

Tectonique cassante près de la ligne du Rhône-Simplon entre Sion et Martigny (Valais, Suisse)



Master en géologie
par GUGLIELMETTI Luca

Sous la direction de
DERRON Marc-Henri
EPARD Jean-Luc

Signatures des enseignants

Université de Lausanne, février 2013

Résumé

L'objectif de cette étude est d'apporter une contribution à la compréhension des structures cassantes présentes dans la vallée du Rhône entre Sion et Martigny et de l'influence de la ligne du Rhône-Simplon sur ces structures.

La ligne du Rhône-Simplon est une faille Néogène importante présente dans les Alpes suisses occidentale : au Col du Simplon elle forme une faille normale, en suite elle passe dans la vallée du Rhône où sa cinématique est décrochante dextre (Hubbard et Mancktelow, 1992). Près de Martigny la suite de la faille est controversée : certains auteurs soutiennent une prolongation dans la zone de Chamonix (Keller *et al.*, 2006; Steck, 2008), d'autres proposent une structure en fleur positive dans le massif du Mont-Blanc inférieur (Egli et Mancktelow, 2012).

Deux zones d'étude ont été choisies : une première en aval d'Ardon, au SW de Sion et une deuxième dans le massif de l'Arpille, une sous-unité du massif des Aiguilles-Rouges située près de la zone de Chamonix, au NW de Martigny. Les orientations des plans de faille et les vecteurs de mouvements, mesurés sur le terrain et à l'aide des modèles digitaux de terrain de haute résolution, ont été analysés avec plusieurs méthodes : l'analyse géométrique des structures, l'analyse cinématique et la reconstruction des directions des paléocontraintes.

Dans le massif de l'Arpille les structures cassantes ont été associées à trois phases de déformation :

- Une première phase de raccourcissement normal à la chaîne, associée à la mise en place des nappes, a formé deux familles de failles décrochantes sub-verticales et conjuguées.
- Une phase de raccourcissement normal à la chaîne et d'extension verticale a formé une famille d'importantes failles inverses à direction NW/50 et des micro-structures semi-ductiles à cassantes associées à un cisaillement également inverse. Cette déformation a été attribuée à une phase tardive (8-0 Ma) et plus rapide ($> 1 \text{ mm/a}$) du soulèvement du massif des Aiguilles-Rouges (Leloup *et al.*, 2005; Glotzbach *et al.*, 2008; Valla *et al.*, 2012).
- Les failles sub-verticales formées pendant la première phase montrent des signes de réactivation gravitaire tardive en failles normales et inverses.

Le secteur d'Ardon présente une forte fracturation formée par des familles de failles sub-verticales associées à une zone de décrochement dextre :

- Les failles principales sont des décrochements dextres de direction 060. Le déplacement total de ces failles a été estimé à environ 500 m.
- Des décrochements secondaires de Riedel de type R (dextres) et R' (sénestres) ainsi que des diaclases réactivées en décrochements sont présentes dans cette zone de décrochement.

Les failles du massif de l'Arpille ne présentent donc aucune influence de la ligne du Rhône-Simplon. Celle ci tourne d'environ 10° dans un sens antihoraire entre Sion et Ardon. Ceci suggère que la suite de la ligne du Rhône-Simplon serait à rechercher au SW d'Ardon et au SE de Martigny, dans le massif du Mont-Blanc.

Remerciements

Je suis très reconnaissant à Marc-Henri Derron, Michel Jaboyedoff et Andrea Pedrazzini pour m'avoir proposé ce sujet intéressant au moment où le projet initial a été annulé. Merci à Jean-Luc Epard d'avoir concrétisé la problématique avec l'idée de focaliser ce travail sur la ligne du Rhône-Simplon. Je remercie Marc-Henri Derron et Jean-Luc Epard d'avoir accepté de guider ce travail de Master : merci de votre disponibilité pour le travail de terrain et pour discuter et répondre à mes questions à tout temps.

Je remercie Marc-Henri Derron pour m'avoir aidé et mis à disposition son savoir dans le domaine de l'analyse des données numériques, notamment des modèles digitaux de terrain à haute résolution. Merci également à Jean-Luc Epard d'avoir partagé sa grande connaissance de la géologie des régions étudiées. Son aide pour l'interprétation des structures et des lames minces a été indispensable.

Je remercie aussi Line et Hans pour m'avoir accompagné sur le terrain. Merci à Florian pour avoir partagé avec moi les astuces du fonctionnement des logiciels pour l'analyse structurale.

Merci à Jean-Luc Epard et Mario Sartori de m'avoir mis à disposition les relevées de terrain et la compilation de la feuille de Sion avant sa parution.

Merci à Laurent Nicod pour la préparation des lames minces. Merci aussi à Anne-Cécile pour m'avoir aidé dans le sciage et m'avoir guidé dans l'analyse minéralogique.

Je remercie aussi Mike pour la révision des calculs du déplacement et Marco pour m'avoir emprunté son puissant ordinateur. Merci aussi à Gilbert et L.N. pour avoir essayé d'améliorer le français d'une grande partie de ces pages.

..

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Situation des secteurs étudiés	10
1.2	État de la recherche théorique	11
1.2.1	Failles secondaires	11
1.2.2	Terminaison d'une faille	13
1.3	État de la recherche dans les Alpes suisses occidentales	15
1.3.1	Chevauchement des nappes	15
1.3.2	Zone de cisaillement du Simplon	15
1.3.3	Faille du Rhône-Simplon	15
1.3.4	Soulèvement des Alpes	19
1.3.5	Failles mineures et tectonique près de la vallée du Rhône	19
2	Méthodologie	22
2.1	Sigles et abréviations	22
2.2	Travail de terrain	22
2.2.1	Paramètres d'une faille	24
2.2.2	Conventions d'orientation	24
2.3	Analyse morphologique numérique	26
2.3.1	Analyse 3D des linéaments	31
2.3.2	Analyse morphologique 3D	31
2.4	Analyse cinématique	31
2.5	Analyse des paléo-contraintes	34
2.6	Quantification du mouvement	36
2.6.1	Reconstruction géométrique	36
2.6.2	Relations épaisseur-déplacement	39
3	Secteur de Martigny	42
3.1	Introduction	42
3.2	Observations de terrain	43
3.2.1	Arpille sud (MA_S)	43
3.2.2	Arpille nord (MA_N)	47
3.3	Lames minces	48
3.4	Analyse morphologique numérique	52
3.4.1	Analyse 2D des linéaments	52
3.4.2	Analyse 3D des linéaments	52
3.4.3	Analyse morphologique 3D	53
3.5	Estimation du déplacement	54

3.6	Analyse cinématique	55
3.7	Analyse des paléocontraintes	57
3.8	Conclusions	59
4	Secteur d'Ardon	61
4.1	Introduction	61
4.2	Observations de terrain	62
4.2.1	Versant	63
4.2.2	Grande falaise NW-SE	68
4.3	Analyse morphologique numérique	72
4.3.1	Analyse 2D des linéaments	72
4.3.2	Analyse 3D des linéaments	73
4.3.3	Vérifications des orientations	74
4.4	Analyse des failles	75
4.4.1	Analyse cinématique	75
4.4.2	Analyse des orientations	77
4.4.2.1	Analyse des orientations (3D)	77
4.4.2.2	Analyse des directions (2D)	79
4.4.2.3	Vérification des résultats	81
4.4.3	Quantification du déplacement	81
4.4.4	Interprétation	83
4.5	Analyse des diaclases en-échelon	86
4.6	Conclusion	89
5	Conclusions	90
5.1	Bilan des méthodes utilisées	90
5.1.1	Analyse des données de mouvement	90
5.1.2	Modèles numériques de terrain	91
5.2	Conclusion géologique	91
5.3	Perspectives	93
	Bibliographie	95
	Table des figures	99
	Liste des tableaux	103
	A Cartes	105
	B Données de mouvement	118

Chapitre 1

Introduction

Le sujet de ce travail de Master est l'étude des structures cassantes présentes dans la vallée du Rhône entre Sion et Martigny.

Cette vallée des Alpes suisses occidentales est traversée par la faille décrochante d'âge néogène dénommée faille du Rhône-Simplon (RS). Même si le fond de la vallée du Rhône est couvert par les sédiments quaternaires, de nombreuses failles décrochantes parallèles à la vallée affleurent sur ses deux flancs (Steck, 2008). Dans les nappes helvétiques des failles secondaires liées à l'accident du RS ont aussi été signalées (Gasser et Mancktelow, 2010). Dans ce travail l'influence de la déformation cassante du RS sur les nappes helvétiques a été étudiée dans le secteur d'Ardon, un village situé sur la plaine du Rhône quelques kilomètres au SW de Sion.

Au col du Simplon le décalage normal de la faille du RS a été estimé à environ 15 *km* (Mancktelow, 1985). Un décalage décrochant d'ordre kilométrique est présent à Saillon (Badoux, 1972). Plus à l'W la suite de la faille est sujette à controverse. L'hypothèse principale est la continuation dans la vallée de Chamonix et la terminaison de la faille en décro-chevauchement (Hubbard et Mancktelow, 1992; Keller *et al.*, 2006; Steck, 2008).

Récemment une continuation dans le massif du Mont-Blanc a été suggérée par Egli et Mancktelow (2010). Une structure en fleur pourrait expliquer à la fois le mouvement décrochant de la faille du RS et le soulèvement tardif du massif du Mont-Blanc. Dans ce modèle le mouvement kilométrique de la faille serait réparti dans plusieurs branches secondaires de faille. Cette bifurcation permet d'accommoder le problème d'espace présent dans la zone finale d'une faille (Freund, 1974).

Afin d'étudier le problème de la terminaison de la faille du RS, les structures cassantes présentes dans le massif de l'Arpille ont aussi été étudiées. Le massif de l'Arpille est une sous-unité du massif des Aiguilles-Rouges, qui affleure en contact avec la vallée de Chamonix.

Il est probable que le soulèvement de la chaîne alpine soit encore actuel. La vallée du Rhône présente une forte activité sismique et un taux de soulèvement élevé (Maurer *et al.*, 1997). Ce soulèvement est responsable de la grande partie des structures cassantes des Alpes (Jaboyedoff *et al.*, 2003; Ustaszewski, 2007), en particulier des longues structures cassantes décrites par Jaboyedoff *et al.* (2003). Les grandes structures cassantes qui coupent la falaise au NW de Martigny ont donc aussi été objet d'étude.

Selon Ustaszewski (2007) une partie des structures cassantes de la vallée du Rhône est liée à des mouvements néotectoniques (plus récents que la dernière glaciation) de nature gravitaire et/ou tectonique. Dans ce travail de Master la présence d'activité neotectonique dans les zones d'étude a aussi été envisagée.

1.1 Situation des secteurs étudiés

Les secteurs étudiés sont situés dans la vallée du Rhône, entre Sion et Martigny.

Le premier secteur d'étude, « Martigny », comprend le massif rocheux situé à NW de cette ville. Cette localité a été choisie en fonction de sa position : proche à la vallée de Chamonix et au coude de la vallée du Rhône (figure 1.1). De plus Jaboyedoff et Pedrazzini me signalent la présence de grandes structures cassantes dans ce massif (comm. pers.). Ce secteur d'étude a donc été choisi pour étudier à la fois le problème de la suite de la faille du Rhône-Simplon au SW de Saillon et les grandes structures cassantes.

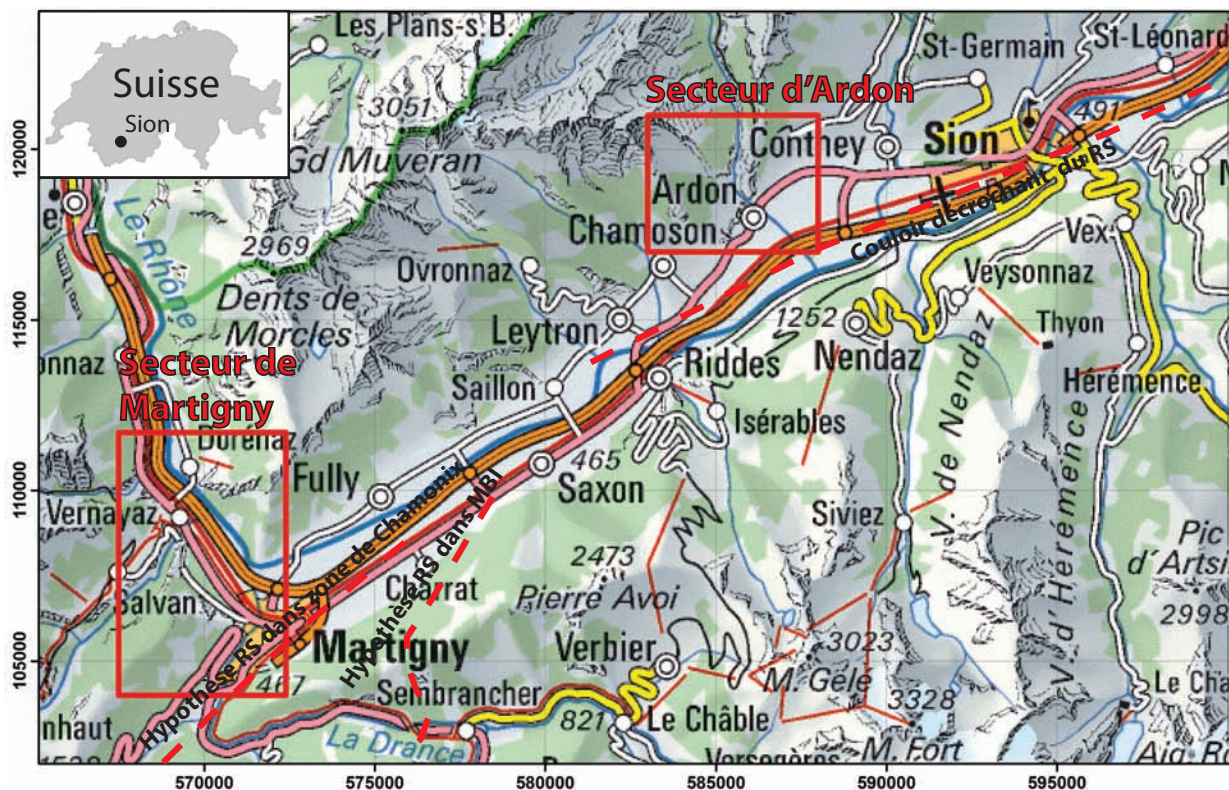


FIGURE 1.1 – Situation topographique des secteurs d'étude d'Ardon et de Martigny. Carte Nationale 1 : 500'000 (Swisstopo, 2008).

Le deuxième secteur d'étude, « Ardon », comprend les terrains en aval de ce village (figure 1.1). Ce secteur a été choisi par sa proximité du couloir de faille du Rhône-Simplon, par la présence de bons affleurements et par la facilité d'accès.

Les deux secteurs d'étude se trouvent au N de la vallée du Rhône. Ils sont donc également situés au N de la zone de faille du Rhône-Simplon et du contact pennique-helvétique (figure 1.2).

Le secteur de Martigny est formé par le socle du massif des Aiguilles-Rouges. Les terrains du secteur d'Ardon sont formés par les nappes helvétiques. Ces nappes s'enracinent sur les massifs du Mont-Blanc externe (pour la nappe de Morcles), Mont-Blanc interne (pour la nappe d'Ardon), Mont-Chétif et Gothard (pour la nappe du Wildhorn) (Steck *et al.*, 2001).

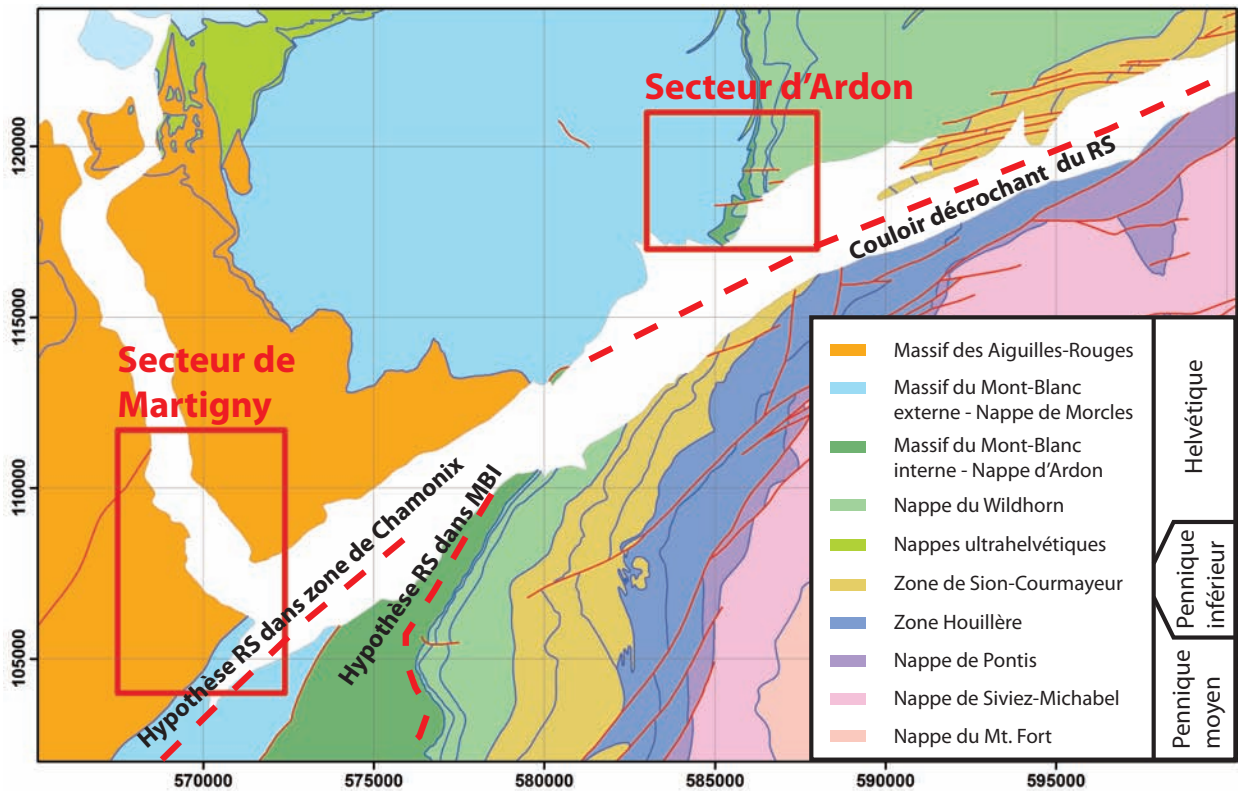


FIGURE 1.2 – Unités tectoniques et situation des secteurs d'étude d'Ardon et de Martigny. Tirée de la carte tectonique des Alpes occidentales 1:100'000 (Steck *et al.*, 1999).

1.2 État de la recherche théorique

1.2.1 Failles secondaires

Le modèle classique de Anderson (1951) décrit l'orientation et le sens de mouvement des failles par rapport à l'orientation des axes principaux des contraintes : quand σ_1 et σ_3 sont horizontales les deux failles décrochantes conjuguées se forment sur des plans sub-vectifs orientés à un angle ϕ de σ_1 (ϕ correspond à l'angle de friction de la roche, d'une valeur moyenne de 30°).

Il a en suite été observé que les failles décrochantes forment souvent des zones de décrochement et sont souvent accompagnées par des séries de failles moins persistantes appelées failles secondaires. Différents auteurs ont étudié la géométrie et la genèse des failles secondaires avec différentes méthodes. La méthode préférée est souvent l'observation directe des structures, soit à l'échelle de l'affleurement (Tchalenko, 1968; Katz *et al.*, 2004) soit à l'échelle régionale (McKinstry, 1953; Bahat, 1980; Freund, 1974; Chinnery, 1966). Des travaux basés sur des expériences en laboratoire ont aussi été effectués (Riedel, 1929; Tchalenko, 1968; Freund, 1974). Certains auteurs ont approché ce problème sur le plan théorique (McKinstry, 1953; Freund, 1974; Chinnery, 1966).

Une nomenclature variée a été développée pour décrire les mêmes structures. Dans cette étude la nomenclature utilisée est celle de Tchalenko (1968). Les interprétations de ces structures sont par contre souvent très différentes. Ci-dessous la description des structures observées par la grande partie des auteurs (voir aussi la figure 1.3).

Failles D (de Décrochement). Ces failles sont aussi dénommées « principales ». Elles délimitent

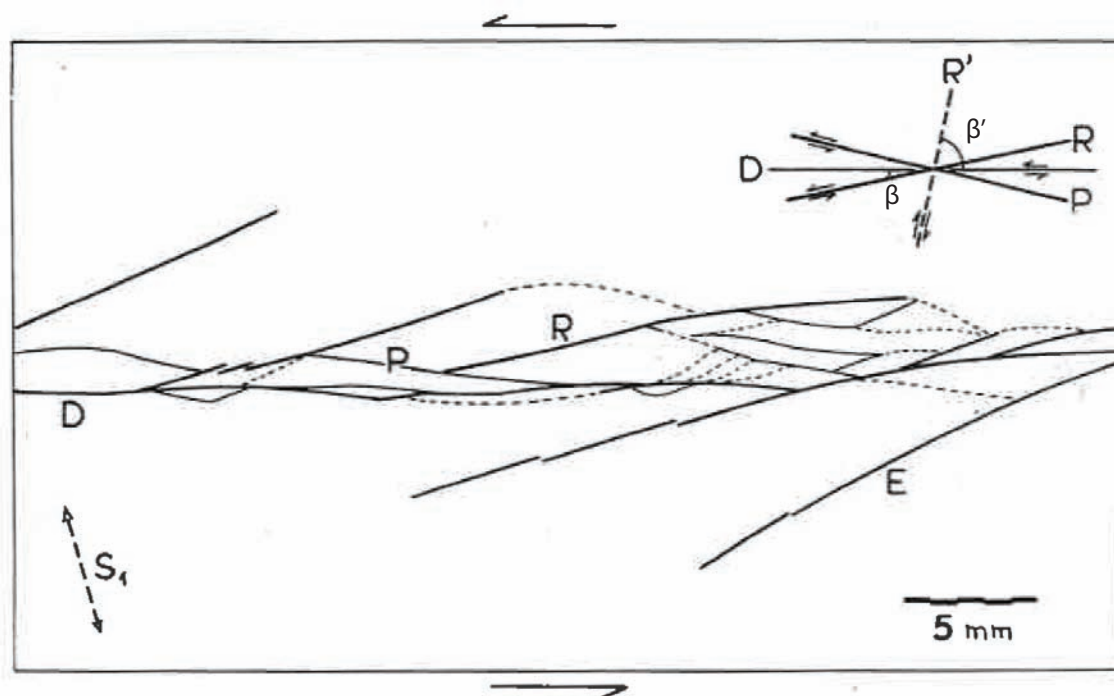


FIGURE 1.3 – Failles secondaires (R, R' et P) développées dans une zone de cisaillement sénestre (D). Tiré de Tchalenko (1968)

la zone de décrochement et ont souvent une orientation cohérente avec le modèle andersonien des failles décrochantes .

Failles R (de Riedel). Ces failles forment un angle aigu avec la faille principale. Cet angle indique la direction de mouvement de la faille principale qui la délimite. Leur sens de mouvement est identique à celui des failles principales.

Failles P . Ces failles forment aussi un angle aigu avec la faille principale, mais cet angle indique la direction opposée du mouvement de la faille principale. Leur sens de mouvement est celui des failles principales.

Failles R' . Ces failles forment un angle obtus avec la faille principale. Leur sens de mouvement est opposé à celui de la faille principale.

Orientation des failles secondaires

Suite au premier travail de Riedel (1929) les auteurs se sont concentrés sur la question controversée de l'orientation des failles secondaires. Cette orientation est souvent exprimée avec l'angle entre la faille principale et la faille secondaire (β pour les structures R et β' pour les R').

Différents auteurs ont décrit des orientations très variables des failles R et R' . Les valeurs de β publiées varient entre environ 10° et 30° (voir tableau 1.1). Les valeurs de β' publiées varient également (entre environ 60° et 90°). Certains auteurs ont observé la rotation des failles secondaires (en particulier des structures R') avec la progression de la déformation (Chinnery, 1966; Freund, 1974; Katz *et al.*, 2004). Une certaine prudence est donc nécessaire lors de l'interprétation des failles secondaires par leur orientation.

Author	Technique	Localité ou matériel	β [°]
Bock (1971) ⁽¹⁾	Calcule théorique	-	5 – 10
Freund (1974)	Terrain	Pâte à modeler. Nouvelle Zélande, Californie, Iran	10
Riedel (1929)	Expérience	Argile	12-17
Kalthoff (1972) ⁽¹⁾	Expérience	Verre et colle Araldite	15
Kobayashi (1974) ⁽¹⁾	Expérience	Verre polymérique	26
Cloos (1932) ⁽¹⁾	Terrain	Californie	30
Tchalenko (1968)	Terrain et expérience	Staffordshire et argile	$\phi/2 = 15$
McKinstry (1953)	Calcule théorique et terrain	Californie	$45 - \phi/2 = 30$
Anderson (1969) ⁽¹⁾	Expérience	Colle Araldite	39
Chinnery (1966)	Calcule théorique et terrain	Nouvelle Zélande, Californie	variable
Katz <i>et al.</i> (2004)	Terrain	Grès (Utah)	15

TABLE 1.1 – Variabilité de β (angle entre les structures R et la faille principale) dans la littérature.

⁽¹⁾ Tiré de Bahat (1980).

Rhéologie

Pour les études basées sur la modélisation en laboratoire ou sur la modélisation mathématique les auteurs ont été obligés de choisir des matériaux avec une certaine rhéologie. La rhéologie utilisée est parfois très variable :

Ductile Dans les laboratoires la matière employée est souvent l’argile, utilisé par exemple dans les expériences de Riedel (1929), de Tchalenko (1968) et de Freund (1974). Dans ce matériel des structures cassantes de type R , R' et P ont été observées et interprétées comme des « discontinuités de cisaillement ». Les auteurs ont aussi mis en évidence la formation de structures semi-ductiles, tels que des kink-bands. Ces structures sont souvent aussi interprétées en termes de fractures secondaires. Dans la littérature les termes R , R' et P sont donc utilisés à la fois pour des structures cassantes et pour des structures semi-ductiles.

Fragile Dans d’autres expériences, le comportement cassant des failles secondaires a été étudié avec des matériaux similaires au verre. Dans cette catégorie figurent le travail de Bahat (1980) et les travaux résumés dans le tableau 1.1.

Le modèle mathématique de McKinstry (1953) est basé sur l’hypothèse du champ de contrainte uniforme et sur le modèle de failles conjuguées. Ces hypothèses correspondent à une rhéologie fragile.

1.2.2 Terminaison d’une faille

Les failles impliquent par définition une concentration du mouvement le long de la surface de faille. Ceci implique un problème d’espace aux deux extrémités de la faille. Ci-dessous un aperçu des théories liées à ce problème et des structures observées près des terminaisons des failles.

Réorientation des contraintes Chinnery (1966) a étudié ce problème à l’aide de la théorie élastique de la dislocation. Cette théorie essaie de formuler la redistribution des contraintes suite à un mouvement sur la faille principale. Dans un milieu confiné cette déformation cause des contraintes élastiques, appelées dislocations. L’auteur a utilisé cette théorie pour calculer les plans

à contraintes cisailantes maximales (les directions de contraintes cisailantes maximales correspondent aux directions probables de rupture). Son étude suggère la génération de failles courbes (figure 1.4). Les limites de ce modèle sont premièrement l'utilisation d'une équation de mécanique élastique pour un problème de mécanique cassante, deuxièmement la complexité de la solution. La nomenclature proposée par cette étude n'est donc pas souvent utilisée dans la littérature.

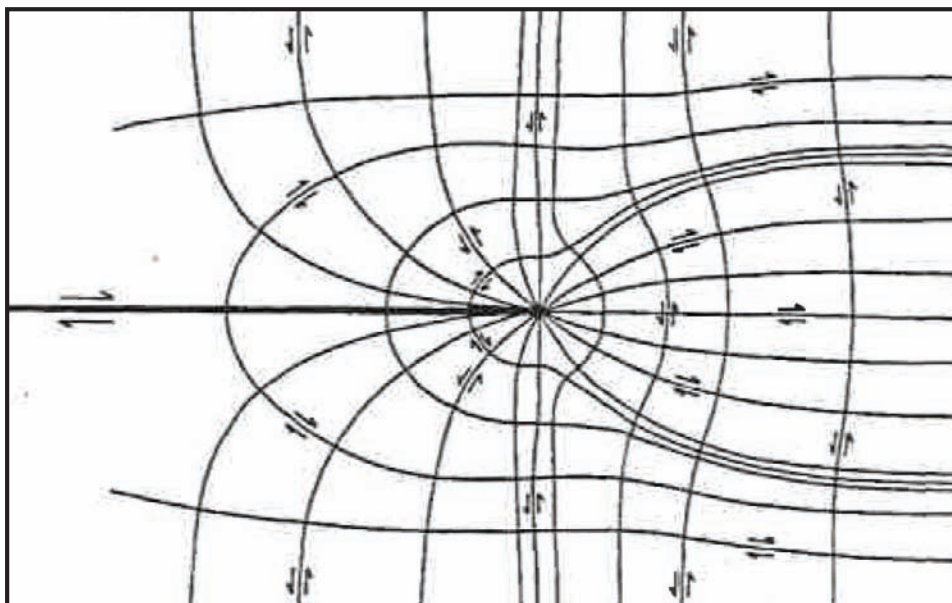


FIGURE 1.4 – Plans à contraintes cisailantes maximales dans la partie finale d'une faille décrochante dextre. Tiré de Chinnery (1966)

Bifurcation Dans la nature plusieurs auteurs (Bahat, 1980; Chinnery, 1966; Freund, 1974) ont observé que les failles décrochantes ont tendance à se terminer en plusieurs branches (figure 1.5). Cette tendance à développer un grand nombre de failles secondaires est appelé bifurcation (« splaying »). Selon Bahat (1980) une bifurcation implique une forte diminution locale des contraintes.

Flexion D'autres solutions proposées impliquent un accommodement par une flexion ou par une rotation de la roche sur les failles secondaires. Dans le cas de la flexion ceci implique une déformation ductile. La figure 1.5 représente une faille alpine en Nouvelle-Zélande : d'après Freund (1974) dans cet exemple la flexion (5 km) et la bifurcation (15 km) ont accommodé un mouvement décrochant de 20 km.

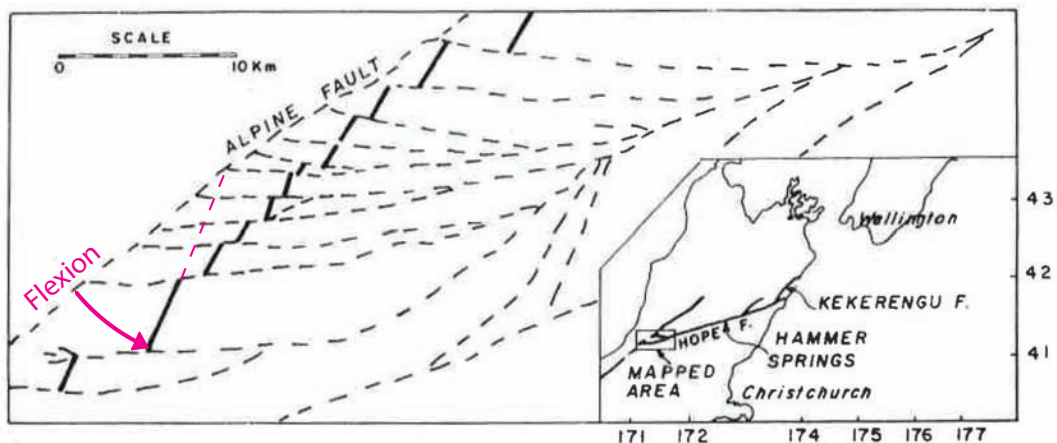


FIGURE 1.5 – Terminaison SW de la faille décrochante dextre « Hope » dans les Alpes de Nouvelle-Zélande. Le déplacement de la faille est accommodé par la bifurcation et par la flexion. Tiré de Freund (1974)

1.3 État de la recherche dans les Alpes suisses occidentales

Ci-dessous nous résumons l'état de la recherche sur les déformations dans les Alpes suisses occidentales.

1.3.1 Chevauchement des nappes

Dans les Alpes la première linéation d'étirement est liée au chevauchement des nappes en direction NW (D_I dans la figure 1.6, Steck, 1984). Les plans de chevauchement peuvent être considérés comme des zones de cisaillement ductiles (Ramsay *et al.*, 1983).

1.3.2 Zone de cisaillement du Simplon

Dans la zone du Simplon, une deuxième linéation d'étirement NE-SW a été interprétée comme une zone de cisaillement ductile associée à un mouvement du bloc supérieur vers le SE (Steck, 1990). Elle plonge entre 30° (dans la zone du Simplon) et 0° (dans l'hélevétique) vers le SE. La zone de cisaillement traverse donc la chaîne alpine obliquement en direction E-W (D_{II} dans figure 1.6).

Dans les nappes helvétiques, près de vallée du Rhône, cette linéation est aussi présente (Burkhard, 1986; Dietrich, 1989). La composante d'extension augmente en se rapprochant de la vallée du Rhône (Dietrich, 1989).

D'après Steck (2008) le déplacement a été estimé au minimum à 60 km, plus probablement à 100 km. Selon la même étude cette déformation a commencé autour de 32 Ma (dikes dans le gneiss déformé) et a continué jusqu'à environ 18 Ma, quand son style est devenu plus cassant et que la déformation s'est concentrée dans la faille du Rhône-Simplon..

1.3.3 Faille du Rhône-Simplon

La faille du Rhône-Simplon, ou ligne du Rhône-Simplon, est une importante faille du Néogène qui traverse les Alpes suisses occidentales (Hubbard et Mancktelow, 1992). Elle trouve son origine dans

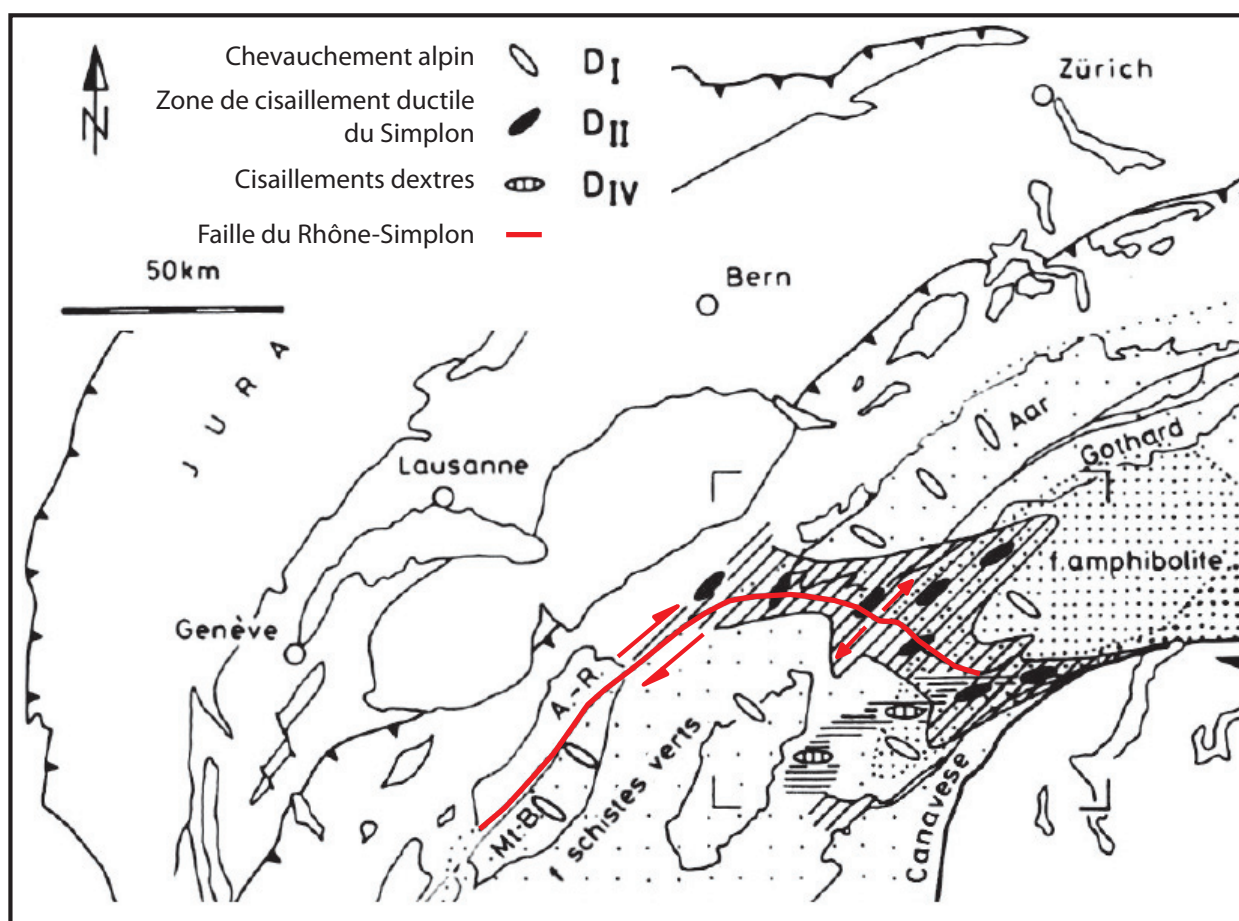


FIGURE 1.6 – Zone de cisaillement du Simplon et faille du Rhône-Simplon. Tiré de Steck (1990)

la zone du Simplon et s'insère dans la vallée du Rhône. Ci-dessous l'état de la recherche de cette structure est détaillé.

Col du Simplon

La zone du Col du Simplon est l'endroit où la faille affleure le mieux et où elle a été le plus étudiée. Ici la faille affecte une zone étroite au centre de la zone de cisaillement ductile du Simplon (figure 1.6) (Steck, 1990). Dans cette région la faille plonge vers le SW avec un faible pendage (Mancktelow, 1985). Sa cinématique est de faille normale, avec une extension vers le SW (Mancktelow, 1985). L'extension vers le SW a commencé il y a 19 Ma (datation Rb-Sr et K-Ar de la mylonite du bloc inférieur ; Mancktelow, 1985) et a continué au moins jusqu'à 3 Ma (datation des traces de fission de l'apatite près de la localité de Brig ; Soom, 1990 dans Keller *et al.*, 2006) dans un régime de soulèvement et de refroidissement. Le déplacement minimal de la faille a été estimé à 15 km (Mancktelow, 1985). Cette déformation de type transtensional à la même cinématique que la zone de cisaillement du Rhône-Simplon. Il est généralement accepté qu'au NW la trace de la faille tourne et s'insère dans la vallée du Rhône comme faille décrochante dextre (Hubbard et Mancktelow, 1992; Keller *et al.*, 2006; Steck, 2008).

Vallée du Rhône

Dans la vallée du Rhône la faille du Rhône-Simplon est en grande partie couverte par les sédiments du Quaternaire. Les campagnes géophysiques effectuées entre Sion et Martigny n'ont pas réussi à localiser avec précision les failles sous les sédiments quaternaires (Besson *et al.*, 1991).

La présence d'un couloir décrochant dextre, dont l'axe central correspond à la vallée du Rhône, est documentée par des failles affleurant en grande partie dans les unités penniques. Dans ce couloir de faille de 6 km de largeur, un réseau de failles kilométriques parallèles à la vallée est présent (Sartori, 2008 dans Sartori et Epard, 2011).

Sion

Un des rares affleurements du couloir de faille du RS au milieu de la vallée du Rhône est celui des collines à l'W de la ville de Sion (figures 1.1 et 1.2). Ici les écailles tectoniques qui forment la zone de Sion-Courmayeur sont séparées par des failles de direction moyenne comprise entre N70° et N80° et de pendage moyen de 75° vers le S (Burri, 1958; Sartori et Epard, 2011).

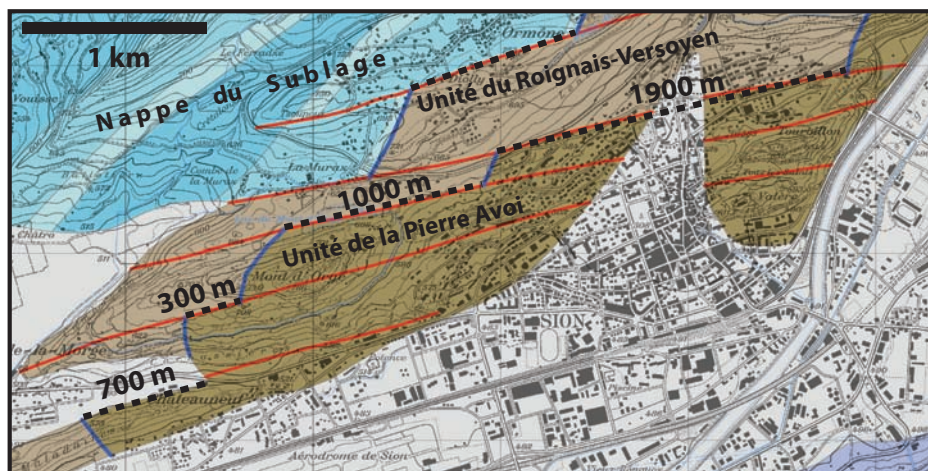


FIGURE 1.7 – Failles décrochantes dextres en-échelon dans les collines de Sion. Carte tectonique 1 :100'000 tirée de Steck *et al.* (1999)

Sur la carte tectonique 1 :100'000 de Steck *et al.* (1999), basée sur les levés de Burri (1958), les rejets apparents entre l'unité de Pierre d'Avoi et l'unité de Roignais-Versoyen sont hectométriques voir kilométriques (figure 1.7). La somme des décalages pour les quatre décrochements donne un déplacement horizontal total d'environ 3 km. Ces failles sont disposées en-échelon le long de la direction de la vallée du Rhône et ont été interprétées comme des structures de type *R* formées dans le couloir décrochant du RS (Sartori et Epard, 2011).

Saillon

Au village de Saillon (figure 1.1) affleure la faille de la Poya, de direction SW-NE. La faille sépare le flanc inverse de la nappe de Morcles (au N) de la série de Saillon, en position normale (au S). Badoux (1972) propose deux modèles pour expliquer l'origine de la série de Saillon : soit elle est rattachée au Lias du flanc normal de l'Ardèche, soit elle provient de la couverture autochtone du massif du Mt. Blanc interne (MBI). Le caractère quartzitique de la série de Saillon est mieux expliqué en suivant cette deuxième hypothèse. Dans ce cas, en assumant un décrochement dextre,

la couverture du massif MBI serait à rechercher au SW de la nappe d'Ardon. La nappe d'Ardon est formée par une série sédimentaire décollée de la couverture jurassique du MBI (Masson, 1980 dans Sartori et Epard, 2011). Dans ce cas le décalage serait d'environ 6 km (1.8). Dans le premier cas le décalage serait d'environ 3.5 km.

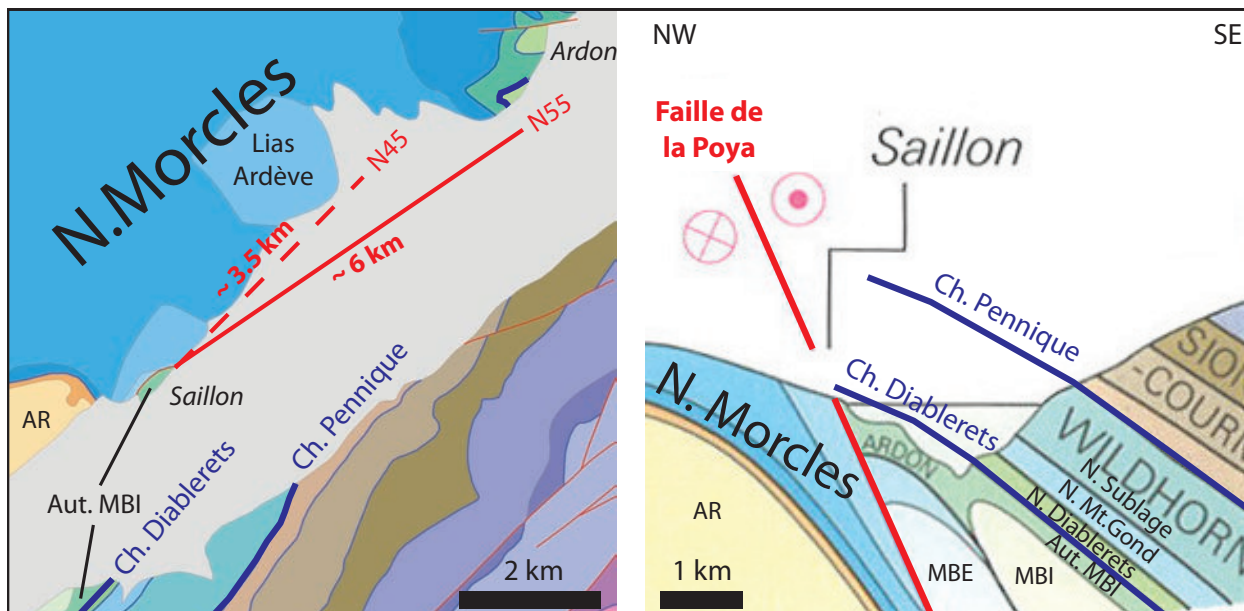


FIGURE 1.8 – Hypothèses de Badoux (1972) sur l'origine de la série de Saillon. Carte tectonique 1 :100'000 tirée de Steck *et al.* (1999), coupe tirée de Steck *et al.* (2001)

Suite dans la vallée de Chamonix

La faille de la Poya est le dernier affleurement du couloir de faille du RS. Au SW la ligne du Rhône-Simplon n'est plus associée à des failles kilométriques. L'hypothèse la plus répandue est qu'elle poursuit dans la vallée de Chamonix (figure 1.2). Dans cette vallée Hubbard et Mancktelow (1992) signalent une faille décrochante dextre de direction NE-SW. Des failles décrochantes dextres alignées en-échelon le long d'une zone de faille de direction NE-SW affleurent dans le massif de Belledonne et dans les chaînes subalpines (Hubbard et Mancktelow, 1992). D'autres structures ductiles et cassantes suggèrent que la zone de déformation du Rhône-Simplon continue jusqu'au massif de Pelvoux. Dans cette région des chevauchements pourraient compenser le mouvement de la faille normale du Simplon.

