Zona di taglio Mompantero - Colle delle Finestre (ZTMF) è un'importante struttura a direzione media NNE-SSW ben visibile dal colle delle Finestre fino a Mompantero (Cadoppi et al., 2002) e che sembra estendersi anche verso nord (alta valle di Viù; Fudral et al., 1994 a,b) e verso sud, dove una serie di allineamenti di elementi morfologici fa supporre la sua prosecuzione fino a Nizza ("lineamento Cenischia - Nizza", Casati & Giovacchini, 1977).

Nel settore della Val Susa, dove la struttura è ben visibile, studi sulla distribuzione ed età delle tracce di fissione (Cadoppi et al., 2002b, Cadoppi & Tallone, 2002) indicano probabili movimenti polifasici (da trascorrente destra a normale) a partire dal Burdigaliano fino al Plio-Pleistocene, come testimoniato da piccole faglie N-S che dislocano i depositi glaciali presso la chiesetta di Seghino (Mompantero).

In alta valle Susa e nell'alta Maurienne sono presenti faglie a direzione N-S che tagliano le unità ofiolitiche e continentali con rigetti stimati nell'ordine di diverse migliaia di metri e che sono state trascorrenti destre tra l'Oligocene e il Miocene e successivamente riattivate come faglie normali (Polino et al., 2002; Malusà, 2004). Questo sistema di faglie corrisponde al sistema di faglie normali di Modane – Termignon - Ruisseau de Chaviere e alla faglia Bessans - P.te d'Andagn sul lato sinistro della valle dell'Arc (Fudral et al., 1994 a,b).

3.1.2 Sistema di faglie a direzione N60°E

Il sistema è presente nel settore della media Val Susa e dell'alta Val Chisone (i cui rispettivi fondovalle sono ad esso paralleli) con strutture di lunghezza plurichilometrica che dislocano l'assetto tettono-stratigrafico e metamorfico preesistente (Polino et al., 2002; Giardino & Polino, 1997). L'attività di questo sistema di faglie evolve da trascorrente destra, tra l'Oligocene e il Miocene, a normale a partire dal Miocene (Malusà, 2004). L'attività recente è testimoniata da faglie che dislocano breccie carbonatiche residuali presso il M.te Seguret (datate al Plio - Pleistocene) e superfici glaciali montonate presso le pendici meridionali del M.te Niblè.

A questo sistema appartengono importanti zone di faglia rilevate nel settore del Col Clapier (cfr. studi eseguiti dal DST nel 2005 - 2006), nonché la nota Faglia di Venaus, intercettata dalle gallerie del nodo centrale dell'impianto idroelettrico di Pont Ventoux, infine, ipoteticamente, le strutture che caratterizzerebbero le zone a scaglie tettoniche descritte al presenti nel settore di Venaus.

3.1.3 Sistema di faglie a direzione N100 - 120°E

Tali sistema è stato individuato tra Oulx e Bardonecchia ed è caratterizzato da movimenti estensionali (Malusà, 2004). Come il precedente, questo sistema di faglie controlla fortemente l'andamento degli assi vallivi della valle di Bardonecchia, media e bassa valle Susa (faglia presunta riportata sullo Structural Model of Italy) e della media Val Chisone. In Val Sangone esso corrisponde alla Zona di faglia del Sangone (ZFS) che raggiunge una lunghezza di 4 km circa, con indicatori cinematici che testimoniano movimenti trascorrenti sinistri e normali.

3.2 Identificazione e definizione dei Domini Strutturali Omogenei

La definizione dei Domini Strutturali Omogenei (DSO) si fonda sul rilievo di superficie dei dati strutturali duttili e fragili e sulla loro elaborazione statistica. Lo scopo è di definire una partizione delle diverse porzioni di territorio studiato in domini strutturali caratterizzati da condizioni omogenee dello stress tettonico all'origine della fratturazione dell'ammasso e della sua distribuzione nello spazio. Nella definizione dei domini riconosciuti nell'ambito del presente studio si è tenuto in conto dei seguenti elementi strutturali:

- Andamento della scistosità principale
- Orientazione delle zone di faglia

In funzione dell'andamento della scistosità e, soprattutto, dell'orientazione delle zone di faglia (sia osservate nell'ambito del presente studio sia ricavate dai dati bibliografici), l'area di studio è stata suddivisa in N. 3 Domini Strutturali Omogenei (Figura 5):

- Dominio Strutturale Ambin – Venaus
- Dominio Strutturale Mompantero
- Dominio Strutturale dell'Orsiera

I limiti dei 3 domini identificati non sono ovviamente netti in quanto la transizione tra un contesto strutturale e quello adiacente è in genere graduale (ad esempio per aumento della spaziatura tra le faglie di uno stesso sistema e incremento della spaziatura tra le faglie di un altro sistema).

RAPPORT NEOTECTONIQUE GENERAL – RELAZIONE NEOTETTONICA DI SINTESI

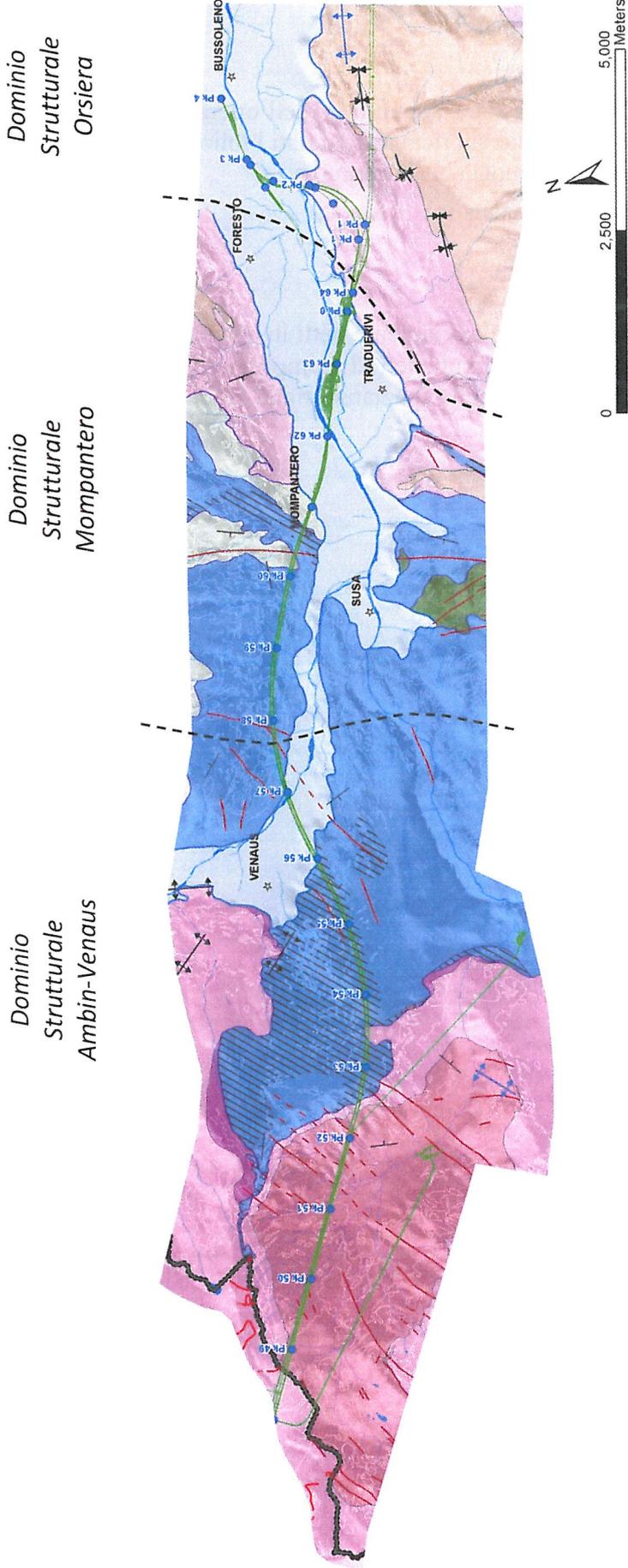


Figura 5 - Schema tettonico del corridoio di studio con individuazione dei Domini Strutturali Omogenei