Suite dans le massif du Mont-Blanc

Dans la partie SE du massif du Mont-Blanc, Egli et Mancktelow (2012) ont mis en évidence de nombreuses structures ductiles et cassantes correspondant à des décrochements dextres d'orientation NE-SW. Plus au NW, proche de la vallée de Chamonix, la déformation des roches du massif du Mont-Blanc est par contre uniquement associée au raccourcissement. Les auteurs suggèrent donc que la suite de la faille du Rhône-Simplon est à rechercher plutôt dans le massif du Mont-Blanc interne (figure 1.2).

Interprétation Selon Hubbard et Mancktelow (1992) la faille du Rhône-Simplon correspondrait à une structure de « pull-apart », associée à une phase d’extension postérieure à celle de la mise en place des nappes. D’autres auteurs interprètent la faille du Rhône-Simplon comme une structure de transpression (zone de décrochement à l’intérieur d’une zone de raccourcissement) qui accommode des instabilités liées au soulèvement du dôme du Lepontin (Keller *et al.*, 2006; Steck, 2008).

1.3.4 Soulèvement des Alpes

La dernière déformation à large échelle dans les Alpes suisses occidentales sont les rétroplis. Dans la zone du Simplon cette déformation forme une troisième importante linéation d’étirement (Steck, 1984). Le rétropli est accompagné par un soulèvement général de la chaîne et, en conséquence, par la sédimentation de la Molasse (Escher et Beaumont, 1997).

Les travaux de Steck (2008) et de Glotzbach *et al.* (2008) résument les observations qui permettent de dater cette déformation près de la vallée du Rhône. Le refroidissement du dôme du Léopontin au dessous de 250° a eu lieu entre 30 Ma et 10 Ma (datation des traces de fission dans les zircons). Dans la zone du Simplon deux phases de refroidissement rapide ($> 30^{\circ}/\text{Ma}$) sont signalées : 18-15 Ma et 11-10 Ma). Cette époque correspond aussi au rétropli du massif du Mont-Blanc (à partir de 16 Ma) et de Vanzone (à partir de 30 Ma). Une phase plus tardive de soulèvement est signalée dans plusieurs zones : dans le massif de l’Aar (à partir de 6 Ma), dans la zone du Simplon (à partir de 5 Ma), dans le massif du Mont-Blanc (à partir de 3 Ma). Ces données sont cohérentes avec la sédimentation massive de la molasse dans la plaine du Po (à partir de 5 Ma).

Le fort taux de soulèvement de cette dernière période (1 mm/a) est comparable à celui d’aujourd’hui (1.5 mm/a dans la vallée du Rhône, Jaboyedoff *et al.*, 2003). De plus une forte analogie existe entre les zones qui aujourd’hui présentent un haut taux de soulèvement et les zone à haute activité sismique. Certains auteurs suggèrent que cette dernière phase de soulèvement soit encore active (Jaboyedoff *et al.*, 2003; Egli et Mancktelow, 2010). Ces auteurs ont aussi proposé un lien entre le soulèvement tardif du Mont-Blanc et la faille du Rhône-Simplon, notamment avec la terminaison de la faille du Rhône-Simplon en structure en fleur positive (« positive flower structure »).

De plus Jaboyedoff *et al.* (2003) suggèrent qu’une grande partie de la fracturation des Alpes est consécutive à ce soulèvement tardif. La création et la réactivation récentes de failles (néotectonique) et la sismique actuelle pourraient donc aussi avoir influencé les structures cassantes présentes près de la vallée du Rhône. Ces aspects seront discutées dans le prochain chapitre.

1.3.5 Failles mineures et tectonique près de la vallée du Rhône

Sismique actuelle

La vallée du Rhône est le secteur le plus actif des Alpes suisses (Maurer *et al.*, 1997). La profondeur de la grande partie des tremblements de terre dans les Alpes suisses occidentales est inférieure à 15 km (Maurer *et al.*, 1997). La vitesse de soulèvement est de l’ordre de $1\text{-}1.5\text{ mm a}^{-1}$ (Kahle *et al.*, 1997 dans Jaboyedoff *et al.*, 2003) et la vitesse de convergence est d’environ 2 mm a^{-1} (Calais *et al.*, 2002). Trois tremblements de niveau VIII (dommages importants) sur l’échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik (MKS) ont été enregistrés au cours des 250 dernières années (Maurer *et al.*, 1997). Les études de Maurer *et al.* (1997) et de Kastrup *et al.* (2004) sur les données des séismes des dernières décennies ont mis en évidence deux régimes tectoniques différents au N et au S de la vallée du Rhône (figure 1.9) :

- Dans l’Helvétique, les failles actives sont sub-verticales et de direction ENE-WSW ou WNW-ESE. Le mouvement est principalement décrochant dextre. L’axe cinématique d’extension T est

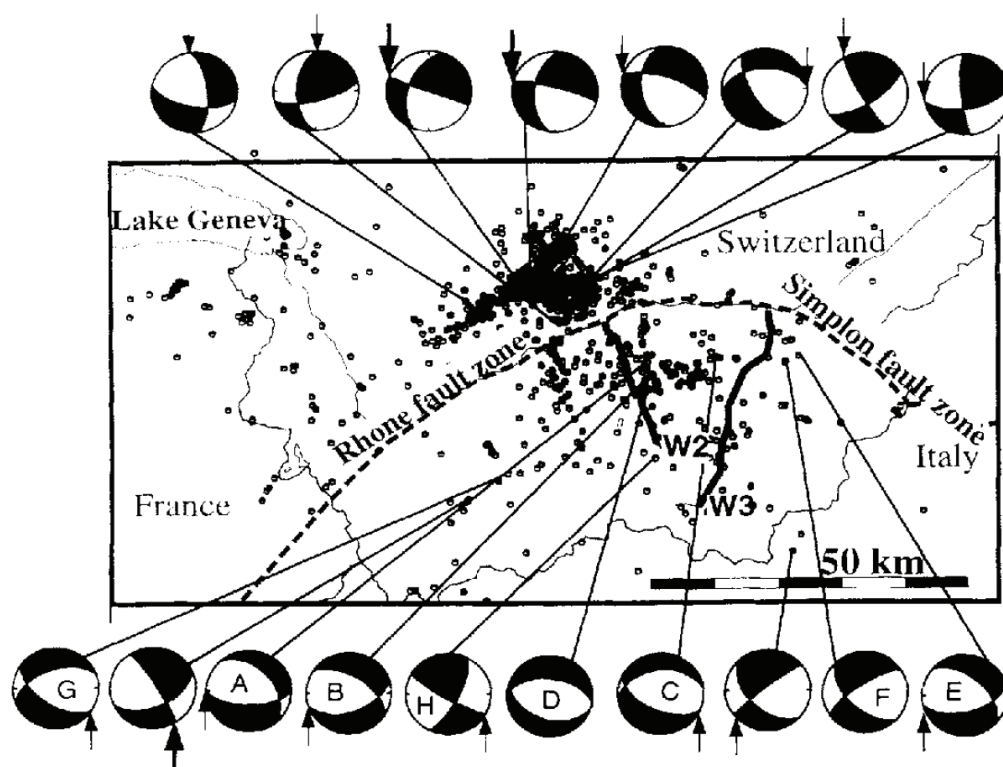


FIGURE 1.9 – Épicentres des séismes pendant la période 1983-91. Les diagrammes beachball représentent la cinématique (projections équiaires de Lambert). Les plans de failles sont indiqués avec une flèche. Tiré de Maurer *et al.* (1997)

sub-horizontale et de direction NW, l'axe cinématique de raccourcissement P est sub-horizontale et de direction NE.

- Dans le Pennique les failles actives sont moins raides et de directions similaires. Le mouvement principal est normal. L'axe T est sub-horizontale et d'azimut N, l'axe P est sub-verticale.

Au S de la vallée du Rhône l'axe d'extension tourne donc d'environ 45° et la contrainte verticale augmente. Différents modèles ont été avancés afin d'expliquer ce comportement.

Faïlles liées à l'accident du Rhône-Simplon

Dans la région du Rawil le travail de Gasser et Mancktelow (2010) ont mis en évidence des failles dont le mouvement suggère une influence du décrochement de la faille du Rhône-Simplon. Maurer *et al.* (1997) ont étudié les séismes de l'Hélievetique : dans la région du Rawil les hypocentres sont alignés le long d'une zone de faille sub-verticale de direction comprise entre ENE-WSW et E-W. Les plans de faille de ces tremblements sont par contre orientés WNW-ESE, le mouvement est décrochant dextre. Les auteurs ont interprété ces tremblements de terre comme la réactivation de structures de Riedel (1929) de type R' formées dans une zone de faille active liée à la faille du Rhône-Simplon.

Dans les nappes penniques de nombreuses failles ont aussi été associées avec une extension NE-SW (Champagnac *et al.*, 2004). Le caractère cassant de cette déformation suggère que la fracturation a eu lieu après le métamorphisme ; la cinématique de la déformation est compatible avec celle de

la faille du Rhône-Simplon.

Néotectonique

Différents auteurs décrivent des failles formées ou réactivées après la dernière glaciation (failles néotectoniques). Ci-dessous une description des failles proches de la vallée du Rhône.

Dans l'Helvétique, dans la région de la Gemmi (à l'E de la dépression du Rawil) le travail de Ustaszewski *et al.* (2007) a mis en évidence une importante faille formée durant la mise en place des nappes (brèche datée au Pliocène) qui témoigne de plusieurs réactivations. La dernière a été datée de l'Holocène (8.7 et 2.4 ka, datation de la dernière exposition à la lumière des Qz et Fsp du remplissage de la fracture).

Dans son travail sur la région des Alpes suisses occidentales Ustaszewski (2007) a aussi mis en évidence la présence d'une fracturation due à des mouvements gravitaires et la présence de nombreuses failles alpines *réactivées* par les mouvements gravitaires.

Dans Deichmann *et al.* (2002), Burkhard a analysé les données sismiques liées aux deux tremblements de terre de magnitude 3.5 qui ont eu lieu le 25.2.2001 à quelques kilomètres au NW de Martigny. Leurs hypocentres, localisés à environ 6 km de profondeur, étaient alignés sur une faille de direction SW-NE de 2 km de longueur et 1 km de hauteur. Dans cette zone affleure le carbonifère du synclinal de Salvan-Dorénaz. La direction de cette faille correspond au plan nodal décrochant dextre du séisme. L'auteur a émis l'hypothèse d'une réactivation d'une structure en demi-graben d'âge hercynienne.

Dans les Préalpes aussi, l'activité tectonique suggère une réactivation d'anciennes failles alpines. Les séismes de Bonnevaux (14.2.1990) et de Samoëns (19.8.2002) ont été étudiés par Delacou *et al.* (2005). Le premier a été situé dans le socle (profondeur de 17 km). Sa cinématique décrochante pourrait correspondre à la réactivation de la faille sénestre de Bonnevaux (N15) soit à une extension de la faille Buchillon-Evian. Ces deux failles ont été décrites par Badoux et Mercanton (1962) comme des failles alpines associées à la mise en place des nappes. L'hypocentre du deuxième tremblement de Terre a été situé à 5 km de profondeur. Cette valeur pourrait correspondre soit au socle, soit à la couverture. Le séisme a eu lieu sur une faille décrochante dextre de direction E-W qui n'affleure pas dans la région. Les deux tremblements de terre suggèrent que dans le Chablais l'extension est normale à la chaîne.

L'étude de Raymond *et al.* (1996) suggère par contre la réactivation de la faille Buchillon-Evian en faille normale. Cette interprétation est basée sur l'observation de petites failles normales dans les terrasses du Würm, sur les résultats des forages et sur des données morphologiques et géophysiques.

Chapitre 2

Méthodologie

Cette étude est basée sur plusieurs méthodes. La géologie structurale classique est fortement basée sur l'observation, l'interprétation et la mesure des structures directement sur le terrain. Au cours de la dernière décennie l'introduction des modèles numériques de terrain (MNT) à haute résolution (1-2 m) et des photographies aériennes georéférencées a permis le développement de différentes méthodes d'analyse de données numériques. Les MNT permettent de visualiser une copie numérisée du relief topographique afin de cibler au mieux les lieux à étudier pour le travail de terrain. Selon les caractéristiques morphologiques et géologiques du terrain, une analyse très précise de l'orientation d'objets géologiques à l'aide des MNT est aussi possible. Pour terminer les MNT permettent aussi de vérifier l'orientation des structures et de les extrapoler sur une région plus vaste.

L'étude des structures cassantes a été menée à plusieurs échelles. Une grande partie des observations de terrain a été effectuée à l'échelle de l'affleurement. Souvent ces informations ont été complétées par des observations à plus petite échelle, notamment par les panoramas et les analyses numériques. Certains affleurements ont aussi été étudiés à une plus grande échelle, notamment pour l'étude de structures de mouvement sur les plans de faille et pour l'observation des microstructures au microscope optique.

Un effort a aussi été fait afin d'extrapoler le maximum d'informations des données récoltées. En particulier les données de mouvement des failles sont souvent complexes à interpréter. De multiples méthodes (analyse cinématique, interprétations d'affleurements, reconstruction des paléocontraintes, analyses des déplacements, statistiques sur les données des failles, etc.) ont donc été appliquées afin de mieux comprendre ces données et de les intégrer dans un modèle tectonique cohérent.

2.1 Sigles et abréviations

Le tableau 2.1 résume les principales sigles et abréviations utilisées dans cette étude. Les affleurements ont été nommés avec le signe # et un numéro (par exemple #3.1). Les failles ont été nommées d'après le sub-secteur d'étude (par exemple AR_W_1 est une faille du sub-secteur AR_W). La localisation des failles et des affleurement peut être effectuée à l'aide des cartes de l'annexe A. Les conventions utilisées pour les orientations des structures ont été résumées dans le chapitre 2.2.2.

2.2 Travail de terrain

Le travail de terrain a été effectué principalement dans les secteurs d'Ardon et de Martigny (figure 1.1). Les relevés de terrain ont été effectués lors de plusieurs visites de quelques jours entre l'été

Sigle	Signification
AR_W	(secteur) d'Ardon, partie W
AR_E	(secteur) d'Ardon, partie E
c	(plan) de cisaillement
Chl	chlorite
f	(plan) de faille
Fsp	feldspath
HS	relief ombré, de hillshade
HSL	(image) Hue Saturation Lightness
j	(plan) de diacase
Kfs	feldspath potassique
MA_N	(secteur) de Martigny, partie N
MA_S	(secteur) de Martigny, partie S
MNT	Modèle Numérique de Terrain
Pl	plagioclas
P	(axe) cinématique principal de raccourcissement
Qz	quartz
RS	(faille) du Rhône-Simplon
s	(plan) de la schistosité
T	(axe) cinématique principal d'extension
σ	axe principal de contrainte
T-D	(relation) épaisseur-déplacement, de Thickness-Displacement
ϕ	angle interne de frottement
Ω	famille d'orientations similaires
Γ	famille de directions similaires

TABLE 2.1 – Sigles et abréviations

2011 et l'été 2012. Cette approche a en partie été imposée par la dispersion des secteurs d'étude, dont certains d'accès particulièrement difficile. Cette méthode a l'avantage de permettre d'avancer en parallèle avec les analyses des modèles numériques et avec les interprétations. Ceci a donc permis de cibler le travail de terrain sur des affleurements potentiellement intéressants et de vérifier les interprétations tectoniques.

Les failles sont définies comme des structures cassantes qui ont subi un mouvement cisailant important (Price et Cosgrove, 1990). Des structures cassantes qui n'ont pas subi un mouvement important sont des diaclasses. Les failles sont les structures cassantes le plus riches en informations et les plus importantes. La déformation tectonique a non-seulement formé ces cassures, mais a aussi été absorbée par les décalages des terrains sur ces failles. Ces objets géologiques contiennent donc des informations très intéressantes sur la tectonique cassante qui les a formés.

Ci-dessous un panorama des paramètres d'une faille et des méthodes pour les mesurer est présenté. Les diaclasses ont été caractérisées de façon similaire ; elles ont les mêmes paramètres à part ceux liés au mouvement.

2.2.1 Paramètres d'une faille

Dans la littérature les failles sont classiquement caractérisées par les paramètres suivants (Allmendinger, 1989).

- Affleurements à la surface.
- Orientation du plan de faille.
- Orientation du vecteur de mouvent (souvent divisé en direction et sens de mouvement).
- Magnitude du mouvement (rejet).
- Épaisseur de la faille.
- Surface affectée par la faille (longueur et largeur).

Dans la pratique il est rare de pouvoir observer et mesurer tous ces paramètres. Si l'érosion de l'affleurement le permet, il est souvent possible d'observer une partie du plan de faille. Selon les roches qui composent l'affleurement, des structures de mouvement peuvent être observées. Quand les deux compartiments de la faille sont conservés, l'épaisseur de la faille peut aussi être estimée. La détermination de la quantité de mouvement et de la surface de faille sont par contre des paramètres plus difficiles à déterminer.

Détermination de mouvement. Les structures de mouvement utilisées pour déterminer le vecteur de mouvement sont les fibres et les stries de friction. Les *fibres* sont des minéraux (souvent de la calcite ou du quartz, mais aussi de la serpentine ou de la chlorite) qui cristallisent le long d'une surface de faille légèrement irrégulière. Elles grandissent à partir d'une zone à l'abri de la friction et leur axe de cristallisation correspond à la direction de mouvement (figure 2.1.A). Il est donc possible de déterminer à la foi la direction et le sens de mouvement. Ces structures sont souvent présentes dans les roches carbonées, plus rarement dans des roches siliceuses. Les *stries de friction* sont des structures gravées dans la roche par des éléments plus durs (figure 2.1.B). Ces structures permettent de déterminer la direction de mouvement, mais pas le sens de mouvement (sauf si le clast est encore présent dans la rayure (ce qui n'a jamais été le cas dans cette étude). Dans ce travail les stries ont été utilisées seulement quand aucune fibre n'a pu être identifiée.

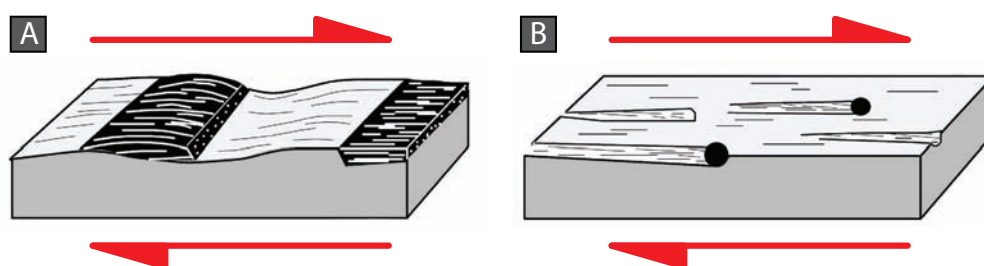


FIGURE 2.1 – Détermination du vecteur de mouvement d'une faille à partir de : A) Fibres. B) Stries de friction. (Tiré de Allmendinger, 1989)

Epaisseur de la faille : La définition de l'épaisseur d'une faille est traitée au chapitre 2.6.2.

2.2.2 Conventions d'orientation

Dans cette étude **tous les angles sont exprimés en degrés**. Pour des raisons de lecture les données sont souvent privées du symbole « ° ». Les objets géologiques mesurés sur le terrain peuvent être regroupés en trois catégories géométriques :

Ligne Les structures linéaires mesurées sont par exemple des directions de mouvement et des intersections de structures planaires avec une surface. L'**orientation** d'une ligne peut être formulée avec l'azimuth (0-360) et le pendage (0-90). Dans ce travail les orientations des lignes ont souvent été mesurées avec l'angle pitch (angle entre l'horizontale d'un plan et la ligne). Dans ce cas l'orientation du plan sur laquelle le pitch a été mesuré est aussi fournie.

Plan La grande partie des structures mesurées sont des structures planaires (une couche, la schistosité principale, un plan de faille, une fracture ecc.). Dans ce travail l'**orientation** des plans est donnée par l'azimuth de sa ligne de plus grande pente et par son pendage.

La **direction** d'une structure planaire correspond à l'horizontale du plan. La direction d'un plan orienté à 180/65 peut être décrite dans les suivantes notations : E-W ; W ; N90.

Vecteur Un vecteur est composé par une direction et par un sens. Le mouvement d'une faille est par exemple une donnée vectorielle. Un vecteur peut donc être exprimé par une ligne et une description du sens. Le sens de mouvement d'une faille peut être décrit par exemple en termes de quel bloc à bougé dans quelle direction. Pendant le travail de terrain les vecteurs de mouvements ont été décrit avec cette méthode.

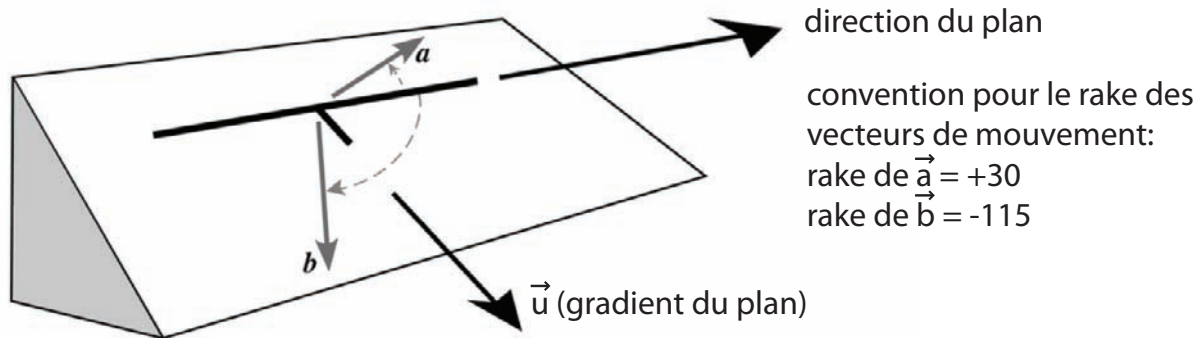


FIGURE 2.2 – Caractérisation du vecteur de mouvement : convention pour l'angle rake (tiré de Allmendinger, 1989).

Pour faciliter les analyses les données de mouvement ont été converties dans le format **rake**. Le rake est un angle de pitch mesuré avec une convention précise, décrite par Allmendinger (1989). Le rake est mesuré à partir de l'horizontale située en sens antihoraire par rapport à la ligne de plus grande pente du plan. La valeur du rake est comprise entre 0° et 180° et peut être soit positive soit négative (figure 2.2). Une valeur négative indique un vecteur qui pointe en bas, donc un mouvement normal. Une valeur positive un mouvement inverse.

Cette convention complexe rend la méthode du rake trop compliquée à utiliser sur le terrain, mais facilite la manipulation des données avec l'ordinateur : l'orientation du plan de faille et la valeur du rake décrivent de façon très compacte la géométrie de la faille et le vecteur de mouvement.

Toutes les conventions utilisées pour décrire les orientations des structures ont été résumées dans le tableau 2.2.

Projection stéréographique

La projection stéréographique permet de représenter en 2D des structures en 3D. La projection utilisée dans ce travail est la projection équivalente de Lambert. Les carrés de la grille de cette

Structure	Format	Convention	Exemple
Plan	Orientation	Azimuth de la ligne de plus grande pente / Pendage	180/65
	Direction	Azimuth	W
Ligne	Orientation	Azimuth / Plongement	140/58
	Pitch	Plan ; Angle pitch et direction	180/65 ; 70 SW
Vecteur	Orientation	Azimuth / Plongement	140/58
	Ligne ; Direction	Angle pitch ; Description du mouvement	180/65 ; 70 NE ; Bloc supérieur descendu vers le SE
	Rake	Plan ; Angle rake	180/65 ; -70

TABLE 2.2 – Résumé des conventions utilisées pour décrire les orientations des structures

projection ont tous la même surface. Ceci aide à mieux visualiser la densité de pôles pendant le regroupement des structures en familles ayant une orientation similaire.

2.3 Analyse morphologique numérique

Les observations de terrain ont été complétées et vérifiées avec des données numériques, tels que les photographies aériennes et les modèles numériques de terrain. La manipulation des différents jeux de données a été effectuée avec les logiciels GIS (Système d'Information Géographique) ArcGIS et ERDAS. La visualisation et le dessin de structures a été effectué principalement avec ArcGIS. Le système de coordonnées utilisé est le système de référence suisse CH1903+, issu de la mesure nationale de 1995. Ces coordonnées sont présentes sur les bords de la grande partie des cartes de cette étude.

Orthophotos

L'office fédéral de la topographie (Swisstopo) fournit des images orthophotos pour la totalité de la surface nationale. Il s'agit de photographies aériennes privées de distorsion. Ci-dessous un tableau avec les informations concernant les orthophotos utilisées, tels que le numéro et le nom correspondant à la carte nationale 1 : 25'000, l'année de vol et la résolution :

Nr.	Nom	Année	Résolution [m]
1284	Monthey	2004	0.5
1285	Les Diablerets	2004	0.5
1286	St. Léonard	2005	0.5
1304	Val-d'Illiez	2004	0.5
1305	Dent de Morcles	2004	0.5
1306	Sion	2005	0.5
1324	Barberine	2005	0.5
1325	Sembracher	2005	0.5

Les images sont composées d'une grille de mailles de résolution de 0.5 m. A chaque point une couleur est donnée et forme donc un pixel. Historiquement Swisstopo fournit des fichiers originaux plus petits, qui couvrent 1/16 d'une carte nationale. Pour une étude à échelle régionale il est nécessaire de les regrouper dans un fichier unique couvrant des zones plus grandes. Cette procédure a été appelée *mosaïque*. Les orthophotos des feuilles indiquées dans le tableau précédent ont donc

été regroupées ensemble dans deux très grands fichiers. Pour faciliter la visualisation de grandes surfaces, les images ont été comprimées en format « JPEG 2000 ». Le fichier comprimé est environ 17 fois plus petit et la perte de qualité est minimale. La mosaïque et la compression ont été effectuées avec le logiciel ERDAS, plus performant que ArcGIS sur des grands fichiers.

Modèles numériques de terrain

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) sont des jeux de données numériques qui décrivent la morphologie du terrain. Comme pour les orthophotos, la surface est couverte par une grille en x, y d'une certaine maille. A chaque point de cette maille une altitude z est associée.

Au cours des dernières années la précision des MNT a été constamment améliorée. Les cantons et les universités n'ont pas toujours investi dans les dernières versions des MNT, ce qui fait qu'au début de cette étude les données disponibles étaient les suivantes :

- Dans le cadre de la délimitation des forêts protectrices (SilvaProtect-CH) le modèle MNT-10 (maille à 10 m^2) a été calculé à partir du modèle MNT-25 (maille à 25 m^2). Le modèle MN-10 est disponible pour l'ensemble du territoire suisse. Les altitudes sont données en mètres sans chiffre après la virgule.
- Entre 2000 et 2008 le MNT-MO a été levé sur l'ensemble du territoire avec une maille de 2 m^2 jusqu'à une altitude maximale de 2000 m . La précision altimétrique est de 0.5 m .
- Pour l'ensemble du canton de Vaud des MNT à maille 1 m^2 sont aussi disponibles. Dans certaines régions (notamment celles situées hors des limites cantonales), les données à haute résolution sont aussi limitées à 2000 m d'altitude.

Nom	VD-1m-2005	VD-1m-2003	VS-2m	CH-10m
Région	Partie du VD	Partie du VD	VS	Suisse
Maille $< 2000\text{ m}$	1 m	1 m	2 m	10 m
Maille $> 2000\text{ m}$	1 m	-	25 m	10 m
Maille autres cantons	25 m	25 m	25 m	-
Pixel depth	Float 32 bit	Float 32 bit	Float 32 bit	Integer 16 bit
Source	Swisstopo	Swisstopo	Swisstopo	Silva project

Assemblage des MNT

Comme pour les orthophotos, les fichiers originaux des MNT couvrent 1/16 d'une carte nationale 1 : 25'000. Ces données ont donc aussi été regroupées dans un grand fichier qui couvre la partie occidentale de la vallée du Rhône.

Les données originales à haute résolution ont des avantages mais aussi des limites :

- Les MNT VD-1m ont une très bonne résolution (1 m) qui est présente aussi pour les portions du territoire ayant une altitude $> 2000\text{ m}$. L'inconvénient est que les portions de territoire valaisanes comprises dans la grille de ces fichiers ont été remplies avec les altitudes du MNT-25.
- Les MNT VS-2m ont une très bonne résolution (2 m). Malheureusement au dessus de 2000 m cette résolution a été remplacé par les altitudes du MNT-25.

Afin d'exploiter les meilleures résolutions disponibles il a été nécessaire d'extraire les zones à haute résolution des différents MNT. La procédure appliquée à la partie occidentale de la vallée du Rhône à l'aide du logiciel ArcGIS est présentée ci-dessous. Les données originales sont représentées dans la figure 2.3.A.

1. Mosaïque

Les fichiers originaux de VD-1m ont été combinés dans le fichier f -VD (en vert dans la figure 2.3.B) avec la fonction *mozaïque*. La même procédure a été appliquée aux fichiers VS-2m. Cela a généré le fichier f -VS (en rouge dans la figure). Dans la même figure on peut remarquer que près de la frontière Vaud-Valais, il y a une zone qui est couverte par les deux fichiers (f -VS \cap f -VD, délimitée par une ligne rouge dans la figure).

Le fichier original du modèle CH-10m était déjà fourni en version mozaïque sur l'entier du territoire suisse. Ce grand fichier a donc dû être coupé sur la zone d'étude. Les données ont aussi été converties de *integer* en *float* afin d'être compatibles avec les autres fichiers. Cela a été effectué à l'aide de la fonction *Float*. Le fichier généré a été appelé f -CH.

2. Resampling

Une grande partie de la zone d'étude se situe dans le Canton du Valais et est donc couverte par des MNT à résolution 2 m. Cette résolution a donc été choisie comme résolution standard pour le fichier final. Les altitudes du fichier f -VD ont été recalculées sur une maille de 2 m avec la fonction *resample*. Les altitudes du fichier f -CH ont aussi été interpolées sur la nouvelle maille.

3. Frontière Vaud-Valais

Pour éliminer toutes données issues du MNT-25, la zone valaisanne comprise dans le fichier f -VD a été éliminée selon la procédure suivante. La ligne de frontière a été dessinée à environ une vingtaine de mètres à l'intérieur du Canton de Vaud (le long du changement de résolution). Cette ligne a été représentée en bleu dans la figure 2.3.B. Dans la zone commune aux fichiers f -VD et f -VS (appelée f -VS \cap f -VD) les fichiers f -VD et f -VS ont été découpés le long de cette ligne. Les données à haute résolution (f -VD-2 au N de cette ligne, en bleu sur la figure ; f -VS-2 au S, en violet sur la figure) ont été ajoutées aux fichiers f -VD respectivement f -VS. Cette fusion a généré les fichiers f -VD-3 et f -VS-3.

4. Limite de 2000 m d'altitude

Les fichiers issus de l'étape précédente ne contiennent plus aucune altitude issue du modèle MTN-25, à l'exception du fichier f -VS-3. Dans ce fichier les hauteurs des points plus élevés que 2000 m proviennent encore du MNT-25. Les valeurs de ces points ont donc été remplacées avec celles du MNT-10. Cela a été effectué à l'aide de la fonction *Con* :

```
Con([f-VS-3] < 2000.00, [f-VS-3], [f-CH])
```

Le fichier avec les nouvelles altitudes a été appelé f -VS-4. La figure 2.3.C. montre le résultat de cette procédure dans la zone couverte par la carte nationale Dt de Morcles (1305). En rouge les altitudes inférieures à 2000 m, en bleu les altitudes supérieures.

5. Mozaïque final

Pour terminer, les fichiers f -VD-3 et f -VS-4 ont été combinés dans le fichier final (visible dans la figure 2.3.D) avec la fonction *Mozaïque*.

Visualisation des MNT

Une méthode classique pour visualiser un MNT est la génération d'une carte des pentes (pente en degrés pour chaque pixel) ou un relief ombré (hillshade ou HS).

Une technique développée par Jaboyedoff *et al.* (2007) permet de visualiser en même temps l'azimut et le pendage de la surface topographique. Cette méthode est basée sur le calcul des vecteurs normaux aux plans (pôles) contenus entre quatre points de hauteur z_1 , z_2 , z_3 et z_4 d'un MNT à maille d . Le pôle \vec{p} est calculé en effectuant le produit vectoriel entre les vecteurs \vec{v}_1 et \vec{v}_2 qui coupent la cellule formée par les quatre points (figure 2.4.A) :

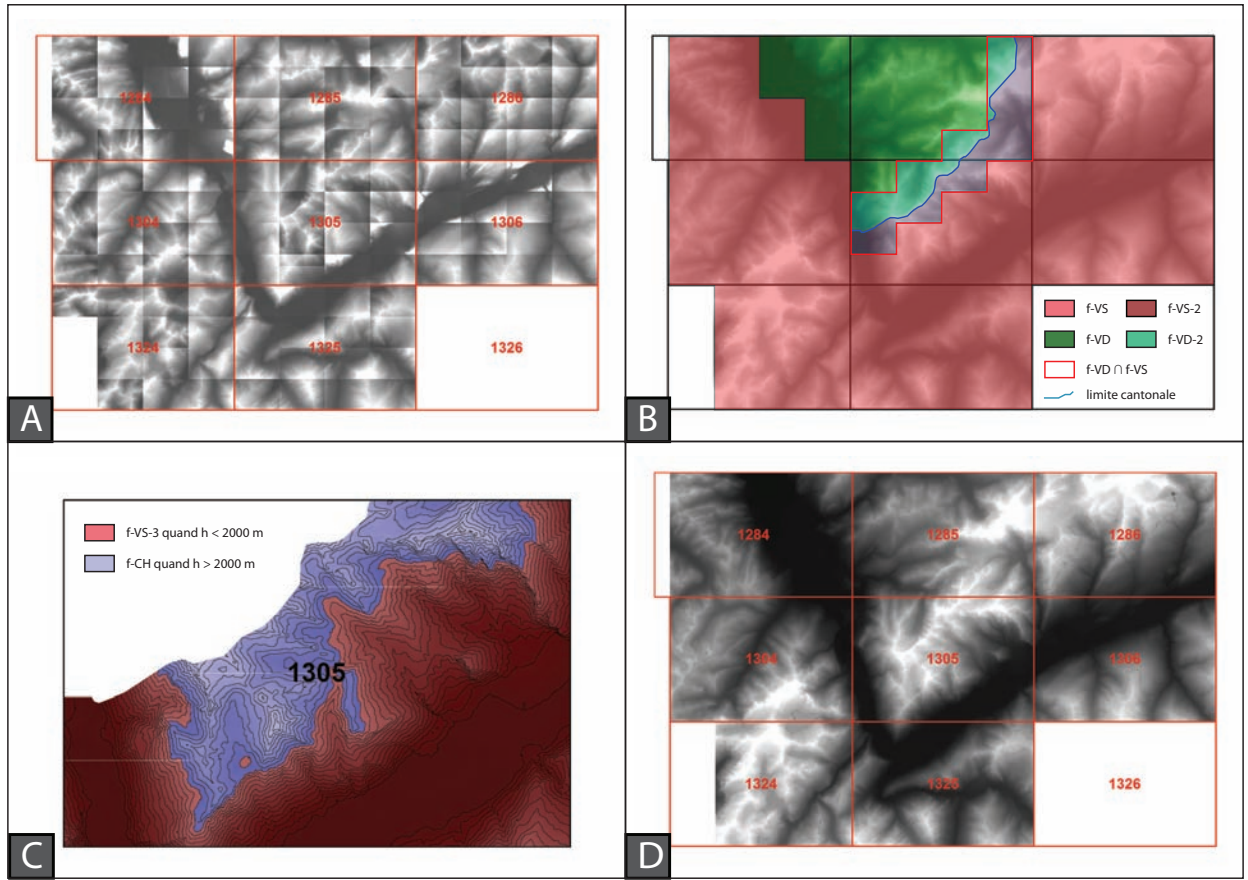


FIGURE 2.3 – Assemblage des MNT dans un fichier unique pour la zone occidentale de la vallée du Rhône. A) Fichiers originaux à haute résolution. B) Sélection des zones (bleu clair et violet) proches de la frontière Vaud-Valais (ligne bleue). Ces zones contiennent des données de qualités différentes (voire explication dans le texte). C) Remplacement des données d’altitudes ≥ 2000 m. Exemple de la feuille de la carte nationale Dent de Morcle. D) Fichier final

$$\begin{aligned}
 \vec{v}_1 &= \left[d; 0; \frac{1}{2}(z_1 + z_3 - z_2 - z_4) \right] \\
 \vec{v}_2 &= \left[0; d; \frac{1}{2}(z_1 + z_2 - z_3 - z_4) \right] \\
 \vec{P} &= \vec{v}_1 \times \vec{v}_2 \\
 \vec{p} &= \frac{\vec{P}}{|\vec{P}|}
 \end{aligned}$$

Une couleur est associée à l’orientation du vecteur unitaire du pôle (\vec{p}). Ceci est effectué en superposant à la projection stéréographique du pôle un modèle colorimétrique HSL (Hue Saturation Lightness). L’azimut est exprimé avec la teinte sur un cercle chromatique de 360° , tandis que le pendage est exprimé par une saturation entre 0° et 90° , c’est à dire la quantité de blanc dans une

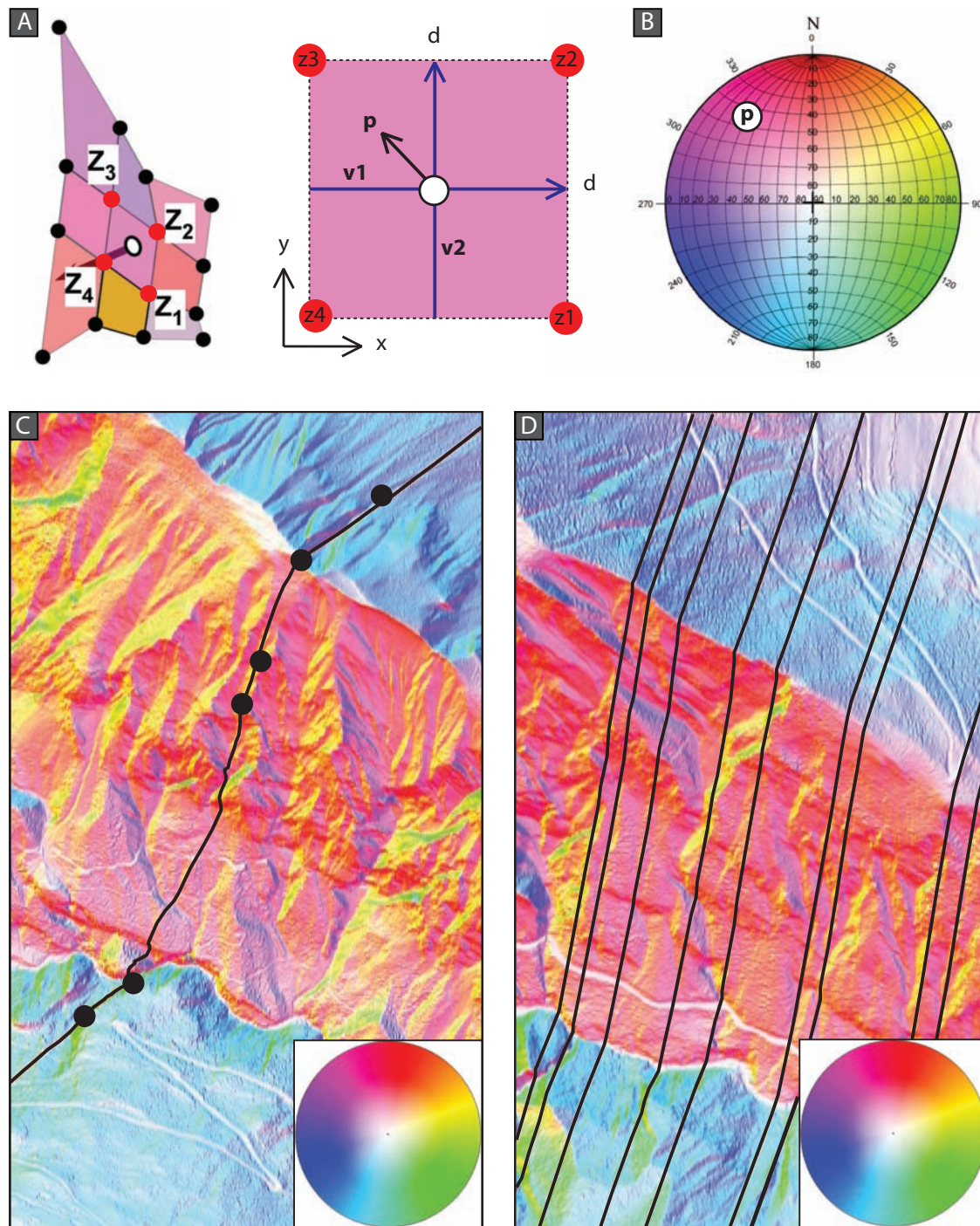


FIGURE 2.4 – Génération d’une image HSL par le logiciel Coltop3D (Jaboyedoff *et al.*, 2007). A) Calcul du pôle à partir de l’altitude des 4 points voisins (z_1 - z_4). B) Calcul de la couleur avec le modèle colorimétrique HS. C) Le modèle colorimétrique HSL superposée à une projection stéréographique. Exemples d’analyses 3D des linéaments avec le logiciel Coltop3D : D) Calcule du meilleur plan passant par les points et visualisation de l’intersection de ce plan avec la surface topographique. E) Visualisation de l’intersection avec la surface topographique de plans ayant une orientation spécifique (dans l’exemple 196/84).

teinte spécifique (figure 2.4.B).

2.3.1 Analyse 3D des linéaments

Le logiciel Coltop3D (Jaboyedoff *et al.*, 2007) permet d'analyser des linéations en 3D. Les pôles des plans sont visualisés en 3D et colorés selon le modèle colorimétrique HSL. Deux modalités d'utilisation sont disponibles :

Trace du plan à partir de points . Des points sont dessinés le long d'une structure présumée planaire. A partir des coordonnées (x,y,z) de ces points le logiciel calcule le plan qui passe le plus proche possible de tous les points. Finalement, l'intersection de ce plan avec la topographie est dessinée.

La figure 2.4.C montre un exemple d'utilisation de cette modalité le linéament d'une vallée. L'orientation du plan calculée par le logiciel est 219/71.

Cette fonction a été utilisée pour calculer l'orientation des structures visibles sur des cartes numérisées. Principalement des orthophotos et des images HSL, mais aussi des images ombrées, des cartes géologiques et des cartes topographiques.

Trace du plan à partir d'une orientation . Une orientation du plan est choisie. En sélectionnant un point de la carte, le logiciel calcule et dessine l'intersection du plan avec la topographie à partir de ce point.

La figure 2.4.D montre un exemple d'utilisation de cette modalité afin de vérifier la présence de failles d'orientation 196/84. Dans cet exemple les vallées dans la zone rouge-jaune ont la même orientation que les intersections des plans 196/84 avec la topographie.

2.3.2 Analyse morphologique 3D

Le logiciel Coltop3D permet aussi l'analyse morpho-structurale d'une surface topographique. Les pôles des plans sont visualisés en 3D et colorés selon le modèle colorimétrique HSL. Les zones où les points ont la même couleur correspondent à des plans ayant la même orientation. Le logiciel permet de sélectionner ces zones et calcule le pendage moyen de ces plans.

Quand la topographie d'un massif rocheux est liée aux orientations des fractures présentes, le massif est dit structurellement contrôlé. Dans ce cas l'orientation des plans qui forment la topographie correspond à l'orientation des familles de discontinuités qui forment le relief.

Coltop3D permet donc de définir à une échelle régionale les familles de discontinuité qui caractérisent le massif rocheux.

2.4 Analyse cinématique

L'analyse cinématique a été effectuée en analysant les orientation des axes cinématiques P-T. Ces axes trouvent origine dans la sismique, mais leur signification est strictement cinématique. Ci-dessous le concept d'axe P-T et son application dans cette étude sont expliqués.

Axes P-T en sismique

En sismique l'interprétation d'un tremblement de terre est appelée **solution du mécanisme focal**. A partir des signaux enregistrés par les sismographes de plusieurs stations de mesure distribuées autour de l'épicentre il est possible de reconstruire : l'heure de l'événement, les coordonnées

de l'épicentre, la profondeur de l'épicentre et la magnitude des neuf composantes du *tenseur sismique du moment* M (Cronin, 2010). Comme pour le tenseur de contraintes, le tenseur sismique du moment peut aussi être décrit avec l'orientation et la magnitude des trois composantes principales : les axes P (de pression), T (de tension) et N (de null). Le plan de faille sur lequel le tremblement a été généré est orienté à 45° de P et de T et contient N. Les plans qui satisfont ce critère sont appelés **plans nodaux** et sont toujours deux. Seul un d'entre eux correspond au plan de faille, le deuxième est appelé plan auxiliaire (Cronin, 2010).

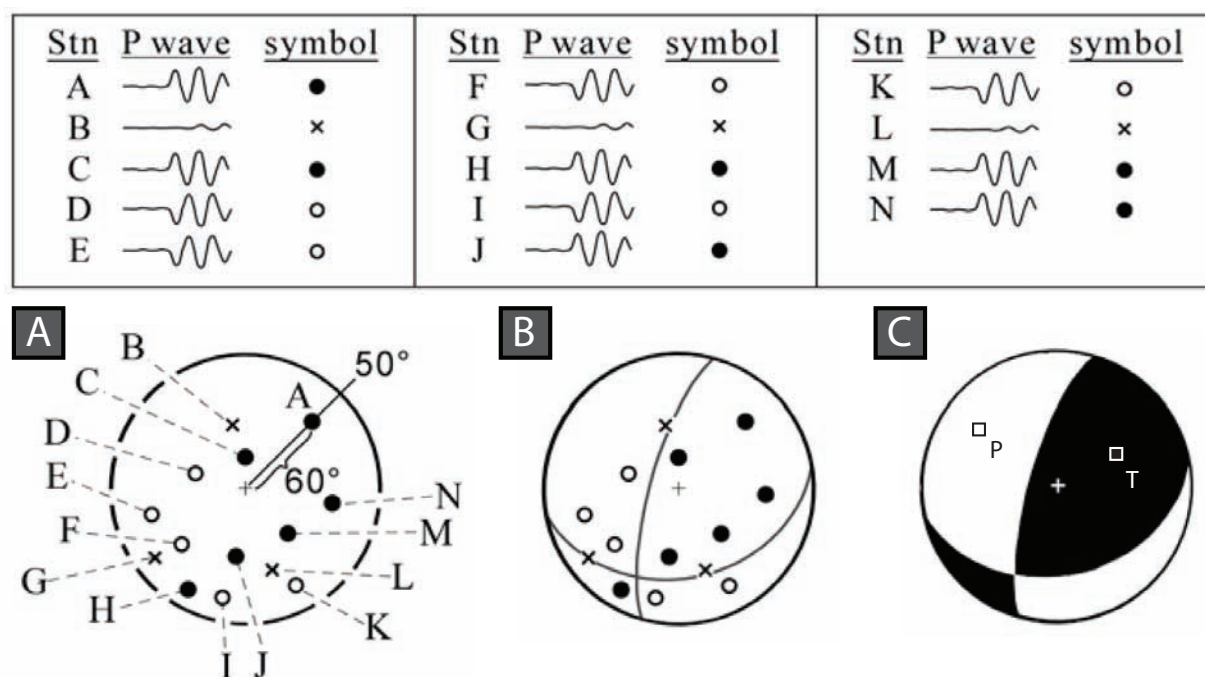


FIGURE 2.5 – Reconstruction du mécanisme focal d'un tremblement de terre à partir de la première oscillation enregistrée par un réseau de sismographes (A-N). Tiré de Cronin, 2010.

Un **diagramme beachball** est une projection stéréographique dans laquelle les grands cercles des deux plans nodaux forment quatre quadrants. Quand la première oscillation enregistrée par un sismographe est vers le bas (compression), la ligne qui relie l'épicentre et la station est projetée et forme un point qui est dessiné en blanc. Quand l'oscillation est vers le haut (tension) le point est dessiné en noir. Quand elle est plate le point est représenté par une croix (figure 2.5.A). Ces points forment un zonage en quatre quadrants, deux contenant les points noirs, deux les points blancs. Les croix se positionnent sur la limite entre quadrants qui correspond aux plans nodaux. Ces derniers peuvent donc être dessinés (figure 2.5.B). Les quatre quadrants sont finalement colorés selon les couleurs des points contenus. Les axes P et T correspondent aux pôles des plans nodaux (figure 2.5.C).

Axes P-T en géologie structurale

En physique l'analyse cinématique est définie comme l'étude du mouvement d'un corps sans considérer les forces qui génèrent le mouvement. Le moment sismique est une mesure de l'énergie d'un séisme

et est défini par l'équation suivante (Aki, 1966 dans Allmendinger, 1990) :

$$M = \mu u A$$

Le moment sismique dépend donc uniquement du module de cisaillement μ (une constante liée au matériel), de la surface du plan de faille A et de la quantité moyenne de déplacement u . Le moment sismique est donc considéré comme une mesure purement cinématique de la magnitude de déformation (Allmendinger, 1990). Même si les noms des axes cinématique P et T proviennent de « pression » et de « tension », leur signification est strictement cinématique. L'axe P correspond à la direction principale de raccourcissement infinitésimal, l'axe T à celle d'extension infinitésimal Allmendinger (1989).

Les axes P-T sont considéré comme une représentation très compacte qui résume à la fois l'orientation du plan de faille, la direction de mouvement et le sens de mouvement Allmendinger (1989). De plus, cette représentation permet de comparer des données de failles de terrain avec des données sismiques.

Reconstruction des axes P-T

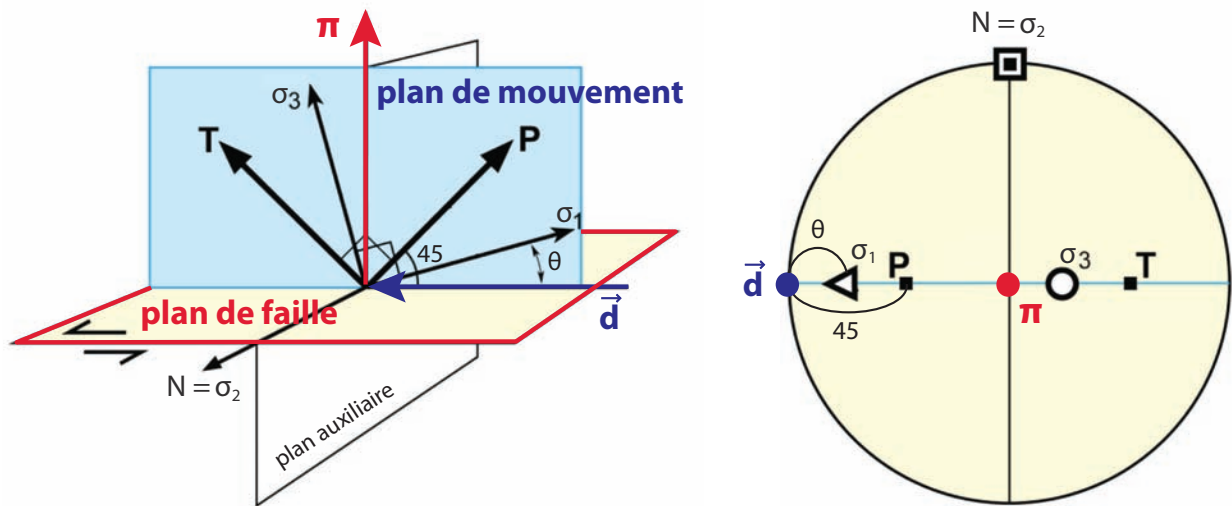


FIGURE 2.6 – Relations entre pôle du plan de faille (π), vecteur de mouvement (\vec{d}), axes cinématiques (T, P, N) et axes des contraintes ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). A) Vision en 3D. B) Projection stéréographique. Modifié d'après Burg (2012)

Allmendinger (1990) a décrit une méthode graphique de reconstruction des axes cinématiques principaux P et T à partir de l'orientation du plan de faille et du vecteur de mouvement. Cette méthode est illustrée dans la figure 2.6. Les axes P-T font partie d'un plan dit *plan du mouvement*. Ce plan est formé par le pôle du plan π et le vecteur de mouvement \vec{d} . Par définition orthonormaux, les axes P-T sont orientés à 45° de π et de \vec{d} . Ils peuvent donc être facilement dérivés avec une rotation de $+45^\circ$ et -45° de \vec{d} sur le plan du mouvement.

Familles cinématiques

Dans ce travail l'analyse cinématique a été effectuée en utilisant la méthode de Allmendinger (1990) implémentée dans Matlab par Cardozo dans Allmendinger *et al.* (2011). Pour chaque faille les axes

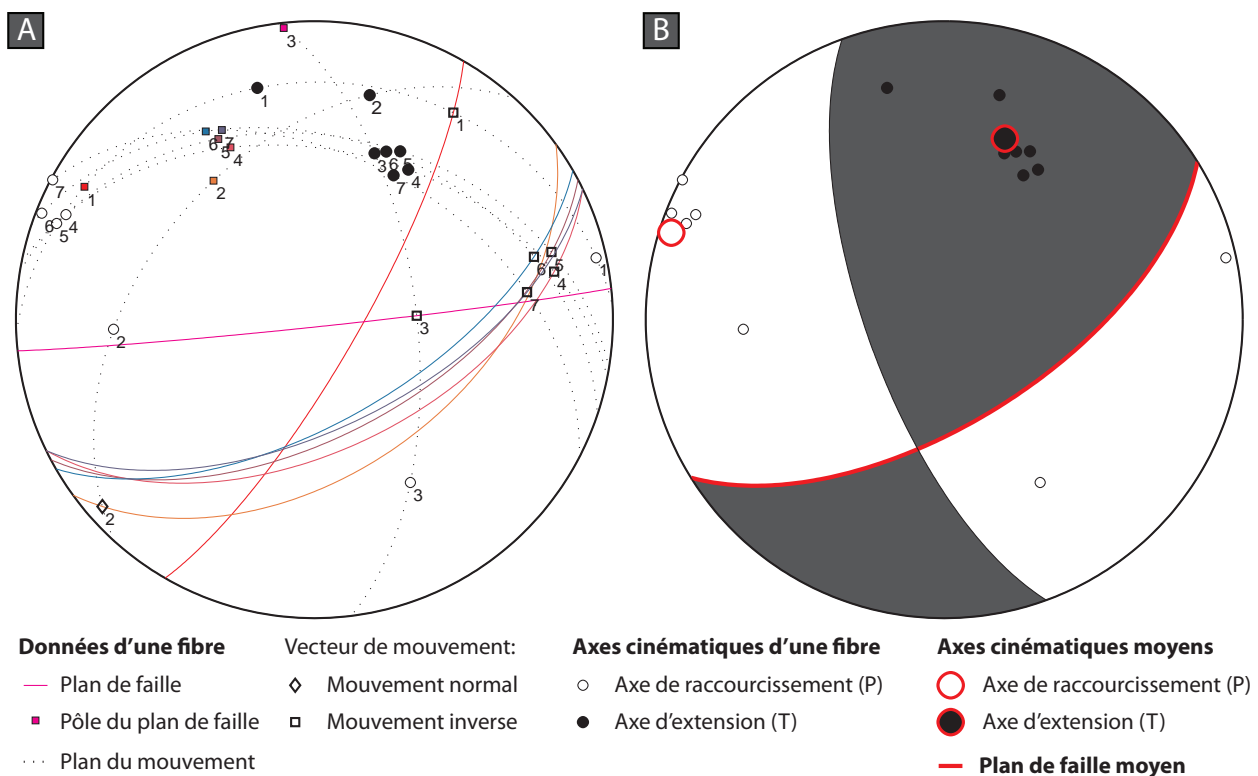


FIGURE 2.7 – Analyse cinématique des fibres de la faille décrochante dextre AR_W_1. A) Reconstitutions des axes P-T pour chaque fibre avec la méthode de Allmendinger (1990). B) Calcul des axes moyens avec la statistique de Bingham (1974) et reconstruction du diagramme beachball.

cinématique P-T de chaque fibre ont été calculés (figure 2.7.A). Les failles ayant des axes P-T similaires ont été en suite regroupées dans une famille. Les valeurs moyennes des axes d'une famille ont en suite été calculées en utilisant la statistique directionnelle de Bingham (1974) implémentée dans Matlab par Cardozo dans Allmendinger *et al.* (2011). Ces familles de failles regroupent donc des failles ayant à la fois la même orientation, la même direction de mouvement et le même sens de mouvement. Des diagrammes beachball ont été reconstruits à partir des axes P-T moyens des familles. Ces diagrammes fournissent aussi une estimation du plan de faille moyen. La figure 2.7.B représente un exemple de reconstruction du diagramme beachball pour les données de la faille AR_W_1.

2.5 Analyse des paléo-contraintes

Le but de l'analyse des paléo-contraintes est de reconstruire les contraintes qui ont généré et/ou causé le mouvement sur une faille. Les analyses des contraintes peuvent être classifiées en deux catégories :

- Les méthodes graphiques, qui permettent de calculer uniquement l'orientation des contraintes principales.
- Les méthodes numériques, qui permettent de calculer l'orientation des contraintes principales et la forme de leur ellipsoïde.

Dans cette étude, les deux types de méthodes ont été essayées. Les grandes variabilités dans les résultats des méthodes numériques m'a porté à me méfier de leurs résultats et à opter pour l'application des méthodes graphiques.

Même si ces méthodes correspondent à une simplification extrême de la réalité, elles peuvent donner une idée de l'orientation des paléo-contraintes. Ceci est très utile afin de comparer les résultats avec d'autres études. Dans cette étude les méthodes graphiques ont été utilisées en connaissant leurs limites et seulement quand le contexte géologique et la cinématique des failles étaient clairs.

Méthode des dièdres droits

Un plan de faille peut se développer sur une fracture pré-existante. Dans ce cas l'axe σ_1 est localisé quelque part dans le quadrant P et l'axe σ_3 quelque part dans le quadrant T . La méthode des dièdres droits de Angelier et Mechler (1977) est basée sur l'hypothèse que σ_1 est probablement orienté dans une position qui se trouve dans le dièdre P de la plupart des failles. Les dièdres P qui contiennent le plus grand nombre d'axes P sont colorés en rouge foncé, ceux qui en contiennent moins en rouge plus clair. La même procédure est appliquée sur les dièdres T en couleur bleu.

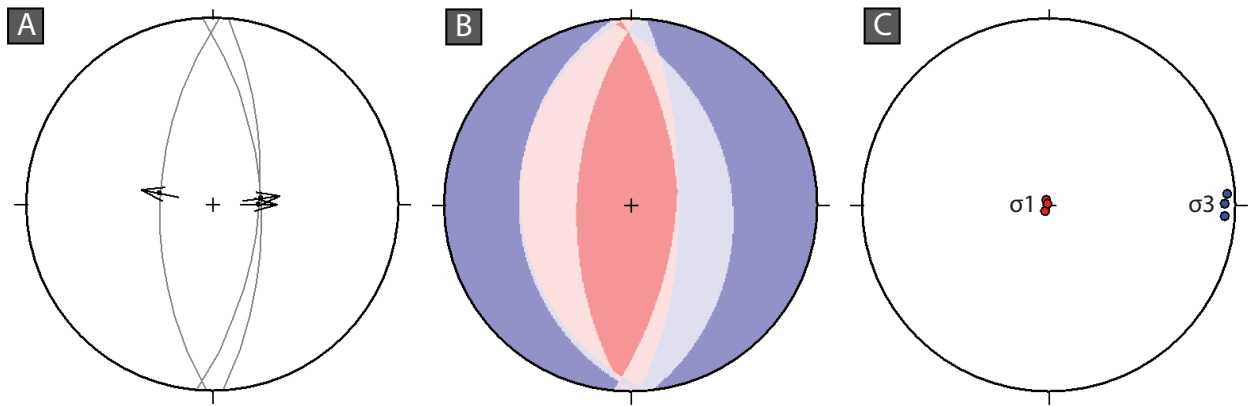


FIGURE 2.8 –

La figure 2.8.A représente l'orientation d'un système de failles normales conjuguées. L'analyse des dièdres droits limite l'orientation de σ_1 à la zone rouge et l'orientation de σ_3 à la zone bleue (2.8.B). Dans cet exemple les failles ne sont pas assez nombreuses et la méthode n'est pas très efficace. Cette méthode est beaucoup plus efficace quand des fractures ayant différentes orientations sont réactivées par la même contrainte.

Axes des contraintes

Cette méthode est significative uniquement quand des fibres sont supposées correspondre au régime tectonique qui a formé la fracture de la faille. Donc quand une fibre n'est pas issue d'une réactivation de la faille.

Selon le critère de Mohr-Coulomb l'angle entre la direction de mouvement et le vecteur de mouvement est $\theta = 45^\circ - \phi/2$ (Wyllie et Mah, 2004). Avec un angle de friction classique de $\phi = 30^\circ$, σ_1 sera orienté à $\theta = 30^\circ$ du vecteur de mouvement \vec{d} et σ_3 à 60° . L'orientation de ces axes de contraintes principaux peut être calculée avec une rotation du vecteur de mouvement sur le plan de mouvement, de façon similaire à l'analyse cinématique. La figure 2.6 représente la relation entre la géométrie du plan de faille, des axes cinématiques P-T et des axes des contraintes principaux.

La figure 2.8.B représente l'application de cette méthode aux mêmes failles conjuguée. Dans ce cas la reconstruction des paléo-contraintes est très précise.

2.6 Quantification du mouvement

2.6.1 Reconstruction géométrique

La reconstruction géométrique d'une faille est une méthode très précise pour quantifier le mouvement. Cette méthode est applicable dans deux situations :

Décalage d'une structure linéaire (par exemple une charnière). L'intersection de la structure linéaire avec le plan de faille donne naissance à deux points (à cause du décalage). Pour quantifier le déplacement il suffit de calculer la distance entre ces deux points.

Décalage d'une structure planaire (par exemple une limite lithologique). Dans ce cas la connaissance du vecteur de mouvement (direction de mouvement et sens de mouvement) est indispensable. L'intersection de la structure planaire avec le plan de faille donne deux lignes (à cause du décalage). La distance entre ces deux lignes le long du vecteur de déplacement correspond à la quantité de déplacement.

Dans cette étude la deuxième approche a été utilisée pour quantifier les déplacements sur des failles du secteur d'Ardon à l'aide des limites lithologiques. La méthode utilisée est décrite ici.

La structure planaire B affleure à la surface le long d'une faille F aux points $P_1(x_1, y_1, z_1)$ et $P_2(x_2, y_2, z_2)$, avec $z_1 > z_2$. A partir du point P_1 l'intersection entre B et le plan de faille F forme la droite a . Une droite b ayant la direction du vecteur de mouvement \vec{d} est tracée à partir de P_2 . Pour estimer la quantité de mouvement il suffit de calculer le point $P_3(x_3, y_3, z_3)$ à l'intersection des droites a et b . La figure 2.9 représente une reconstruction en 3D du problème.

Transformation de coordonnées

Le calcul du point d'intersection P_3 est plus facile si le problème est formulé en deux dimensions. Cela est possible du moment que les trois points et les deux droites sont toutes des structures situées sur le plan de faille. La formulation permet aussi d'approximer la faille avec une structure parfaitement planaire. En réalité les points P_1 et P_2 ne sont pas exactement sur le plan F et en 3D les droites a et b n'ont donc pas de point d'intersection.

Le nouveau système de coordonnées cartésiennes (x', y') est parallèle au plan de faille : x' a été défini comme la direction de F , y' comme la ligne de plus grande pente de F (avec sens négatif). Le calcul des équations des droites a et b dans le nouveau système de coordonnées peut être facilité par la définition d'un triangle rectangle couché sur le plan de faille et ayant comme sommets P_1, P_2 et O' . Les côtés qui forment la base et la hauteur du triangle sont appelés respectivement l_{tot} et h_{tot} (figure 2.9).

h_{tot} correspond à la distance entre P_1 et l'origine O . Elle peut être calculée en construisant un triangle rectangle ayant comme sommets P_1 et O et comme côté l'axe z . Un cathète peut être déterminé en calculant la différence des hauteurs entre P_1 et P_2 . L'angle en P_1 , γ , peut être calculé à partir du pendage de la faille ; la longueur de l'hypoténuse h_{tot} peut être déterminée avec un calcul trigonométrique :

$$\gamma = 90 - \text{pendage}_F$$

$$h_{tot} = \frac{|z_3 - z_1|}{\cos(\gamma)}$$

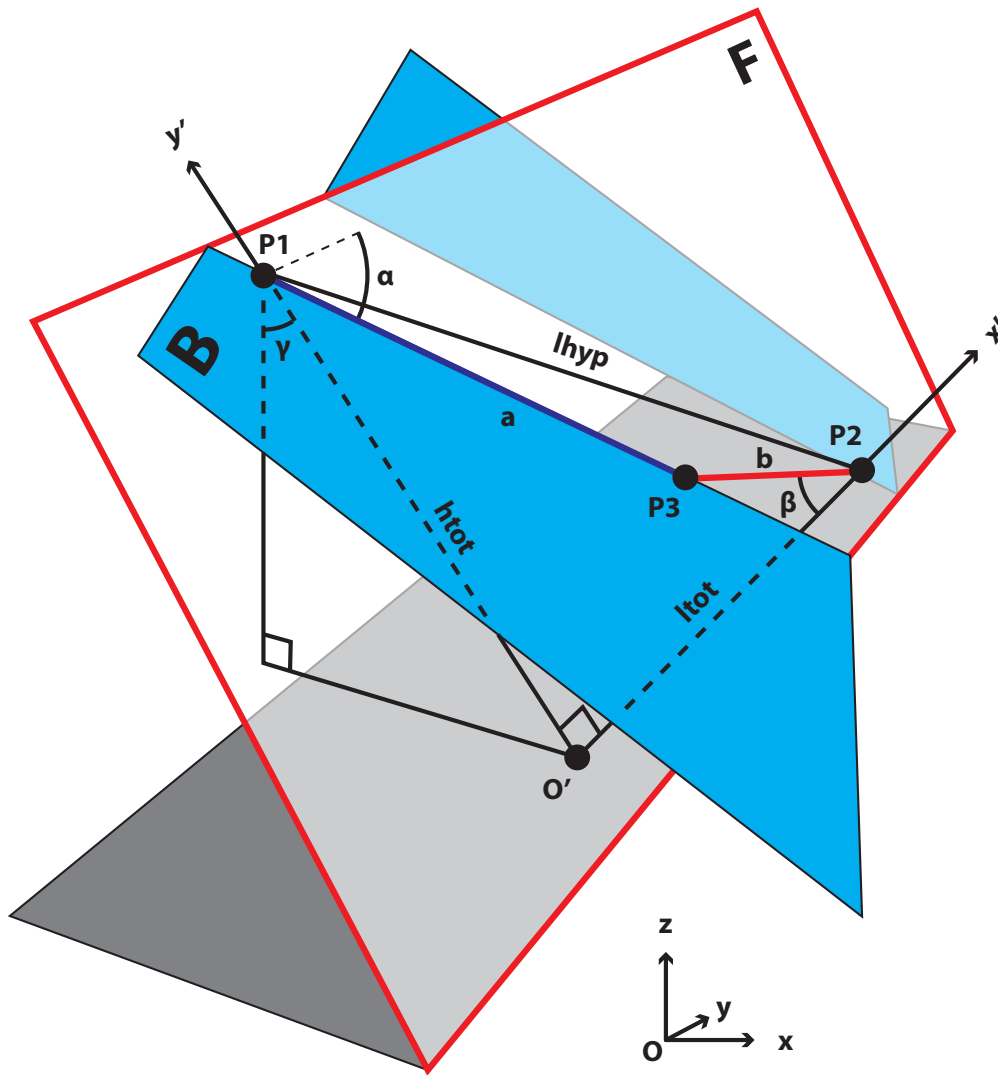


FIGURE 2.9 – Reconstruction de la quantité de mouvement $|P_2P_3|$ à partir d'une structure planaire B décalée par une faille F. La droite b représente la direction de mouvement.

l_{tot} correspond à la distance entre P_2 et l'origine O . Elle peut être calculée avec un calcul trigonométrique à partir de h_{tot} et l_{hyp} . Cette dernière longueur correspond à l'hypoténuse du triangle, c'est à dire à la distance entre P_1 et P_2 :

$$l_{hyp} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_3)^2}$$

$$l_{tot} = \sqrt{l_{hyp}^2 - h_{tot}^2}$$

Les droites a et b peuvent être formulées avec l'équation générale d'une droite $y' = mx' + q$. Les paramètres m et q peuvent être reconstruits à partir des pentages des deux droites (α et β). Ces angles sont couchés sur le plan de faille et correspondent donc à des pitch. β a donc été mesuré sur le terrain à partir d'une fibre. α peut être soit mesuré sur le terrain, soit reconstruit à l'aide d'un stéonnet (intersection entre les plans B et F). Les paramètres q peuvent être dérivés des

intersections des droites avec l'axe y' :

$$m_1 = -\tan(\alpha)$$

$$q_1 = h_{tot}$$

$$m_2 = -\tan(\beta)$$

$$q_2 = \tan(\beta)l_{tot}$$

Calcul de l'intersection

Le point d'intersection $P_3(x'_3, y'_3)$ peut être calculé en résolvant le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} y'_3 = m_1 x'_3 + q_1 \\ y'_3 = m_2 x'_3 + q_2 \end{cases}$$

Une solution du système est :

$$x'_3 = (q_2 - q_1)/(m_1 - m_2)$$

$$y'_3 = m_1 x'_3 + q_1;$$

Les longueurs des lignes $|P_1 P_3|$ et $|P_2 P_3|$ (qui correspond à la longueur du vecteur de mouvement \vec{d}) peuvent finalement être calculées avec la trigonométrie :

$$|P_1 P_3| = \sqrt{x'^2_3 + (h_{tot} - y'_3)^2}$$

$$|P_2 P_3| = |\vec{d}| = \sqrt{(l_{tot} - x'_3)^2 + y'^2_3}$$

Finalement, les coordonnées en (x, y, z) de P_3 (ici la notation $\overrightarrow{OP_3}$ est utilisée) peuvent être calculées à partir soit de P_1 , soit de P_2 :

$$\overrightarrow{OP_{3,a}} = \overrightarrow{OP_1} + \vec{v}_a \cdot |P_1 P_3|$$

$$\overrightarrow{OP_{3,b}} = \overrightarrow{OP_2} + \vec{v}_b \cdot |P_2 P_3|$$

Où \vec{v}_a et \vec{v}_b correspondent aux vecteurs unitaires des droites a et b , avec sens indiquant P_3 .

Finalement la distance entre P_{3a} et P_{3b} peut être calculée. Cette distance Δ est une erreur et est due au fait que les points P_1 et P_2 ne sont pas exactement alignés sur le plan F . La valeur de l'erreur Δ peut donc être considéré comme une indice de la qualité de l'approximation du problème avec une faille parfaite.

$$\Delta = \sqrt{(x_{3a} - x_{3b})^2 + (y_{3a} - y_{3b})^2 + (z_{3a} - z_{3b})^2}$$

Résumé

Cette procédure du calcul du déplacement a été résumée dans le tableau 2.6.1.

1. Dans une première phase α , angle de pitch de la droite a est reconstruit à l'aide d'un stéréonet à partir des orientations du plan de faille F et de la structure planaire B .
2. Dans une deuxième phase la longueur du vecteur de déplacement $|\vec{d}|$ est calculée à partir des points P_1 et P_2 , de l'angle α , de l'angle pitch du vecteur de mouvement β et du pendage de la faille. La distance Δ entre les points d'intersections P_{3a} et P_{3b} (calculés respectivement à partir des points P_1 et P_2) est aussi calculée. La valeur de Δ est une indice de la qualité du résultat.

Phase	Flux	Objet	Type de structure
Stéréonet	input	F B	plan plan
	output	α	angle
Calcul	input	P1 P_2 α β F	point point angle angle plan
	output	$ \vec{d} $ Δ	longueur longueur

TABLE 2.3 – Résumé de la procédure et des paramètres nécessaire au calcul du déplacement

2.6.2 Relations épaisseur-déplacement

Dans une roche sans structures décalées par il n'est pas possible de reconstruire la quantité de mouvement qui à eu lieu sur une faille. Dans cette étude cela était le cas dans le secteur de Martigny, où d'importantes structures cassantes étaient présentes dans des gneiss très homogènes. Ci-dessous une approche empirique qui permet une estimation de l'ordre de grandeur du mouvement est exposée.

Modèle linéaire

Pendant les années 80 différents auteurs ont étudié la croissance des failles dans le temps et dans l'espace, en particulier la relation entre épaisseur et déplacement (T-D de thickness-displacement). Hull (1988) a collecté et analysé les données morphologiques d'une centaine de failles de différentes échelles, mais toutes de type cassante, de haute déformation (cataclasite) et présentes dans des roches quartzo-feldspatiques. En analysant les données T-D les observations suivantes ont été faites :

- Dans un diagramme T-D de type « nuage de points » les points sont très dispersés et ne montrent aucune relation évidente (Evans, 1990). Certaines données montrent même une variation d'un ordre de grandeur.
- Les données T-D couvrent un espace de 8 ordres de grandeur (entre 10^{-4} et $10^4 m$). Pour les visualiser de façon plus compacte, on utilise des axes à échelle logarithmique (diagramme log-log) (Hull, 1988).
- Dans un diagramme log-log on peut observer une corrélation linéaire sur plusieurs ordres de grandeur (figure 2.10.A). Différents auteurs ont fourni les paramètres de la loi de puissance ($D = b T^a$) pour différents types de failles. Par exemple Hull (1988) publia $a = 0.97$ et $b = 63$ pour les données des cataclasites, ce qui est proche d'une relation linéaire ($a \approx 1$). La grande variabilité des données est moins visible, car compressée par l'échelle logarithmique, qui permet d'analyser le comportement globale des données dans un espace de plusieurs ordres de magnitude.
- Cependant les données varient d'environ ± 1 ordre de grandeur le long de la droite de régression. Cette variance peut être en partie due à des erreurs de mesure et des variations de la lithologie (Hull, 1988).
- La relation linéaire T-D ne peut donc être utilisée que de façon qualitative. Il serait plus approprié de calibrer le modèle uniquement avec des données de la même faille ou de la même famille de failles de la zone d'étude (Evans, 1990).

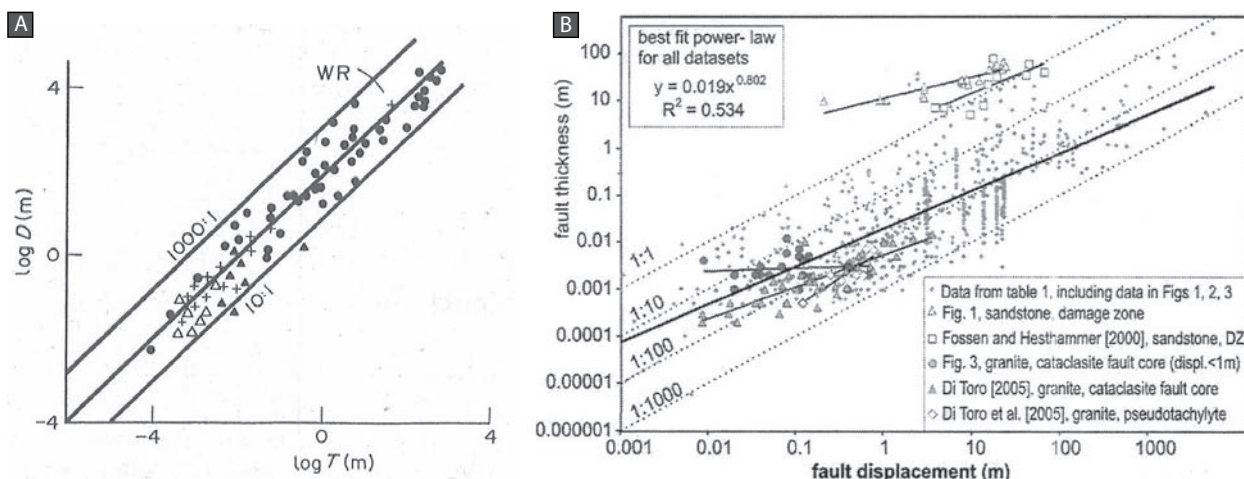


FIGURE 2.10 – Relations entre épaisseur et déplacement pour des failles cassantes dans des roches quartz-feldspathiques. A) Tiré de Evans (1990). B) Tiré de Shipton *et al.* (2006).

Limites du modèle linéaire

Dans les décennies suivantes de nombreux auteurs ont continué à étudier le sujet et ont mis en évidence les limites suivantes :

- Certaines failles ont tendance à concentrer la déformation dans des fractions de la zone de faille. La zone de faille qui se développe est par conséquent asymétrique. Si elle est appliquée à une zone de faible mouvement, la méthode T-D aura tendance à sous-estimer le mouvement (Evans, 1990).
- Généralement une faille est formée par un « fault core » (FC, une zone à haute déformation souvent formée par de la kakirite) englobée dans une « damage zone » (DZ, une zone fracturée à plus faible déformation) (Shipton *et al.*, 2006). Les éléments structuraux utilisés pour définir ces zones varient selon les auteurs. Les éléments issus de la déformation peuvent changer dans le temps. L'épaisseur d'une faille dépend donc beaucoup des définitions utilisées.
- Des nouvelles données suggèrent qu'il y a effectivement une corrélation positive entre épaisseur de la zone DZ et le déplacement. Par contre l'épaisseur de la zone FC semble grandir seulement jusqu'à une valeur maximale pour rester constante le long de la déformation. Cette observation est cohérente avec différents modèles théoriques de réduction de la résistance tangentielle pendant les tremblements de terre (Shipton *et al.*, 2006).
- L'anisotropie de la lithologie, ainsi que la présence d'anciennes structures dans la roche influencent aussi la géométrie avec laquelle une faille se développe (Evans, 1990; Shipton *et al.*, 2006).
- Des analyses de données plus spécifiques (même faille, même lithologie) suggèrent que des équations non-linéaires expliquent mieux les données que le modèle linéaire (Shipton *et al.*, 2006).
- Même si en général les données des granites sont très souvent bien proches de la ligne de régression, elles s'alignent souvent sur des droites ayant des pentes différentes que celle de la ligne de régression principale (figure 2.10.B) (Shipton *et al.*, 2006).

Modèle utilisé

Globalement, le modèle linéaire de Evans ($a = 0.97$) a été confirmé par l'étude de Shipton ($a = 0.8$). Dans cette étude l'estimation du déplacement a été effectuée avec le modèle linéaire de Evans, choisi pour sa simplicité. L'épaisseur utilisée pour les estimations est de l'épaisseur totale de la

faille, donc la somme entre DZ et FC. Cette épaisseur a été choisie dans des zones de mouvement significatives afin d'éviter une sous-estimation de la quantité du mouvement.

Chapitre 3

Secteur de Martigny

3.1 Introduction

Situation géographique

Dans cette étude le secteur de Martigny a été défini comme le massif rocheux situé au NW de Martigny. Ce massif rocheux est limité au SE par la vallée de Chamonix et au NW par la gorge du Trient. Cette étude est focalisée sur la partie la plus au NW du massif, autour du sommet du Roc Blanc.

Situation tectonique et géologique

Figure A.1 représente l'extrait de la carte tectonique 1 : 100'000 de Steck *et al.* (1999) et une coupe NW-SE (Steck *et al.*, 2001). Depuis le SE affleurent les unités tectoniques suivantes :

Nappe de Morcles Cette zone est formée par la couverture du massif du Mont-Blanc externe (Epard, 1986). Dans la zone d'étude elle forme la colline du château de la Bâtiaz. Les roches de cette unité sont des calcaires, des dolomies, des marnes et des grès (Steck *et al.*, 1999).

Massif des Aiguilles-Rouges Dans la zone d'étude cette unité est présente sous forme de la sous-unité appelée massif de l'Arpille. Trois sous-unités sont différenciées :

- La couverture du massif de l'Arpille, qui affleure seulement sur quelques dizaines de mètres au NW de la zone de Chamonix. Elle est formée par des quartzites, des dolomies et des marnes (Steck *et al.*, 1999). La couverture du massif de l'Arpille et la nappe de Morcles forment l'unité dite « zone de Chamonix ». Cette unité est très fortement déformée avec une géométrie complexe qui implique plusieurs phases de déformation (Ayrton, 1980).
- Le socle du massif de l'Arpille couvre la grande partie du secteur étudié. La roche principale est un gneiss constitué de quartz, plagioclase, feldspath potassique et biotite provenant du métamorphisme d'une série schisto-gréseuse (Blanc, 1976).
- Le "Carbonifère" affleure au NE des gorges du Trient, près du village de Vernayaz. Ces roches consistent en conglomérats (poudingue de Vallorcine), grès et pélites. Pendant l'orogénèse alpine cette unité a été plissée et forme aujourd'hui le synclinal de Collonges-Dorénaz (Sublet, 1962).

Division en sous-secteurs d'étude

Pendant le travail la zone d'étude a été divisée en deux sous-secteurs d'étude selon des critères lithologiques, morphologiques et géographiques :

Arpille sud (MA_S) : Cette zone est formée par la partie méridionale de la montagne de l'Arpille. Elle commence au village de La Bâtiaz et s'étend jusqu'au col de Le Gotreu, au NE du sommet du Roc Blanc. Elle comprend donc une partie du socle du massif de l'Arpille. Le flanc NW de cette zone termine en éboulement dans la Vallée du Rhône.

Arpille nord (MA_N) : Cette zone est formée par le flanc N de la montagne de l'Arpille et par la vallée du Trient. Elle couvre donc la partie septentrionale du socle du massif de l'Arpille. Le domaine tectonique et les roches sont donc les mêmes que pour MA_S. Cette zone a été différenciée de MA_S uniquement sur des critères géographiques et morphologiques.

3.2 Observations de terrain

N.B. : Dans ce chapitre les observations sont souvent accompagnées de références à des noms d'affleurement et à des noms de failles. Les cartes des figures A.2 et A.6 permettent de situer tous ces objets.

3.2.1 Arpille sud (MA_S)

Généralement la montagne de l'Arpille est couverte par la végétation et les affleurements se limitent aux falaises disséminées le long du versant. L'éboulement du flanc NE de l'Arpille expose par contre une grande falaise d'orientation NW-SE de plusieurs centaines de mètres de hauteur. Cette falaise suit la forme de la montagne : entre la plaine et le sommet, elle couvre une dénivellation d'environ 1000 m. Malgré cette excellente exposition la grande partie de la falaise reste malheureusement inaccessible à cause de la pente élevée (entre 50° et 90°).

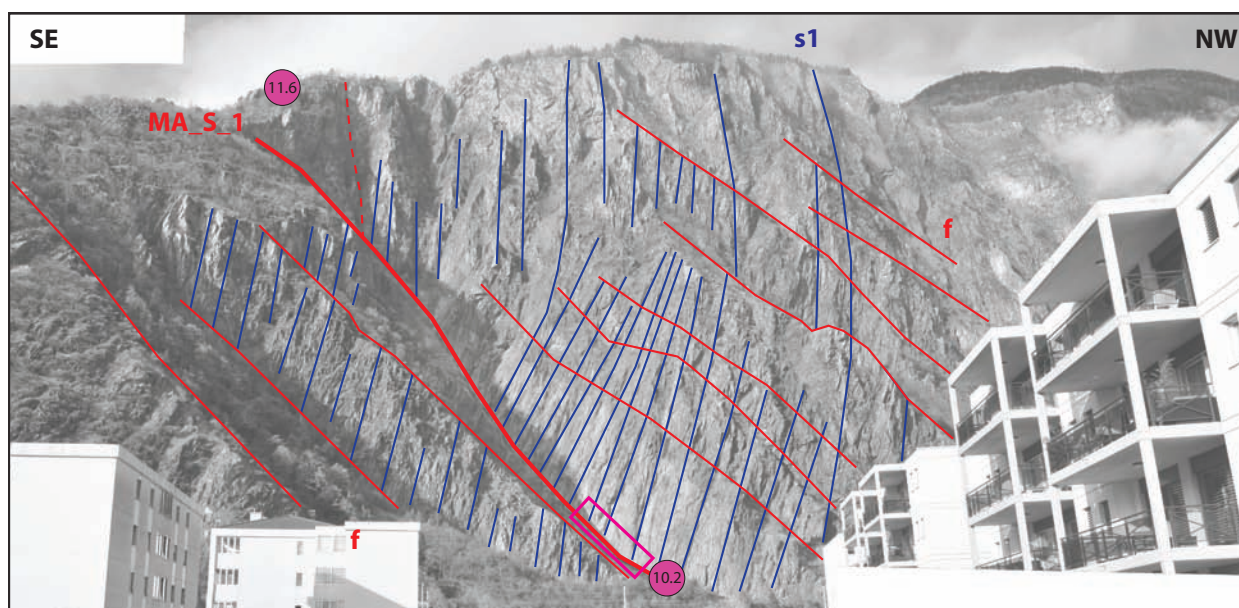


FIGURE 3.1 – Panorama du secteur sud du Massif de l'Arpille. Les grandes structures cassantes (la faille MA_S_1 et des fractures parallèles f) et la schistosité principale (s1) sont visibles de loin.

La falaise du secteur méridional de la montagne de l'Arpille (MA_S) est coupée par une série de longues structures cassantes qui plongent vers le NW. En particulier, trois de ces structures (MA_S_1, MA_S_2 et MA_S_3) marquent fortement la morphologie du versant et forment des petites vallées

de direction N-S (figure 3.1). Cela a permis de remonter la falaise le long de ces trois petites vallées afin d'étudier les structures cassantes. Les mêmes structures ont en suite aussi été recherchées au dessus de la falaise.

Les roches du Massif de l'Arpille sont des gneiss riches en feldspath et quartz. La schistosité principale est souvent bien visible et, bien que les roches montrent localement des plis, son orientation dominante est de environ SE/80.

MA_S_1

L'étude de cette faille était impossible depuis le haut à cause de la pente trop élevée. L'accès depuis le bas est par contre très pratique (affleurement #10.2).

Un miroir de faille très net de orientation moyenne 312/48 est présent à la base de la falaise qui forme le flanc gauche de la petite vallée (figure 3.1). La déformation cassante est concentrée dans le miroir de faille, autour duquel la roche est souvent intacte.

Sur le compartiment supérieur des fibres de quartz sont localement présentes. Toutes les fibres indiquent un mouvant inverse suivant la ligne de plus grande pente. Les données de mouvement ont été résumées dans le tableau B.1.

La schistosité principale (s1) est sub-verticale et son orientation est très constante (en moyenne 122/78).

Le flanc droit de la petite vallée a une orientation très similaire à celle du plan de faille. L'érosion a rendu ce plan moins net que la coupure visible dans le flanc gauche. L'érosion a mis en évidence deux familles de discontinuités : une pentue correspondant à s1 et une subhorizontale d'orientation 339/14 appelée ici j1. Vu la régularité dans l'espacement et l'orientation, cette dernière correspond à une famille de fractures. Le diagramme de la figure 3.2.A résume l'orientation des structures observées dans ces affleurements. Le diagramme met en évidence que les trois structures (la faille, s1 et j1) ont la même direction et que j1 est normale à s1.

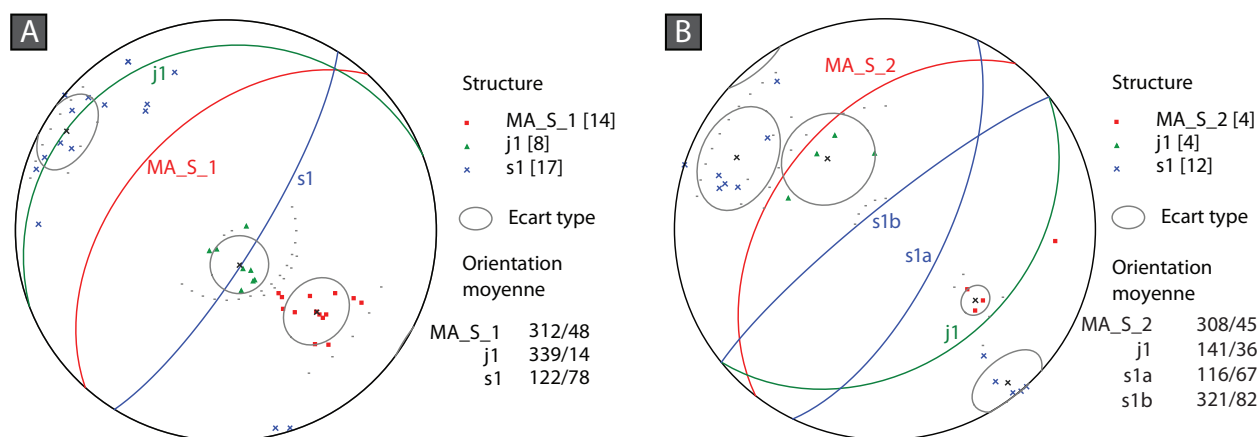


FIGURE 3.2 – Orientation des structures près des failles : A) MA_S_1; B) MA_S_2. Projections équiaires de Lambert.