3.2.1 Dominio strutturale Ambin - Venaus

Il dominio strutturale Ambin - Venaus si estende, lungo il tracciato, dal confine di stato fino alla val Cenischia, e comprende le seguenti unità tettono – metamorfiche:

- Unità di Ambin: Basamento pre-triassico, Complesso di Clarea e Copertura Mesozoica Parautoctona;
- Zona a Scaglie;
- Parte della Zona Piemontese ovvero parte delle Unità di Fossa Puys - Venaus e associate Unità Oceaniche.

Per quanto riguarda l'assetto strutturale duttile, il dominio Ambin – Venaus è caratterizzato da una scistosità pervasiva immergente principalmente verso SE secondo angoli di immersione medi (40° - 60°).

L'assetto strutturale fragile del dominio Ambin – Venaus, caratterizzato dalla dominanza di zone di faglia principali con orientazione NE-SW e immersione verso SE secondo angoli elevati, è descritto in letteratura (Perrone, 2006 con referenze) e denominato “Sistema di Faglie della Media Val Susa”. Nell'ambito del presente studio il sistema dominante in questo settore è stato denominato SF1.

Sono inoltre presenti altri tre sistemi di faglie:

- un sistema con orientazione E/NE-W/SW (SF2): sono stati osservate strutture immergenti a SE e strutture coniugate immergenti a NW, con angoli generalmente medi (circa 50°);
- un sistema con orientazione circa N-S (SF3) e immergente a E;
- un sistema con orientazione NW-SE (SF4) formato da faglie coniugate immergenti verso NE o verso SW.

Questi ultimi tre sistemi corrispondono anche ai sistemi di giunti identificati per questo dominio, come illustrato in Figura 6. Le orientazioni dei piani di scistosità sono riportate in

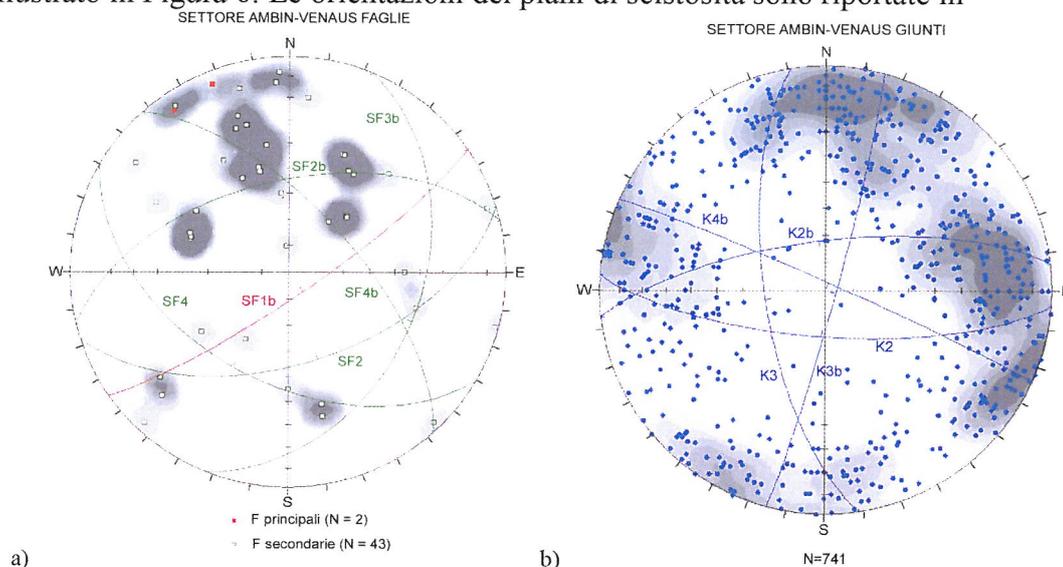


Figura 6 - Dominio Strutturale Ambin – Venaus. a) Proiezione dei poli dei piani di faglia principali e secondari e relative ciclografiche; b) proiezione dei poli delle superfici dei differenti sistemi di giunti e relative ciclografiche (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore)

In base alle misure effettuate relative alle superfici di scistosità, ai piani assiali e agli assi di piega (cfr. Figura 7) si possono fornire le seguenti osservazioni:

- per quanto riguarda le superfici di scistosità si osservano due picchi, uno relativo a superfici immergenti a SE e uno relativo a superfici immergenti a S - SW. Sono inoltre osservabili poli di scistosità indicativi di superfici coniugate rispetto alle precedenti, ovvero immergenti a NW e a NE;
- per quanto riguarda i piani assiali delle pieghe di fase D3, il numero delle misure disponibili appare poco rappresentativo. Tuttavia sono identificabili piani assiali immergenti a SW e subordinatamente a NE;
- gli assi di piega di fase D2 e D3 appaiono molto dispersi. Gli assi di pieghe di fase D2 risultano dispersi secondo varie direttrici e con angoli di immersione bassi. Gli assi di piega di fase D3 risultano orientati secondo direzioni NE - SW e secondo direzioni W/NW - E/SE, anch'essi con angoli di immersione generalmente bassi.

In base a tali osservazioni si possono fornire le seguenti interpretazioni:

- le giaciture delle superfici di scistosità sono indicative della presenza di pieghe di tipo aperto, asimmetriche, con fianchi lunghi immergenti verso SE o S - SW e fianchi corti immergenti verso i quadranti opposti. Statisticamente, infatti, il numero delle misure rilevate viene effettuato in corrispondenza dei fianchi lunghi che quindi sono rappresentati da un numero maggiore di misure. La dispersione delle superfici di scistosità relative ai fianchi lunghi delle pieghe (immersione a SE e a S - SW) potrebbe essere indicativa di una fase plicativa successiva (D4?) con assi orientati circa N - S;
- le misure disponibili dei piani assiali D3 confermano il quadro descritto al punto precedente: i piani assiali immergenti a SW sono responsabili delle pieghe con scistosità immergente da NE a SW, i piani assiali immergenti a NW sono responsabili delle flessioni delle superfici di scistosità immergenti da SE a NW;
- tale quadro è confermato dall'orientazione degli assi delle pieghe di fase D3, le cui direzioni principali risultano infatti circa ortogonali rispetto a quelle dei piani assiali descritti al punto precedente. Va sottolineato, a questo proposito, che la dispersione degli assi di piega potrebbe confermare la presenza di una quarta fase plicativa, tardiva e relativa a condizioni “quasi - fragili”.