Faillles mineures

Au NW de la faille MA_S_1 le massif est coupé systématiquement par d'autres failles ayant une orientation constante. A la différence des failles principales, ces failles n'influencent pas autant la morphologie du terrain. Elles recoupent la grande falaise à des endroits très raides et donc

difficiles d'accès. Dans le panorama de la figure 3.1 il est toutefois possible d'en apercevoir la grande persistance et la régularité dans l'espace.

MA_S_2

Au dessus de la falaise cette faille est visible mais reste inaccessible. Elle est par contre bien accessible depuis l'éboulement au dessous de la falaise : toutes les mesures et la description suivante concernent cette zone.

Comme pour MA_S_1 la déformation semble concentrée dans le miroir de faille principal qui est bien visible sur le flanc gauche de la petite vallée. Localement des affleurements en surplombs ont permis de mesurer l'orientation du plan de faille (moyenne 308/45). Aucune structure de mouvement n'a par contre pu être identifiée. L'orientation de la schistosité principale (s1) est très pentue et varie entre 116/67 et 321/82. Des fractures (j1) d'orientation 141/36 ont été observées en bas et en haut de la falaise.

L'orientation du plan de faille et de s1 est donc semblable à celle observée près de la faille MA_S_1 (figure 3.2.B). Les fractures sont par contre moins pentues. Dans ce cas aussi, les trois structures ont la même direction (SW-NE).

MA_S_3

Cette faille est également bien accessible depuis l'éboulement en aval de la grande falaise. Comme pour MA_S_1 et MA_S_2 le miroir de faille est bien localisé à gauche de la petite vallée. Il détermine la base de la petite falaise à gauche de la rivière et son épaisseur (« damage zone » est centimétrique). Dans cette zone la schistosité principale (s1) est aussi généralement très verticale.

L'orientation du miroir de faille est d'environ 305/58. Cette faille affleure aussi au dessus de la falaise, sur le plateau de la localité Sur le Mont, près de l'antenne. Le long de sa direction le plan de faille est à nouveau visible sur des affleurements isolés (#11.1-4).

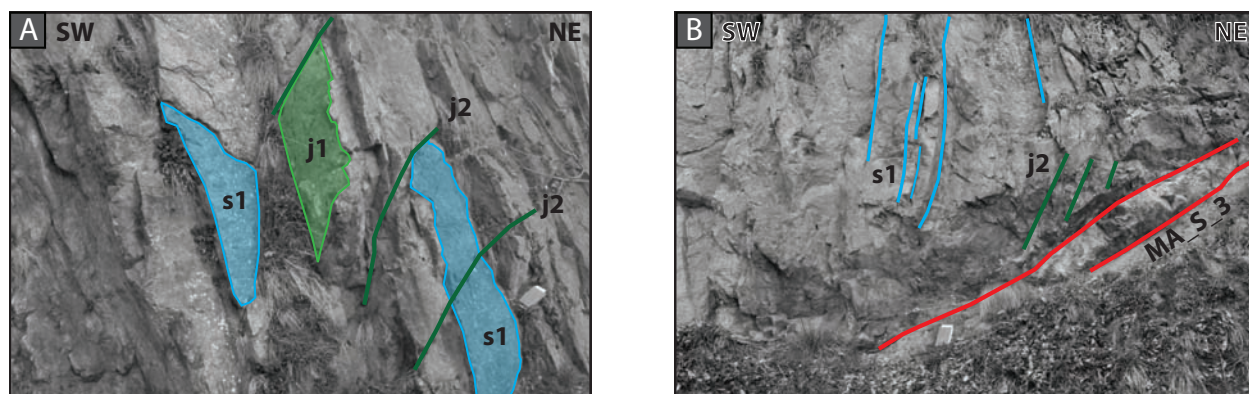


FIGURE 3.3 – Affleurement de la faille MA_S_3 en localité Sur le Mont (affleurement #11.1). A) Fracturation à environ 10 m de la faille. B) Miroir de faille.

Un de ces affleurements est particulièrement intéressant, car il met en évidence la fracturation de la roche près de la faille. L'affleurement est formé par la petite falaise qui surmonte la route qui descend à la localité Sur le Mont (#11.1). La petite falaise d'environ 4 m de haut est coupée par deux familles de fractures (j1 et j2) et par la schistosité principale (s1), toujours très pentue et régulière (orientation moyenne 123/81). Dans la photographie de la figure 3.3.A on peut observer

que les plans de s1 sont coupés par les plans sub-verticaux de j1 (241/79) et par les plans sub-horizontaux de j2 (303/66).

Une dizaine de mètres plus au NW affleurent les deux petits miroirs de la faille MA_S.3 (figure 3.3.B). Leur orientation est celle du plan de faille mesuré dans la vallée au milieu de la grande falaise. Des tectoglyphes avec pitch proche de 90° indiquent une direction de mouvement identique à celle de la faille MA_S.1. Malheureusement des fibres qui confirmeraient le sens de mouvement n'ont pas été trouvées. Dans la figure 3.3.B on peut aussi observer que les fractures j1 ont une orientation plus pentue les plans de faille.

Les orientations des toutes les structures qui affleurent près de la faille MA_S.3 (en haut et au milieu de la falaise) ont été résumées dans le diagramme de la figure 3.4.A. Le plan de faille et s1 ont également la même direction (SW-NE). C'est aussi le cas pour j2, qui bissecte s1 et le plan de faille. L'orientation de j1 est très proche à celle du plan normal aux trois structures précédentes. La direction de j1 correspond à celle de la falaise au NE de Sur le Mont. Cette famille pourrait donc être impliquée dans l'éboulement du flanc NE du massif de l'Arpille.

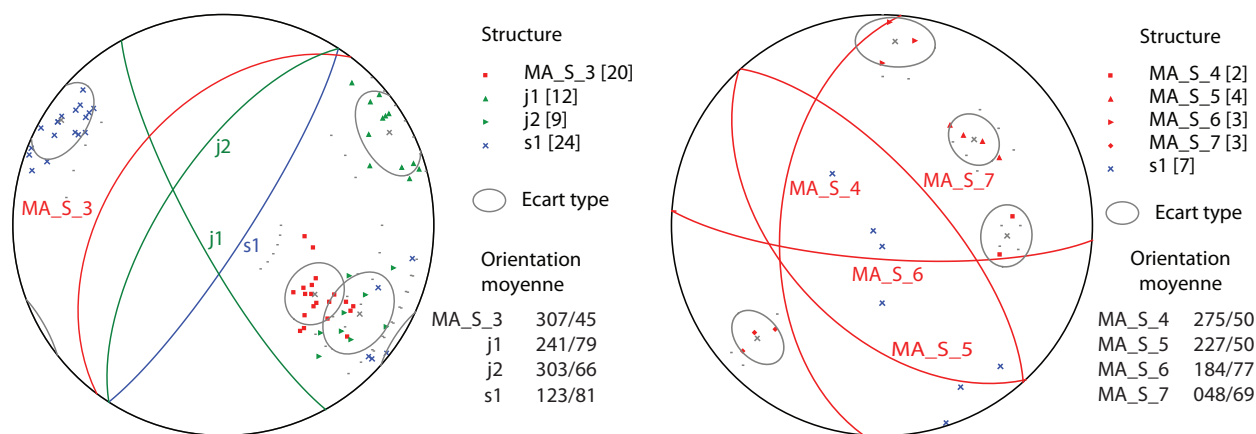


FIGURE 3.4 – Orientation des structures près des failles : A) MA_S.3 ; B) MA_S.4, MA_S.5, MA_S.6 et MA_S.7. Projections équiales de Lambert.

MA_S_4 - MA_S_7

En longeant le haut de la falaise, des failles de plus petite dimension ont été rencontrées.

MA_S.4 est une faille mineure d'orientation environ 275/50. Cette faille a donc une orientation similaire aux failles MA_S.1, MA_S.2 et MA_S.3.

MA_S.5 et MA_S.6 sont deux failles d'orientation moyenne 225/50 et 184/77. Dans cette zone la schistosité principale est horizontale. De plus dans les roches près de ces failles, des plis très serrés témoignent d'une forte déformation.

La faille MA_S.7 affleure à l'altitude maximale de la grande falaise de l'Arpille (affleurement #18.4). Dans cette zone s1 est à nouveau très verticale. Le plan de faille a une orientation moyenne de 048/70.

Le diagramme de figure 3.4 représente les orientations des failles MA_S.4, MA_S.5, MA_S.6 et MA_S.7. A la différence des failles MA_S.1, MA_S.2 et MA_S.3 ces failles sont caractérisées par des orientations très variées.

3.2.2 Arpille nord (MA_N)

La morphologie de la partie nord du secteur de Martigny (MA_N) est caractérisée par plusieurs collines.

Colline de Sinlio

En rive droite de la gorge du Trient, en localité Sinlio, une longue et haute colline de direction NNE couvre une grande partie du sous-secteur MA_N. Ces flancs sont très raides : l'accès a été possible uniquement le long de la route goudronnée qui traverse le versant E et du petit chemin qui en longe le sommet.

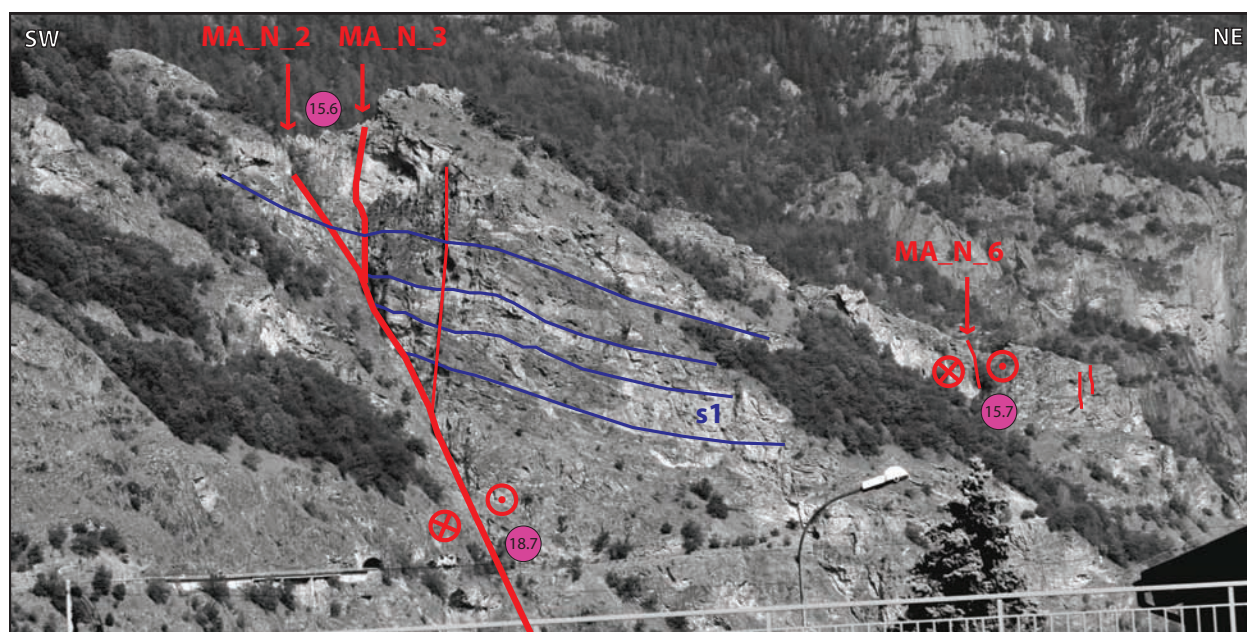


FIGURE 3.5 – Panorama de la colline de Sinlio. Des structures cassantes sub-verticales, dont les failles MA_N_2, MA_N_3 et MA_N_6 sont mises en évidence en rouge.

Dans le panorama de figure 3.5 la longue colline de Sinlio est représentée depuis la vallée du Rhône. Des importantes structures cassantes sub-verticales sont bien visibles. Ces structures et d'autres linéaments visibles sur les données numériques (voir chapitre 3.4.1) ont été étudiés sur le terrain à la fois depuis le sommet de la colline et depuis la route goudronnée. Deux types de failles sub-verticales ont été cartographiées. Des failles à direction WNW, sur lesquelles des fibres de Qz indiquent un mouvement décrochant dextre (par exemple MA_N_1, visible dans la figure 3.5). Des failles à direction N sont aussi présentes (par exemple MA_N_2, prive de fibres et MA_N_6, décrochant dextre, dans la même figure).

Collines plates

Près du pont de Gueroz, la gorge du Trient décrit deux virages. Ici la morphologie change et les collines deviennent plus plates. Malgré ça la colline en rive gauche reste inaccessible à cause d'une haute falaise en aval de la route goudronnée. La colline en rive droite forme un plateau de quelques centaines de mètres de longueur. Un petit chemin descend la colline à travers des falaises jusqu'à

la plaine du Rhône. Cette colline est traversée par plusieurs failles sub-verticales ayant différentes orientations.

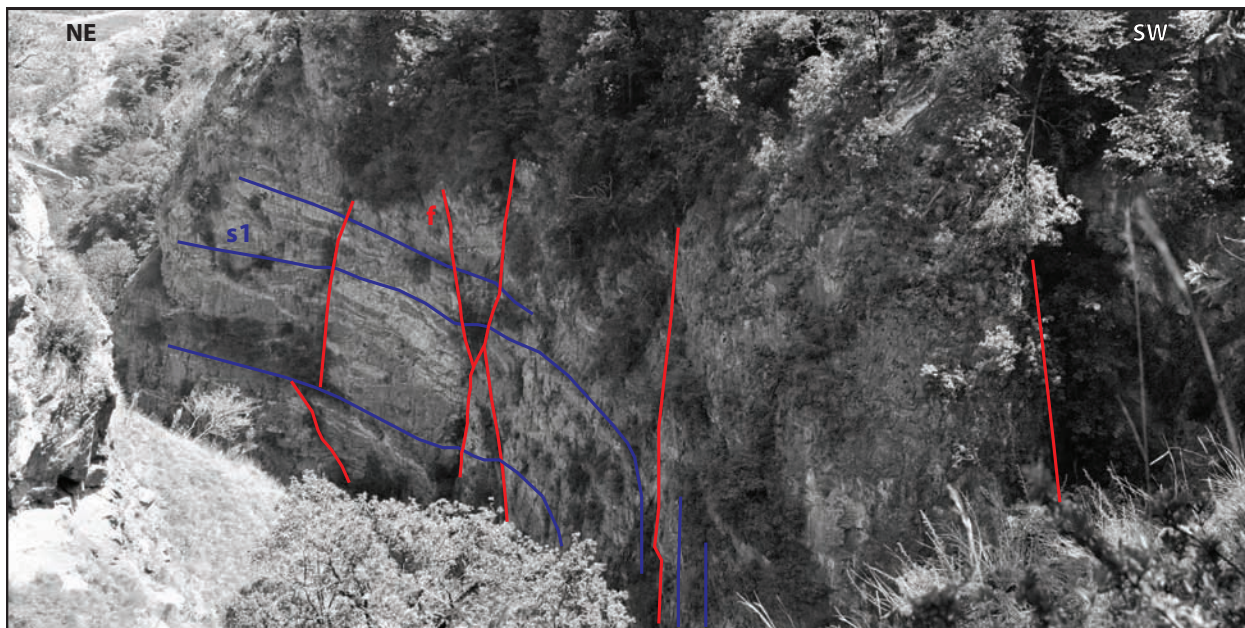


FIGURE 3.6 – Vue depuis le pont de Gueroz sur le flanc droite de la gorge du Trient. Le coud formé par la gorge donne l'illusion que la schistosité principale (s1) soit plissée. La falaise est coupée par plusieurs failles sub-verticales (f).

La photographie de la figure 3.6 représente la vue sur le plateau depuis le pont de Gueroz. Différentes failles sub-verticales sont visibles. Les failles de la photographie n'ont pas été étudiées sur le terrain car elles n'affleurent pas sur le plateau de la colline. Sept failles ont put être cartographiées sur la colline. La direction de la grande partie de ces failles est autours de N. Souvent des fibres de Qz ont été trouvées sur les plans de faille. Le mouvement indiqué par les fibres pour les failles à direction N varie entre sénestre, et vertical. Les mouvements verticaux comprennent à la fois la montée et la descente du même compartiment.

En général les fibres d'une faille indiquent un seul mouvement. Deux failles font exception à ceci :

- Sur la faille MA_N_11 des fibres indiquent un mouvement décrochant sénestre, plus loin d'autres fibres indiquent un mouvement normal.
- Sur la faille MA_N_9 des fibres indiquent un mouvement inverse, d'autres un mouvement normal.

3.3 Lames minces

Afin de mieux étudier les structure des grandes failles inverses du secteur MA_S, deux échantillons orientés (LG01 et LG02) ont été pris sur le toit de la faille MA_S_1 à l'affleurement #10.2. Pour obtenir une vision 3D, dans chaque échantillon trois lames minces ont été sciées selon les plans suivants (voir diagramme de Lambert de la figure 3.7 :

- α) Plan normal au plan de faille et parallèle à la direction de mouvement.
- β) Plan normal au plan de faille et normal à la direction de mouvement.
- γ) Plan parallèle au plan de faille.

La lame mince de l'échantillon LG01 qui correspond au plan α a été appelé LG01 α etc. Les photographies des lames représentées dans la figure 3.7 ont été prises avec une binoculaire en lumière transmise naturelle.

Minéralogie La roche est un gneiss avec une distribution de taille des grains bimodale. Les deux échantillons sont caractérisés par une forte altération.

Les grands minéraux ont une longueur moyenne d'environ 1 – 1.5 mm et une largeur d'environ 0.5 – 0.8 mm. Le minéral dominant est le feldspath potassique (Kfs), mais le plagioclas (Pl) et le quartz (Qz) sont aussi présents. Le Pl est bien distinguable en lumière polarisée par les macles polysynthétiques. En lumière polarisée le Qz et le Kfs montrent les deux une extinction onduleuse. Le Kfs montre parfois des macles de carlsbad. Le Qz est très bien préservé, tandis que le Kfs et le Pl présentent souvent une forte altération, probablement en séricite.

Les petits minéraux se distribuent autour des grands minéraux et forment une sorte de matrice. Les minéraux principaux sont les micas blancs, caractérisés par une biréfringence élevée en lumière polarisée. Ces minéraux sont alignés en bandes et sont altérés en séricite (transparente en lumière naturelle). Le Qz est également présent en grande proportion dans la matrice : les petits cristaux d'environ 0.2 – 0.3 mm sont alignés en bandes ondulées. La taille de ces grains de Qz suggère une recristallisation partielle de la roche. Des minéraux opaques sont aussi présentes dans la matrice.

Une veine d'environ 2-4 mm de largeur apparente est visible dans la lame LG02 β . Elle est constituée principalement par des cristaux de chlorite (Chl) et de Qz. Les cristaux de Qz ont une taille de environ 0.5 – 1 mm. Les cristaux de Chl sont difficiles à distinguer ; leur taille est en tout cas beaucoup plus petite que les cristaux de Qz.

Structures Le meilleur plan pour analyser les structures est le plan normal α , car normal à la faille et à la schistosité principale. Les structures suivantes peuvent être distingués dans la lame LG01 α :

- s1** Dans certains cristaux de Qz une schistosité pénétrative s1 est visible. La détermination de son orientation est difficile, dans la lame LG01 α son pendage est sub-vertical. Cette structure ductile doit trouver origine dans une déformation haut métamorphisme. Cette structure est la seule à témoigner d'une ancienne phase de déformation D1 de nature ductile.
- s2** Une clivage schisteux, plus marqué et moins pénétratif que s1, est formée par l'alignement de minéraux opaques de la matrice. La géométrie légèrement ondulée de cette structure suggère qu'il s'agit de stylolithes. Cette structure très marquée forme la schistosité principale. Son orientation est cohérente avec la valeur de la schistosité principale mesurée sur le terrain (SW/80).
- c2** Des plans de cisaillement parallèles au plan de faille sont aussi visibles. Ces plans décalent le clivage schisteux dans un sens de mouvement inverse. La cinématique de ces structures est donc la même que celle de la faille.
- j2** Les feldspaths sont coupés par des fractures à remplissage de chlorite. Ces fractures pourraient être interprétées comme des fractures d'extension. La fracture j2 de la figure 3.7 montre un décalage apparent inverse cohérent avec le sens de mouvement de la faille.

La géométrie des structures s2, c2 et j2 est cohérente avec un cisaillement à cinématique inverse, s2 étant parallèle à l'axe x de l'ellipsoïde de déformation, j1 à l'axe z (voir la figure 3.7). Ces déformations sont donc probablement associées à une deuxième phase de déformation D2, de nature semi-ductile (zones de cisaillement) à cassante (décalage des fractures d'extension).

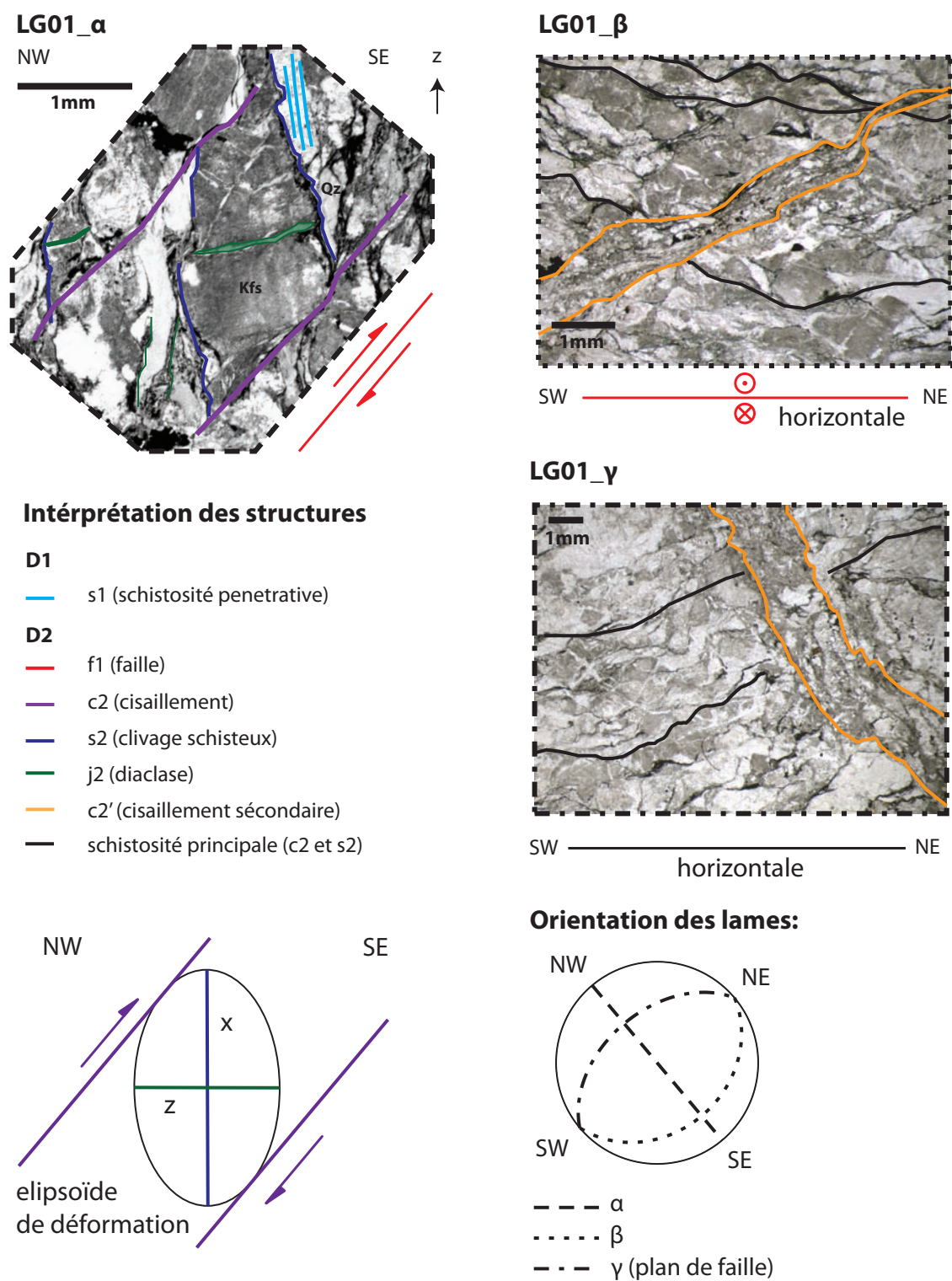


FIGURE 3.7 – Lames minces orientées et en lumière naturelle des roches près de la faille MA_S.1

Dans les lames β et γ il est difficile de différencier les structures s2 et c2. La schistosité principale mise en évidence par des traits noir dans la figure 3.7 est formée par ces deux structures. Dans certaines lames il est possible d'observer des bandes qui recoupent cette schistosité principale (c2', en orange dans la figure 3.7).

- Une zone de cisaillement d'environ 1.5 mm de largeur apparente est visible dans la lame LG01 β .
 - Une zone de cisaillement d'environ 1.5 mm de largeur apparente est visible dans la lame LG01 γ .
- Les minéraux qui la forment sont ceux de la roche, leur taille correspond à celle des minéraux plus petits, leur bordure est très nette. Leur origine est difficile à estimer, mais leur nature assez cassante suggère de les interpréter comme des zones de cisaillement secondaires (c2') associées aux cisaillement principal (c2).

3.4 Analyse morphologique numérique

3.4.1 Analyse 2D des linéaments

La zone d'étude de Martigny est abondamment couverte par la forêt : cela empêche une bonne identification des structures à l'aide des orthophotos. Les linéaments ont par conséquent été dessinées manuellement sur des cartes issues du modèle numérique digital (MNT), tels les images Hue-Light-Saturation (HSL) et le relief ombré (HS de hillshade).

La figure A.3 représente les linéaments identifiés. Leur position et leur géométrie sont bien corrélées avec les structures identifiées sur le terrain. De suite une discussion de ces linéaments :

L_1 Ce linéament affleure sur le flanc SE et sur le flanc NW de la montagne de l'Arpille. Sur le flanc SE, comme observé lors des relevés de terrain, la direction de ce linéament correspond à la fois à la schistosité principale et aux failles inverses. En rive droite du Trient affleure très bien la falaise du flanc NW de la montagne de l'Arpille. Cette falaise est formée par des bancs de roche de direction constante qui forment le linéament L_1 . Même si ces structures n'ont pas été visitées lors de relevés de terrain, leur direction permet de les interpréter à la fois comme la schistosité principale et comme la suite des linéaments L_3 (ces structures ont la même direction).

L_2 Correspond au contact entre le Massif de l'Arpille et la Zone de Chamonix.

L_3 Correspond aux failles inverses d'orientation NW/50 cartographiées dans le secteur MA_S.

L_4 Correspond aux failles décrochantes de direction comprise entre N-S et NNW-SSE identifiées dans le secteur MA_N.

L_5 Correspond aux failles décrochantes de direction E-W cartographiées dans le secteur MA_N.

3.4.2 Analyse 3D des linéaments

Les linéaments 2D ont ensuite été étudiés à l'aide du logiciel Coltop3D (Jaboyedoff *et al.*, 2007) pour en définir l'orientation. Quand un linéament est formé par une structure planaire sa trace correspond à l'interception du plan avec la surface topographique.

Les linéaments auparavant cartographiées ont donc été dessinées avec la fonction « Trace du plan à partir de points » de Coltop3D. La figure A.4 représente la carte des traces que les plans calculés forment à la surface. La figure 3.8.A représente le diagramme de leur orientation.

De suite une discussion des orientations calculées pour ces linéaments :

L_1 Ci-dessous l'orientation des linéaments L_1 du secteur MA_N est discutée. Ces linéaments affleurent près des gorges du Trient et leur plongement calculé est de 76° vers le NW. Sur le terrain le plongement de la schistosité principale est par contre d'environ 75° vers le SE. La différence entre ces deux orientations pourrait être expliquée d'un côté par l'érosion des falaises, de l'autre par le fait que des éventuels surplombs (plongement des structures vers le SW dans un versant à plongement NW) restent invisibles lors d'un scan lidar aéroporté. C'est le cas des MNT à haute résolution de Swisstopo.

L_2 L'orientation du contact entre le massif de l'Arpille et la zone de Chamonix n'a pas pu être calculée à cause de la morphologie uniforme du versant : les points dessinés le long du contact étaient trop colinéaires.

L_3 Comme anticipé dans l'analyse 2D, ces linéaments correspondent aux failles inverses cartographiées dans le secteur MA_S. Ces linéaments ont été prolongés avec les linéaments L_1 du secteur MA_S. Ceci est justifié par l'observation que les failles ont la même direction que la

schistosité principale. L'image HSL a permis de cartographier une quantité de structures de ce type largement supérieure au travail de terrain (12 vs 3). L'orientation moyenne calculée (329/49) est assez cohérente avec celle mesurée sur le terrain (en moyenne 309/46).

- L_4 Ces linéaments correspondent aux failles sénestres de direction N-S cartographiées sur le terrain dans le secteur MA_N. L'orientation moyenne calculée (074/89) est similaire à celle mesurée sur le terrain (moyenne 241/79).
- L_5 Ce linéament correspond aux failles décrochantes W-E du secteur MA_N. Un seul linéament de ce type est visible sur les deux cotés de la colline : son orientation a donc pu être calculée avec Coltop3D. Une légère différence existe entre l'orientation calculée (180/81) et la moyenne mesurée sur le terrain (203/75).

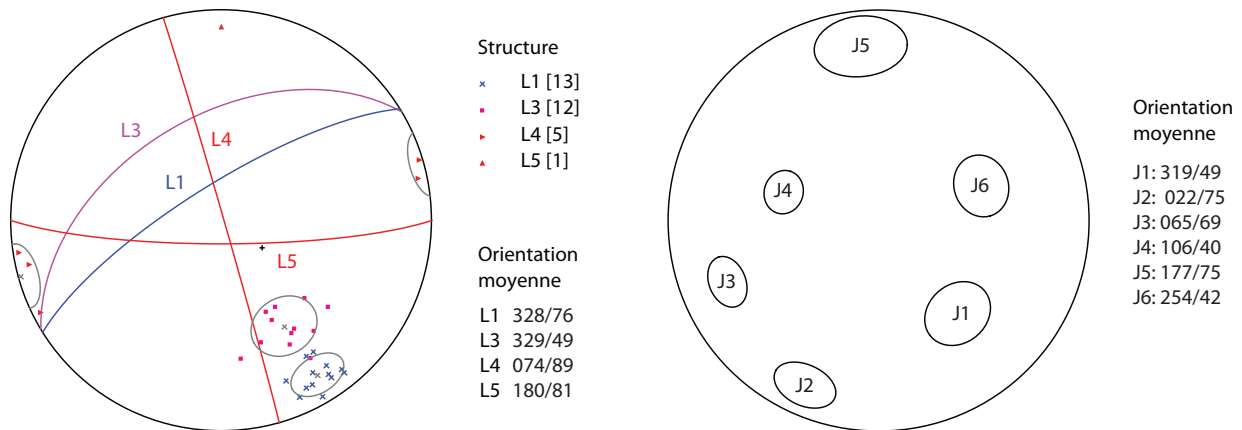


FIGURE 3.8 – Orientation des structures identifiées avec : A) Analyse 3D des linéaments ; B) Analyse morphologique 3D.

3.4.3 Analyse morphologique 3D

La morphologie de la zone d'étude a aussi été analysée avec une approche 3D. Dans le logiciel Coltop3D les portions de la surface topographique ayant la même orientation ont été sélectionnées. Ces portions forment des surfaces planaires et ont donc la même couleur sur la roue HSL. L'orientation de ces plans a été donc calculée. Six familles (J1-J6) ressortent de cette analyse (figure 3.8.B).

La figure A.5 montre en couleur les portions de la zone d'étude caractérisées par ces familles. Le secteur MA_S est quasiment entièrement couvert par seulement trois couleurs. Cela signifie que cette partie de l'éboulement est contrôlée structurellement par les familles J1 (bleu), J2 (vert absinthe) et J3 (vert bouteille). En particulier l'image met bien en évidence que les failles à orientation NW/50 (J1) et J3 forment des vallées à dièdre. Sur le terrain il a été vérifié que le flanc droit du dièdre correspond au plan de faille. Il est donc possible de conclure que le plan de faille est effectivement orienté comme J1 (319/49).

Le secteur MA_N est par contre moins bien caractérisé structurellement. Il est toutefois possible d'identifier les failles E-W dans la famille J5 (rouge, 177/75). Cette valeur est assez proche de la moyenne mesurée sur le terrain (203/75). Les failles N-S correspondent à la famille J3. L'orientation calculée pour cette famille est 065/69, tandis que sur le terrain elle était de 241/79. Le pendage calculé avec cette approche (79) est donc plus proche de la réalité que celui calculé avec la méthode des linéaments 3D (89). L'azimut calculé est assez différent de la valeur moyenne mesurée. Ceci est en partie justifié par le fait que sur le terrain l'orientation de cette famille était très variable.

Le flanc SE du Massif de l'Arpille est en partie caractérisé par la famille J4 (jaune paille, 106/40) et en partie par des orientations très variables (en gris). Sur le terrain il a été vérifié que la morphologie de ce secteur est caractérisée par une alternance de falaises et d'éboulis de versant. Avec un pendage si faible cette famille ne peut pas correspondre à la schistosité, dont le pendage a été mesuré à environ 80° sur le terrain.

3.5 Estimation du déplacement

Sur le terrain il n'a pas été possible de trouver d'objets géologiques (des litages ou des structures bien définies) décalés par les failles. Une estimation précise de la quantité de mouvement qui a eu lieu sur les failles n'as pas été possible. Une approche empirique a donc été utilisé pour d'estimer le déplacement d'une des grandes failles inverses du secteur méridional de l'Arpille (MA_S.1). Cette approche est basée sur le diagramme déplacement-épaisseur (T-D de l'anglais « thickness-deplacement ») publié par Hull (1988) et confirmé par Shipton *et al.* (2006). Les données de ce diagramme sont issues de zones de déformation cassantes riches en quartz.

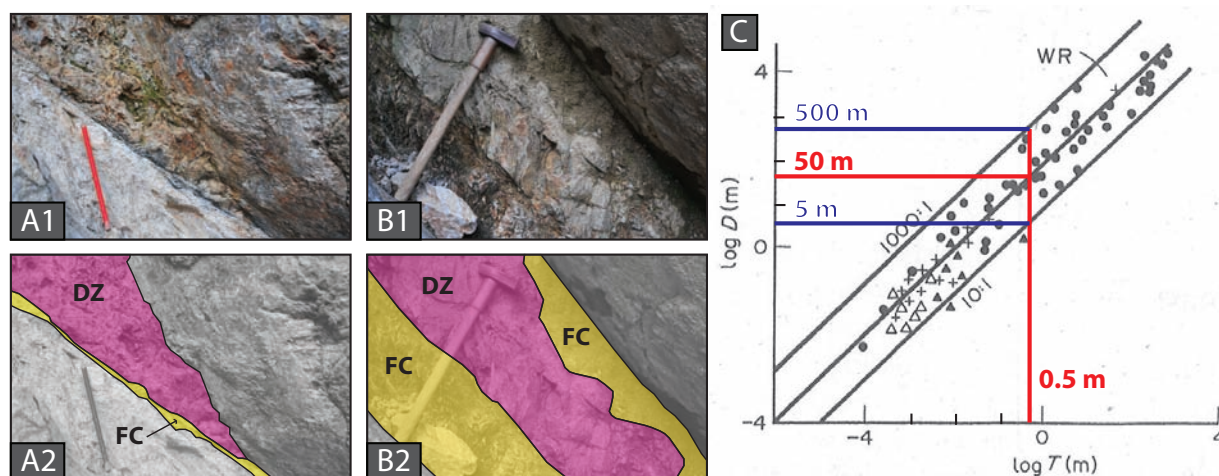


FIGURE 3.9 – Estimation du déplacement de la faille MA_S.1 à partir de son épaisseur total (« fault core » FC et « damage zone » DZ). A) Faible épaisseur de faille. B) Épaisseur maximale de environ 0.5 m. C) Relation empirique de Hull (1988).

Sur le terrain il a été observé que l'épaisseur de la faille MA_S.1 est très variable. Dans les zones à faible épaisseur (figure 3.9.A) les compartiments sont séparés par une coupure nette dans laquelle une couche millimétrique de kikirite (« fault core », FC) est visible. Dans les zones à plus grand épaisseur (figure 3.9.B) la coupure est moins nette. Une zone de roche fracturée (« damage zone », DZ) est présente à coté de zones importantes de kikirite. Ici l'épaisseur total a été estimé à environ 0.5 m.

Dans les failles, les mouvements ont tendance à se concentrer dans des fractions du plan de faille. Un calcul du déplacement avec la méthode T-P sur l'épaisseur moyen de ces failles aura donc tendance à sous-estimer le mouvement Evans (1990). Par conséquent la quantité de déplacement à été estimé à partir de la zone d'épaisseur maximal. Pour une épaisseur de 0.5 m le diagramme prévoit un déplacement de 50 m avec une incertitude de un ordre de magnitude. Cela correspond à un intervalle compris entre 5 m et 500 m.

3.6 Analyse cinématique

Les axes cinématiques de raccourcissement (P) et d'extension (T) des fibres ont été calculés avec la méthode de Allmendinger (1990) sur les données de mouvement récoltées sur le terrain et résumées dans le tableau B.1. Comme discuté dans le chapitre 2.4, ces axes sont une expression compacte de la cinématique d'une faille (Allmendinger, 1989).

Les failles ayant une distribution des axes P-T similaires ont été regroupées dans la même famille. Pour chaque famille les axes cinématiques moyens ont été calculés avec la statistique de Bingham (1974). Les plans nodaux ont été calculés à partir des axes moyens. Les plans nodaux sur lesquels des failles ont été observées ont été colorés en rouge et le sens de mouvement a été indiqué.

La figure 3.10 synthétise les résultats de l'analyse cinématique. Les axes cinématiques ont été regroupés en sept familles de failles. On peut distinguer deux groupes de familles de failles : les trois ayant un mouvement décrochant (f1-3) et les quatre ayant un mouvement soit normal soit inverse (f4-7).

MA_N - Failles décrochantes

L'orientation des ces axes cinématiques est caractérisée par un très faible pendage. Les axes P peuvent être divisés en deux catégories selon leur azimut : environ NW (f1 et f3) et NE (f2). Ces deux types d'axes sont orientés à environ 90° : seul deux événements tectoniques distincts peuvent les expliquer.

Dans la littérature des failles décrochantes de type f1 (environ N-S dextres) et f3 (environ E-W sénestres) ont été décrites dans la région voisine par de nombreux auteurs. En particulier dans le Chablais par Badoux et Mercanton (1962) et par Raymond *et al.* (1996); dans les Préalpes par Mosar et Borel (1992) et par Plancherel (1976).

Sur le terrain aucune observation indiquant une relation de failles conjuguées entre f1 et f3 n'a été trouvée. Cependant une bonne corrélation de l'orientation et de la cinématique existe entre les failles décrochantes du Chablais et celles du secteur N de l'Arpille. Ceci suggère d'interpréter ces dernières structures comme issues de la même déformation. Le calcul de l'orientation des paléocontraintes a donc été effectué sur cette hypothèse.

Cette hypothèse a la limite de ne pas expliquer les failles de type f2, qui ont la même orientation que f3 (environ verticales N-S) mais sens de mouvement opposé (dextre vs sénestre). La cinématique de type f2 est basée sur les fibres d'une faille mineure (MA_S_5) et d'une faille assez importante du secteur nord (MA_N_6). Une étude plus détaillée de cette dernière faille pourrait aider à expliquer aussi les failles de type f3.

MA_N - Failles normales et inverses

Les familles f4, f5 et f6 sont caractérisées par un premier axe cinématique quasiment horizontal orienté entre NW et W et un deuxième axe orienté quasiment à la verticale. Dans f4 l'axe vertical est P (régime normal), dans f5 et f6 l'axe vertical est T (régime principalement inverse avec une très légère composante décrochante).

Sur la faille MA_N_11 deux fibres indiquent un mouvement décrochant sénestre du type f3 et une fibre un mouvement normal de type f4. Une autre particularité de ces failles inverses est leur pendage élevé (72° pour f5 et 77° pour f6). Ces valeurs sont beaucoup trop grandes pour des failles inverses, pour lesquelles le travail classique de Anderson (1951) prévoit un pendage de 30° . Ces observations suggèrent que les failles f5 et f6 ont été d'abord formées sous un régime décrochant et ont été en suite réactivées en failles inverses.

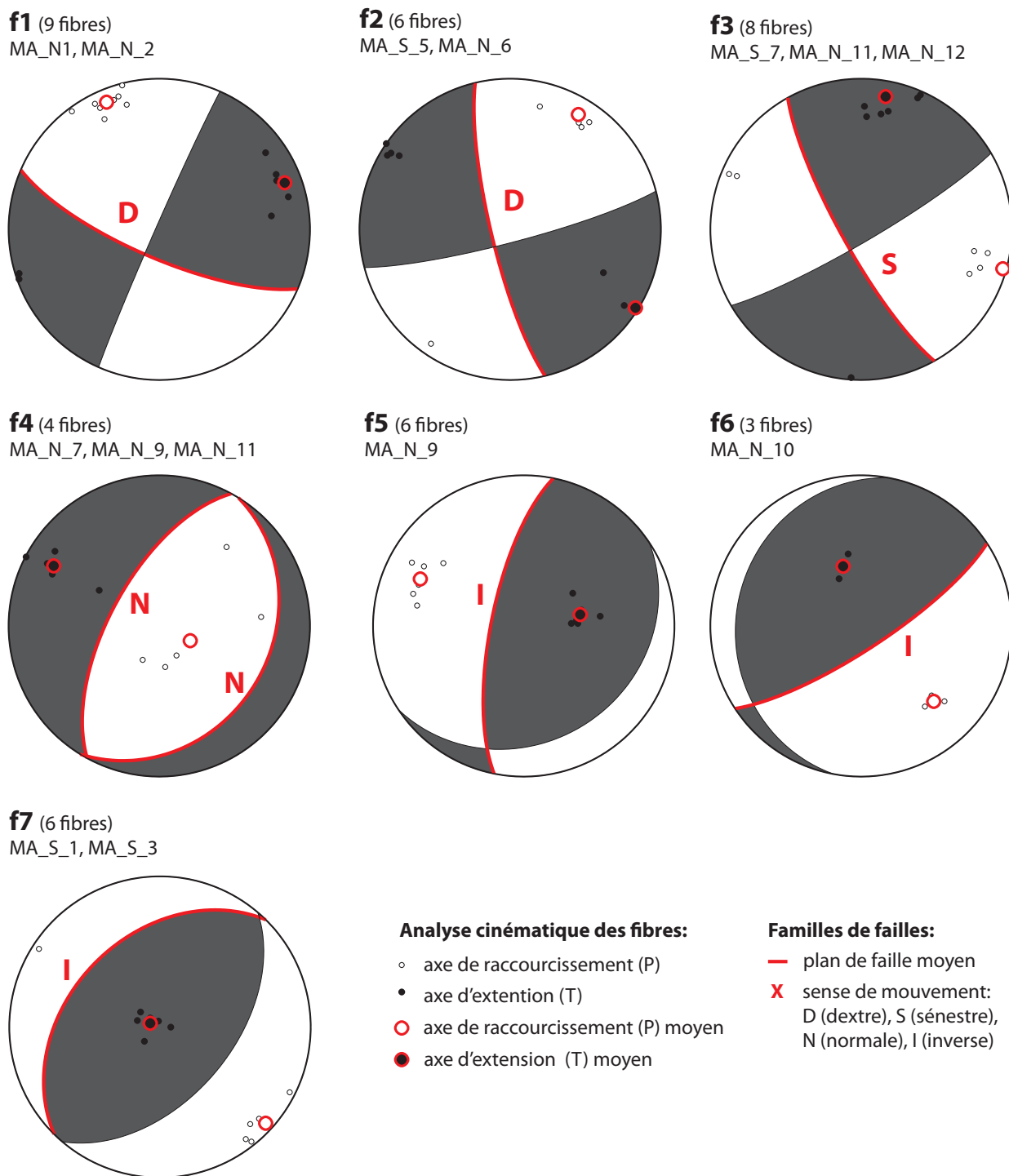


FIGURE 3.10 – Analyse cinématique des failles et classification en familles de failles d'orientation et mouvement similaires.

Un autre cas intéressant est celui de la faille MA_N_9. Elle présente six fibres indiquant un mouvement inverse (famille f5) et une fibre indiquant un mouvement normal très similaire à celui de la famille f4. Deux cas pourraient expliquer cela :

- Les deux déformations se sont succédées dans le temps et ont impliqué l'ensemble de la surface.
- Une partie de la surface de la faille à subi une déformation pendant qu'une autre partie à subi l'autre déformation.