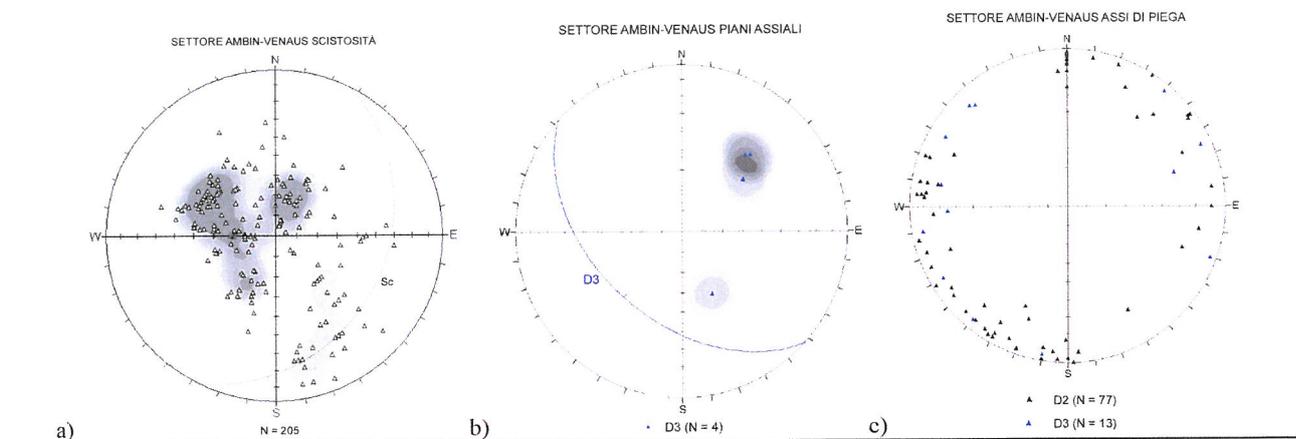


Figura 7 - Dominio Strutturale Ambin – Venaus. a) Proiezione dei poli dei piani di scistosità e cerchio massimo relativo al picco di concentrazione dei poli di scistosità (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore); b) Proiezione dei poli dei piani assiali delle pieghe di fase D3 e cerchio massimo relativo al picco di concentrazione dei poli di piano assiale; c) Proiezione degli assi di piega di fase D2 e di fase D3 (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore)

Le giaciture delle superfici di scistosità sono indicative della presenza di pieghe di tipo aperto, asimmetriche, con fianchi lunghi immergenti verso SE o S - SW e fianchi corti immergenti verso i

quadranti opposti. Statisticamente, infatti, il numero delle misure rilevate viene effettuato in corrispondenza dei fianchi lunghi che quindi sono rappresentati da un numero maggiore di misure. La dispersione delle superfici di scistosità relative ai fianchi lunghi delle pieghe (immersione a SE e a S - SW) potrebbe essere indicativa di una fase plicativa successiva (D4?) con assi orientati circa N - S

3.2.2 Dominio strutturale Mompantero

Il dominio strutturale di Mompantero si estende tra la zona dell'imbocco di valle del Tunnel di Base e la zona dell'imbocco di monte dell'interconnessione.

Le unità tettono - metamorfiche comprese in questo dominio sono le seguenti:

- Parte della Zona Piemontese con le Unità di Fossa Puys – Venaus e le Unità ofioliti che localmente associate;
- L'Unità Incertae Sedis (Zona a Scaglie di Cantalupo);
- Parte dell'Unità Dora Maira (Basamento pre - triassico e relativa copertura permomesozoica).

Il sistema di faglie principale dominante è orientato secondo direzioni N - S secondo angoli elevati (sistema SF3). A questo sistema appartengono anche strutture secondarie, per lo più orientate in direzione NE - SW.

Sono inoltre presenti le seguenti zone di faglia secondarie:

- SF2 con orientazione circa E - W;
- SF4 con orientazione NW - SE.

In questo settore non sono invece state osservate strutture del sistema SF1 che rappresentano le strutture dominanti nel dominio Ambin - Venaus.

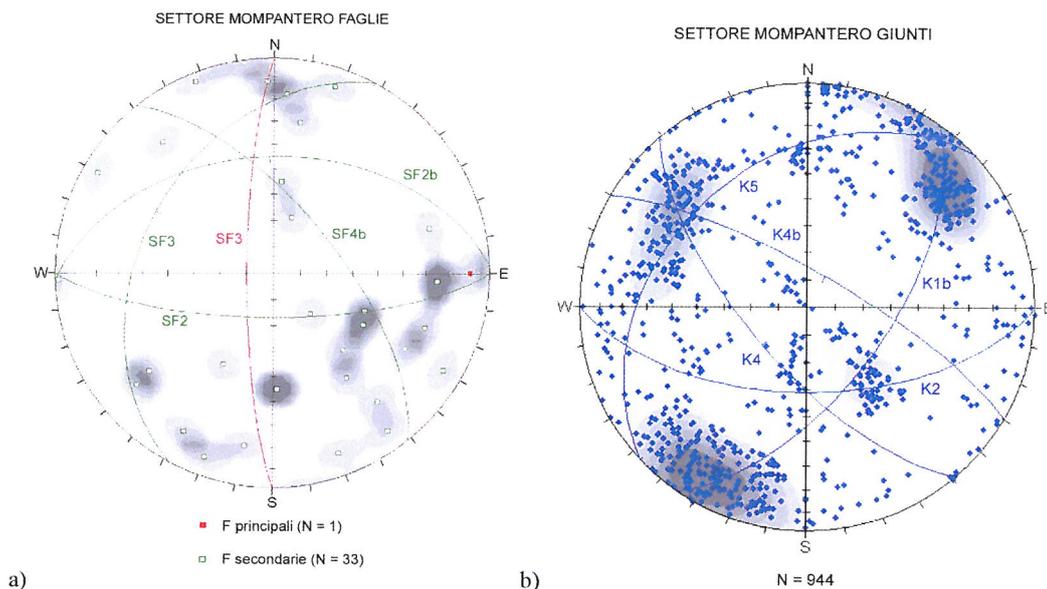


Figura 8 - Dominio Strutturale Mompantero. a) Proiezione dei poli dei piani di faglia principali e secondari e relative ciclografiche; b) proiezione dei poli delle superfici dei differenti sistemi di giunti e relative ciclografiche (reticolo equiareo di Schmidt, emisfero inferiore)

Per quanto riguarda i sistemi di giunti riconosciuti, alcuni di questi mostrano orientazioni analoghe a quelle delle zone di faglia rilevate in questo dominio (K2 e K4 circa coincidenti con i sistemi SF2 e SF4); altri sistemi non sono invece direttamente riconducibili ai sistemi di faglie predominanti in questo dominio (K1 e K5).

Il dominio strutturale di Mompantero è caratterizzato da superfici di scistosità immergenti principalmente verso W - NW. La proiezione dei poli delle superfici di scistosità (Figura 9) mette in evidenza la presenza di due picchi di concentrazione: un picco, principale, relativo a superfici immergenti verso NW e un picco secondario relativo a superfici immergenti verso W - NW. Tale andamento delle superfici di scistosità potrebbe essere interpretato come dovuto a pieghe di tipo isoclinale (ad esempio di fase D2) i cui fianchi presentano direzioni di immersione molto simili. Locali dispersioni potrebbero essere invece dovute all'effetto di fasi plicative successive (D3).

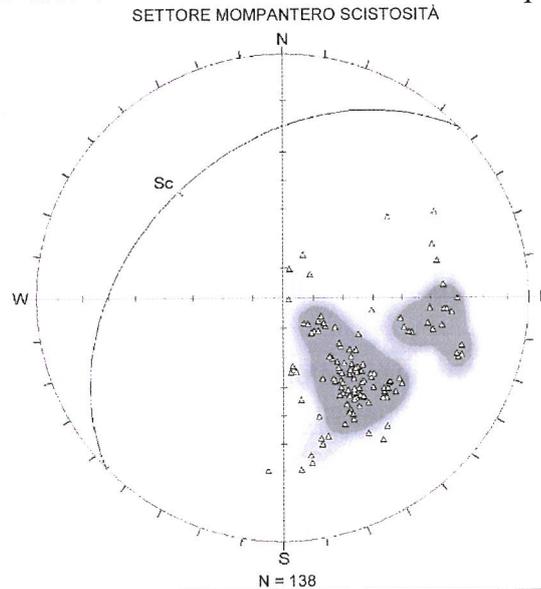


Figura 9 - Dominio Strutturale Mompantero. Proiezione dei poli dei piani di scistosità e cerchio massimo relativo al picco di concentrazione dei poli di scistosità (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore)

Tale interpretazione appare confermata dall'orientazione degli assi di piega di fase D2 (Figura 10), per lo più concentrati secondo la direzione NW - SE.

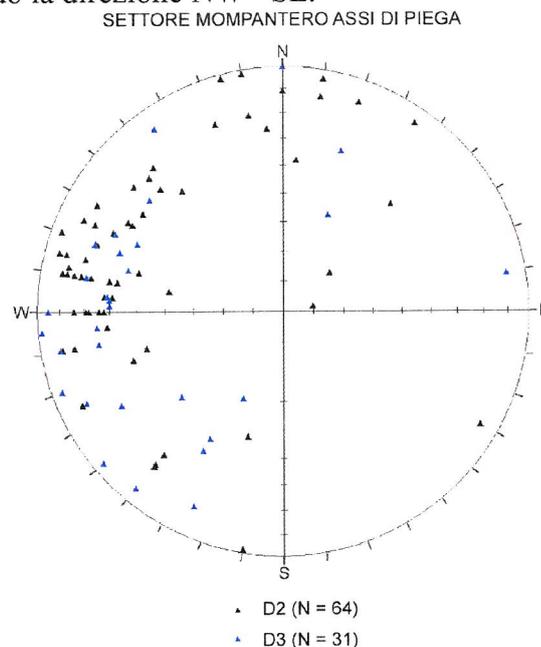


Figura 10 - Dominio Strutturale Mompantero. Proiezione degli assi di piega di fase D2 e di fase D3 (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore)

3.2.3 Dominio strutturale Orsiera

Il dominio strutturale dell'Orsiera, ubicato nel versante i cui si sviluppa l'interconnessione, comprende essenzialmente l'Unità del Dora Maira (Basamento pre - triassico e Copertura Permo-mesozoica).

Il dominio strutturale dell'Orsiera è caratterizzato da una scistosità pervasiva immergente principalmente verso N - NE secondo angoli da medi ad elevati

Per quanto riguarda l'assetto strutturale fragile nel dominio Orsiera sono stati osservati tre sistemi di faglie principali predominanti:

- SF1 con orientazione circa NE - SW;
- SF2 con orientazione NW - SE. A questo sistema appartengono anche alcune zone di faglia secondarie;
- SF4 con orientazione simile a SF2 ma con angoli di immersione inferiori.

Sono inoltre presenti zone di faglia secondarie appartenenti al sistema SF3.

Va inoltre segnalata la presenza di Master Joint orientati secondo le direzioni dei sistemi K2 (circa E - W) e K3 (circa N - S). In particolare i Master Joint del sistema K3 sono presenti in fasci di strutture di potenza complessivamente compresa tra i 30 e i 60 metri e con spaziatura tra le singole superfici compresa tra 5 e 10 metri circa. I Master Joint del sistema K2 appaiono invece generalmente come strutture isolate.

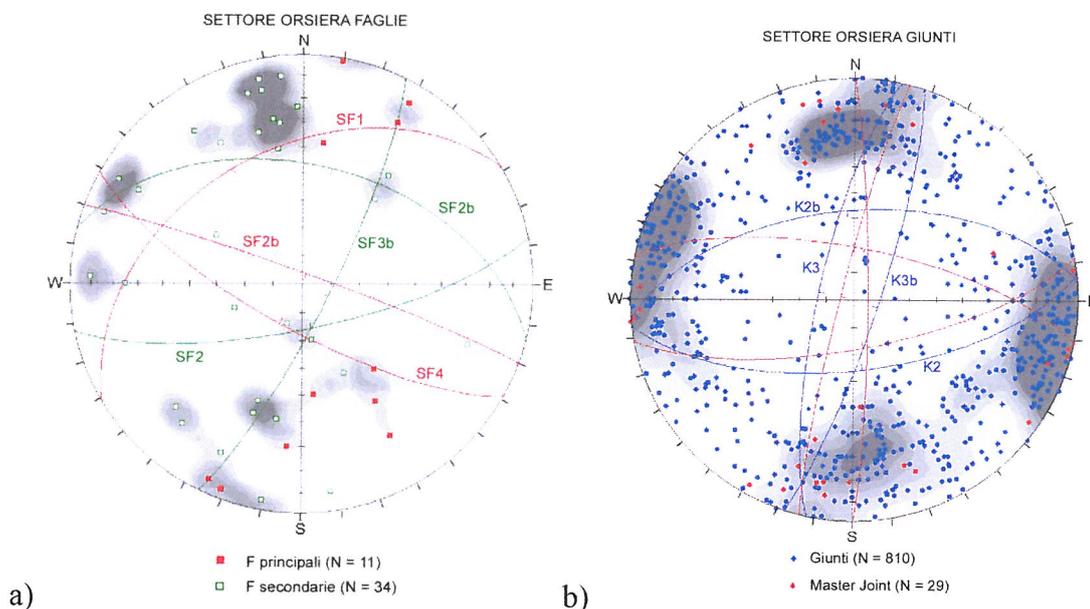


Figura 11 - Dominio Strutturale Orsiera. Proiezione dei poli dei piani di faglia principali e secondari e relative ciclografiche. Proiezione dei poli delle superfici dei differenti sistemi di giunti e relative ciclografiche (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore)

Il dominio strutturale dell'Orsiera è caratterizzato da una scistosità pervasiva immergente principalmente verso N - NE secondo angoli da medi ad elevati (Figura 12). In base alle proiezioni dei poli dei piani di scistosità, dei piani assiali e degli assi di piega, si possono offrire le seguenti osservazioni:

- Per quanto riguarda le scistosità sono osservabili due picchi principali: un picco predominante associato a superfici immergenti verso N - NE e un picco secondario associato a superfici immergenti verso SE;

- La giacitura dei piani assiali di fase D3 coincide con la giacitura della maggior parte delle superfici di scistosità;
- Gli assi delle pieghe di fase D2 e D3 sono all'incirca coincidenti sia come orientazione sia come angolo di immersione. Le pieghe D2 e D3 sono pertanto coassiali.