Les deux cas pourraient être expliqués par une déformation de type gravitaire, où le type de mouvement varie dans le temps selon le mouvement des blocs voisins (premiers cas) et dans l'espace si une faille est recoupée par une autre (deuxième cas).

MA_S - Failles inverses

Malgré la ressemblance entre les régimes cinématiques des familles f6 et f7, ces dernières ont été distinguées des failles inverses du secteur MA_N pour les raisons suivantes :

- Leur impact sur la morphologie est beaucoup plus important.
- Leur pendage plus faible (environ 50°) n'exclut pas une formation en faille inverse.
- Leur orientation est constante dans tout le secteur.

Probablement les failles inverses du secteur MA_S ont donc une origine différente que celles du secteur MA_N.

3.7 Analyse des paléocontraintes

L'analyse des paléocontraintes à été effectuée avec la méthode des dièdres droits de Angelier et Mechler (1977) et avec la méthode des axes P-T mais en utilisant un angle de friction interne classique de $\phi = 30^\circ$. Les calculs et les diagrammes ont été effectué avec le logiciel T-Tecto 3.0 de Zalohar et Vrabec (2007).

MA_N - Failles décrochantes

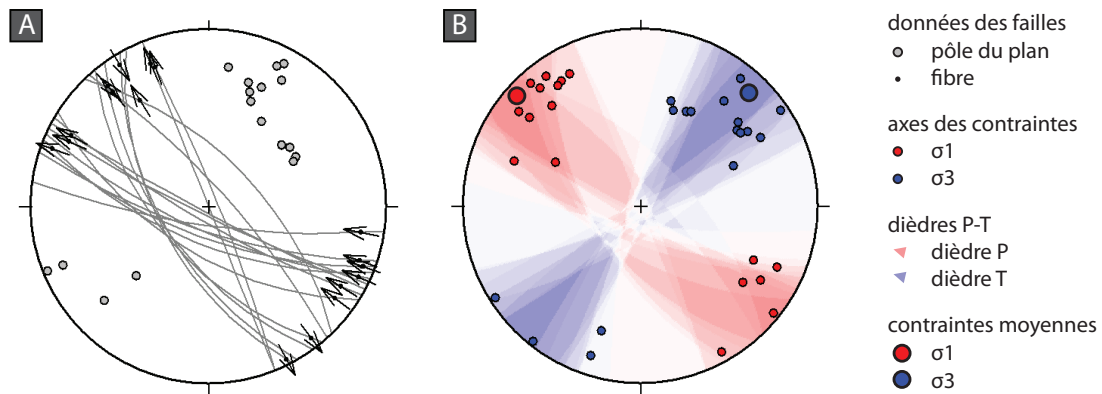


FIGURE 3.11 – MA_N - Calcul de l'orientation des contraintes sur les failles décrochantes conjuguées f1 et f3

L'analyse des contraintes à été effectuée sur les données de mouvement des familles f1 et f3. Ces failles ont donc été analysées comme étant conjuguées. Cela permet à la méthode des dièdres droits de bien contraindre les portions du graphique où les dièdres P et T sont communs aux différentes failles (portions plus sombres rouges et bleues de la figure 3.12). Les axes σ_1 et σ_3 de chaque fibre (points rouges respectivement bleus) sont regroupés dans les zones sombres respectives des dièdres P-T. L'origine de ces failles est donc compatible avec un régime tectonique de compression horizontale NW-SE et d'extension horizontale SW-NE.

MA_S - Failles inverses

L'analyse des grandes failles inverses de la partie méridionale du Massif de l'Arpille à été effectuée sur les données de mouvement de la seule faille avec des fibres (MA_S_1). Dans ce cas la méthode des dièdres droits est peut contraignante. Cela est du au fait que les plans de faille et les fibres ont des orientations constantes. Les axes des contraintes des fibres sont par contre bien groupés : ceux de σ_1 autour de NW/0, ceux de σ_3 autour de NW/90.

Ce régime tectonique est donc caractérisé par une compression horizontale NW-SE (perpendiculaire donc à la chaîne alpine) et d'extension verticale.

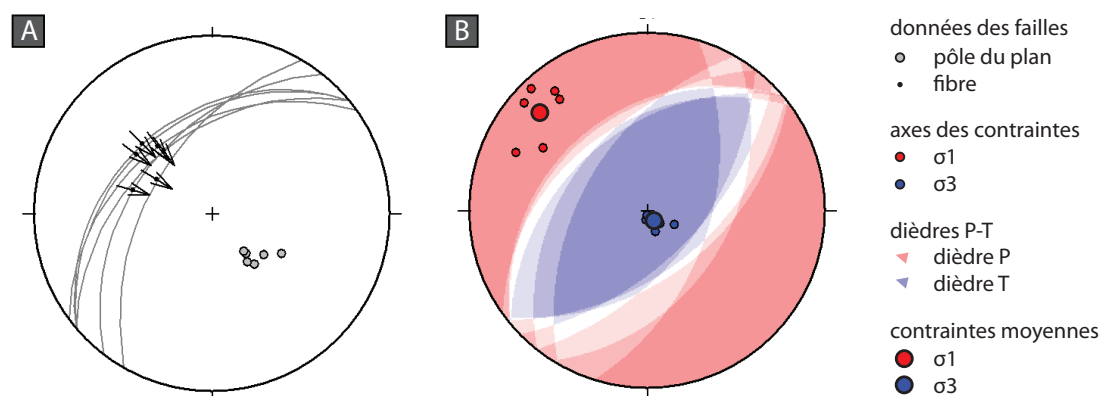


FIGURE 3.12 – MA_S - Calcul de l'orientation des contraintes sur les failles inverses (f7)

3.8 Conclusions

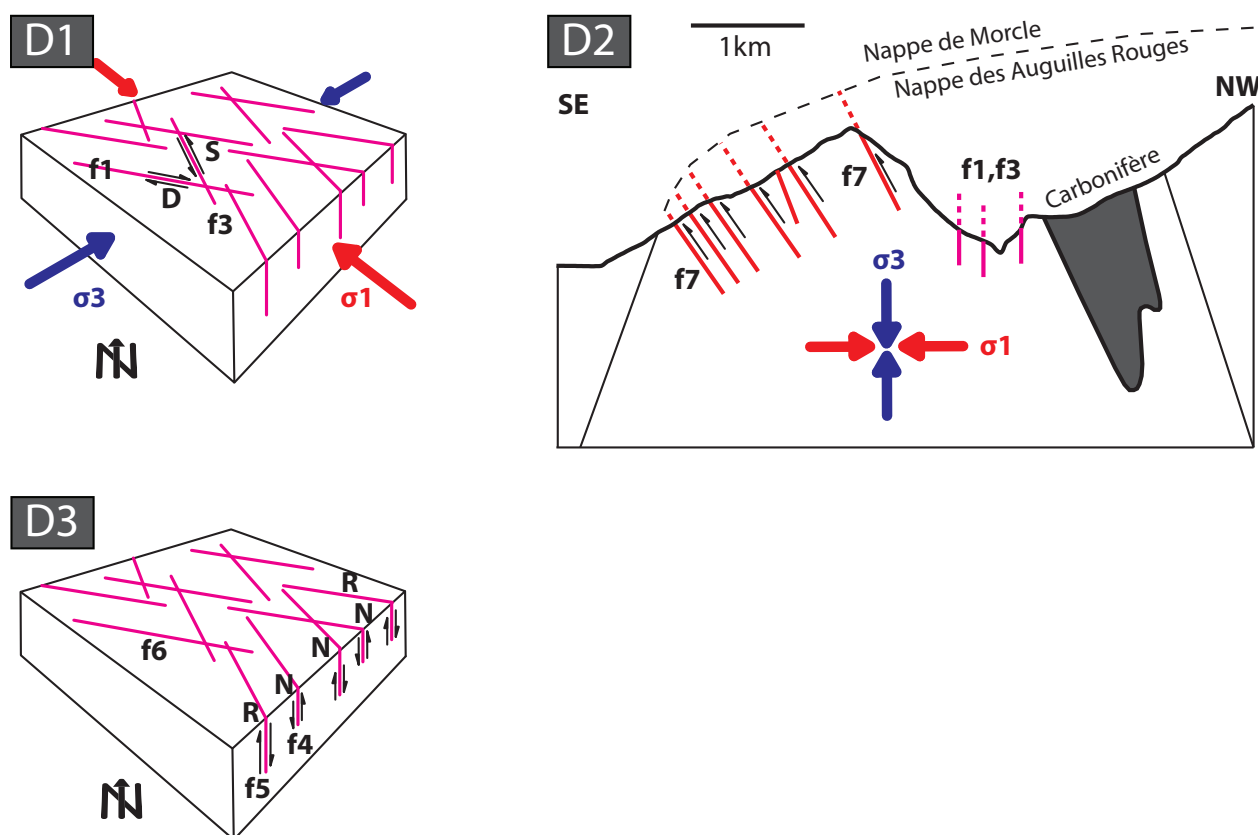


FIGURE 3.13 – Phases de déformations cassantes dans le Massif de l'Arpille. D1 : formation des failles conjuguées décrochantes pendant la mise en place des nappes. D2 : formation de failles à extension verticale dans une phase tardive du soulèvement de la chaîne. D3 : réactivation gravitaire locale des failles en failles normales et inverses.

L'origine des failles observées dans le Massif de l'Arpille peut être expliquée par les phases de déformations suivantes :

D1 Formation des failles conjuguées décrochantes (famille f1, environ E-W dextres et famille f3, environ N-S sénestres) sous un régime de raccourcissement NW-SE (perpendiculaire à la chaîne alpine) et d'extension SW-NE (parallèle à la chaîne alpine).

Dans les régions avoisinantes du Chablais et des Préalpes, les études de Badoux et Mercanton (1962), Plancherel (1976), Mosar et Borel (1992) et Raymond *et al.* (1996) ont mis en évidence de nombreuses failles avec cette cinématique. Les auteurs ont associé l'origine de ces structures à la mise en place des nappes (Badoux et Mercanton, 1962). Les failles décrochantes du secteur MA_N ont donc été interprétées comme issues de cette déformation.

Dans la région septentrionale du Massif de l'Arpilleaffleure le synclinal de Carbonifère de Collonges-Dorénaz de direction axiale NNE et charnière horizontale (Sublet, 1962). Dans la partie supérieure du synclinal, le même auteur décrit que les plis couchés des lacs de Fully témoignent d'une déformation encore plus forte.

Dans le secteur de Martigny les familles de failles f1 et f3 ont été observées uniquement dans le secteur le plus au nord du massif de l'Arpille (MA_N). Même si cette fracturation est mise en

évidence par une topographie particulièrement favorable (gorges du Trient), une corrélation entre le fort plissement du Carbonifère et la fracturation du sub-secteur MA_N est probable.

- D2** Formation des failles inverses NW/50 (f7) sous un régime de raccourcissement NW-SE et d'extension verticale. Avec une surface d'au moins 500 m x 300 m (faille MA_S_3) ces failles sont la structure cassante la plus importante du Massif de l'Arpille. Leur mouvement a été estimé avec la corrélation empirique de Hull (1988) à $50 \text{ m} \pm 1$ ordre de grandeur.

Les observations des lames minces confirment qu'une déformation de nature semi-ductile à cassante a affecté la roche proche des plans des familles f7. La cinématique de cette déformation sémi-ductile est la même que celle de la déformation cassante des failles. La cinématique et la nature assez cassante des structures semi-ductiles suggèrent que les deux structures sont reliées à la même déformation.

Cette déformation est probablement le soulèvement tardif du massif des Aiguilles-Rouges. Le soulèvement des Alpes pendant l'Oligocène et le Miocène est attesté par le plissement du massif des Aiguilles-Rouges et, plus au SW, par le retro-plissement du massif du Mont-Blanc (Steck *et al.*, 2001). Les études de Glotzbach *et al.* (2008) et de Leloup *et al.* (2005) résument les datations de l'exhumation du massif des Aiguilles-Rouges et du massif du Mont-Blanc effectuée par différents auteurs. Ces datations sont effectuées principalement avec la méthode des traces de fission dans l'apatite (refroidissement au dessous d'environ 100°) et du zircon (refroidissement au dessous d'environ 250°). Dans le massif des Aiguilles-Rouges les données disponibles sont moins nombreuses que dans le Mont-Blanc, mais elles suggèrent que l'exhumation des deux massif est contemporaine (Leloup *et al.*, 2005; Valla *et al.*, 2012). De récentes études dans le massif du Mont-Blanc suggèrent que l'exhumation a commencé à 22 Ma, dans une phase tardive du chevauchement des nappes helvétiques (Leloup *et al.*, 2005; Glotzbach *et al.*, 2008, 2010). Ces études ont aussi suggéré la présence de sous-périodes de soulèvement plus rapides : avant 6 Ma (2.5 mm/a) et à partir de 3 Ma ($> 1 \text{ mm/a}$). Le taux actuel du soulèvement ($> 1 \text{ mm/a}$ dans la vallée du Rhône) suggère que cette dernière phase de soulèvement rapide soit encore actuelle (Jaboyedoff *et al.*, 2003). Cette dernière accélération du soulèvement a été associée à l'érosion des vallées par les glaciers (Glotzbach *et al.*, 2010).

Les failles inverses et les micro-structures semi-ductiles à cinématique inverse du massif de l'Arpille pourraient donc avoir été générées durant cette période tardive de refroidissement rapide. Des études plus détaillées seraient toutefois nécessaires pour le confirmer.

- D3** Réactivation des failles f1 et f3 en failles normales et inverses (f4, f5 et f6). Cette phase est suggérée par la complexité de la cinématique de ces failles et par différentes observations de terrain. Dans la région du Chablais la réactivation de failles alpines en failles normales a été décrite par Raymond *et al.* (1996).

L'origine de cette réactivation pourrait être soit gravitaire soit tectonique. La réactivation gravitaire à échelle locale expliquerait bien la variabilité de la cinématique dans le temps de certaines failles. Elle expliquerait aussi les différentes cinématiques observées sur les failles ayant la même orientation.

Le long de la vallée du Rhône de nombreuses failles gravitaires sont signalées (Ustaszewski, 2007).

Chapitre 4

Secteur d'Ardon

4.1 Introduction

Situation géographique

Dans cette étude, le secteur d'Ardon a été défini par les terrains au NW du village d'Ardon, situé entre Sion et Martigny. Ce secteur comprend un grand versant orienté au SE (ci-dessous dénommé « le versant ») qui se termine dans la plaine du Rhône. Ce versant est coupé par une grande falaise de direction NW-SE, d'environ 400 m de hauteur et qui borde au SW l'arête Sex du Gru - la Routia (ci-dessous dénommé « la grande falaise »). Le versant est coupé en deux par la Lizerne, une rivière de direction NW-SE.

Situation tectonique

La figure A.7 représente la situation de la zone d'étude à l'aide de la carte tectonique 1 : 100'000 de Steck *et al.* (1999) et de deux coupes tirées de Steck *et al.* (2001).

Les nappes helvétiques occupent les terrains situés au N-NW de la vallée du Rhône. Ce secteur d'étude est donc formé uniquement par des nappes helvétiques. Depuis le NW (ou depuis le bas) affleurent les unités tectoniques suivantes :

Nappe de Morcles La partie plus interne et supérieure de la nappe de Morcles couvre la grande partie de l'extrait de la carte tectonique de la figure A.7. Cette nappe est formée par les sédiments du massif de Mont-Blanc externe.

Nappe d'Ardon Composée uniquement par des terrains du Crétacée, cette nappe correspond à une série sédimentaire décollée des terrains jurassiques provenant de la couverture de la partie interne du massif du Mont-Blanc (Masson(1980) dans Sartori et Epard (2011)).

Nappe des Diablerets Cette nappe chevauche la nappe d'Ardon. Deux "klippes" attribuées à cette nappe affleurent près du village d'Ardon (Sartori et Epard, 2011).

Formations géologiques

La description des roches est basée sur les observations de terrain et a été complétée avec les descriptions de la notice explicative de la feuille géologique de Sion d'après Sartori et Epard (2011). Les nappes de Morcles et d'Ardon sont composées par les unités géologiques suivantes :

"Valanginien schisteux" (Kimméridgien tardif - Valanginien précoce). Cette unité est aussi connue avec les termes « Zementstein » et « Formation de Palfris ». Elle est formée par une alternance de marnes et de calcaires argileux avec un caractère biodétritique marqué. Un

litage très fin (millimétrique) lui donne une apparence schisteuse. Des veines de calcite sont souvent présentes. Cette formation est présente dans les nappes de Morcles et d'Ardon.

"Valanginien calcaire" (Valanginien). Cette unité est aussi connue sous les termes « Formation de l'Orli » et « Calcaire de Betlis ». Il s'agit d'une série de calcarénite massive, avec des bancs assez épais (plusieurs centimètres), une patine gris clair et une cassure plus sombre. Cette formation est également présente dans les nappes

Kieselkak (Hauterivien). Dans la nappe d'Ardon, cette formation est formée par des calcaires et des marnes siliceuses à patine brune. Une haute teneur en silice les rend très massives et leur donne un aspect coupant.

Tertiaire (Eocène-Oligocène). Les roches de cette unité sont des marnes, des schistes et des calcaires. Il s'agit d'une unité massive avec localement une haute teneur en silice. L'attribution stratigraphique de certains terrains est problématique à cause de la complexité tectonique.

La nappe des Diablerets est composée par les unités géologiques suivantes :

Argilites noires (Aalénien-Oxfordien). Ces roches incluent des argilites noires non calcaires, des grès fins argileux et des alternances marno-calcaires à patine brune et cassure foncée.

Malm (Malm) Aussi connu sous le terme « Formation de Quinten ». Calcaire gris clair à pâte fine. Très massif, il forme souvent des parois de quelques dizaines de mètres de hauteur. Les « klippes » de la nappe des Diablerets sont formées par ces roches.

"Valanginien schisteux" (Berriasien-Valanginien.) Voir nappes de Morcles et d'Ardon.

"Valanginien calcaire" (Valanginien). Voir nappes de Morcles et d'Ardon

La zone d'étude est couverte par deux feuilles de l'atlas géologique Suisse 1 :25'000. La feuille 1306 Sion, publiée par Sartori *et al.* (2011) m'a été gentiment mise à disposition dès le début du travail. Elle a le grand avantage de couvrir la grande partie du secteur étudié et d'avoir été publiée très récemment. La feuille 1305 Dt. de Morcles de Badoux (1971) date désormais de quelques décennies. Elle est donc moins précise que celle de Sion et n'inclut pas la nappe d'Ardon (découverte en 1980).

Division en sous-secteurs d'étude

Les failles de cette zone d'étude ont été nommées d'après leur appartenance aux sous-secteurs définis ci-dessous. Cette division a été faite sur un critère purement géographique. A l'exception de « AV », ce zonage a été illustré sur la carte de la figure A.9 :

AR.W : Cette zone comprend les terrains situés à l'W de la Lizerne.

AR.E : Cette zone comprend les terrains situés à l'E de la Lizerne.

AV : Cette zone comprend les affleurements près de la localité d'Aven, aussi située sur la rive gauche de la vallée du Rhône, mais plus en hauteur. Le travail dans cette région a été moins détaillé que dans les secteurs d'Ardon. Deux failles de ce secteur ont été utilisées dans l'analyse cinématique.

4.2 Observations de terrain

Dans le secteur d'Ardon la morphologie du versant est souvent douce et caractérisée par des collines et des plateaux. Dans le secteur AR.W, en montant depuis le village d'Ardon, les plateaux suivants peuvent être distingués (voir figure A.9) : celui d'Ardon, celui de Beuble, celui de Tsan, et celui d'Isière. La fin des plateaux est marquée par des falaises à direction SW-NE. Le versant est parcouru

par des nombreux chemins : une route bétonnée monte depuis le côté S du village, un chemin monte sur la colline du château du Crest depuis le côté N du village, un chemin longe le versant très proche des falaises qui surmontent le village. Les nombreux vignobles qui couvrent le versant permettent aussi un bon accès aux affleurements disséminés dans les collines.

Comme déjà dit, au SW le versant est coupé par la grande falaise qui expose les roches sur une hauteur de plusieurs centaines de mètres. Le petit chemin qui descend depuis le col de La Routia au village de Neimié constitue le seul accès aux roches de cette falaise.

Le versant est coupé en deux par la Lizerne, une rivière qui coule au fond d'une profonde gorge à direction NW-SE. L'accès à cette gorge est malheureusement rendu impossible par l'œuvre humaine : un barrage construit près de la localité Bolaire forme un petit lac artificiel qui recouvre le fond de la vallée.

Au NE de la Lizerne (secteur AR_E), la morphologie est similaire à celle du secteur AR_W. Le plateau principal est celui de Champlong, qui termine également dans une falaise à direction SW-NE. ce secteur est également parcouru par plusieurs routes et chemins.

Les levés de terrain ont été effectués lors de plusieurs visites de quelques jours entre l'été 2011 et l'été 2012. Cela a permis d'avancer en parallèle avec l'investigation à l'aide des modèles numériques de terrain. Une attention particulière a été donnée aux structures visibles sur les modèles digitaux et aux structures déjà cartographiées sur les feuilles géologiques.

N.B. : Dans ce chapitre les observations sont souvent accompagnées de références à des noms d'affleurements et à des noms de failles. La carte topographique de la figure A.9 permet de situer tous ces objets.

4.2.1 Versant

Une grande partie des structures cassantes affleure dans le versant orienté à SE (ci-dessous dénommé « le versant ») qui se termine dans la plaine du Rhône.

Faïlle AR_W_1 Cette faille traverse tout le secteur AR_W en direction E-W (figure 4.1.A). A l'altitude de la plaine du Rhône, elle affleure près de la centrale hydroélectrique (affleurements #14.7 et #2.5, figure 4.1.B), ensuite elle s'insère dans une petite vallée (#14.1, #12.1) et se perd dans les éboulis du plateau d'Isière. Elle est à nouveau visible au dessus de la route goudronnée (#12.3). Ces affleurements sont formés, soit par les roches du Valaginien schisteux de la nappe d'Ardon, soit par le Malm de la nappe des Diablerets. Ces deux nappes sont décalées par la faille, le sens apparent étant dextre. A l'E de la route goudronnée la faille est cachée à nouveau par les éboulis du versant, mais sa suite dans les roches du Tertiaire est probable.

Aux affleurements #14.1 et #12.1, la faille a une orientation moyenne d'environ 147/56 (f1 dans la figure 4.2.A). Globalement la faille semble suivre cette orientation, mais localement son orientation dévie de cette valeur avec des pendages très élevés. Près de la centrale hydroélectrique le plan de faille est sub-verticale (f3 = 133/86). Tout en haut, près de l'affleurement #12.3, la faille est également sub-verticale (f2 = 180/79). Ici le valaginen schisteux est plus riche en calcaire ; deux plans de faille sont visibles, séparés d'environ 20 – 30 cm. Dans la grande partie de ces affleurements de nombreuses fibres de calcite indiquent un mouvement décrochant dextre avec un pitch compris entre 10 et 20 S.

L'orientation des couches est très variable. En témoignent les petits plis et la variabilité dans les orientations mesurées. Généralement les couches sont moins pentues que la faille (figures 4.1.B et

A l'affleurement #2.5 la faille AR_W_1 est coupée par la faille AR_W_2 (en jaune sur les figures 4.1.A

et B). Cette dernière faille a une orientation moyenne de 084/85. Des fibres de calcite indiquent que son mouvement est décrochant sénestre avec un pitch de 05 S. Les plans des deux failles sont donc normaux entre eux.

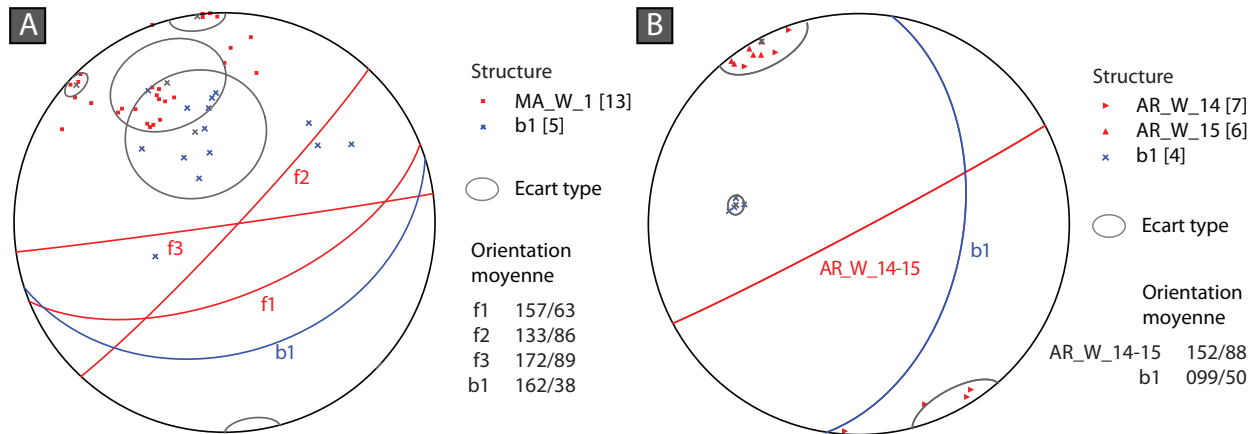


FIGURE 4.2 – Orientation de structures près des failles : A) AR_W_1; B) AR_W_14 et AR_W_15. Projections équiaires de Lambert.

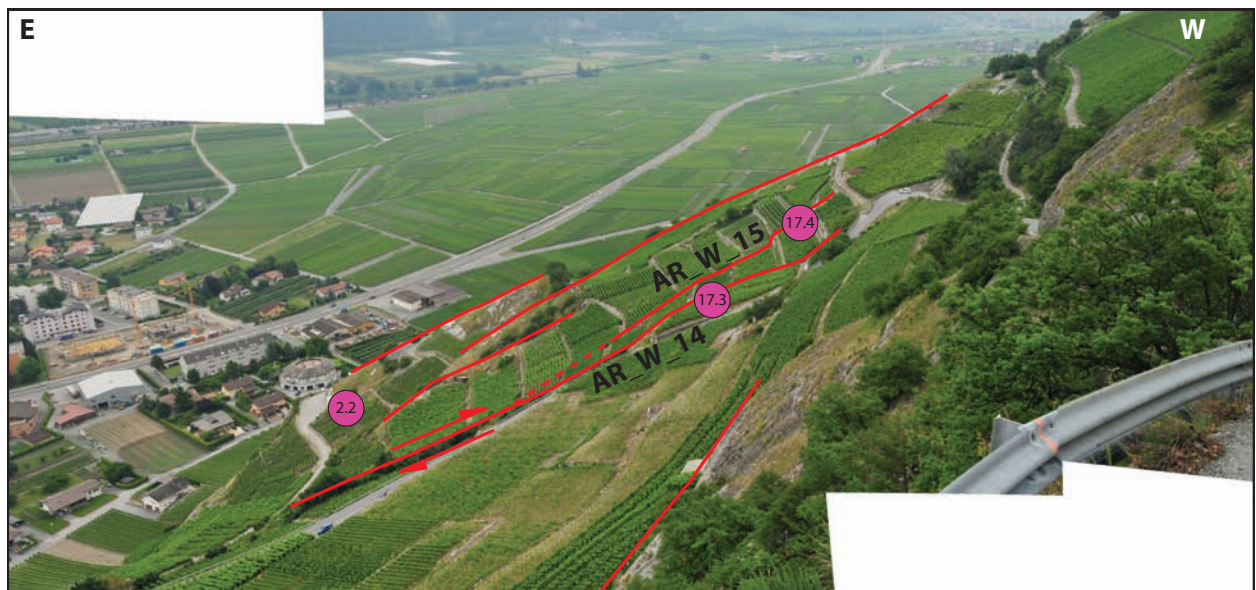


FIGURE 4.3 – Panorama du plateau de Beuble : le décrochement dextre AR_W_14 et sa deuxième branche AR_W_15. En arrière d'autres structures parallèles sont visibles.

Faille AR_W_14 Une deuxième faille importante de direction ESE-WNW est la faille AR_W_14 qui affleure dans les vignobles à l'W du village d'Ardon (figure 4.3). Deux branches de cette faille sont visibles aux affleurements #17.3 et #17.4. Le reste de la faille est caché par le matériel morainique sur lequel les vignobles ont été implantés, mais la direction des falaises suggère une suite et une union des deux branches au NE. L'orientation du plan de faille des deux branches est très similaire : l'orientation moyenne est 152/88. Sur le plan de faille de l'affleurement #17.4 des

tectoglyphes indiquent un mouvement décrochant (pitch 15 NE) de sens inconnu. Le décalage des unités lithologiques cartographiées sur la feuille de Sion témoigne d'un mouvement dextre.

Faïlle AR_W_3 Cette faille de direction E-W affleure au dessus du chemin qui traverse les vignobles au NW du village d'Ardon (affleurement #2.4). Un miroir de faille vertical très net coupe les couches de Malm des Diablerets sur une longueur d'environ 30 m. Des nombreuses fibres de calcite indiquent deux mouvements : le premier est dextre et de pitch 20-30 E, le deuxième est sénestre et de pitch 30-40 W (figures 4.4 et 4.5.A). Des fibres courbes sont aussi observables, par exemple en haut de la figure 4.4. Elles témoignent un changement des contraintes : de décrochement dextre à sénestre, ou et vice versa. Ceci impliquerait une rotation des vecteurs de mouvement comprise entre 50° et 80°. Cette faille témoigne donc probablement d'une réactivation. Les fibres courbes sont souvent cassées, ce qui empêche une datation relative des deux phases de mouvement.

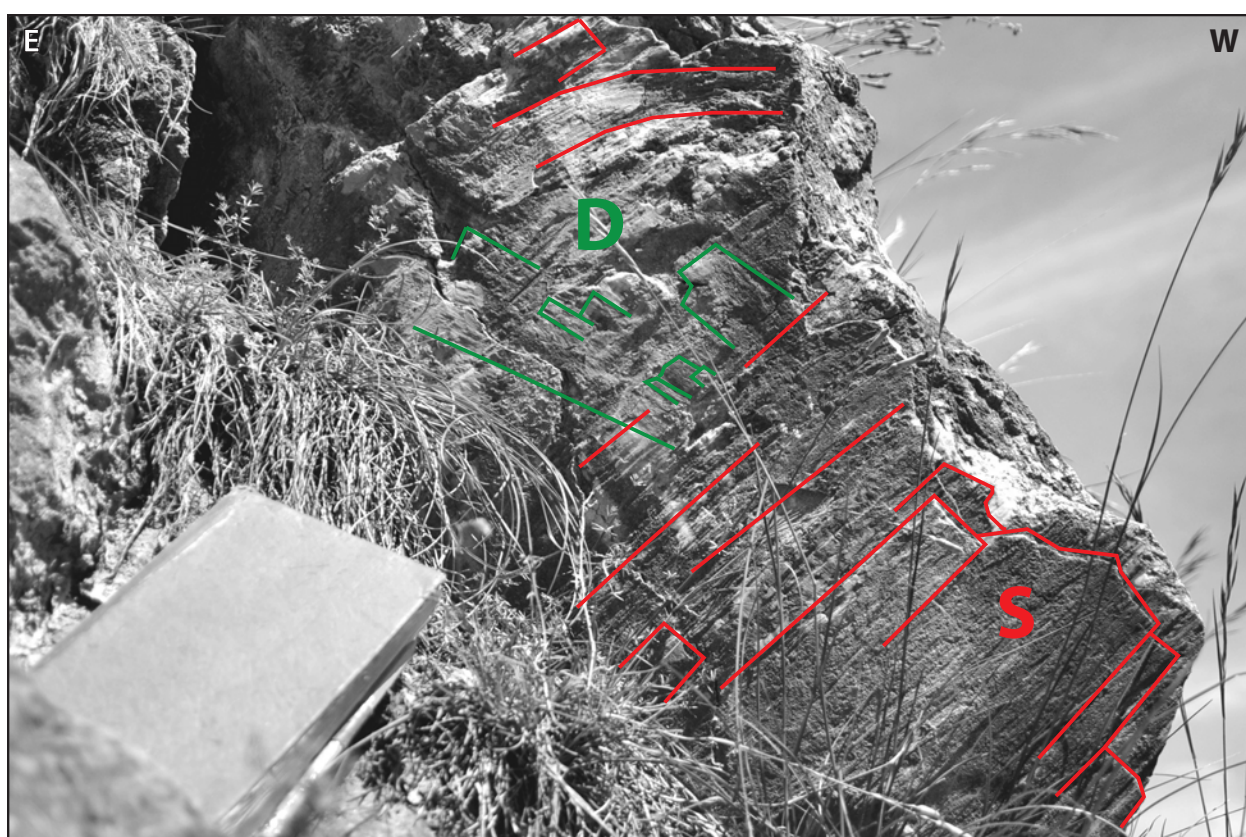


FIGURE 4.4 – Détail de la faille E-W AR_W_3. Sur le même miroir de faille des fibres de calcite sénestres (en rouge) et dextres (en vert) sont visibles. Des fibres courbes de sens de mouvement inconnu sont présentes en haut de la figure.

Faïlle AR_E_1 Cette faille de direction NW-SE affleure en rive gauche de la Lizerne. Elle coupe le Malm des Diablerets sur une longueur d'environ 300 m. Son miroir de faille est très net et forme une falaise de quelques dizaines de mètres de hauteur, bien accessible depuis le bas (#13.1) et depuis le haut (#13.3). Au premier affleurement des fibres de calcite indiquent un mouvement décrochant sénestre (pitch 30 SE). Sur le miroir de faille, des diaclase en-échelon j1 peu déformées sont visibles. Une photographie de cette faille est représentée dans la figure 4.6.

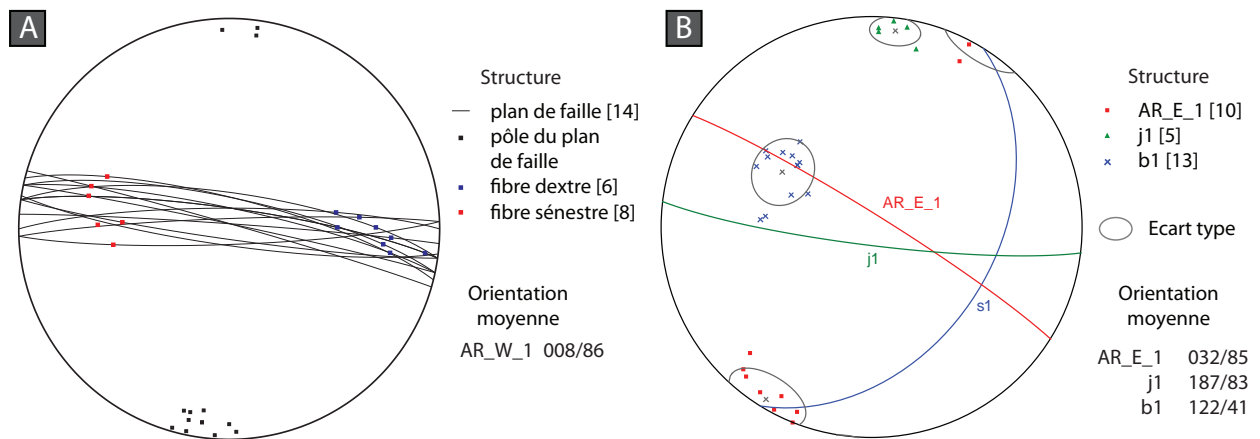


FIGURE 4.5 – A) Orientations des fibres de la faille AR_W_3; B) Orientations des structures près de la faille AR_E_1. Projections équiaires de Lambert.

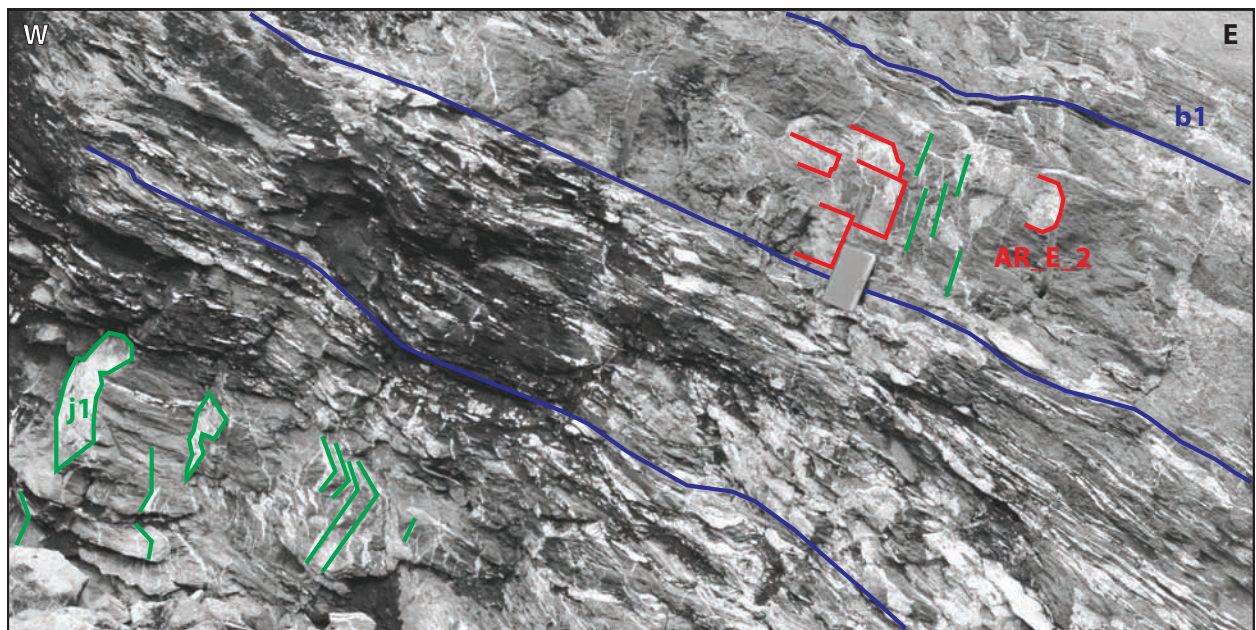


FIGURE 4.6 – Faille AR_E_1 avec fibres indiquant un décrochement sénestre (en rouge) et des fractures en-échelon indiquant aussi un décrochement sénestre (en vert).

Ci-dessous une interprétation de la représentation de ces structures, dont la géométrie est représentée dans le diagramme de Lambert de la figure 4.5.B. Le plan de faille (moyenne 032/85) est sub-vertical et normal aux couches (moyenne 122/41). La zone de cisaillement (déformation ductile) qui a généré ces fractures a donc la même orientation que la faille AR_E_1 (structure cassante). De plus la direction des fractures en-échelon indique que la zone de cisaillement a aussi accommodé un mouvement décrochant sénestre.

Diaclases en-échelon Dans le secteur d'Ardon les roches sont coupées par des nombreuses diaclases de calcite disposées en-échelon. Ces diaclases sont particulièrement présentes dans le Valanginien Schisteux. Certaines de ces diaclases ont la particularité d'être alignées le long de

petits plans de faille de quelques mètres de longueur. L'orientation de ces faille est souvent normale aux couches.

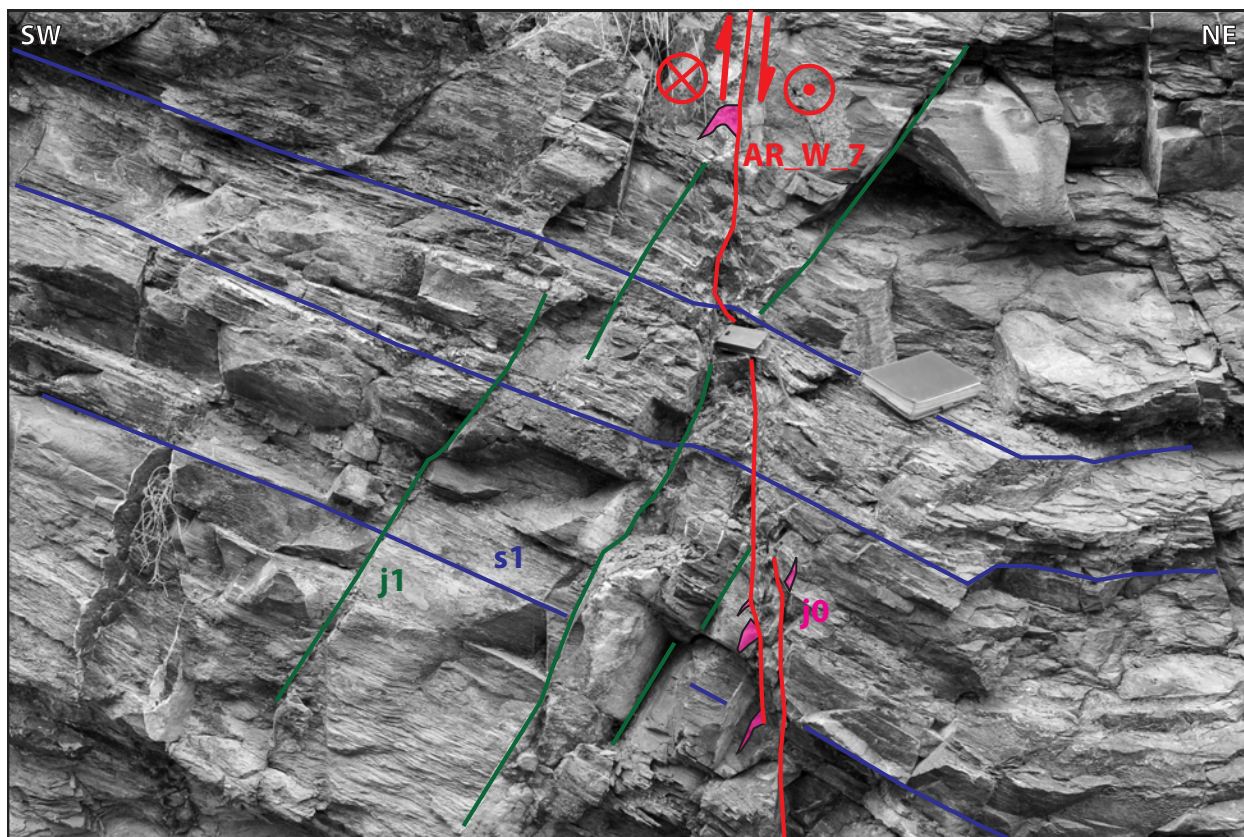


FIGURE 4.7 – Exemple de transition entre un régime semi-ductile (diaclasses à grande extension j_0) et un régime cassant (faille AR_W_7 et diaclasses à faible extension j_1).

L'exemple de la faille AR_W_7, qui affleure sur la route goudronnée entre les plateaux de Tsan et d'Isières (#12.4), est illustré dans la figure 4.7. Le plan de faille est sub-vertical et de direction NW-SE. Des diaclases j_1 à faible extension, de direction E-W et de pendage 70° sont distribuées en-échelon le long de cette faille. Très proches du plan de faille, des diaclases j_0 à plus grande ouverture mais moins persistantes ont la même orientation que j_1 et sont aussi disposées en-échelon. Ces diaclases sont déformées par le cisaillement et témoignent donc d'une déformation plus ductile. Cet affleurement suggère une transition entre un régime plus ductile (formation des diaclases j_0) et en régime plus cassant (formation des diaclases j_1 et de la faille AR_W_7).

Dans le chapitre 4.5 la nature de ces déformations sera analysée plus en détail.

4.2.2 Grande falaise NW-SE

La grande falaise de direction NW-SE qui délimite la partie occidentale du secteur d'Ardon (ci-après dénommé « le grande falaise ») est coupée par des nombreuses structures cassantes. Malheureusement la pente très élevée de la falaise empêche l'accès à la plupart des affleurements. Les structures ont donc été observées principalement au pied de la falaise.