In base a tali osservazioni si possono fornire le seguenti considerazioni:

- I dati relativi alla scistosità sembrano indicativi di pieghe asimmetriche di tipo aperto con assi orientati all'incirca in direzione E - W, fianchi lunghi immergenti verso N - NE e fianchi corti immergenti verso SE. Tale quadro è confermato dall'orientazione degli assi di fase D3 evidenziata in Figura 13;
- i piani assiali delle pieghe D3 mostrano la stessa giacitura dei fianchi lunghi di tali pieghe;
- la dispersione della scistosità osservabile in Figura 12 può essere legata a figure di interferenza dovute alla presenza di pieghe D2 e D3 coassiali.

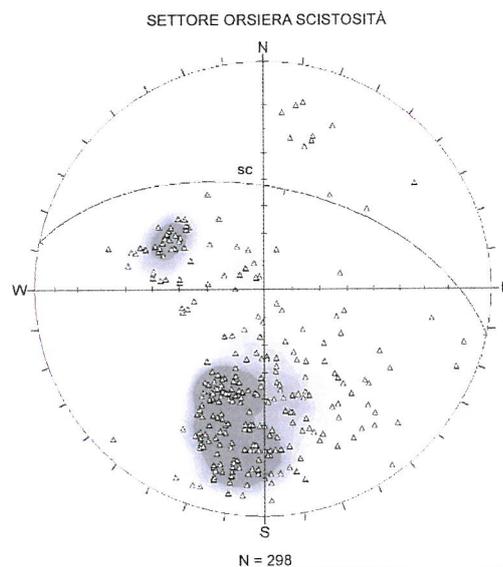


Figura 12 - Dominio Strutturale Orsiera. Proiezione dei poli dei piani di scistosità e cerchio massimo relativo al picco di concentrazione dei poli di scistosità (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore)

RAPPORT NEOTECTONIQUE GENERAL – RELAZIONE NEOTETTONICA DI SINTESI

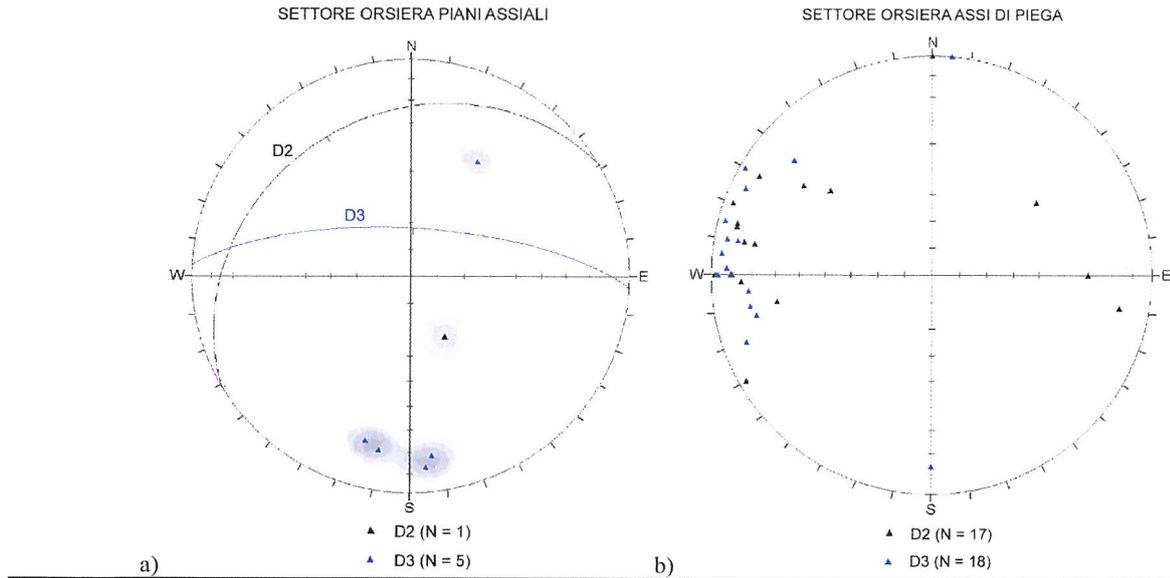


Figura 13 - Dominio Strutturale Orsiera. Proiezione dei poli dei piani assiali delle pieghe di fase D3 e cerchio massimo relativo al picco di concentrazione dei poli di piano assiale. Proiezione degli assi di piega di fase D2 e di fase D3 (reticolo equiarea di Schmidt, emisfero inferiore)

Va peraltro sottolineato che la direzione di immersione principale della scistosità nel dominio dell'Orsiera appare opposta rispetto a quella rilevata nel dominio Ambin – Venaus. In effetti il confronto tra la Figura 7 e la Figura 12 mostra come i fianchi lunghi delle pieghe D3 siano opposti nei due domini.

4. Inquadramento sismo tettonico del settore del progetto in territorio francese

Questa parte di relazione relativa alla porzione francese dell'opera in progetto è ripresa dagli elaborati dell'APR, parzialmente modificata: in essa viene fatta una sintesi dei dati sismotettonici e neotettonici nel settore del tracciato ferroviario previsto tra St-Jean de Maurienne e la Val Susa.

Lo studio relativo alla parte francese è uno studio scientifico che propone un aggiornamento del contesto sismotettonico e neotettonico della zona in esame. Si fonda sulla base dei risultati più recenti dei laboratori di ricerca interessati dall'argomento e dei database esistenti. Pertanto, i risultati cartografici possono differire dai documenti usati per la determinazione dei sismi di riferimento e quindi delle accelerazioni da prendere in considerazione per il calcolo delle differenti tipologie di opere del genio civile.

Data la scala scelta per la rappresentazione delle informazioni relative al contesto sismotettonico e neotettonico del progetto, il tracciato delle opere è solamente indicativo del settore di studio e non segue fedelmente il tracciato del tunnel di base.

Da un punto di vista pratico, si è definita una zona di studio che si estende su una trentina di chilometri da entrambe le parti del tracciato ferroviario (Figura 14), in modo da fornire interpretazioni sul contesto neotettonico pertinenti (cfr. § 4.1 e § 4.2).

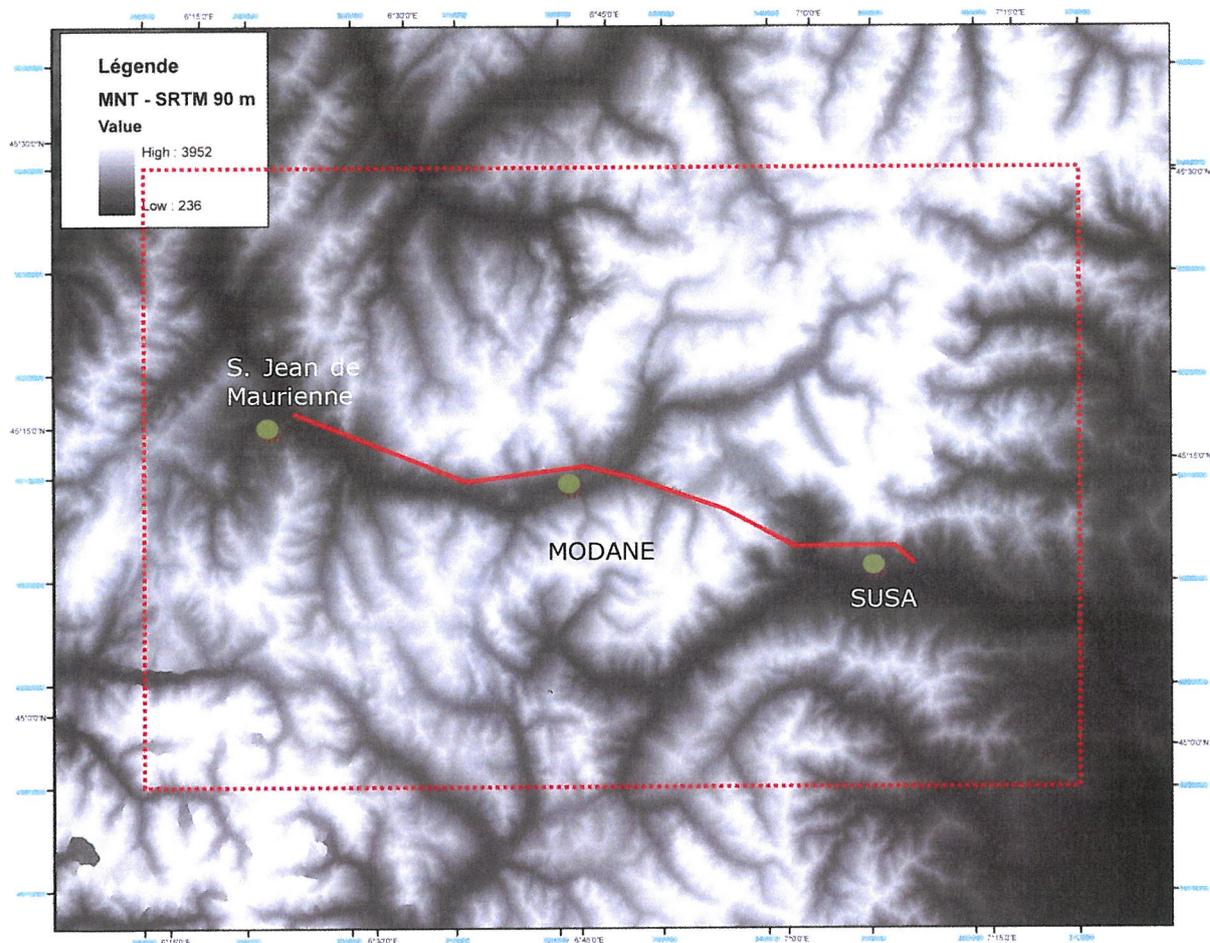


Figura 14 - Localizzazione del settore target definito per gli studi sismotettonici e neotettonici

4.1 Contesto neotettonico

In una catena dove la deformazione è particolarmente lenta e la copertura vegetativa particolarmente abbondante (almeno nelle sue parti basse, situate al di sotto di quota 2.000-

2.500m), la difficoltà risiede nell'osservazione oltre che sul terreno anche da immagini satellitari e aeree di indici tettonici attivi. Infatti, se l'evoluzione tettonica associata alla formazione delle falde di sovrascorrimento (durante il Eocene-Oligocene), ed alla propagazione del fronte di deformazione verso l'esterno (durante il Mio-Pliocene) sono ben caratterizzate, le osservazioni di terreno riguardanti la deformazione attiva sono rare e spesso controverse, il che non permette di ottenere un'immagine omogenea del campo di deformazione attiva. In questo contesto, l'analisi della sismicità rimane lo strumento maggiormente affidabile per quel che concerne la caratterizzazione dell'attuale regime tettonico.

In termini di fratturazione, sono stati sviluppati due approcci nelle Alpi occidentali al fine di caratterizzare l'ultima fase di deformazione. Da una parte un approccio morfotettonico basata sulla ricerca di lineamenti (MNT, fotografie da satellite, etc.), dall'altra una quantificazione dei campi di paleosollecitazioni associati alle fasi più tardive nella storia della catena (deformazione fragile).

Globalmente, in termini di paleosollecitazioni, si osserva nell'insieme delle zone interne un regime tettonico dominato dall'estensione, con inoltre la presenza abbastanza costante di tensori di distacco (Champagnac et al., in press). I 2 tipi di regimi, compatibili a livello delle direzioni di estensione, sembrano, mediante permutazione delle sollecitazioni, risultare da uno stesso regime tettonico. Si osserva una direzione maggiore d'estensione, parallela all'asse di allungamento della catena, ed una direzione minore d'estensione perpendicolare all'arco. Mediante confronto all'attuale regime tettonico, si può supporre una cronologia di episodi di estensione: prima di tutto durante il Neogene (Miocene - Pliocene), il regime tettonico dell'arco interno sarebbe caratterizzato da un episodio di estensione parallela all'orogene (estrusione verso il sud ed il mare Ligure in apertura), poi, più recentemente (Pliocene ad oggi), da un episodio di estensione perpendicolare all'arco, sempre attivo (riaggiustamenti gravitativi).

4.2 Analisi morfotettonica

Per quel che concerne l'analisi morfotettonica, l'analisi speditiva eseguita a partire dalla fotografia da satellite LANDSAT 7 evidenzia un certo numero di lineamenti strutturali (Figura 15).

In primo luogo, nella parte NW del settore target, si riconosce una serie di lineamenti orientati NE-SW, continui, associati alle strutture del massiccio di Belledonne (asse mediano, ecc). Queste strutture sono situate a margine del settore di studio.

Nella parte sud del settore, si osserva una serie di lineamenti orientati NNW-SSE che corrispondono probabilmente alle faglie normali attive da un punto di vista sismico. Queste strutture si prolungano più a sud nella regione di Briançon con faglie come quella della Haute Durance, riconosciuta essere attiva (Sue and Tricart, 2003).

Nella parte centrale del settore di studio, tra $6^{\circ}30'$ e $6^{\circ}45'$ di longitudine, questi lineamenti NNW-SSE si incurvano e si collegano con una famiglia di allineamenti NNE-SSW, i quali seguono globalmente l'asse della catena. Questa famiglia di lineamenti può essere interpretata come faglie longitudinali associate all'attività sismica. Ci si trova qui probabilmente in presenza dell'espressione della superficie delle faglie attive nella parte ovest del settore target, cioè faglie normali che si collegano al fronte pennico. Infatti, questi lineamenti corrispondono localmente agli orientamenti delle mappe focali (vedi sopra). Inoltre, sono localizzati nelle vicinanze del fronte pennico. Si ritrova pertanto uno schema tradizionale con faglie normali attive, collegate in profondità al fronte pennico.

Infine, una terza famiglia di lineamenti risulta molto chiaramente da questa analisi morfotettonica. Si tratta di strutture trasversali alla catena orientata E-W - NE-SW. Sono anche riconosciute sul terreno come faglie normali tardo-alpine. Non esiste una relazione cronologica chiara tra questa famiglia di faglie e le faglie sub-longitudinali. Questo schema strutturale si ritrova nella regione di

Briançon al sud del settore target, fino nella regione della Haute Ubaye. Si tratta dunque di uno schema abbastanza tradizionale per quel che concerne la fratturazione tardo- alpina nelle Alpi occidentali.