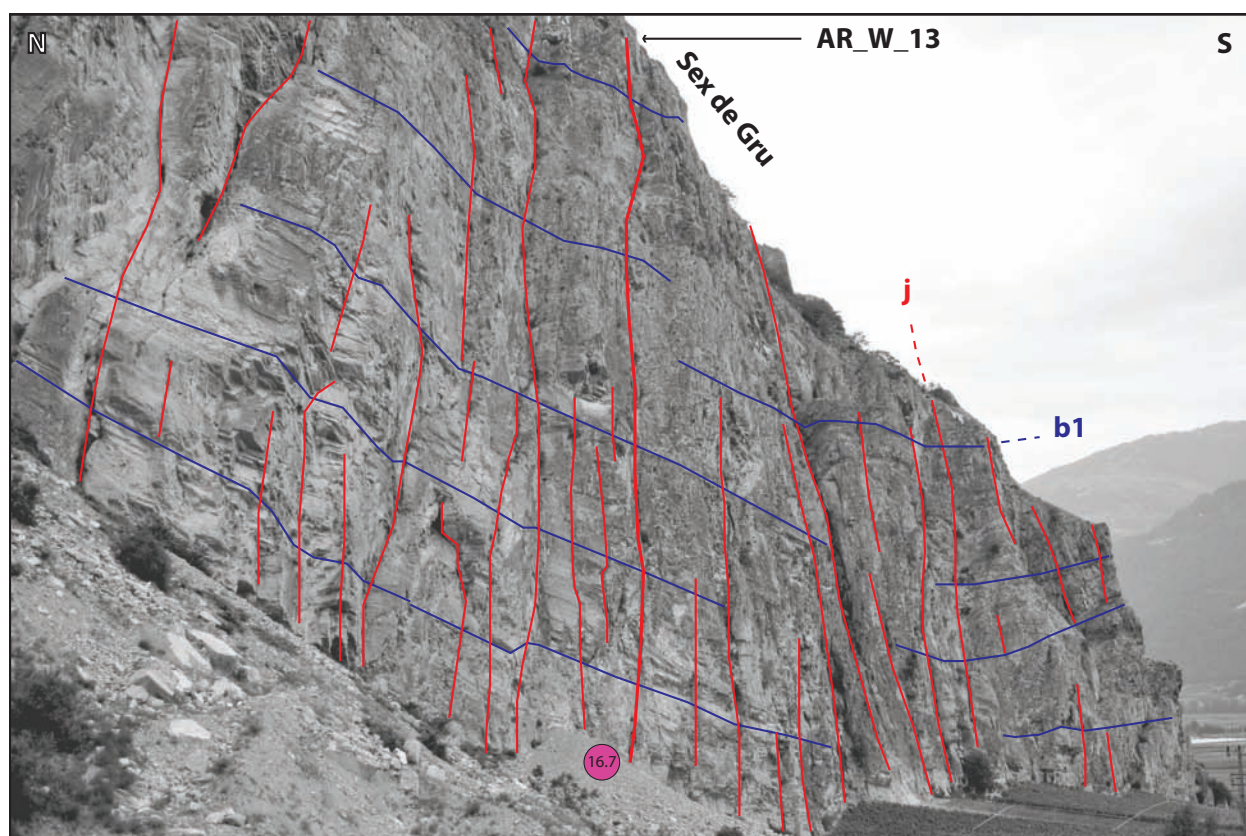


FIGURE 4.8 – Panorama de la grande falaise NW-SE qui délimite la partie occidentale du secteur d'Ardon près du Sex de Gru. Des structures cassantes j à direction E-W recoupent les couches $b1$.

Failles E-W La partie SE de cette falaise porte le nom Sex de Gru et délimite le plateau Beuble à l'W. La fracturation de cette partie de la falaise est très marquée : plusieurs discontinuités verticales de direction W-E coupent la falaise (en rouge dans la figure 4.8). Certaines discontinuités ont une forte continuité et coupent la roche jusqu'en haut ; la plupart à une persistance de quelques dizaines de mètres. Généralement l'espacement des discontinuités est de l'ordre du mètre et l'ouverture est millimétrique. Dans les structures les plus persistantes la « damage zone » est plus grande et atteint les quelques centimètres. Même si aucune structure de mouvement n'a été observée, il est probable que ces structures cassantes à haute persistance (comme la faille AR_W_13, affleurement #16.7) correspondent à des failles. Près de la faille AR_W_13 (183/87), des discontinuités ayant une orientation moyenne de 228/63 ($j1$) sont aussi présentes. Les couches ($b1$) ont une orientation légèrement différente que ailleurs sur le terrain (093/33). La figure 4.9.A représente l'orientation de ces structures. Les pôles des deux structures cassantes (les failles et $j1$) sont situés sur le plan de la $b1$, ce qui implique qu'ils sont normaux à cette dernière.

Failles NW-SE Plus au NW, au dessous du Col de la Routia, la grande falaise est coupée par des nombreuses structures cassantes sub-verticales (en rouge dans la figure 4.10). Ces structures sont plus espacées que les précédentes. Deux de ces structures ont été étudiées plus en détail et ont été interprétées comme des failles. La figure 4.9.B résume leur orientation.

A l'affleurement #16.5 la faille AR_W_11 a une orientation moyenne de 226/77. Des fibres de calcite indiquent un mouvement décrochant dextre (pitch 5 NW). Bien que les couches soient localement

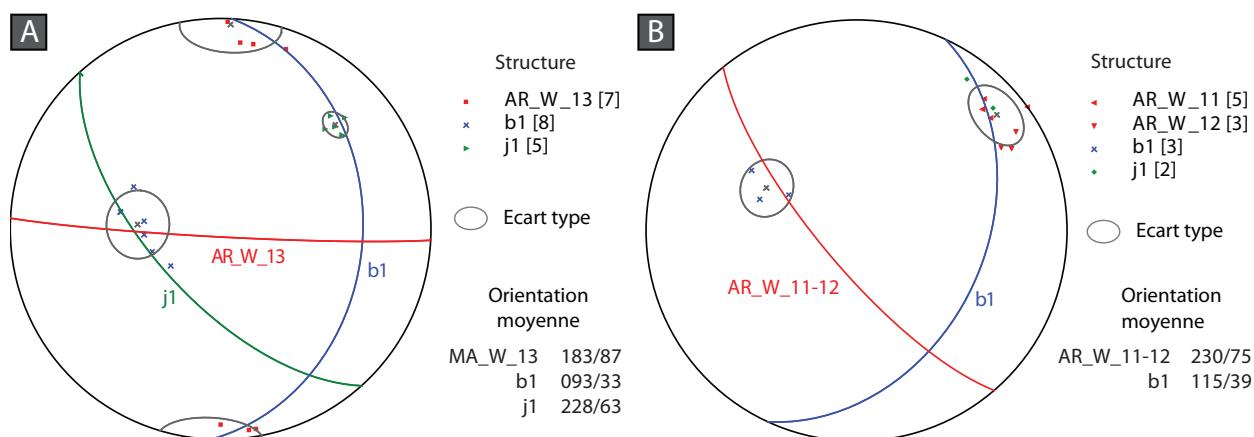


FIGURE 4.9 – Orientations près des failles : A) AR_W_13; B) AR_W_11 et AR_W_12. Projections équiaires de Lambert.

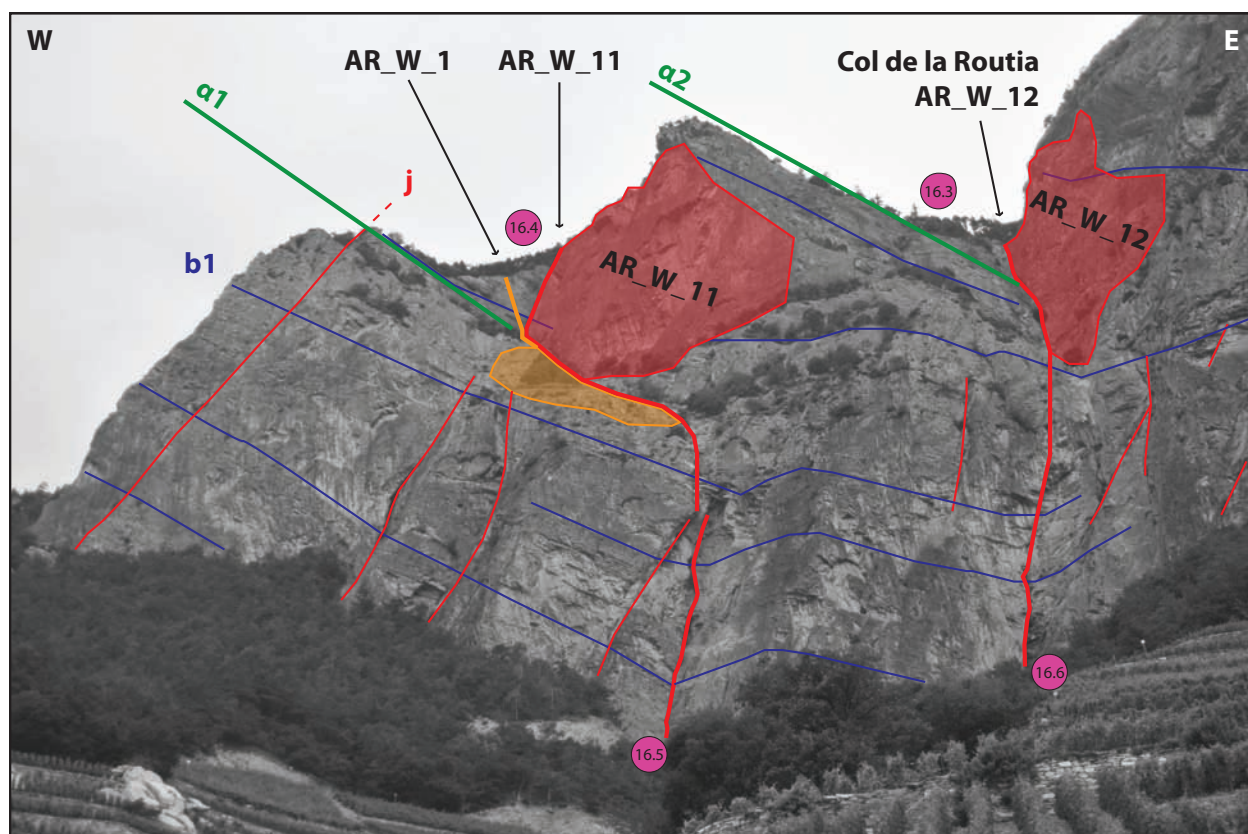


FIGURE 4.10 – Panorama de la grande falaise NW-SE qui délimite la partie occidentale du secteur d'Ardon près du Col de la Routia.

plissées, leur orientation moyenne est assez constante autours de 115/39. Le plan de faille et les couches sont donc normaux entre eux.

A l'affleurement #16.6, la faille AR_W_12 a une orientation moyenne et une direction de mouvement similaires à la faille AR_W_11 (240/73, pitch 10 SE). Le sens de mouvement est par contre opposé :

des fibres de calcite indiquent clairement un mouvement sénestre. La raison de cette cinématique opposée reste inexpliquée : une grande partie des failles de direction NW-SE de ce travail sont dextres. Les fibres sénestres de la faille AR_W_12 pourraient être expliquées par une réactivation postérieure. Une investigation plus détaillée de ces failles a été impossible à cause de la difficulté d'accès à la falaise.

Plans α

Le chemin qui descend la grande falaise depuis le col de La Routia a été parcouru. Au SW de ce col, deux plans de direction approximative SE/50 forment le flanc W de deux vallées à dièdre qui coupent la falaise en direction N-S (α_1 et α_2 , en vert dans la figure 4.10).

L'accès à des deux plans a été tenté, sans succès, depuis le sommet de la falaise (affleurements #16.3 et #16.4, juste au dessous du petit chemin). Les observations ont donc été effectuées uniquement depuis le bord de la falaise. Le flanc E des vallées était bien visible, le flanc W restait partialement caché par la topographie. Les couches (b1), localement plissées, sont coupées par une série de structures cassantes très pentues (j). Depuis l'affleurement #16.4, une structure cassante recoupant les couches avec un pendage beaucoup plus faible que les fractures j a été observé (en jaune dans la figure 4.10). L'orientation et la position de cette structure correspondent à celles de la faille AR_W_1.

Dans le panorama, les plans α semblent être parallèles aux couches. Le flanc E des vallées à dièdre est formé par les failles verticales AR_W_11 et AR_W_12. Dans la coupe de Badoux (1971) la vallée plus à l'W, dont fait partie le plan α_2 , a été interprétée comme un synclinal. Cette interprétation ne considère toutefois ni l'existence de la nappe d'Ardon (inconnue à l'époque), ni l'importante faille AR_W_1. Les plans α affleurent donc dans une zone où la géologie est complexe et leur interprétation est particulièrement difficile. Dans cette étude le plan α_1 a été interprété comme la suite de la faille AR_W_1. Cette interprétation est basée sur les orientations calculées avec Coltop3D sur l'MNT et sur le fait que le plan coupe les couches. Le plan α_2 est probablement dû à une faille parallèle à AR_W_1 qui n'affleure pas dans le versant.

4.3 Analyse morphologique numérique

Ci-dessous la qualité des jeux de données numériques est brièvement discutée :

Modèle numérique de terrain Le secteur d'Ardon est entièrement couvert par un MNT à résolution originale 2 m. La qualité de ce modèle de terrain est très bonne, sauf pour une petite région au NW du col de La Routia où la surface du modèle est formée par un série de triangles. Vraisemblablement la mesure des hauteurs dans cette zone a été problématique et seulement quelques points ont pu être mesurés. Le reste des points de la grille à 2 m ont probablement été calculés par des interpolations linéaires entre ces hauteurs. La qualité de la grande partie de zone d'étude d'Ardon est par contre très bonne. La seule vraie limite de ce MNT est d'avoir été acquis depuis un avion : la densité des points du modèle dans les nombreuses falaises à très fort pendage est faible.

Orthophotos La zone principale du secteur d'Ardon est formée par le versant qui termine dans la plaine du Rhône. Ce versant est couvert soit par la forêt, soit par les vignobles. En photographie aérienne, la forêt empêche toute vision. Les vignobles offrent une assez bonne visibilité. Cependant les nombreux chemins qui parcourent ces vignobles ressemblent beaucoup aux affleurements rocheux (les deux sont blancs). Dans l'orthophoto la grande falaise qui délimite le versant à l'ouest n'est pas en ombre. Les falaises verticales sont bien visibles dans les photographies. Les zones les moins raides sont par contre souvent couvertes par les débris de versant, ce qui empêche la vision de la roche.

Généralement les analyses numériques ont été effectuées sur la base du MNT. Les photographies aériennes ne fournissaient pas plus de données et n'ont donc pas été utilisées.

Cependant l'étude du secteur d'Ardon est fortement basée sur les observations de terrain. Le travail ponctuel sur les orientations des linéaments et des plans a donc été préféré à des analyses systématiques des linéaments ou des plans qui forment la morphologie. Dans le secteur d'Ardon l'analyse morphologique 3D n'a donc pas été effectuée.

4.3.1 Analyse 2D des linéaments

Les linéaments ont été dessinés manuellement sur des cartes de type hillshade (HS) et Hue Color Saturation (HSL).

La figure A.10 représente les structures identifiées. Le linéament L_1 (environ SW-NE) est parallèle à la direction des couches cartographiées sur les feuilles géologiques. Les linéaments L_2 - L_5 coupent les couches et pourraient donc être des structures cassantes. Ces structures ont les suivantes caractéristiques :

- L_2 De direction NW-SE à WNW-ESE. Ces linéaments coupent les petites falaises de direction SW-NE qui affleurent au dessous des plateaux de Beuble et de Tsan. Leur espacement est de l'ordre de 20 – 40 m. Dans le versant leur longueur est limitée à environ 100 m à cause des plateaux qui cachent leur probable prolongation. Dans la grande falaise leur longueur est plus élevée (plusieurs centaines de mètres).
- L_3 De direction moyenne W-E, ces linéaments sont aussi présents dans les falaises au dessous des plateaux et dans la grande falaise. Dans les collines du versant, ils forment de petites vallées. Ils sont plus espacés et plus persistants que L_2 (espacement ≥ 100 m, persistance 200 – 600 m).

- L_4 Ces linéaments de direction N-S forment d'importantes vallées à dièdre dans la grande falaise. Ils forment aussi des falaises de plusieurs dizaines de mètres de hauteur en rive gauche de la Lizerne. Leur nombre limité empêche une bonne estimation de leur espacement. Leur persistance est d'environ 500 m.
- L_5 De direction NE-SW, ces structures sont visibles uniquement dans la grande falaise. A ces endroits leur espacement est d'environ 100 m, leur persistance d'environ 300 m.

4.3.2 Analyse 3D des linéaments

Les linéaments 2D ont en suite été étudiés à l'aide du logiciel Coltop3D (Jaboyedoff *et al.*, 2007) pour en définir l'orientation. Cette analyse est basée sur le fait que, quand un linéament est formé par une structure planaire, sa trace correspond à l'intersection du plan avec la surface topographique.

Determination des orientations a partir des linéaments

Pour que l'analyse 3D des linéaments soit efficace, il est nécessaire que les points dessinés le long d'un linéament ne soient pas colinéaires. Une topographie variée facilite le calcul de l'orientation du plan qui forme un linéament : le meilleur des cas est celui d'un linéament qui traverse une vallée ou une colline. Dans ce cas, le plan qui passe par les points est très bien contraint. Si les points dessinés sont colinéaires, les plans qui passent par la droite sont théoriquement infinis. Il n'est donc pas possible de définir les plans sans connaître en partie leur orientation (soit leur direction, soit leur pendage).

Plusieurs essais ont été effectués pour déterminer l'orientation des plans formant les linéaments auparavant cartographiés avec la fonction « Trace du plan à partir de points » de Coltop3D. La grande partie des linéaments du secteur d'Ardon ont une extension limitée. Ils affleurent dans les pentes rocheuses mais sont cachés sous les débris du versant qui couvrent les plateaux. Même si la topographie du versant est assez variée (plateaux à faible pendage et pentes rocheuses à plus fort pendage), il n'a pas été possible de calculer systématiquement et précisément les orientations des plans formant les linéaments.

AR_W_1

Le linéament de type L_3 formé par la faille AR_W_1 dans le versant a été étudié en détail. Ce linéament est particulièrement intéressant car l'orientation de cette faille est variable (voir chapitre 4.2.1). De plus le prolongement de la faille dans la grande falaise n'a pas pu être vraiment prouvée (voir chapitre 4.2.2). Les observations de terrain suggèrent toutefois que les plans α (plans qui forment le flanc droite des vallées N-S dans la grande falaise, voir figure 4.10) soient formés par des structures cassantes.

Avec Coltop3D l'orientation des deux plans α a été estimée à 150/50. Cette orientation est assez proche de celle mesurée sur le terrain (150/60). La suite de ces structures a été étudiée : l'intersection de ces deux structures avec la surface topographique a été dessinée avec Coltop3D (fonction « Trace du plan à partir d'une orientation ») et a été représentée dans la figure A.11.A.

Dans cette figure, il peut être observé que la trace du plan α_1 (la plus au N) correspond bien au linéament entre le col de La Routia et le plateau d'Isières. A l'E de ce plateau, la trace de α_1 s'éloigne du linéament et intersecte la vallée de la Lizerne environ 100 m plus au NW de la faille cartographiée sur le terrain. Dans cette zone le linéament correspond par contre bien à la trace du plan α_2 (la ligne la plus au S).

Il est donc évident que la faille AR_W_1 ne peut pas être approximée par un plan parfait. Deux modèles pourraient expliquer le comportement de cette faille :

Faille courbe Une seule faille d'orientation globale comprise entre SW/50 et SW/60 coupe la zone d'étude. Localement la faille tourne et change d'orientation. La rotation n'affecte pas la direction, mais plutôt le pendage, qui devient plus pentu. Ce modèle a été représenté dans la figure A.11.B.

Zone de faille La faille est formée par deux branches d'orientation comprise entre SW/50 et SW/60 (en rouge et violet dans la figure A.11.C). Ces branches sont reliées par d'autres failles ayant une orientation plus pentue (en bleu dans la figure). Ces branches forment donc une zone de faille décrochante.

Dans la littérature, les failles courbes et les zones de faille sont interprétées comme des structures générées par une grande déformation cassante (Price et Cosgrove, 1990). Dans cette étude le modèle préféré est le deuxième, car par la suite la faille AR_W_1 sera interprétée comme la faille principale d'une zone de décrochement.

4.3.3 Vérifications des orientations

L'analyse morphologique numérique sera en suite utilisée pour vérifier la consistance du modèle tectonique proposé. Cette vérification est exposée dans le chapitre 4.4.2.3.

4.4 Analyse des failles

Ce chapitre a comme but l'étude des grandes failles de nature uniquement cassante. Les petites failles associées à des diaclases en-échelon seront analysées dans le chapitre 4.5.

4.4.1 Analyse cinématique

Les axes cinématiques de raccourcissement (P) et d'extension (T) des fibres ont été calculés avec la méthode de Allmendinger (1990) sur les données de mouvement récoltées sur le terrain et résumées dans le tableau B.2. Comme discuté dans le chapitre 2.4, ces axes sont une expression compacte de la cinématique d'une faille (Allmendinger, 1989).

Les failles ayant une distribution des axes P-T similaires ont été regroupées dans la même famille. Pour chaque famille les axes cinématiques moyens ont été calculé avec la statistique de Bingham (1974). Les plans nodaux ont été calculés à partir des axes moyens. Les plans nodaux sur lesquels des failles ont été observées ont été colorés en rouge et le sens de mouvement a été indiqué.

L'analyse cinématique a été effectuée uniquement sur les failles avec des données de mouvement. Les failles sans fibres ont donc été exclues de cette analyse. Les failles accompagnées par les diaclases en-échelon ont aussi été exclues de cette analyses. Dans le chapitre précédent, il a été montré qu'elles sont l'expression d'une tectonique particulière.

Les failles du secteur d'Ardon ont été regroupées en quatre familles cinématiques. La figure 4.11 synthétise les résultats de l'analyse cinématique.

Familles principales

Les familles cinématiques f1 et f2 regroupent la plupart des failles (10 sur 13) et la majorité des fibres (51 sur 63). Ces deux familles ont donc été interprétées comme les familles principales.

Dans f1 les axes cinématiques de compression (P) sont concentrés autour d'une orientation moyenne de 129/17. Pour les axes T, l'orientation moyenne est 034/15. Pour f2, les orientations moyennes des axes moyens : 088/21 pour P et 181/04 pour T. Dans les deux familles les axes sont donc sub-horizontaux. Par rapport à f1, les axes cinématiques de f2 sont roté de 45° en sens antihoraire. Des quatre plans nodaux de ces deux familles cinématiques, seulement trois (grands cercles rouges dans la figure 4.11) correspondent à des failles observées sur le terrain. Ci-dessous ces trois types de failles sont illustrées à l'aide des failles décrites dans le chapitre 4.2.

1. Décrochement dextre E-W (f1). Ces structures correspondent par exemple à la faille AR_W_1 et aux fibres sénestres de la faille AR_W_3. Dans cette analyse, les failles à direction ESE-WNW sont aussi comprises dans cette catégorie.
2. Décrochement sénestre NW-SE (f2). Ces décrochements sont formés par exemple par les faille AR_E_1 et AR_W_12.
3. Décrochement sénestre N-S (f1). Formés par exemple par la faille AR_W_2.

Familles minoritaires

Comme pour f1 et f2, pour f3 et f4 les axes cinématiques sont aussi sub-horizontaux et confirment un régime décrochant.

La famille cinématique f3 est formée pour exemple par les fibres sénestres de AR_W_3. La cinématique de cette famille est donc à l'opposé de celle de f1.

La famille f4 est formée uniquement par les fibres de la faille AR_W_11. Cette faille est une des deux failles verticales de direction NW-SE observées au pied de la grande falaise, en bas du col de La Routia.

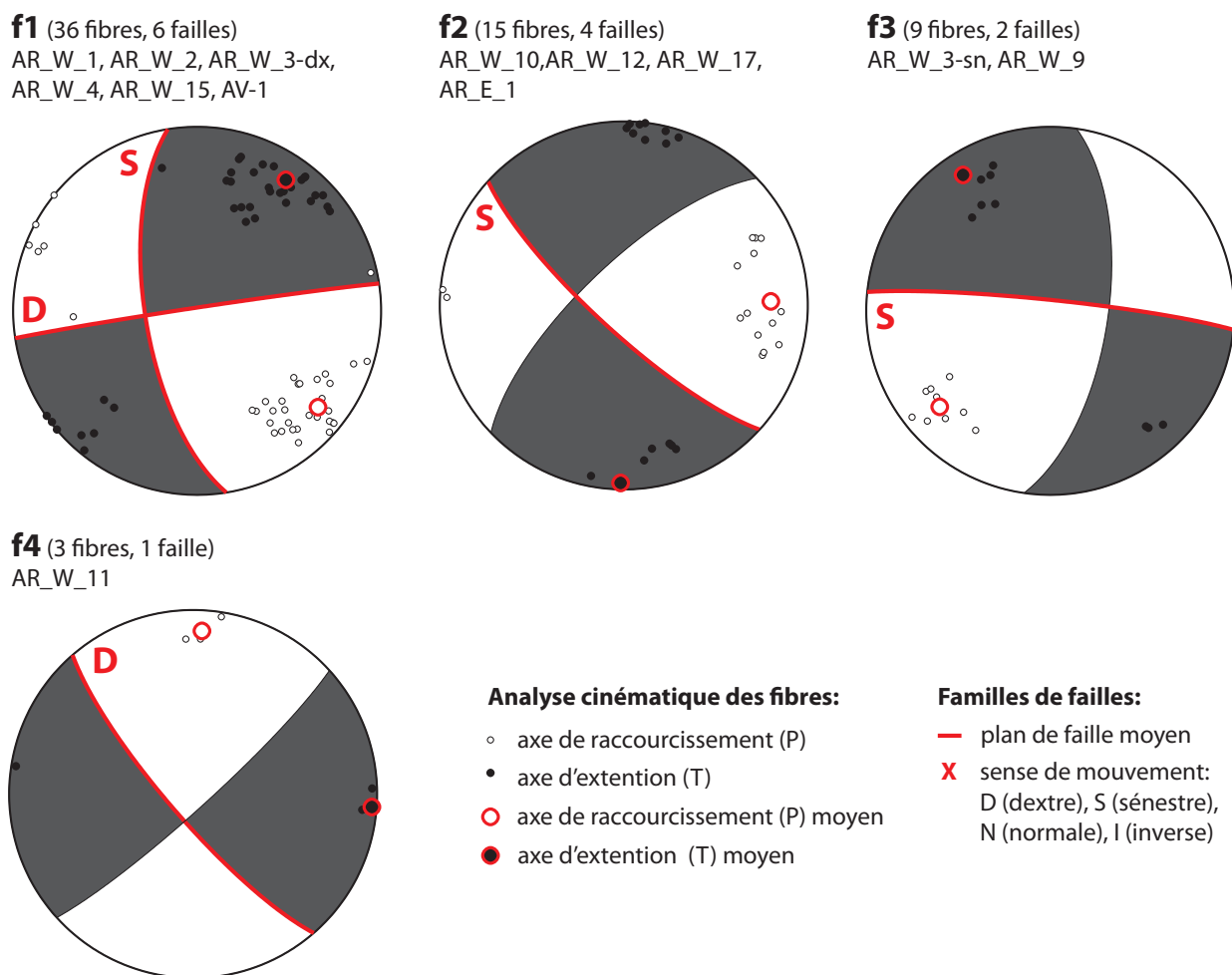


FIGURE 4.11 – Analyse cinématique des failles et classification en familles cinématiques.

Cinématiques opposées

Dans les failles de direction E-W les décrochements sont en majorité dextres (f1), mais les fibres sénestres (f3) sont aussi nombreuses. La faille AR_W_3 confirme que les mouvements sénestres ne sont pas négligeables : sur son plan de faille sont présentes à la fois des fibres indiquant un mouvement dextre et des fibres indiquant un mouvement sénestre. C'est la raison de la division des données de mouvement en dextre (AR_W_3-dx) et sénestres (AR_W_3-sn). Les fibres courbes de cette faille pourraient suggérer une transition progressive entre ces deux cinématiques opposées. Une réactivation d'une ancienne faille décrochante sénestre en décrochement dextre pourrait aussi être une explication.

La famille f4 est par contre représentée par une seule faille (AR_W_11). A côté de cette faille une faille ayant la même direction (environ NW-SE) et sens de mouvement opposé (la faille AR_W_12 de type f2) a été observée. Dans ce cas aussi, ces deux failles ont une cinématique opposée. Ces failles affleurent dans la grande falaise qui coupe le versant au SW et sont donc de très difficile accès. Une étude plus détaillée de ces structures n'a donc pas été possible.

Discussion

Les résultats de l'analyse cinématique sont particuliers pour trois raisons. Premièrement, parce que le fait que la cinématique de la majorité des failles peut être résumée dans seulement deux familles cinématiques. Deuxièmement, parce que les failles minoritaires ont une cinématique qui est exactement à l'opposé des cinématiques dominantes. Troisièmement, il est intéressant d'observer que toutes les failles sont décrochantes et qu'une grande partie est sub-v verticale.

Cette troisième particularité était absolument inattendue. Les unités helvétiques sont souvent coupées par des nombreuses failles normales et inverses à pendage moyen (Maurer *et al.*, 1997; Champagnac *et al.*, 2004; Ustaszewski *et al.*, 2007; Gasser et Mancktelow, 2010).

Le fait qu'aucune faille conjuguée classique n'ait été trouvée suggère que cette cinématique ne peut pas être expliquée par un modèle classique de failles conjuguées. Ceci empêche aussi une analyse des contraintes tels que celle effectuée dans le secteur de Martigny.

Tous ces facteurs suggèrent que le secteur d'Ardon est une région assez spéciale et différente des régions avoisinantes.

4.4.2 Analyse des orientations

4.4.2.1 Analyse des orientations (3D)

Afin d'étudier plus en détail la géométrie des failles, une analyse classique des orientations des failles en 3D a donc été effectuée.

Familles d'orientation Les pôles des toutes les failles ont été représentés sur un diagramme de Lambert. Cinq zones de haute concentration de pôles ont été identifiées, ces zones forment des familles de failles ayant une orientation similaire ($\Omega_1 - \Omega_5$).

La figure 4.12.A représente une synthèse des résultats. En arrière plan, la densité des données est représentée en gris par la concentration de Fisher (1953). Le cône de l'écart type d'une famille a été dessiné en couleur (dans le diagramme un cône forme un ovale). Le grand cercle qui correspond à la valeur moyenne d'une famille a été dessiné avec la même couleur. Ces données statistiques ont été résumées dans le tableau 4.1.

En général les familles représentent des failles très pentues (pôles près du bord du diagramme et pendages moyens de 80°). La seule exception est la famille Ω_4 (pendage moyen de 53°).

Attribution des failles aux familles Les failles cartographiées sur le terrain dans les secteurs AR.W, AR.E et AV ont en suite été assignées aux familles identifiées dans l'étape précédente. Pour chaque faille un diagramme des pôles a été effectué. Dans tous les cas, la concentration des pôles et la valeur moyenne étaient bien corrélées avec une des cinq familles. Chaque faille a donc pu être classifiée dans une des cinq familles. La liste des failles assignées à une famille est aussi résumée dans le tableau 4.1. Les familles qui comprennent le plus de failles sont Ω_2 et Ω_3 (avec respectivement 8 et 9 failles). Ω_1 et Ω_4 sont encore bien représentées avec 3 failles pour chacune. Par contre, les données de Ω_5 proviennent uniquement de la faille AR.W.2. L'écart type réduit de cette famille est donc plus du au manque de données que à leur uniformité.

Pour illustrer la consistance des cinq familles, les mesures des pôles de chaque faille ont été dessinées. La couleur de ces pôles correspond à la famille dans laquelle la faille a été classifiée (Figure 4.12.A). En général, les points d'une couleur sont bien regroupés dans la famille ayant la même couleur. Ceci confirme que les plans des failles peuvent généralement être approximés par un plan et que ce plan correspond assez bien à celui l'orientation moyenne de la famille.

Nom famille	Orientation moyenne	Ecart type	Failles
Ω_1	145/72	17	AR_W_1, AR_W_14, AR_W_15,
Ω_2	182/90	15	AR_W_3, AR_W_6, AR_W_8, AR_W_9, AR_W_13, AR_E_3, AR_E_4, AV_1
Ω_3	221/85	20	AR_W_7, AR_W_10, AR_W_11, AR_W_12, AR_W_16, AR_W_17, AR_E_1, AR_E_2, AR_E_5
Ω_4	250/53	8	AR_W_4, AR_W_5, AV_2
Ω_5	084/84	5	AR_W_2

TABLE 4.1 – Familles de failles d'orientations similaires. Ces données sont représentées sous forme de diagramme de Lambert dans la figure 4.12.A.

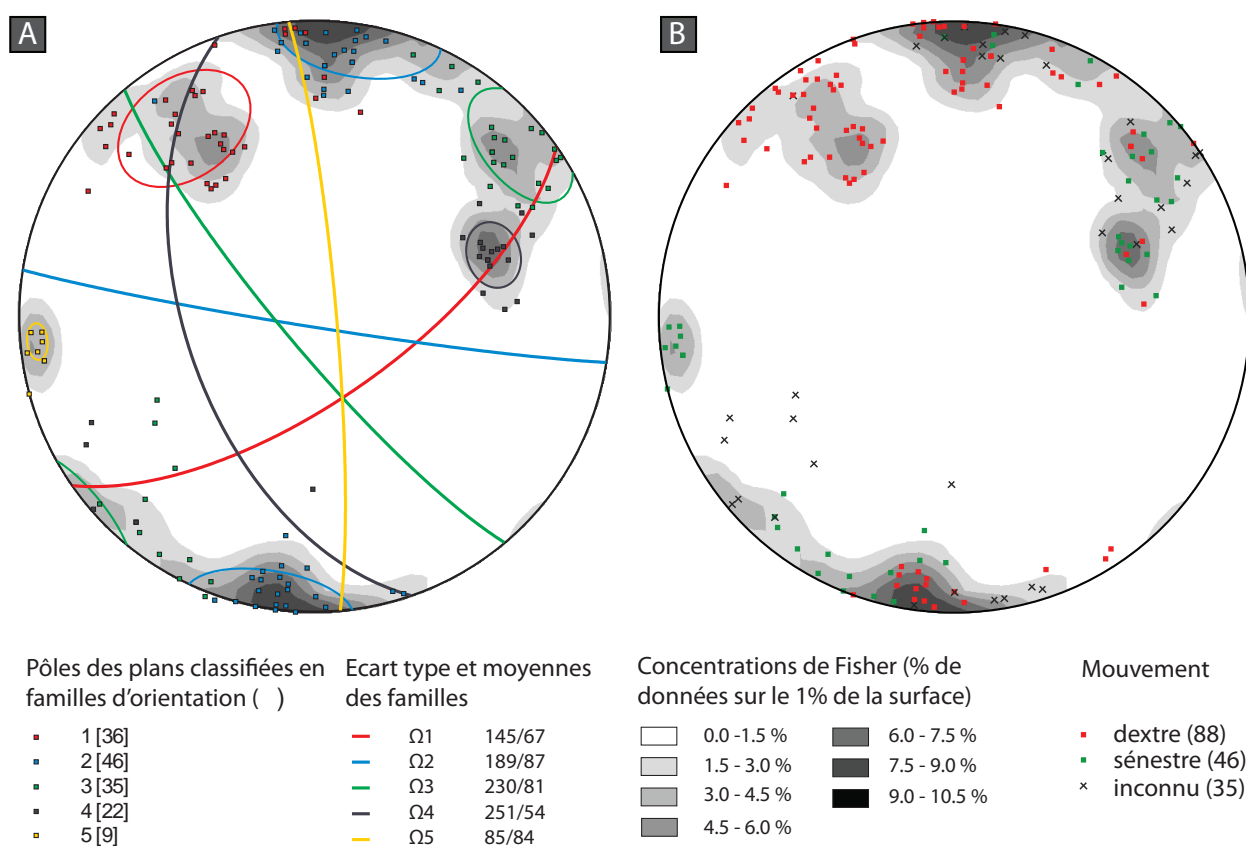


FIGURE 4.12 – Analyse des orientations des plans de faille : A) Classification en familles ayant la même orientation (Ω). B) Mouvement. Projections équiangles de Lambert.

Analyse des mouvements Dans l'analyse cinématique, il a été montré que les fibres de la grande majorité des failles témoignent des mouvements décrochants. Leur cinématique peut donc être décrite en termes de mouvements dextres (D) et sénestres (S). Les pôles des failles ont donc été classés selon ce critère et représentés dans un deuxième diagramme de Lambert (Figure 4.12.B). Une bonne partie des mesures des plans de faille prises sur le terrain sont par contre privées d'indications de mouvement. Quand toutes les fibres d'une faille indiquaient un décrochement bien

défini (dextre ou sénestre), ce mouvement a donc été extrapolée aux mesures prises de ces données. Par exemple, les 9 fibres, trouvées le long de la faille AR_W_1 indiquaient toutes un décrochement dextre. Les 36 pôles de ce plan de faille ont donc été tous représentés comme des décrochement dextres. Les pôles des failles pour lesquelles le mouvement est indéterminé ont été dessinés en gris. La seule faille où les fibres indiquent plusieurs sens de mouvement est AR_W_3 (fibres à la fois dextres et sénestres). Les mesures de cette faille ont été divisées en dextres et sénestres et aucune extrapolation n'a été effectuée.

Une discussion sur les données de mouvements de chaque famille d'orientation est résumée ci-dessous :

- Ω_1 La totalité des failles ont un mouvement dextre.
- Ω_2 Une grande partie des données est aussi dextre. Des mouvements sénestres sont aussi présents. La faille (AR_W_3) confirme que les failles de cette famille peuvent avoir bougé dans ces deux sens.
- Ω_3 La majorité des données est sénestre. Les quelques données dextres proviennent toutes de la faille AR_W_7. Cette faille coupe une zone avec une géologie très complexe. Cette famille a donc été interprétée comme sénestre.
- Ω_4 Les données de cette faille proviennent de trois failles, dont une avec mouvement indéterminé, une dextre et une sénestre. Avec ces données, il est difficile de déterminer le mouvement de cette famille. Ces trois failles sont des structures mineures (quelques dizaines de mètres d'extension).
- Ω_5 Cette famille est représentée uniquement par la faille AR_W_2 (la faille orientée à environ 90° de AR_W_1). Toutes les fibres de cette faille indiquent un mouvement clairement sénestre.

Ces familles couvrent un arc couché sur le bord du diagramme compris entre le NW et l'E. Au NW les mouvements sont dextres, et après une zone de transition (au N) les mouvements sont sénestres. Le diagramme de Lambert n'est pas très efficace pour représenter la répartition de ces données, de plus les structures ont toutes un pendage élevé. Afin de mieux étudier leur distribution les données ont donc été analysées en 2D.

4.4.2.2 Analyse des directions (2D)

En deux dimensions l'orientation d'une faille peut être décrite par la direction de la faille, comprise entre 0° et 180° . Les directions des failles ont été calculées et représentées sous forme d'histogrammes à intervalle de 5° .

Valeurs moyennes La figure 4.13.A représente les histogrammes pour les données moyennes des familles calculées dans l'analyse des orientation en 3D (chapitre 4.4.2.1) et résumées dans le tableau 4.1. Chaque faille est donc représentée par sa direction moyenne. Le premier histogramme montre la famille de la faille selon le tableau 4.1. Le deuxième histogramme montre le sens de mouvement de la faille.

Depuis la gauche, trois cloches peuvent être distinguées. Ces cloches correspondent à des familles de failles ayant une direction similaire. Ces familles, nommées Γ , ont les caractéristiques suivantes :

- Γ_1 Cette famille est bien isolée, est formée par les trois failles de la famille d'orientation Ω_1 et toutes les failles sont dextres. Ceci avait déjà été observé dans les diagrammes de Lambert.
- Γ_2 Cette deuxième famille est aussi bien isolée et comprend les sept failles de la famille d'orientation Ω_2 . Trois de ces failles ont un sens de mouvement inconnu, trois sont sénestres, une est dextre et une est à la fois dextre et sénestre.

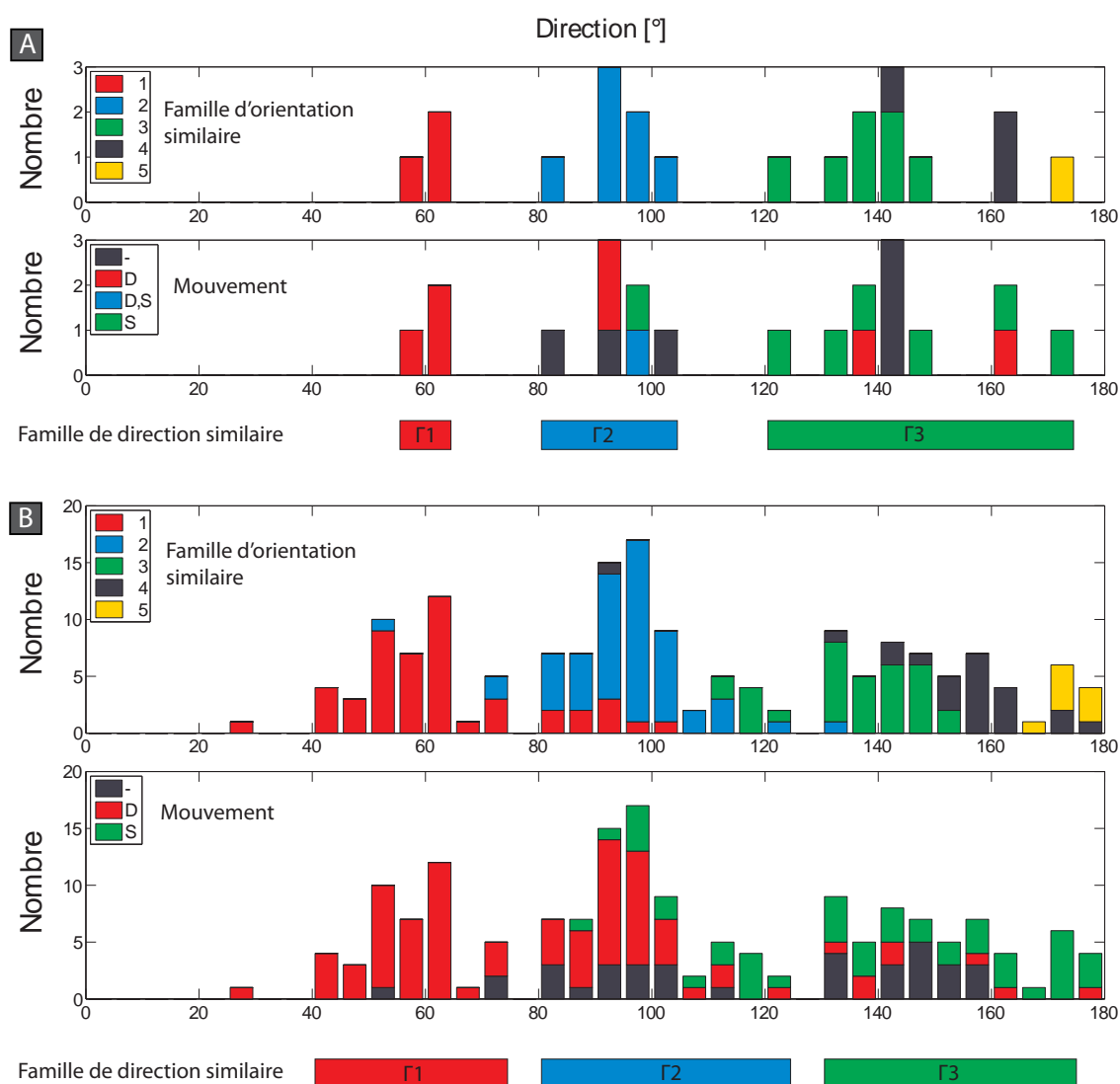


FIGURE 4.13 – Histogrammes (nombre vs direction) des failles selon la famille d'orientation Ω et la direction (Dextre D, Sénestre S). A) Valeurs moyennes des failles. B) Toutes les valeurs. Classification des données en familles de direction similaire.

Γ_3 A partir de 115° la concentration des données est moins bien définie. Cette famille comprend les données des familles d'orientation Ω_3 , Ω_4 et Ω_5 . Les sens de mouvement des failles de cette famille sont en grande partie sénestres (six failles). Deux failles sont dextres.

Toutes les valeurs La même analyse a été effectuée sur la totalité des mesures d'orientation des failles. La méthode utilisée est exactement la même qui a été appliquée à l'analyse des orientations en 3D (chapitre 4.4.2.1). Les données de mouvement ont donc été extrapolées uniquement pour les failles où le mouvement était claire.

L'avantage d'analyser les directions de toutes les mesures est que les données sont beaucoup plus nombreuses. Pour les 21 failles analysées précédemment, il y a 167 mesures des plans de faille. Dans

les histogrammes de la figure 4.13.B, les familles précédemment identifiées sont par conséquent mieux définies :

- Γ_1 Cette famille forme une cloche de gauss. Les directions sont comprises entre environ 40° et 75° . Un pic est bien visible à environ 60° .
- Γ_2 Cette famille forme aussi une cloche de gauss. Les directions sont comprises entre environ 80° et 125° , avec un pic à 95° . Les failles qui forment cette cloche comprennent des failles majoritairement dextres, mais aussi sénestres. Dans cette analyse, il peut être observé que dans la partie gauche de la cloche (entre environ 80° et 110°) les failles sont principalement dextres alors que dans la partie droite (entre 95° et 125°) elles sont principalement sénestres.
- Γ_3 Les directions de cette famille sont comprises entre 130° et 180° . Sa forme n'est pas celle d'une distribution de gauss et il est difficile d'identifier un pic. Une valeur moyenne pourrait être estimée à 140° . Ces failles sont principalement sénestres).

4.4.2.3 Vérification des résultats

Afin de vérifier la pertinence de ces résultats à l'échelle du secteur d'étude, les intersection avec la surface des familles Γ_1 , Γ_2 et Γ_3 ont été dessinées. Ceci a été effectué avec Coltop3D (Jaboyedoff *et al.*, 2007), en dessinant des plans verticaux ayant la direction de ces familles. Le seul plan qui n'est pas vertical est celui de la faille AR_W_1, dont le pendage est de 50° au SE.