Landsat7 - tunnel Lyon-Turin - Analyse morphostructurale

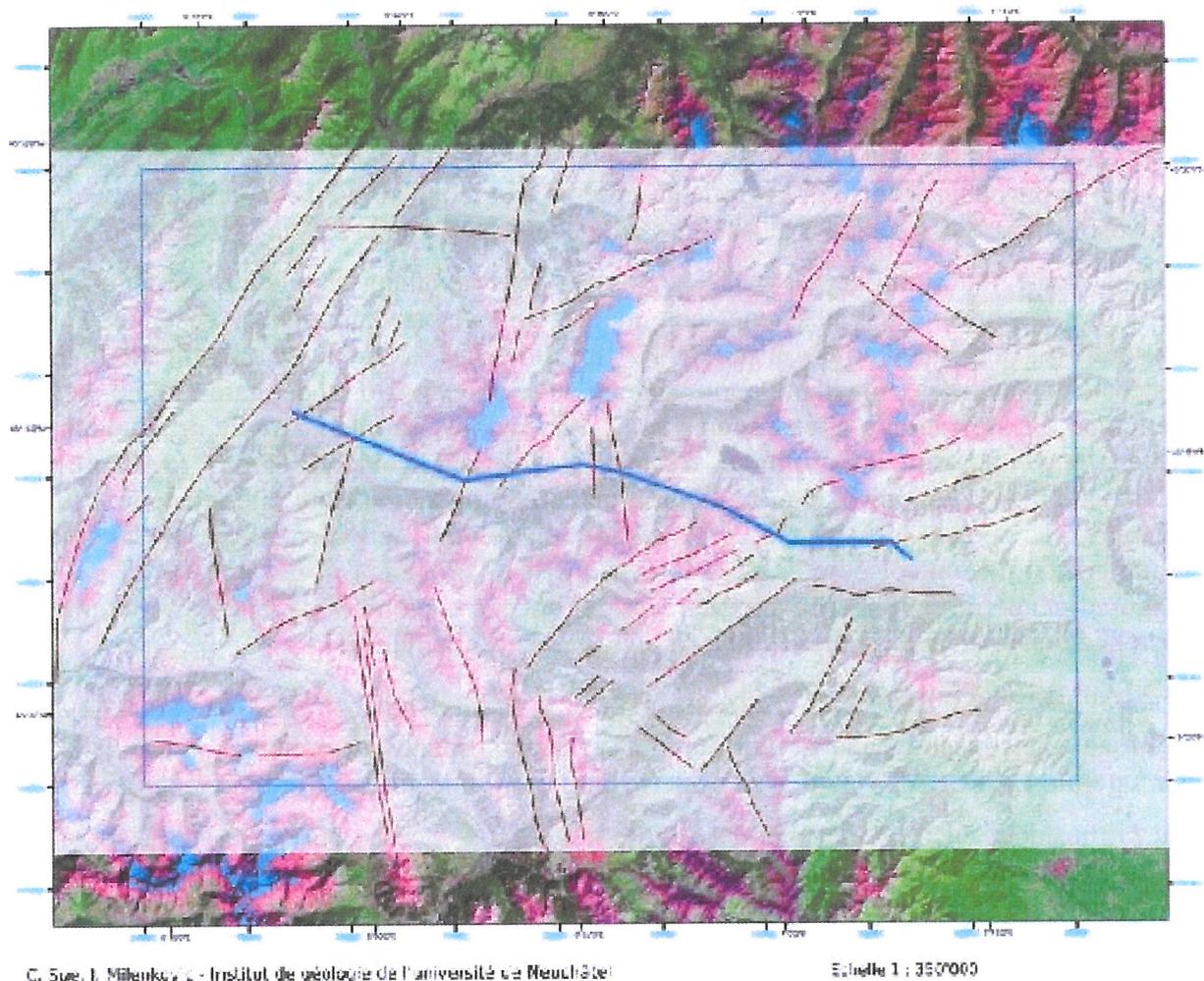


Figura 15 - Analisi morfotettonica del settore studiato

L'impatto di queste faglie (longitudinali e trasversali rispetto all'asse dell'orogene) sul tracciato della galleria è molto importante, dato che creano discontinuità meccaniche nei terreni attraversati dalla galleria, anche nel caso di faglie inattive. In pratica, la parte ovest del tracciato ferroviario è maggiormente interessato dalle faglie longitudinali, probabilmente attive in quanto faglie normali, mentre la parte est del tracciato è intersecata da un fascio molto chiaro di faglie trasversali. L'attività delle faglie trasversali è discutibile: esse corrispondono probabilmente ad un evento tettonico fragile, in estensione parallela all'orogene, precoce rispetto all'estensione attuale perpendicolare alla catena. Tuttavia, queste faglie possono essere riattivate nel campo attuale di sollecitazioni, con movimenti a priori sinistrorsi.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, H. & Jackson, J., 1987:* Active tectonics in the Adriatic region. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society* 91, 937-983.
- Aubourg, C., Rochette, P., Stephan, J. F., Popoff, M. and Chabert-Pelline, C., 1999:* The magnetic fabric of weakly deformed Late Jurassic shales from the southern subalpine chains (French Alps): evidence for SW-directed tectonic transport direction. *Tectonophysics* 307(1-2), 15-31.
- Baroux, E., Béthoux, N. and Bellier, O., 2001:* Analyses of the stress field in southeastern France from earthquake focal mechanisms. *Geophysical Journal International* 145, 336-348.
- Calais, E., 1999:* Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996-1998. *Geophysical Journal International* 138, 221-230.
- Calais, E., Bayer, R., Chéry, J., Cotton, F., Flouzat, M., Jouanne, F., Martinod, J., Mathieu, F., Scotti, O., Tardy, M. and Vigny, C., 2000:* REGAL: A permanent GPS network in the French Western Alps, Configuration and first results. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris - Series IIA - Earth and Planetary Science* 331, 435-442.
- Calais, E., Nocquet, J. M., Jouanne, F. and Tardy, M., 2002:* Current strain regime in the Western Alps from continuous Global Positioning System measurements, 1996-2001. *Geology* 30, 651-654.
- Champagnac, J. D., Sue, C., Delacou, B. and Burkhard, M., 2003:* Brittle orogen-parallel extension in the internal zones of the Swiss Alps (south Valais). *Eclogae geologicae Helveticae* 96, 325-338.
- Champagnac, J. D., Sue, C., Delacou, B. and Burkhard, M., 2004:* Brittle deformation in the inner northwestern Alps: from early orogen-parallel extrusion to late orogen-perpendicular collapse. *Terra Nova* 16(4), 232-242.
- Champagnac, J. D., Sue, C., Delacou, B., Tricart, P., Allanic, C. and Burkhard, M., in press:* Miocene orogen-parallel extension in the inner Western Alps revealed by dynamical fault analyses. *Tectonics*.
- Collombet, M., 2001:* Cinématique et rotation des Alpes occidentales: approche paléomagnétique et modélisation analogique. Ph.D. thesis, UJF Grenoble. Grenoble, 222
- Collombet, M., Thomas, J. C., Chauvin, A., Tricart, P., Bouillin, J. P. and Gratier, J. P., 2002:* Counterclockwise rotation of the western Alps since the Oligocene: New insights from paleomagnetic data. *Tectonics* 21, 352-366.
- DARMENDRAIL X. (1994):* Déformation récente et actuelle des Alpes occidentales. Mise en évidence, caractérisation et quantification par analyse géomorphologique et comparaison de nivellements. *Géol. Alpine, Mém. hs N° 21*, 174p.
- DARMENDRAIL X., MENARD G., TARDY M. (1994):* Interprétation néotectonique d'anomalies géomorphologiques dans une grande vallée des Alpes nord-occidentales: le Grésivaudan. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t.318, II, p. 815-821.
- Delacou, B., Sue, C., Champagnac, J. D. and Burkhard, M., 2004:* Present-day geodynamics in the bend of the western and central Alps as constrained by earthquake
- Eva, E., Pastore, S. and Deichmann, N., 1998:* Evidence for ongoing extensional deformation in the Western Swiss Alps and thrust-faulting in the southwestern Alpine foreland. *Journal of Geodynamics* 26(1), 27-43.