Les intersections de ces plans correspondant à des structures visibles sur l'MNT ont été dessinées dans la figure A.12. Il peut être observé que l'orientation des trois familles Γ_1 , Γ_2 Γ_3 forment quasiment la totalité des structures visibles sur l'image ombrée. La corrélation entre cette carte et celle des linéaments dessinés en 2D (figure A.10) est très forte.

Il peut donc être conclu que non seulement les familles de direction Γ_1 , Γ_2 et Γ_3 représentent les failles cartographiées sur le terrain, mais qu'elles décrivent aussi très bien la géométrie de la fracturation des zones non cartographiées du secteur d'Ardon.

4.4.3 Quantification du déplacement

La complexité tectonique du secteur d'Ardon a empêché l'identification de structures linéaires décalées par des failles. La feuille géologique de Sion (Sartori *et al.*, 2011) fournit une cartographie très détaillée des limites lithologiques. Il est donc possible de quantifier les déplacements réels à partir du décalage des lithologies et des vecteurs de mouvements avec la construction géométrique détaillée dans le chapitre 2.6.1.

Sur la feuille géologique des lithologies décalées peuvent être observées principalement sur les failles de direction WSW-ENE (famille Γ_1) et sur les failles de direction W-E (famille Γ_2). Les seules failles décalées pour lesquelles le vecteur de mouvement a été identifié sur le terrain sont AR_W_1 et AR_W_15, appartenant à Γ_1). La quantification des déplacements a donc été possible uniquement sur ces deux failles.

AR_W_1 Les points topographiques P_1 et P_2 ont été choisis à l'intersection entre la faille et la limite supérieure du Malm de la Nappe des Diablerets. Cette limite correspond aussi au chevauchement entre la nappe des Diablerets et la nappe d'Ardon. Les orientations de la faille F , des couches B et du vecteur de mouvement utilisés correspondent à la moyenne des observations de terrain dans cette localité. Ces paramètres et les résultats de cette analyse ont été résumés dans le tableau 4.2 et dans la figure 4.14.A.

Dans le bloc au N de la faille, la limite Diablerets-Ardon est couverte par la moraine dans la localité de Bolaire et par les alluvions dans la plaine du Rhône. Dans cette étude cette

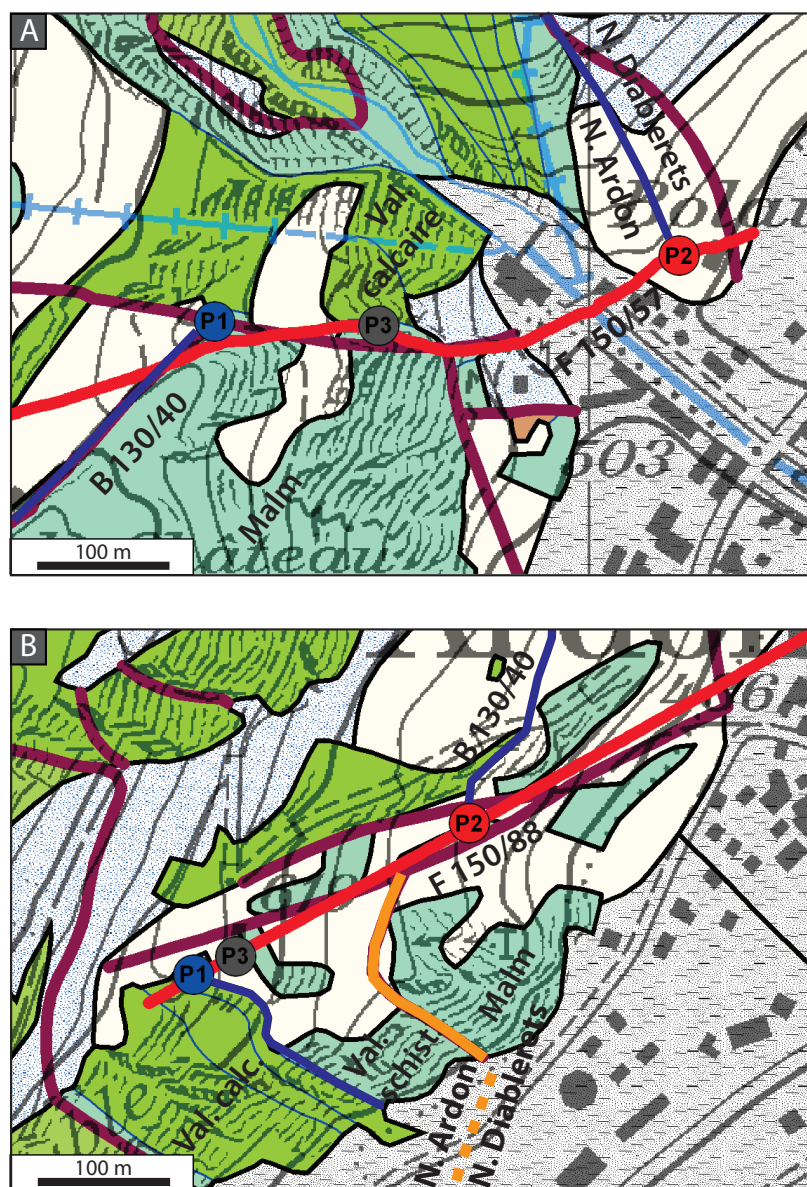


FIGURE 4.14 – Secteur d’Ardon : quantification du déplacement pour les failles décrochantes dextres A) AR_W_1 B) AR_W_14. En rouge la trace du plan moyen F avec la surface topographique. En bleu les limites lithologiques utilisées. Carte géologique tirée de Sartori et Epard (2011)

limite (ligne bleu dans figure 4.14, prolongement de la falaise dans le Valanginien Schisteux qui affleure au NW de P_2) a été interprétée légèrement plus à l’W que dans la feuille de Sion (ligne rouge foncé). Le point P_2 a été donc placé à l’intersection de cette limite avec le prolongement de la faille dessiné avec Coltop3D (ligne rouge).

La rejet vrai $|\vec{d}|$ a été calculé à environ 250 m, l’erreur Δ à environ 25 m. Le non alignement de P_1 et P_2 sur un plan de faille parfait est la cause de cette erreur.

AR_W_14 Les points topographiques P_1 et P_2 ont été choisis à l’interception entre la faille et la limite entre le Valanginien Schisteux et le Valanginien Calcaire (les deux font partie de la nappe d’Ardon). Ces unités ont été préférés à la limite Diablerets-Ardon, car ici ce chevauchement

est en grande partie couvert par la moraine. Sur la feuille de Sion, une division de la faille en deux branches a été cartographiée. Ceci a aussi été observé sur le terrain. Pour l'analyse du déplacement, ces deux branches ont été approximées avec un seul plan de faille, dont l'intersection avec la surface est visible en rouge sur la figure 4.14.B). Les paramètres et les résultats de cette analyse ont été résumés dans le tableau 4.2.

La rejet vrai $|\vec{d}|$ a été calculé à environ 210 *m*, l'erreur Δ à environ 5 *m*.

Les failles du type Γ_1 ont donc décalé les roches d'environ 200–250 *m*. Il s'agit donc de déformations cassantes très importantes. A titre de comparaison, les décrochements cartographiés dans les écaïlles qui forment la zone de Sion-Courmayeur (située près de la ville de Sion, à seulement 6 *km* au NW d'Ardon) ont des déplacements apparents compris entre 100 *m* et 250 *m* (figure 4.14.C). Les décrochements de Sion sont aussi dextres, leur direction est comprise principalement entre 070 et 080, leur pendage a une moyenne de 75 vers le S (Burri, 1958; Sartori et Epard, 2011). Il existe donc une analogie entre ces structures et les failles de type Γ_1 .

Paramètre	AR_W_1	AR_W_14
P_1 [<i>m</i>]	[585715 ; 118345 ; 655]	[585290 ; 117450 ; 630]
P_2 [<i>m</i>]	[586070 ; 118395 ; 510]	[585500 ; 117565 ; 540]
F	150/57	150/88
B	130/40	100/50
α	52 (NE)	44 (NE)
β	20 (NE)	15 (NE)
P_3 [<i>m</i>]	[585840 ; 118342 ; 584]	[585322 ; 117464 ; 596]
$ \vec{d} $ [<i>m</i>]	248	212
Δ [<i>m</i>]	24	4

TABLE 4.2 – Quantification de la longueur du vecteur de mouvement $|d|$ et de l'erreur Δ pour les faille décrochantes dextres AR_W_1 et AR_W_15.

4.4.4 Interprétation

Dans l'introduction (chapitre 1.2, état de la recherche théorique) les principales structures présentes dans une zone de décrochement ont été détaillées. Dans une zone de décrochement dextre (cinématique de la ligne du RS dans la vallée du Rhône) les failles principales (dénommées D) sont aussi dextres. Les failles secondaires développées sont : des failles dextres de type R et des failles sénestres de type R'. L'angle entre les failles secondaires et la faille principale est dénommé β . Dans la littérature les valeurs β des structures R varient d'environ 15 à 30° (voir tableau 1.1). Pour R', les angles varient d'environ 60 à 90°.

Les résultats de l'analyse des orientation des failles, en particulier ceux de l'analyse des directions, suggèrent que les failles décrochantes du secteur d'Ardon correspondent à des failles formées dans une zone de décrochement dextre de direction N60. Ce modèle est représenté dans la figure 4.15 et est discuté ci-dessous.

D Ces décrochements principaux correspondent aux failles de la famille Γ_1 . Toutes les failles de cette famille sont dextres. Ces failles très espacées (seulement deux failles de ce type ont été repérées sur le terrain ; au niveau de la plaine du Rhône leur espacement est d'environ 400 *m*) ont une persistance importante (entre 700 et 2000 *m*) et témoignent d'un décalage réel compris

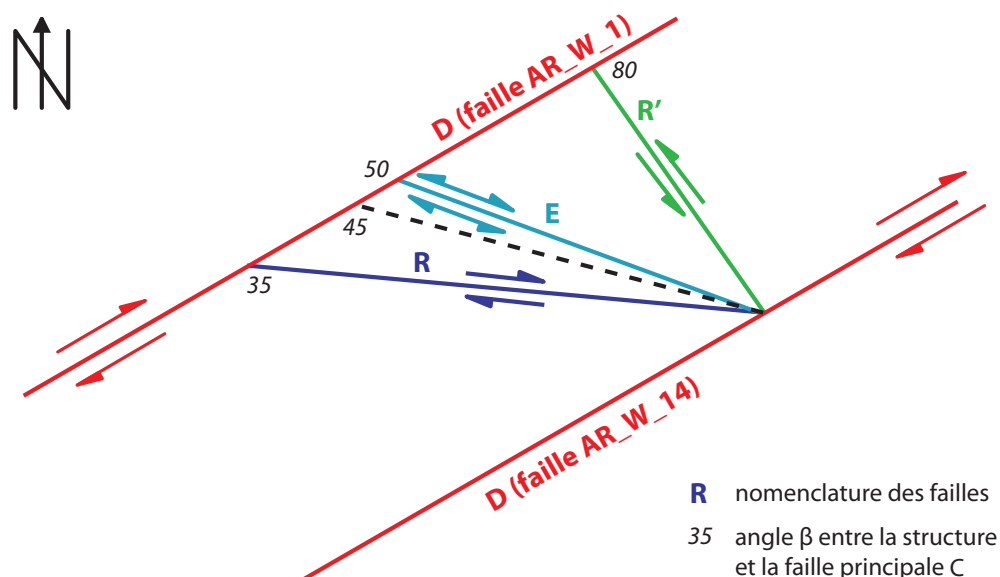


FIGURE 4.15 – Interprétation des failles du secteur d'Ardon en zone de décrochement dextre. La direction des failles dessinées est celle estimée dans l'analyse de directions en 2D.

entre 200 m et 250 m. Elles sont sans doute les structures cassantes principales du secteur d'Ardon. La faille AR_W_1, à pendage 50-60 vers le SE, est la seule faille importante du secteur d'Ardon à n'être pas sub-v verticale. Sa direction, sa cinématique et son décalage sont toutefois cohérents avec un faille de type D. L'origine de cette structure est inconnue. Il n'est pas exclu que cette faille corresponde à une réactivation de discontinuités pré-existantes, comme un chevauchement, une surface axiale d'un pli, une faille liée à la mise en place des nappes ou localement à une faille synsédimentaire. Une étude détaillée des plis et des chevauchements de la zone d'étude serait nécessaire pour répondre à cette question.

- R** Ces décrochements secondaires sont formés par les failles dextres de la famille Γ_2 . Ces structures ont une orientation moyenne de $\beta = 35^\circ$ et ont un espacement réduit : des nombreuses structures parallèles ont été repérées dans l'analyse des linéaments en 2D. Cette valeur de β est supérieure d'au moins 5-15° aux valeurs indiquées dans la littérature.
- R'** Ces décrochements secondaires sont formés par les failles de la famille Γ_3 . Ces structures ont une orientation moyenne de $\beta = 80^\circ$ également supérieure aux valeurs moyennes indiquées dans la littérature. Ces failles sont en très grande partie sénestres. Comme pour les structures R, les R' sont aussi peu espacées (8 ont été cartographiées sur le terrain, mais de nombreuses structures parallèles ont été cartographiées dans le chapitre 4.4.2.3). Dans l'analyse des directions, l'orientation de ces structures est particulièrement variable.
- E** Certaines failles de la famille Γ_2 sont caractérisées par un angle β plus élevé (environ 50°) et par un mouvement décrochant à la fois dextre et sénestre. Deux modèles pourraient expliquer ces failles.
 - Elles ont été formées dans la zone de décrochement comme diaclases d'extension (E). Ces structures se forment à un angle de $\beta = 45^\circ$ (Price et Cosgrove, 1990), ce qui est cohérent avec la direction de ces failles. Le mouvement cisailant dextre et sénestre pourrait être lié soit au changement des contraintes locales suite à la progression de la déformation (Chinnery, 1966), soit à un changement de contraintes.

- Ces failles ont la même orientation que les petites failles à diaclases en-échelon décrites dans le prochain chapitre (4.5). Ces failles pourraient donc être associées à la déformation qui sera expliquée dans le prochain chapitre, éventuellement réactivées par le décrochement.

Dans les structures R et R', une différence existe entre les angles β de cette étude et les angles publiés de la littérature. De plus, les familles de direction de cette étude ont parfois une grande variabilité (en particulier pour les structures R'). Ces phénomènes pourraient être liés à plusieurs facteurs. La rotation des structures suite au mouvement décrochant sur les failles principales et secondaires a été décrite par plusieurs auteurs (Chinnery, 1966; Freund, 1974; Katz *et al.*, 2004), en particulier pour les structures R' . Dans le secteur d'Ardon plusieurs phases de plissement sont visibles sur le terrain (Sartori et Epard, 2011).

4.5 Analyse des diaclases en-échelon

Rhéologie

Les diaclases en-échelon (structures cassantes) sont des fractures à extension qui se forment dans des zones de cisaillement (structures ductiles). Elles sont donc considérées par la plupart des auteurs comme des déformations semi-ductiles (Price et Cosgrove, 1990).

Comme illustré dans le chapitre 4.2.1, dans le secteur d'Ardon, certaines diaclases en-échelon affleurent le long de petites failles cassantes. Ces affleurements témoignent d'un changement du type de déformation dans l'espace et/ou le temps (anisotropie de la déformation). Deux interprétations de ces structures sont possibles :

1. Elles pourraient être expliquées par un changement de température : à une première phase semi-ductile (diaclases en-échelon classiques le long d'une zone de cisaillement), une deuxième phase plus froide aurait suivi (fractures cassantes en-échelon le long d'une faille).
2. Près de la faille AR_W_16 (plateau d'Ardon, affleurement #2.2) les diaclases en-échelon de la phase semi-ductile sont alignées le long des axes des plis. Ces diaclases sont localisées sur des plis de type kink (à charnières pentues). Les kinks sont considérés comme une déformation semi-ductile qui se forme dans des roches fortement anisotropiques (Price et Cosgrove, 1990). Les plans de faille sont souvent normaux aux couches. Ceci suggère qu'il existe un lien entre les plissement des couches (kinks) et les failles à diaclases en-échelon. La vitesse de déformation plus que la température pourrait causer ces changements locaux du type de déformation.

Analyse cinématique et des paléocontraintes

La persistance de la majorité des failles est limitée à quelques mètres. Généralement, il n'a malheureusement pas été possible de trouver des fibres sur ces plans de faille.

La faille AR_E_1, de plusieurs centaines de mètres de longueur, constitue une exception. Elle est la seule faille importante sur laquelle des fractures en-échelon sont visibles. Les fibres de cette faille indiquent un mouvement cohérent avec celui indiqué par la géométrie des diaclases en-échelon (décrochant sénestre). Ceci suggère que les déformations semi-ductiles pourraient être issues de la même déformation qui a formé la faille.

Les orientations des axes principaux des paléocontraintes ont été reconstruites géométriquement. Le pôle des diaclases correspond par définition à σ_3 . Le point d'intersection entre le plan des diaclases (j1) et le plan de faille (f1) correspond à σ_2 . σ_1 est orienté par définition à 90° de σ_2 et de σ_3 . Son orientation correspond donc à l'intersection entre j1 et le plan normal à j1 et à f1.

La figure 4.16 représente la géométrie et la reconstruction des paléocontraintes pour quatre failles à diaclases en-échelon. Le nombre limité d'affleurements est dû au fait que la grande partie des structures en-échelon affleure sur des surfaces érodées : les affleurements qui permettent la mesure à la fois des plans j1 et de f1 sont rares. Dans les quatre cas, les failles sont sub-verticales et de direction NW-SE.

La cinématique indiquée par les quatre affleurements est à chaque fois différente :

- Dans AR_E_1 le mouvement est principalement décrochant sénestre. Une composante verticale est aussi présente (compartiment SW monté).
- Dans AR_W_7 le mouvement est principalement décrochant dextre. Une composante verticale est aussi présente (compartiment SW monté).
- Dans AR_W_8 le mouvement est principalement vertical (compartiment NE monté)
- Dans AR_W_16 le mouvement est principalement vertical (compartiment SW monté)

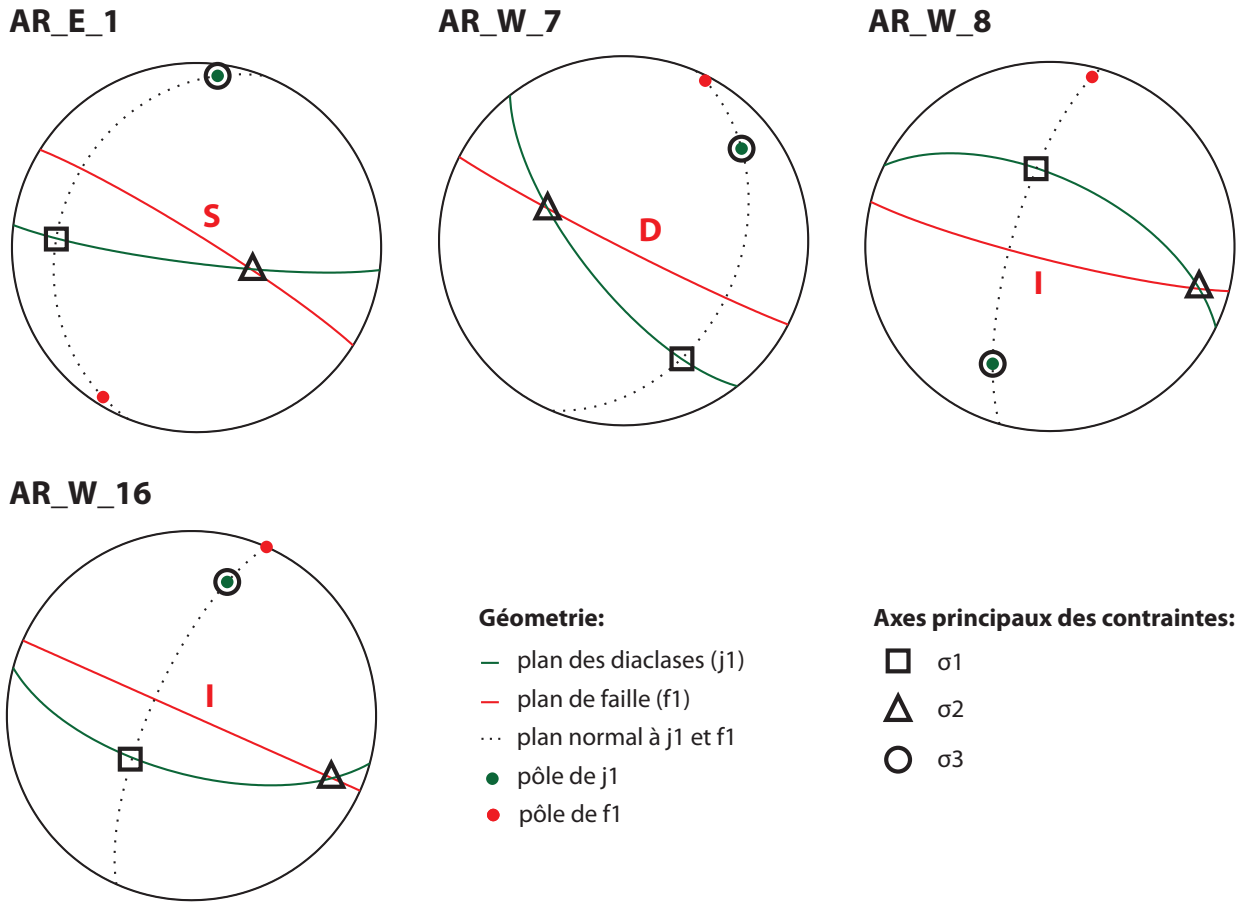


FIGURE 4.16 – Reconstruction des orientation des contraintes à partir de la géométrie des failles à diaclases en-échelon. Projections équiaires de Lambert.

Cette hétérogénéité dans les mouvements est aussi visible dans les axes des paléocontraintes. Les orientations de σ_1 et de σ_2 sont très variables. L'orientation de σ_3 est par contre plus constante : dans les quatre cas cet axe est sub-horizonzal avec azimuth NNW.

La grande variabilité dans le orientations de σ_1 et de σ_2 est en partie liée à la méthode de reconstruction. Contrairement à σ_3 , qui dépend d'une seule mesure (plan j1), σ_1 et σ_2 dépendent de l'intersection de deux mesures (j1 et f1). Leur orientation est donc beaucoup plus sensible aux erreurs de mesure. La cinématique est aussi influencée par ce phénomène car elle dépend aussi de l'intersection de ces deux plans. L'orientation constante de σ_3 est donc un fait et non pas un artefact.

Interprétation

Les observations de terrain, l'analyse cinématique et l'analyse des paléocontraintes suggèrent que la déformation des failles à diaclases en-échelon est moins régulière que celles des grandes failles cassantes. Cette déformation est aussi beaucoup plus compliquée, car le type de déformation change dans l'espace et/out le temps. Les deux hypothèses sur l'origine du type de déformation portent donc à deux interprétations différentes :

1. Dans une étude des diaclases conjuguées en-échelon dans les nappes helvétiques, Dietrich

(1989) a interprété diaclases en-échelon comme l'expression d'une extension NW-SE parallèle aux axes de plis. Dans la même étude l'auteur décrit une transition entre un régime semi-ductile (diaclases en-échelon) et un régime cassant (failles et fractures) très similaire à celle observée dans cette étude. L'auteur a interprété ces structures comme des instabilités cinématiques causées par le changement de la direction du chevauchement qui a eu lieu dans une phase tardive, après la mise en place des nappes. Les failles à diaclases en-échelon du secteur d'Ardon pourraient donc être interprétées comme étant d'une phase de déformation semi-ductile située après la mise en place des nappes et (vue sa nature semi-ductile) avant la déformation cassante liée à l'accident Rhône-Simplon.

2. Si l'origine des failles à diaclases en-échelon est liée à une anisotropie de la déformation causée par un plissement des couches tardif, la situation cette déformation dans le temps est plus difficile. Une datation de la formation des diaclases serait nécessaire pour situer cette déformation par rapport à la déformation cassante liée à l'accident Rhône-Simplon.

4.6 Conclusion

Les structures à nature cassante et semi-ductile du secteur d'Ardon peuvent être interprétées avec deux phases de déformation :

D1 Une première phase de déformation de type semi-ductile à cassant a formé les diaclases en-échelon et les kinks. Ces structures ont une direction comprise entre WNW et NW. L'axe σ_3 est sub-horizontale et de direction NNE. Cette orientation de σ_3 correspond à celle décrite par Dietrich (1989) pour les diaclases en-échelon du domaine helvétique. Elle correspond aussi aux directions d'extension cartographiées par Steck (1990) et par Burkhard (1986) dans cette région et attribuées à la zone de cisaillement ductile du Simplon (figure 1.6).

La pénurie d'affleurements permettant la mesure de l'orientation des diaclases et la complexité de la déformation (transition entre régime semi-ductile et régime cassant) oblige à une certaine prudence dans leur interprétation. De plus une partie de ces diaclases est probablement associée à un plissement tardif des couches. Ces structures seraient donc associées à une déformation d'âge relatif inconnu par rapport aux structures cassantes de la déformation D2. Une étude plus détaillée serait nécessaire afin de distinguer les structures liées à l'anisotropie de la déformation locale des structures liées à une vraie déformation ductile à échelle régionale.

D2 Une deuxième phase de déformation, de type cassante a formé les nombreuses failles décrochantes cartographiées sur le terrain et visibles sur les modèles numériques de terrain.

Ces failles ont été interprétées comme des failles principales (D) et secondaires (R et R') d'une zone de décrochement dextre à direction N60° (figure 4.15). Cette interprétation est basée sur la cinématique des failles, sur leur orientation, sur les décalages concentrés dans les longues failles principales et sur le faible espacement des failles R et R'. Une réactivation des diaclases issues de D1 en failles décrochantes pourrait expliquer les failles décrochantes à cinématique contradictoire de direction comprise entre R et R'.

Le sens de mouvement et la direction de cette zone de décrochement sont cohérents avec le couloir décrochant formé dans la vallée du Rhône par la ligne du Rhône-Simplon. Le mouvement total le long des deux failles principales D a été estimé à environ $250\text{ m} + 200\text{ m} \cong 500\text{ m}$. Le sens de mouvement et la quantité de mouvement des failles C du secteur d'Ardon sont légèrement inférieurs à ceux des décrochements de Sion (figure 1.7).

Les décrochements de Sion ont une direction principale comprise entre N70° et N75° et ont été interprétés comme des structures de type R par Sartori et Epard (2011). Le fait que ces décrochements soient parallèles à la vallée du Rhône et qu'ils soient également caractérisés par des décalages de plusieurs hectomètres suggèrent de les interpréter comme des failles principales. Dans ce cas une rotation antihoraire d'environ 10-15° de la direction de la faille principale serait présente entre Sion et Ardon (figure 5.1). Une étude détaillée des écaillés de Sion mériterait donc aussi d'être menée afin de confirmer cette hypothèse.

Néotectonique

Des indices de réactivation des failles par une tectonique plus récente n'ont pas été observés dans le secteur d'Ardon. Dans le catalogue des événements historiques ECOS-02 un tremblement de terre daté de 1524 et de magnitude $M = 6.4$ est dénommé séisme « d'Ardon » (Sartori et Epard, 2011). Son épicentre serait situé dans la région du Mont Gond, avec une incertitude d'environ 20 km. Ce séisme témoigne donc d'une très forte activité près de la vallée du Rhône, mais ne peut pas être considéré comme une preuve de l'activité des failles du secteur d'Ardon.

Chapitre 5

Conclusions

5.1 Bilan des méthodes utilisées

5.1.1 Analyse des données de mouvement

Cette étude est fortement basée sur les données de mouvement des fibres. Pendant ce travail de Master différentes méthodes d'analyse de données de mouvement ont été approchées et une (l'inversion des données de mouvement) n'a finalement pas été utilisée dans cette étude. Ci-dessous un bilan de ces méthodes est résumé.

Axes cinématiques principaux

La reconstruction des axes cinématiques principaux d'extension et de compression (axes P-T) de Allmendinger (1989) s'est révélé un bon outil pour l'analyse de la cinématique des failles. Même si ces axes n'ont pas une signification physique importante, comme les axes de contrainte ou de déformation, cette méthode a été appréciée premièrement car elle permet une représentation compacte de la cinématique d'une faille et deuxièmement afin de regrouper les failles en familles cinématiques.

Axes principaux des contraintes

La reconstruction des axes principaux des contraintes à l'aide de méthodes géométriques s'est aussi révélé un outil efficace pour mieux étudier la genèse de certaines failles. Cette reconstruction a été faite à l'aide de modèles très simples, tels que la méthode des dièdres droits (Angelier et Mechler, 1977) et la détermination de l'orientation de σ_1 à partir du pôle du plan et de l'angle de frottement interne (Anderson, 1951). La simplicité de ces méthode oblige à une prudence dans leur application mais permet de mieux évaluer la qualité du résultat.

La reconstruction des axes principaux des contraintes a été effectué uniquement pour des failles considérées représentatives pour la tectonique d'une région. Dans le cas des failles secondaires d'Ardon cette méthode n'a pas été utilisée car ces failles ne sont pas de type andersonien et car leur cinématique ne représente pas forcément la tectonique régionale.

Inversion des données de mouvement

Le calcul de la direction de mouvement d'une faille soumise à un champ de contraintes est appelée *problème direct* et est décrit par une équation linéaire. Le calcul des axes principaux des contraintes à partir des données de mouvements est appelé *inversion des données de mouvement*. Il s'agit

d'une méthode itérative : plusieurs champs de contraintes sont essayés, la direction de mouvement est calculée (problème direct), les contraintes qui génèrent un mouvement proche du mouvement observé sont choisies.

Un grand avantage de cette méthode est qu'elle permet la reconstruction des axes principaux de contraintes pour des failles *pré-existantes* : elle est donc souvent utilisée dans les études de failles néotectoniques. De plus cette méthode permet aussi le calcul de la forme de l'ellipsoïde des contraintes. Dans les années '80 et '90 différentes variations de cette méthode ont été développées (Michael, 1984; Gephart, 1990; Angelier, 1990). En général cette méthode est utilisée pour des études systématiques (un grand nombre de fibres pour chaque faille et un grand nombre de failles) et à large échelle (voir Champagnac *et al.* 2004). Dans ce travail de Master cette méthode n'a finalement pas été utilisée pour deux raisons :

1. A différence des axes PT, cette méthode est sensible à de nombreux paramètres et fait plus d'hypothèses (Gapais *et al.*, 2000). De plus les différents algorithmes publiés dans la littérature se sont révélés peu robustes (résultats différents avec les mêmes données).
2. Les failles étudiées présentaient rarement des signes de réactivation. Cette méthode aurait donc introduit une complexité qui n'était pas nécessaire.

5.1.2 Modèles numériques de terrain

Dans cette étude les modèles numériques de terrain à haute résolution (MNT) ont été utiles à plusieurs niveaux.

- Premièrement ils ont été indispensables à la planification du travail. Les secteurs d'étude ont aussi été en partie repérés et choisis grâce aux structures visibles sur les MNT. Les visites sur le terrain ont en suite pu être ciblées sur des endroits sensés correspondre à des structures cassantes.
- L'analyse numérique systématique des MNT à l'aide du logiciel Coltop3D (Jaboyedoff *et al.*, 2007) n'a pas donné de bons résultats : l'interprétation des structures cassantes nécessite souvent plus de paramètres que la seule orientation. De plus le calcul de l'orientation des structures dans des zones à collines coupées par des petites falaises tel que le secteur d'Ardon est imprécis.
- Les MNT se sont révélés par contre un outil très efficace pour étudier la direction de structures ponctuelles. C'est le cas par exemple de la faille AR_W_1, dont la trace court sur plusieurs kilomètres et coupe une haute falaise autrement inaccessible.
- Les MNT ont aussi été très utiles pour la vérification de la fracturation à l'échelle du secteur d'étude, en particulier dans le cas du secteur d'Ardon.

5.2 Conclusion géologique

Les résultats de cette étude permettent de tirer les conclusions géologiques suivantes :

Ardon

- Dans la vallée du Rhône, la ligne du Rhône-Simplon (RS) est présente sous forme de zone de faille décrochante. Dans le versant au N du village d'Ardon cette zone de faille est formée par deux failles décrochantes dextres parallèles à la vallée du Rhône. Des failles secondaires de Riedel (structures R et R') sont présentes entre ces deux failles principales.
- Le décalage total des deux failles principales d'Ardon (500 m) est largement inférieur au décalages pluri-kilométriques des failles de Sion (décalage apparent de 3 km cartographié par Burri (1958), voir figure 1.7) et à Saillon (décalage apparent d'environ 6 km selon l'interprétation de Badoux

(1972), voir figure 1.8). La zone décrochante d'Ardon pourrait donc être interprétée comme une zone plus externe du couloir de faille, dont le centre doit courir plus au S.

- Il est généralement accepté que les structures de type Riedel sont des structures secondaires qui caractérisent une zone de décrochement sur toute sa longueur (McKinstry, 1953; Freund, 1974). Dans le secteur d'Ardon des structures associées à la terminaison d'une failles (bifurcation ou rotation, Chinnery, 1966; Freund, 1974) n'ont pas été trouvées. Le secteur d'Ardon serait donc assez éloigné de la terminaison de la faille du RS.

Martigny

- Dans le massif de l'Arpille (une sous-unité des Aiguilles-Rouges) d'importantes failles inverses témoignent d'un soulèvement de nature cassante. Cette cinématique a été confirmée par des micro-structures de nature semi-ductile à cassante observées en lame mince (plans de cisaillement, clivage schisteux, fractures d'extension).
- Ces structures ont été associées au soulèvement rapide ($> 1 \text{ mm/a}$) et tardif (8 Ma - présent) qui a affecté le massif des Aiguilles-Rouges et le massif du Mont-Blanc (Leloup *et al.*, 2005; Glotzbach *et al.*, 2008, 2010; Valla *et al.*, 2012).
- Aucune structure de bifurcation n'a été observée. Les failles affleurent sur des plans parallèles de surface d'environ 1.5 hm^2 (hectares). Sur le MNT ces plans peuvent être suivis dans le versant pour des kilomètres.
- Aucune structure liée à la ligne du RS (décrochements ou décro-chevauchements) n'a été observée : les structures cassantes du massif de l'Arpille ont été associées à la mise en place des nappes, au soulèvement tardif et aux mouvements gravitaires tardifs.
- Ces observations suggèrent que la ligne du RS ne passe pas proche du massif de l'Arpille. La ligne devrait probablement être recherchée plus au NW (dans le massif de Fully) ou probablement plus au SE, dans le massif du Mont-Blanc.

Échelle régionale

Si les décrochements de Sion sont interprétés comme des décrochements principaux, la direction du couloir de décrochement du RS tourne d'environ 10° entre Sion (N70) et Ardon (N60, figure 5.1). Dans le versant gauche de la vallée du Rhône une rotation similaire des failles est observable (N70 en face de Sion et N50 plus au SW). Cette rotation du couloir de faille serait cohérente avec l'hypothèse de la suite de la ligne du RS dans le massif du Mt. Blanc inférieur (Egli et Mancktelow, 2012). Cette rotation pourrait avoir été facilitée par l'orientation du chevauchement des unités helvétiques dans la zone du massif du Mont-Blanc externe près de la vallée du Rhône (la direction du chevauchement de la nappe des Diablerets est d'environ N40).

Malgré que les cartes géologiques de cette région soient très détaillées il reste très difficile d'estimer si un décalage existe entre le flanc droit et le flanc gauche de la vallée du Rhône. Cette vallée coupe obliquement les structures ce qui rend les projections très délicates. De plus la géométrie de cette zone est complexe. Elle comprend le chevauchement (pas planaire) des nappes et la variation des plongements axiaux. Les projections des chevauchements dessinées dans la figure 5.1 ont été effectuées en utilisant les orientations détaillées dans les cartes géologiques et les directions de la coupe tectonique horizontale à 2000 m d'altitude de Steck *et al.* (2001). Un décalage des unités penniques et des nappes helvétiques est probablement présent, mais il reste difficile à quantifier avec précision.

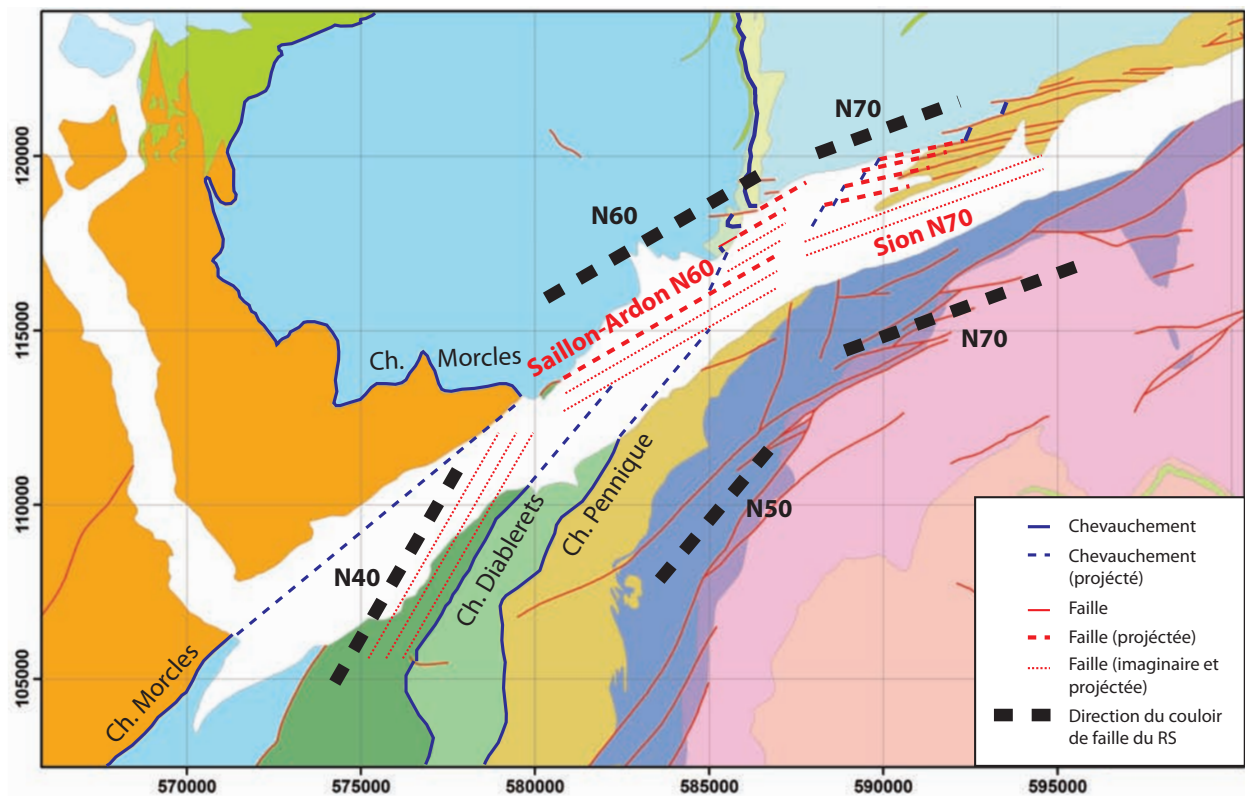


FIGURE 5.1 – Illustration de l'hypothèse de la rotation du couloir de faille du Rhône-Simplon. Légende des unités tectoniques : voir figure 1.2. Modifié d'après Steck *et al.* (1999).

5.3 Perspectives

Terrain

Dans le secteur de Martigny une étude détaillée des microstructures serait nécessaire afin de comprendre l'origine et la répartition des structures semi-ductiles à cinématique inverse. Dans le même secteur, au nord de la gorge du Trient des failles cassantes à direction N-S coupent la falaise située au NW du village de Vernayaz. Leur étude pourrait contribuer à valider l'hypothèse de la fracturation du massif des Aiguilles-Rouges pendant la mise en place des nappes.

Dans la région d'Ardon une cartographie géologique détaillée serait nécessaire afin de mieux comprendre la position des nappes et des unités lithologiques dans la partie W du secteur d'étude. Ceci ainsi que des coupes (en particulier dans la grande falaise à la limite SW du secteur) pourraient aider à mieux comprendre le décalage des failles. Cette étude pourrait être facilitée par la télédétection laser (« Light Detection And Rangin ») de la grande falaise.

Une étude détaillée du plissement de ces roches serait utile afin de mieux interpréter l'anisotropie de la déformation semi-ductile.

Les lapiez situés au sud du Wildhorn présentent une forte fracturation à pendage sub-vertical, mais la forte érosion rend les mesures structurales difficiles. Dans les orthophotos de swisstopo leurs linéaments sont extrêmement bien visibles. Une analyse de leur direction à l'aide de ces documents pourrait aider à déterminer l'influence de la faille du RS dans cette région.

Finalement une étude des structures dans le massif du Mont-Blanc et dans les nappes penniques

au S de la vallée du Rhône serait nécessaire pour déterminer la continuation de la faille du RS.

Analyses

Des informations sur l'âge et les conditions de pression et température seraient de grande utilité dans l'interprétation des diaclases en-échelon de calcite présentes dans le secteur d'Ardon. Dans Ustaszewski (2007), la température de la formation des veines de calcite a été estimée avec la méthode des macles de calcite. Dans le même travail la datation des veines a été datée à l'aide de la méthode du déséquilibre de l'Uranium et du Thorium. Dans le secteur de Martigny, la datation des structures semi-ductiles ou des structures cassantes à cinématique inverse pourrait apporter une importante contribution à leur interprétation.

Le lien entre l'activité sismique et les failles néotectoniques dans les unités helvétiques pourrait être étudié avec la méthode du « Seismo Lineament Analysis Method » (SLAM). Cette méthode consiste dans la projection à la surface des failles identifiées à l'aide des données sismiques et pourrait donc être intégrée dans une analyse de linéaments en Coltop3D.

Bibliographie

- AKI, K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo*, 44:73–88.
- ALLMENDINGER, R., CARDOZO, N. et FISHER, D. (2011). *Structural geology algorithms*. Cambridge University Press.
- ALLMENDINGER, W. (1989). Notes on fault slip analysis. Geological society of America short course on "quantitative interpretation of joints and faults". Departement of geological sciences, Cornell university, Ithaca, USA.
- ALLMENDINGER, W. (1990). Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 12(8):973 – 986.
- ANDERSON, E. M. (1951). *The dynamics of faulting*. Oliver and Boyd.
- ANGELIER, J. (1990). Tectonique cassante et néotectonique. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 112(2):283–207.
- ANGELIER, J. et MECHLER, P. (1977). Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie : la methode des dièdres droits. *Bulletin Société Géologique France*, 8(19):1209–1318.
- AYRTON, S. (1980). La géologie de la zone Martigny-Chamonix (versant Suisse) et l'origine de la nappe de Morcles (un exemple de subduction continentale). *Eclogae Geol. Helv.*, 73(1):137–172.
- BADOUX, H. (1971). Feuille 1305 Dt de Morcles. Atlas géologique Suisse 1 :25'000, Carte 58.
- BADOUX, H. (1972). Tectonique de la nappe de Morcles entre Rhône et Lizerne. *Matériaux pour la Carte Géologique de la Suisse*.
- BADOUX, H. et MERCANTON, C.-H. (1962). Essai sur l'évolution tectonique des Préalpes médianes du Chablais. *Eclogae Geol. Helv.*, 55(1):135–177.
- BAHAT, D. (1980). Secondary faulting, a consequence of a single continuous bifurcation process. 117:373–380.
- BESSON, O., ROUILLER, W. F., FREI, W. et MASSON, H. (1991). Campagne de sismique-réflexion dans la vallée du Rhône (entre Sion et Martigny, Suisse). *Bull. Murlthienne*, (109):45–63.
- BINGHAM, C. (1974). An antipodally symmetric distribution on the sphere. *The Annals of Statistics*, 2(6):1201–1225.