- Eva, E. & Solarino, S., 1998:* Variations of stress directions in the western Alpine arc. *Geophysical Journal International* 135, 438-448.
- Fah, D., Giardini, D., Bay, F., Bernardi, F., Braunmiller, J., Deichmann, N., Furrer, M., Gantner, L., Gisler, M., Isenegger, D., Jimenez, M. J., Kastly, P., Koglin, R., Masciadri, V., Rutz, M., Scheidegger, C., Schibler, R., Schorlemmer, D., Schwarz-Zanetti, S., Steimen, S., Sellami, S., Wiemer, S. and Wossner, J., 2003:* ECOS and the related macroseismic database. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 96(2), 219-236.
- Fréchet, J., 1978:* Sismicité du sud-est de la France et une nouvelle méthode de zonage sismique. Thèse de doctorat d'Etat, Université des Sciences, Technologies et Médecine. Grenoble,
- Giardini, D., Grünthal, G., Shedlock, K. and Zhang, P., 1999:* Global Seismic Hazard Map. Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP). International Lithosphere Program.
- Gidon, M., 1974:* L'arc alpin a-t-il une origine tourbillonnaire? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris - Series IIA - Earth and Planetary Science* 278, 21-24.
- Gubler, E., Kahle, H. G., Klingele, E., Mueller, S. and Olivier, R., 1981:* Recent Crustal Movements in Switzerland and Their Geophysical Interpretation. *Tectonophysics* 71(1-4), 125-152.
- Kastrup, U., 2002:* Seismotectonics and stress-field variations in Switzerland. Ph.D. thesis, ETH Zurich.
- Kastrup, U., Zoback, M. L., Deichmann, N., Evans, K. and Giardini, D., 2004:* Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth* 109(B01402).
- Maurer, H., Burkhard, M., Deichmann, N. and Green, G., 1997:* Active tectonism in the central Alps: Contrasting stress regimes north and south of the Rhone Valley. *Terra Nova* 9, 91-94.
- Ménard, G., 1988a:* Structure et cinématique d'une chaîne de collision: Les Alpes occidentales et centrales. Thèse de Doctorat d'état, Université Joseph Fourier. Grenoble, 278
- Nocquet, J.-M., 2002:* Mesure de la déformation crustale en Europe occidentale par Géodésie spatiale. Ph.D. thesis, Université de Nice 307
- Nocquet, J. M. & Calais, E., 2003:* Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996-2001. *Geophysical Journal International* 154(1), 72-88.
- Nocquet, J. M. & Calais, E., 2004:* Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics* 161(3), 661-681.
- Pavoni, N. & Roth, P., 1990:* Seismicity and seismotectonics of the Swiss Alps. Results of microearthquake investigations 1983-1988. *Mémoire de la société Géologique de France* 156, 129-134.
- Rothé, J. P., 1941:* Les séismes des Alpes françaises en 1938 et la sismicité des Alpes occidentales. *Annales de l'Institut de Physique du Globe, Strasbourg* 3, 1-105.
- Sue, C., 1998:* Dynamique actuelle et récente des Alpes occidentales internes - Approche structurale et sismologique. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier. Grenoble, 299
- Sue, C., Thouvenot, F., Fréchet, J. and Tricart, P., 1999a:* Widespread extension in the core of the western Alps revealed by earthquake analysis. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth* 104(B11), 25611-25622.

- Sue, C. & Tricart, P., 1999b*: Late Alpine brittle extension above the Frontal Pennine Thrust near Briançon, Western Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 92(2), 171-181.
- Sue, C. & Tricart, P., 2002a*: Widespread post-nappe normal faulting in the Internal Western Alps: a new constrain on arc dynamic. *Journal of Geological Society of London* 159, 61-70.
- Sue, C., Grasso, J. R., Lahaie, F. and Amitrano, D., 2002b*: Mechanical behavior of western Alpine structures inferred from statistical analysis of seismicity. *Geophysical Research Letters* 29(8), 65-69.
- Sue, C. & Tricart, P., 2003*: Neogene to current normal faulting in the inner western Alps: a major evolution of the late alpine tectonics. *Tectonics* 22(5).
- Sue, C., Delacou, B., Champagnac, J. D., Burkhard, M. and Allanic, C., 2004*: Quantification of the seismic strain around the bend of the western Alps. In: 32nd IGC, Florence.
- Thomas, J. C., Claudel, M. E., Collombet, M., Tricart, P., Chauvin, A. and Dumont, T., 1999*: First paleomagnetic data from the sedimentary cover of the French Penninic Alps: evidence for Tertiary counterclockwise rotations in the Western Alps. *Earth and Planetary Science Letters* 171(4), 561-574.
- Thouvenot, F., Fréchet, J., Guyoton, F., Guiguet, R. and Jenatton, L., 1990*: SISMALP: An automatic phone-interrogated seismic network for the western Alps. *Cah. Cent. Eur. Geodyn. Seismol.* 1, 1-10.
- Thouvenot, F., Fréchet, J., Jenatton, L. and Gamond, J. F., 2003*: The Belledonne Border Fault: Identification of active seismic strike-slip fault in the western Alps. *Geophysical Journal International* 155(1), 174-192.
- Tricart, P., Bouillin, J. P., Dick, P., Moutier, L. and Xing, C. Q., 1996*: The high Durance fault-zone and the extensional reactivation of the Briançonnais front thrust, to the SE of the Pelvoux Massif (western Alps). *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris - Series IIA - Earth and Planetary Science* 323(3), 251-257.
- Vialon, P., Rochette, P. and Ménard, G., 1989*: Indentation and rotation in the Alpine arc. In: *Alpine tectonics*, Geological Society of London Special Publication (Coward, M., Dietrich, D. and Park, R. eds). 329-338. Blackwell scientific publication.
- Vigny, C., Chery, J., Duquesnoy, T., Jouanne, F., Ammann, J., Anzidei, M., Avouac, J. P., Barlier, F., Bayer, R., Briole, P., Calais, E., Cotton, F., Duquenne, F., Feigl, K. L., Ferhat, G., Flouzat, M., Gamond, J. F., Geiger, A., Harmel, A., Kasser, M., Laplanche, M., Le Pape, M., Martinod, J., Menard, G., Meyer, B., Ruegg, J. C., Scheubel, J. M., Scotti, O. and Vidal, G., 2002*: GPS network monitors the Western Alps deformation over a five- year period: 1993-1998. *Journal of Geodesy* 76(2), 63-76.