- BLANC, P. (1976). *Géologie du massif de l'Arpille*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne.
- BURG, J.-P. (2012). Paleo-stress analysis from fault data. ETH Zürich.
- BURKHARD, M. (1986). *L'helvétique de la bordure occidentale du Massif de l'Aar*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel.
- BURRI, M. (1958). La zone de Sion-Courmayeur au Nord du Rhône. *Matériaux pour la Carte Géologique de la Suisse*.
- CALAIS, E., NOCQUET, J.-M., JOUANNE, F. et M., T. (2002). Current strain regime in the western Alps from continuous GPS measurements. *Geology*, 30(7):651–654.
- CHAMPAGNAC, J.-D., SUE, C., DELACOU, B. et BURKHARD, M. (2004). Brittle deformation in the inner NW Alps : from early orogen-parallel extrusion to late orogen-perpendicular collapse. *Terra Nova*, 16(4):232–242.
- CHINNERY, M. A. (1966). Secondary faulting : II. geological aspects. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 3(2):175–190.
- CRONIN, V. (2010). A primer on focal mechanism solutions for geologists. Baylor university.
- DEICHMANN, N., BAER, M., BRAUNMILLER, J., BALLARIN DOLFIN, D., BAY, F., DELOUIS, B., FAEH, D., BERNARDI, F., GIARDINI, D., KRADOLFER, U., HUBER, S., GERSTENBERGER, M., MARAINI, S. et OPRISAL, R. (2002). Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2001. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 95:249–261.
- DELACOU, B., DEICHMANN, N., SUE, C., THOUVENOT, F., CHAMPAGNAC, J.-D. et BURKHARD, M. (2005). Active strike-slip faulting in the Chablais area (NW Alps) from earthquake focal mechanisms and relative locations. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 98(2):189 – 199.
- DIETRICH, D. (1989). Fold-axis parallel extension in an arcuate fold- and thrust belt : the case of the Helvetic nappes. *Tectonophysics*, 170(3–4):183 – 212.
- EGLI, D. et MANCKTELOW, N. (2010). New structural field data on the timing and kinematics of deformation and exhumation of the Mont Blanc massif. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 12. EGU General Assembly 2010.
- EGLI, D. et MANCKTELOW, N. (2012). Neogene tectonic evolution of the Mont Blanc area. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 14. EGU General Assembly 2012.
- EPARD, J.-L. (1986). Le contact entre le socle du Mont-Blanc et la zone de Chamonix : implications tectoniques. *Bull. Soc. vaud. Sci. nat.*, 78:225–245.
- ESCHER, A. et BEAUMONT, C. (1997). Formation, burial and exhumation of basement nappes at crustal scale : a geometric model based on the western swiss-italian Alps. *Journal of Structural Geology*, 19(7):955 – 974.
- EVANS, J. P. (1990). Thickness-displacement relationships for fault zones. *Journal of Structural Geology*, 12(8):1061 – 1065.
- FISHER, R. (1953). Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 217(1130):295–305.

- FREUND, R. (1974). Kinematics of transform and transcurrent faults. *Tectonophysics*, 21(1–2):93 – 134.
- GAPAIS, D., COBBOLD, P. R., BOURGEOIS, O., ROUBY, D. et de URREIZTIETA, M. (2000). Tectonic significance of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 22:881–888.
- GASSER, D. et MANCKTELOW, N. S. (2010). Brittle faulting in the Rawil depression : field observations from the Rezli fault zones, Helvetic nappes, Western Switzerland. *Swiss Journal of Geosciences*, 103(1):15–32.
- GEPHART, J. W. (1990). Stress and the direction of slip on fault planes. *Tectonics*, 9(4):845–858.
- GLOTZBACH, C., REINECKER, J., DANISIK, M., RAHN, M., FRISCH, W. et SPIEGEL, C. (2008). Neogene exhumation history of the Mont Blanc massif, western Alps. *Tectonics*, 27(4):TC4011.
- GLOTZBACH, C., van der BEEK, P. et SPIEGEL, C. (2010). Episodic exhumation and relief growth in the Mont Blanc massif, western Alps from numerical modelling of thermochronology data. *Earth and Planetary Science Letters*, 304:417–430.
- HUBBARD, M. et MANCKTELOW, N. S. (1992). Lateral displacement during Neogene convergence in the western and central Alps. *Geology*, 20(10):943–946.
- HULL, J. (1988). Thickness-displacement relationships for deformation zones. *Journal of Structural Geology*, 10(4):431 – 435.
- JABOYEDOFF, M., BAILLIFARD, F. et DERRON, M. (2003). Preliminary note on uplift rates gradient, seismic activity and possible implications for brittle tectonics and rockslide prone areas : the example of western Switzerland. *Bull. Sot. vaud. Sci. nat.*, 88(3):401–420.
- JABOYEDOFF, M., METZGER, R., OPPIKOFE, T., COUTURE, R., DERRON, M.-H., LOCAT, J. et TURMEL, D. (2007). New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points : COLTOP-3D software. In TAYLOR et FRANCIS, éditeurs : *Rock mechanics : meeting society's challenges and demands. Proceedings of the 1st Canada - U.S. rock mechanics symposium, Vancouver, Canada*, volume 1, pages 61–68.
- KAHLE, H., GEIGER, A. et BÜRKI, B. e. a. (1997). Recent crustal movements, geoid and density distribution. contribution from integrated satellite and terrestrial measurements. In et AL., P., éditeur : *Results of the National Research Program 20 (NRP 20)*. Birkhäuser, Basel.
- KASTRUP, U., ZOBACH, M. L., DEICHMANN, N., EVANS, K. F., GIARDINI, D. et MICHAEL, A. J. (2004). Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journal of Geophysical Research*, 109(B1).
- KATZ, Y., WEINBERGER, R. et AYDIN, A. (2004). Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, 26(3):491 – 501.
- KELLER, L. M., FÜGENSCHUH, B., HESS, M., SCHNEIDER, B. et SCHMID, S. M. (2006). Simplon fault zone in the western and central Alps : mechanism of Neogene faulting and folding revisited. *Geology*, 34(4):317–320.
- LELOUP, P. H., ARNAUD, N., SOBEL, E. R. et LACASSIN, R. (2005). Alpine thermal and structural evolution of the highest external crystalline massif : the Mont Blanc. *Tectonics*, 24(4):TC4002.

- MANCKTELOW, N. S. (1985). The Simplon Line : a major displacement zone in the Western Lepontine Alps. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 78(1):73–96.
- MAURER, H. R., BURKHARD, M., DEICHMANN, N. et GREEN, A. G. (1997). Active tectonism in the central Alps : contrasting stress regimes north and south of the Rhone Valley. *Terra Nova*, 9(2):91–94.
- McKINSTRY, H. E. (1953). Shears of the second order. *American Journal of Science*, 251(6):401–414.
- MICHAEL (1984). Determination of stress from slip data : faults and folds. *Journal of geophysical research*, 89(B13):11517–11526.
- MOSAR, J. et BOREL, G. (1992). Paleostress from the Préalpes Médiannes (Switzerland). *Annales Tectonicae*, 6(2):115–133.
- PLANCHEREL, R. (1976). Essai d'interprétation de la dislocation transversale Bellegarde-Lac Noir (Préalpes médianes fribourgeoises). *Eclogae Geol. Helv.*, 69(2):461–469.
- PRICE, N. et COSGROVE, J. (1990). *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press.
- RAMSAY, J. G., CASEY, M. et KLIGFIELD, R. (1983). Role of shear in development of the Helvetic fold-thrust belt of Switzerland. *Geology*, 11(8):439–442.
- RAYMOND, D., DEFFONTAINES, B., FEHRI, A., DORIOZ, J. et RUDANT, J. (1996). Néotectonique de la région sud-lémanique (Hautesavoie, France) : approche multisources (imagerie optique et hyperfréquences, analyse morphostructurale). *Eclogae Geol. Helv.*, 89(3):949–973.
- RIEDEL, W. (1929). Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paleontologie*, B:354–368.
- SARTORI, M. (2008). Une carte des décrochements dans la vallée du Rhône. *Schweizer Tektonischer Treffen, Zürich, Lecture Abstracts*.
- SARTORI, M., BURRI, M., EPARD, J.-L., MASSON, H. et PASQUIER, J.-B. (2011). Feuille 1306 Sion. Atlas géologique Suisse 1 :25'000, Carte 130.
- SARTORI, M. et EPARD, J.-L. (2011). *Notice explicative 130 de la feuille 1306 Sion*. Atlas géologique Suisse 1 :25'000. Office fédéral des eaux et de la géologie.
- SHIPTON, Z., SODEN, A., KIRKPATRICK, J., BRIGHT, A. et LUNN, R. (2006). How thick is a fault ? Fault displacement-thickness scaling revisited. In ABERCROMBIE, R., éditeur : *Earthquakes : Radiated Energy and the Physics of Faulting*, volume 170 de *Geophysical Monograph Series*, pages 193–198. AGU.
- SOOM, M. (1990). *Abkühlungs-und Hebungsgeschichte der Externmassive und der penninischen Decken beidseits der Simplon-Rhone-Linie seit dem Oligozän : Spaltspurdaterungen an Apatit/Zirkon und K-Ar-Datierungen an Biotit/Muskowit (Westliche Zentralalpen)*. Thèse de doctorat, Universität Bern.
- STECK, A. (1984). Structures de déformations tertiaires dans les Alpes centrales. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 77(1):55–100.

- STECK, A. (1990). Une carte des zones de cisaillement ductile des Alpes Centrales. *Eclogae geologicae Helvetiae*, 83:603–627.
- STECK, A. (2008). Tectonics of the Simplon massif and Lepontine gneiss dome : deformation structures due to collision between the underthrusting European plate and the Adriatic indenter. *Swiss Journal of Geosciences*, 101:515–546.
- STECK, A., BIGIOGGERO, B., DAL PIAZ, G. V., ESCHER, A., MARTINOTTI, G. et MASSON, H. (1999). Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentale et des régions avoisinantes 1 :100'000. Service hydrologique et géologique national. Carte géologique spéciale nr. 123.
- STECK, A., EPARD, J.-L., ESCHER, A., GOUFFON, Y. et MASSON, H. (2001). *Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentale et de régions avoisinantes, notice explicative*. Office fédéral des eaux et de la géologie.
- SUBLET, P. (1962). *Etude géologique du synclinal carbonifère de Collonges-Dorénaz (Valais)*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne.
- SWISSTOPO (2008). Carte nationale de la Suisse 1 :500'000. Office fédéral de topographie Swisstopo.
- TCHALENKO, J. (1968). The evolution of kink-bands and the development of compression textures in sheared clays. *Tectonophysics*, 6(2):159 – 174.
- USTASZEWSKI, M. (2007). *Active tectonics in the central and western Swiss Alps*. Thèse de doctorat, Universität Bern.
- USTASZEWSKI, M., HERWEGH, M., MCCLYMONT, A. F., PFIFFNER, O. A., PICKERING, R. et PREUSSER, F. (2007). Unravelling the evolution of an Alpine to post-glacially active fault in the Swiss Alps. *Journal of Structural Geology*, 29(12):1943 – 1959.
- VALLA, P., van der BEEK, P. A., SHUSTER, D. L., BRAUN, J., HERMAN, F., TASSAN-GOT, L. et GAUTHERON, C. (2012). Late Neogene exhumation and relief development of the Aar and Aiguilles Rouges massifs (Swiss Alps) from low-temperature thermochronology modeling and $4\text{He}/3\text{He}$ thermochronometry. *Journal of geophysical research*, 117:F01004.
- WYLLIE, D. C. et MAH, C. W. (2004). *Rock slope engineering*. Spon press, New York, forth edition édition.
- ZALOHAR, J. et VRABEC, M. (2007). Paleostress analysis of heterogeneous fault-slip data : The gauss method. *Journal of Structural Geology*, 29(11):1798 – 1810.

Table des figures

1.1	Situation topographique des secteurs d'étude d'Ardon et de Martigny. Carte Nationale 1 :500'000 (Swisstopo, 2008).	10
1.2	Unités tectoniques et situation des secteurs d'étude d'Ardon et de Martigny. Tirée de la carte tectonique des Alpes occidentales 1 :100'000 (Steck <i>et al.</i> , 1999).	11
1.3	Failles secondaires (R, R' et P) développées dans une zone de cisaillement sénestre (D). Tiré de Tchalenko (1968)	12
1.4	Plans à contraintes cisailantes maximales dans la partie finale d'une faille décrochante dextre. Tiré de Chinnery (1966)	14
1.5	Terminaison SW de la faille décrochante dextre « Hope » dans les Alpes de Nouvelle-Zélande. Le déplacement de la faille est accommodé par la bifurcation et par la flexion. Tiré de Freund (1974)	15
1.6	Zone de cisaillement du Simplon et faille du Rhône-Simplon. Tiré de Steck (1990)	16
1.7	Failles décrochantes dextres en-échelon dans les collines de Sion. Carte tectonique 1 :100'000 tirée de Steck <i>et al.</i> (1999)	17
1.8	Hypothèses de Badoux (1972) sur l'origine de la série de Saillon. Carte tectonique 1 :100'000 tirée de Steck <i>et al.</i> (1999), coupe tirée de Steck <i>et al.</i> (2001)	18
1.9	Épicentres des séismes pendant la période 1983-91. Les diagrammes beachball représentent la cinématique (projections équiales de Lambert). Les plans de failles sont indiqués avec une flèche. Tiré de Maurer <i>et al.</i> (1997)	20
2.1	Détermination du vecteur de mouvement d'une faille à partir de : A) Fibres. B) Stries de friction. (Tiré de Allmendinger, 1989)	24
2.2	Caractérisation du vecteur de mouvement : convention pour l'angle rake (tiré de Allmendinger, 1989).	25
2.3	Assemblage des MNT dans un fichier unique pour la zone occidentale de la vallée du Rhône. A) Fichiers originaux à haute résolution. B) Sélection des zones (bleu clair et violet) proches de la frontière Vaud-Valais (ligne bleue). Ces zones contiennent des données de qualités différentes (voire explication dans le texte). C) Remplacement des données d'altitudes ≥ 2000 m. Exemple de la feuille de la carte nationale Dent de Morcle. D) Fichier final	29

2.4	Génération d'une image HSL par le logiciel Coltop3D (Jaboyedoff <i>et al.</i> , 2007). A) Calcul du pôle à partir de l'altitude des 4 points voisins (z_1 - z_4). B) Calcul de la couleur avec le modèle colorimétrique HS. C) Le modèle colorimétrique HSL superposée à une projection stéréographique. Exemples d'analyses 3D des linéaments avec le logiciel Coltop3D : D) Calcule du meilleur plan passant par les points et visualisation de l'intersection de ce plan avec la surface topographique. E) Visualisation de l'intersection avec la surface topographique de plans ayant une orientation spécifique (dans l'exemple 196/84).	30
2.5	Reconstruction du mécanisme focal d'un tremblement de terre à partir de la première oscillation enregistrée par un réseau de sismographes (A-N). Tiré de Cronin, 2010. . .	32
2.6	Rélations entre pôle du plan de faille (π), vecteur de mouvement (d), axes cinématiques (T, P, N) et axes des contraintes (σ_1 , σ_2 , σ_3). A) Vision en 3D. B) Projection stéréographique. Modifié d'après Burg (2012)	33
2.7	Analyse cinématique des fibres de la faille décrochante dextre AR.W.1. A) Reconstructions des axes P-T pour chaque fibre avec la méthode de Allmendinger (1990). B) Calcul des axes moyens avec la statistique de Bingham (1974) et reconstruction du diagramme beachball.	34
2.8	35
2.9	Reconstruction de la quantité de mouvement $ P_2P_3 $ à partir d'une structure planaire B décalée par une faille F. La droite b représente la direction de mouvement.	37
2.10	Relations entre épaisseur et déplacement pour des failles cassantes dans des roches quartz-feldspathiques. A) Tiré de Evans (1990). B) Tiré de Shipton <i>et al.</i> (2006). . .	40
3.1	Panorama du secteur sud du Massif de l'Arpille. Les grandes structures cassantes (la faille MA.S.1 et des fractures parallèles f) et la schistosité principale (s1) sont visibles de loin.	43
3.2	Orientation des structures près des failles : A) MA.S.1 ; B) MA.S.2. Projections équiaires de Lambert.	44
3.3	Affleurement de la faille MA.S.3 en localité Sur le Mont (affleurement #11.1). A) Fracturation à environ 10 m de la faille. B) Miroir de faille.	45
3.4	Orientation des structures près des failles : A) MA.S.3 ; B) MA.S.4, MA.S.5, MA.S.6 et MA.S.7. Projections équiaires de Lambert.	46
3.5	Panorama de la colline de Sinlio. Des structures cassantes sub-verticales, dont les failles MA.N.2, MA.N.3 et MA.N.6 sont mises en évidence en rouge.	47
3.6	Vue depuis le pont de Gueroz sur le flanc droite de la gorge du Trient. Le coud formé par la gorge donne l'illusion que la schistosité principale (s1) soit plissée. La falaise est coupée par plusieurs failles sub-verticales (f).	48
3.7	Lames minces orientées et en lumière naturelle des roches près de la faille MA.S.1 . .	50
3.8	Orientation des structures identifiées avec : A) Analyse 3D des linéaments ; B) Analyse morphologique 3D.	53
3.9	Estimation du déplacement de la faille MA.S.1 à partir de son épaisseur total (« fault core » FC et « damage zone » DZ). A) Faible épaisseur de faille. B) Épaisseur maximal de environ 0.5 m. C) Relation empirique de Hull (1988).	54
3.10	Analyse cinématique des failles et classification en familles de failles d'orientation et mouvement similaires.	56
3.11	MA.N - Calcul de l'orientation des contraintes sur les failles décrochantes conjuguées f1 et f3	57

3.12	MA_S - Calcul de l'orientation des contraintes sur les failles inverses (f7)	58
3.13	Phases de déformations cassantes dans le Massif de l'Arpille. D1 : formation des failles conjuguées décrochantes pendant la mise en place des nappes. D2 : formation de failles à extension verticale dans une phase tardive du soulèvement de la chaîne. D3 : réactivation gravitaire locale des failles en failles normales et inverses.	59
4.1	A) Panorama du plateau d'Isières. La faille décrochante dextre AR_W_1 est mise en évidence. B) Vue sur les failles AR_W_2 et AR_W_1 depuis le village d'Ardon. C) Détail de la faille AR_W_1 dans le Valanginien Schisteux (#14.1). Près de la faille une schistosité s1 parallèle au plan de faille est développée.	64
4.2	Orientation de structures près des failles : A) AR_W_1 ; B) AR_W_14 et AR_W_15. Projections équiaires de Lambert.	65
4.3	Panorama du plateau de Beuble : le décrochement dextre AR_W_14 et sa deuxième branche AR_W_15. En arrière d'autres structures parallèles sont visibles.	65
4.4	Détail de la faille E-W AR_W_3. Sur le même miroir de faille des fibres de calcite sénestres (en rouge) et dextres (en vert) sont visibles. Des fibres courbes de sens de mouvement inconnu sont présentes en haut de la figure.	66
4.5	A) Orientations des fibres de la faille AR_W_3 ; B) Orientations des structures près de la faille AR_E_1. Projections équiaires de Lambert.	67
4.6	Faille AR_E_1 avec fibres indiquant un décrochement sénestre (en rouge) et des fractures en-échelon indiquant aussi un décrochement sénestre (en vert).	67
4.7	Exemple de transition entre un régime semi-ductile (diaclasses à grande extension j0) et un régime cassant (faille AR_W_7 et diaclasses à faible extension j1).	68
4.8	Panorama de la grande falaise NW-SE qui délimite la partie occidentale du secteur d'Ardon près du Sex de Gru. Des structures cassantes <i>j</i> à direction E-W recoupent les couches b1.	69
4.9	Orientations près des failles : A) AR_W_13 ; B) AR_W_11 et AR_W_12. Projections équiaires de Lambert.	70
4.10	Panorama de la grande falaise NW-SE qui délimite la partie occidentale du secteur d'Ardon près du Col de la Routia.	70
4.11	Analyse cinématique des failles et classification en familles cinématiques.	76
4.12	Analyse des orientations des plans de faille : A) Classification en familles ayant la même orientation (Ω). B) Mouvement. Projections équiaires de Lambert.	78
4.13	Histogrammes (nombre vs direction) des failles selon la famille d'orientation Ω et la direction (Dextre D, Sénestre S). A) Valeurs moyennes des failles. B) Toutes les valeurs. Classification des données en familles de direction similaire.	80
4.14	Secteur d'Ardon : quantification du déplacement pour les failles décrochantes dextres A) AR_W_1 B) AR_W_14. En rouge la trace du plan moyen F avec la surface topographique. En bleu les limites lithologiques utilisées. Carte géologique tirée de Sartori et Epard (2011)	82
4.15	Interprétation des failles du secteur d'Ardon en zone de décrochement dextre. La direction des failles dessinées est celle estimée dans l'analyse de directions en 2D. . .	84
4.16	Reconstruction des orientation des contraintes à partir de la géométrie des failles à diaclasses en-échelon. Projections équiaires de Lambert.	87
5.1	Illustration de l'hypothèse de la rotation du couloir de faille du Rhône-Simplon. Légende des unités tectoniques : voir figure 1.2. Modifié d'après Steck <i>et al.</i> (1999). .	93

A.1	Martigny : carte tectonique et coupe tectonique	106
A.2	Martigny : carte des affleurements et des failles repérés sur le terrain	107
A.3	Martigny : analyse 2D des linéaments et relief ombré	108
A.4	Martigny : analyse 3D des linéaments avec Coltop3D et image Hue Saturation Lightness (HSL)	109
A.5	Martigny : Image HSL du massif de l'Arpille des familles identifiées avec Coltop3D .	110
A.6	Martigny : carte de synthèse des failles	111
A.7	Ardon : carte et coupes tectoniques	112
A.8	Ardon : carte et coupes géologiques	113
A.9	Ardon : cartographie des failles sur le terrain	114
A.10	Ardon : carte des linéaments et image ombré	115
A.11	Ardon : carte des modèles géométriques pour la faille AR_W_1	116
A.12	Ardon : vérification des orientations des familles de failles (carte de l'intersection des failles avec la topographie numérisée) et image Hue Saturation Lightness (HSL) . . .	117

Liste des tableaux

1.1	Variabilité de β (angle entre les structures R et la faille principale) dans la littérature. (¹) Tiré de Bahat (1980).	13
2.1	Sigles et abréviations	23
2.2	Résumé des conventions utilisées pour décrire les orientations des structures	26
2.3	Résumé de la procédure et des paramètres nécessaire au calcul du déplacement	39
4.1	Familles de failles d'orientations similaires. Ces données sont représentées sous forme de diagramme de Lambert dans la figure 4.12.A.	78
4.2	Quantification de la longueur du vecteur de mouvement $ d $ et de l'erreur Δ pour les faille décrochantes dextres AR_W_1 et AR_W_15.	83
B.1	Martigny - Données de mouvement des failles	118
B.2	Ardon - Données de mouvement des failles	119

Annexe A

Cartes

Figure A1: Martigny, Carte tectonique 1:100'000 (tirée de Steck et al., 1999) et coupe tectonique (tirée de Steck et al., 2001)

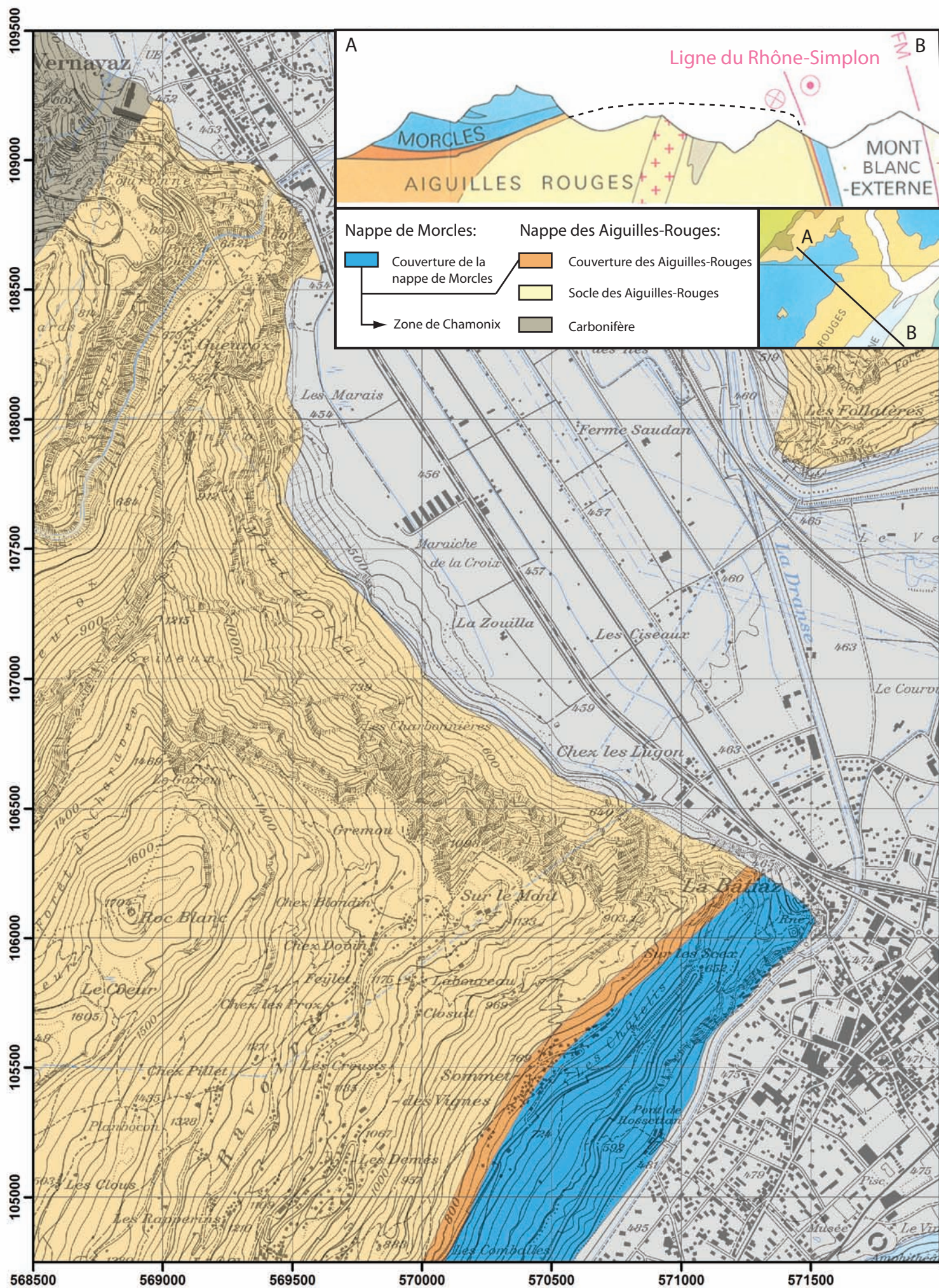


Figure A2 - Martigny, carte des affleurements et des failles repérés sur le terrain

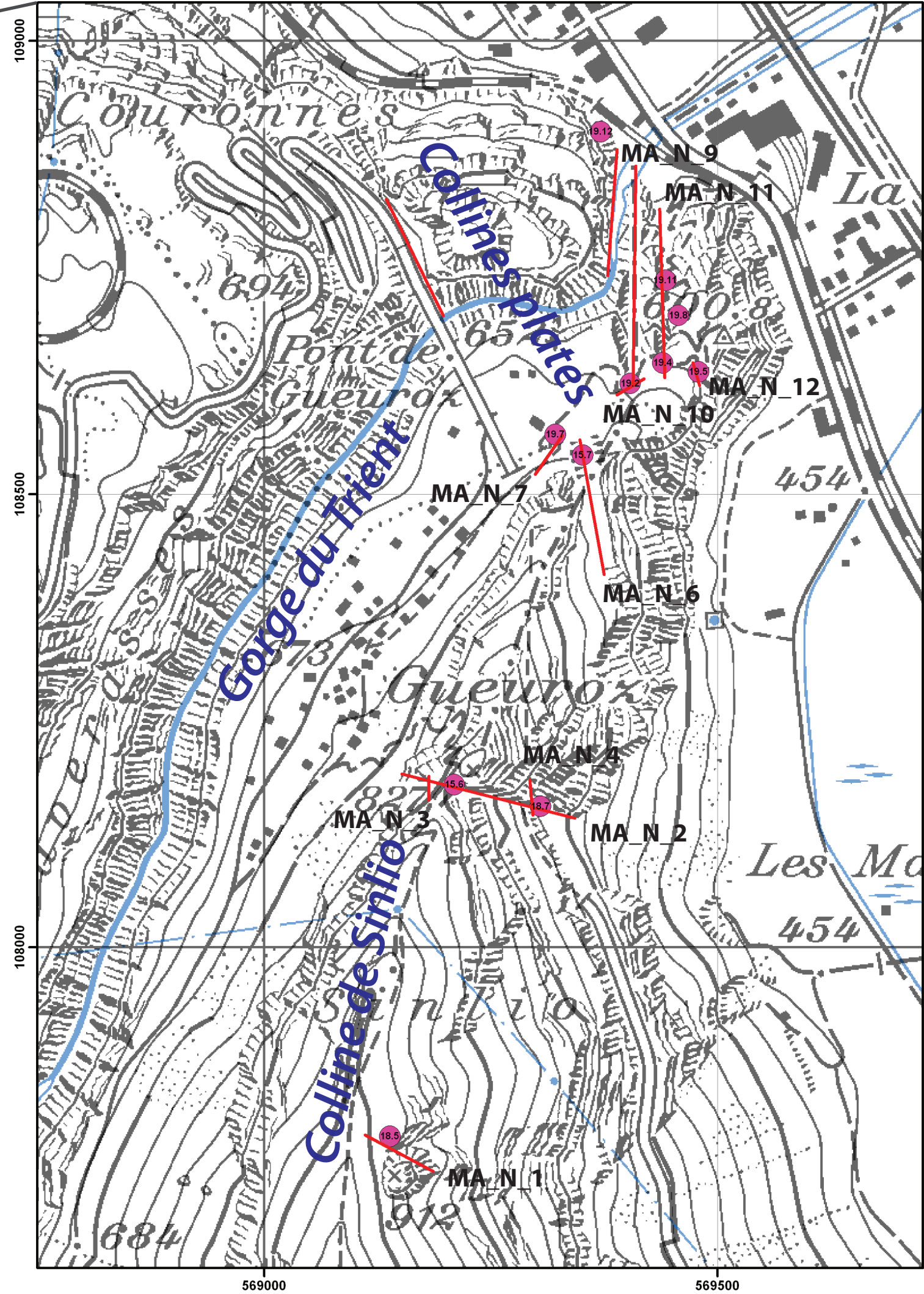
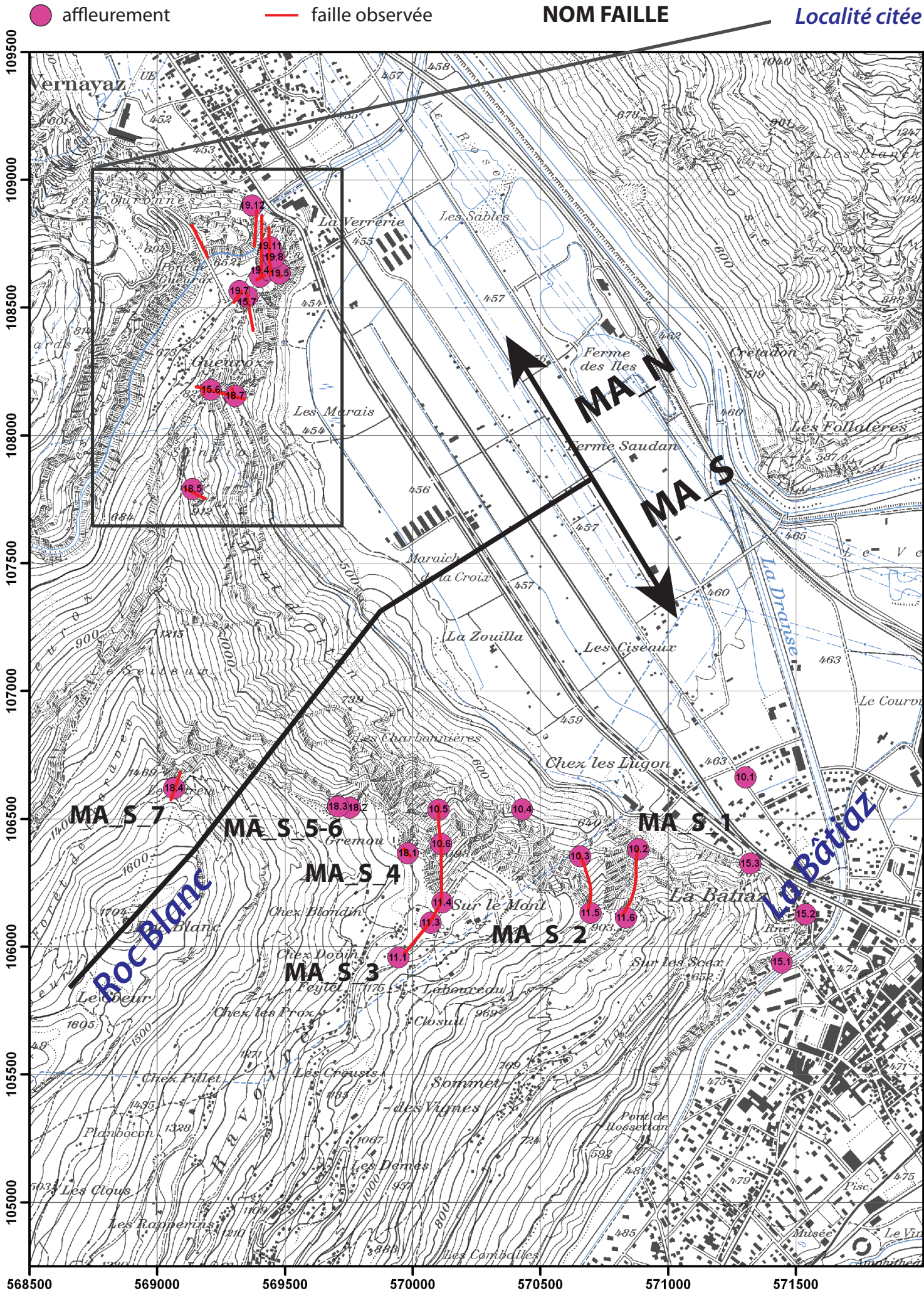


Figure A3: Martigny, Analyse 2D des linéaments et relief ombré

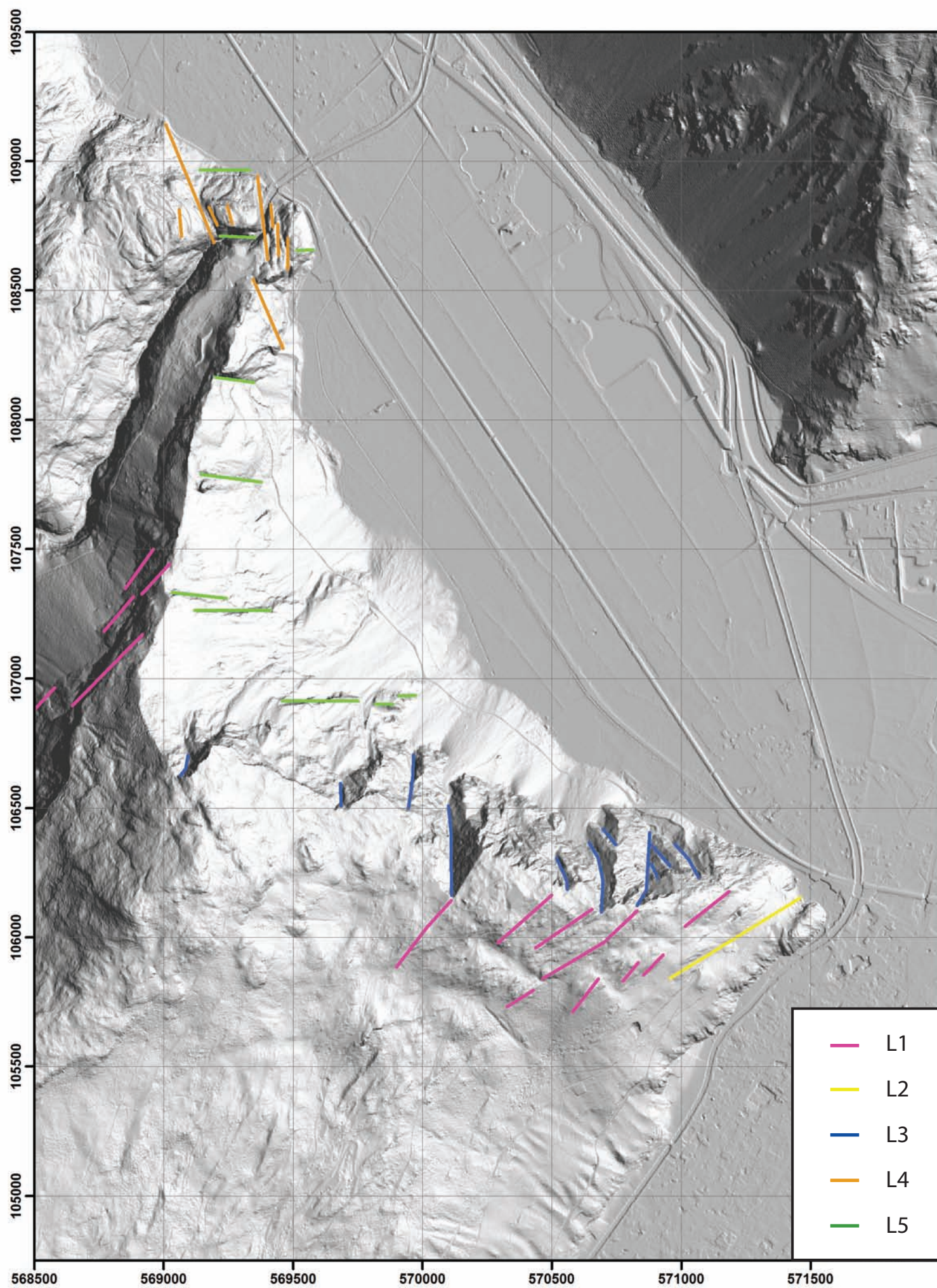


Figure A4: Martigny, Analyse 3D des linéaments avec Coltop3D (Jaboyedoff et al. 2007) et image Hue Saturation Lightness (HSL)

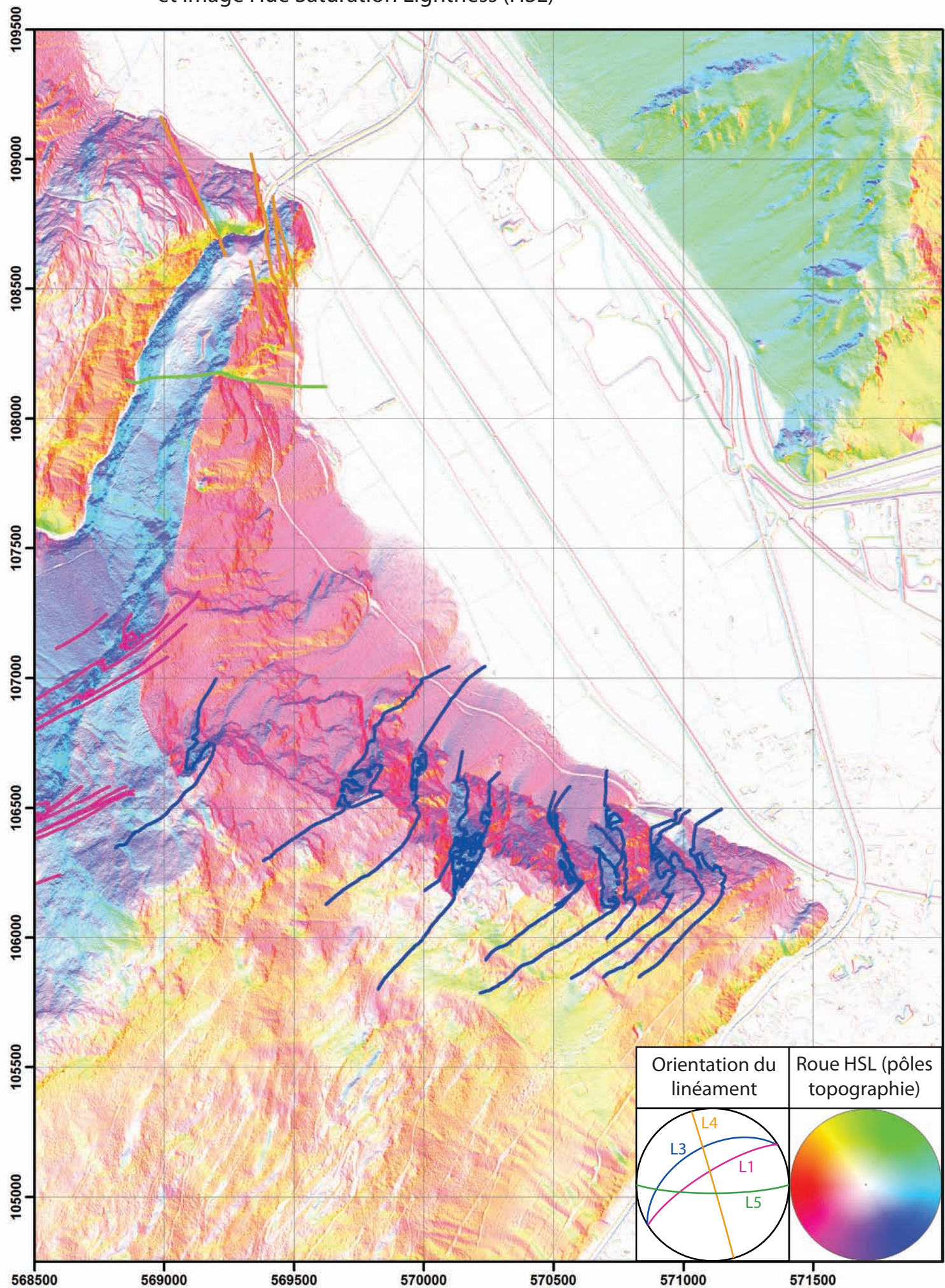


Figure A5: Martigny, Image Hue Saturation Lightness (HSL) du massif de l'Arpille. En couleur les portions de la surface topographique qui font partie des 6 familles de failles identifiées avec Coltop3D (Jaboyedoff et al. 2007)

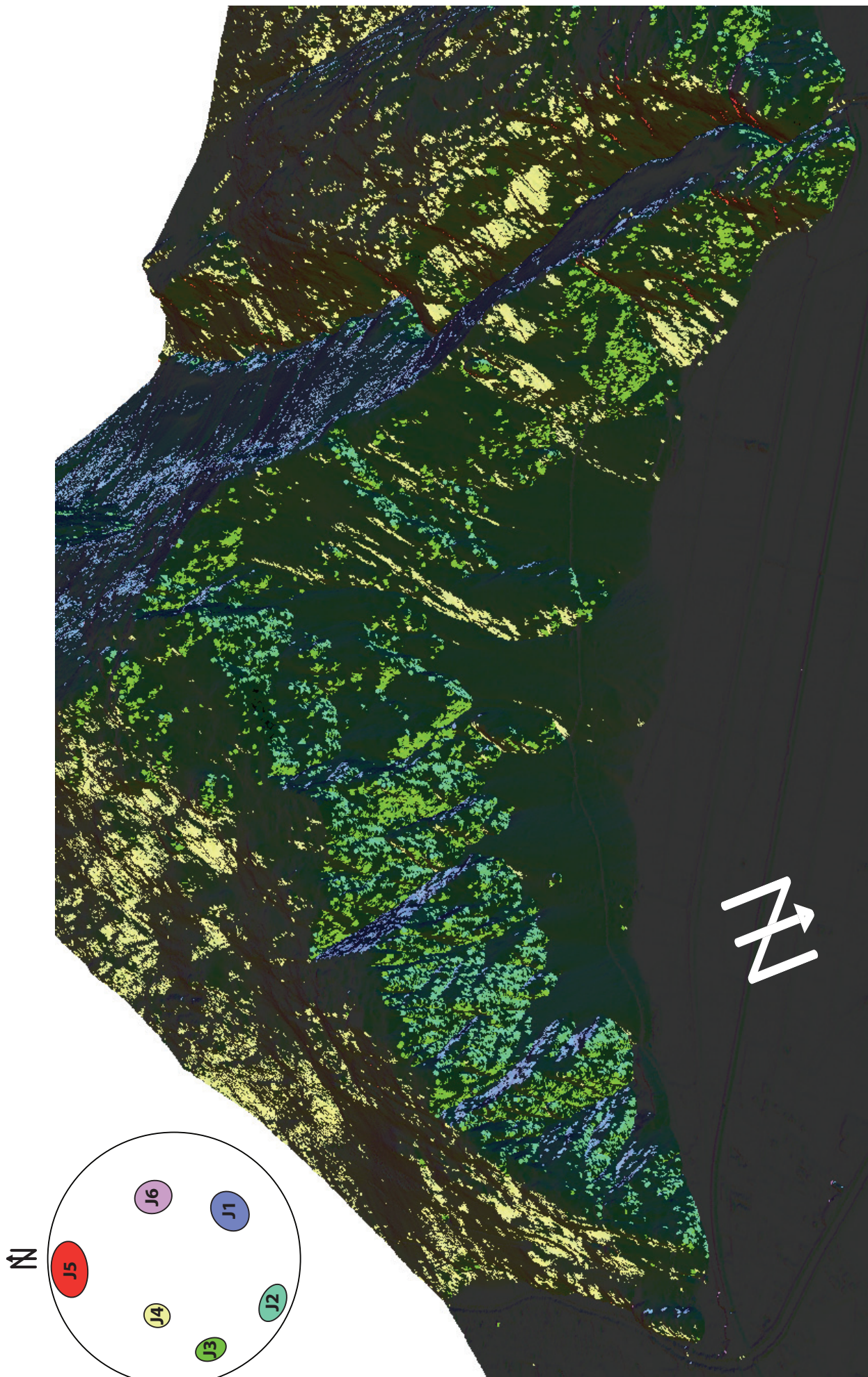


Figure A6 - Martigny, Synthèse des failles et relief ombré

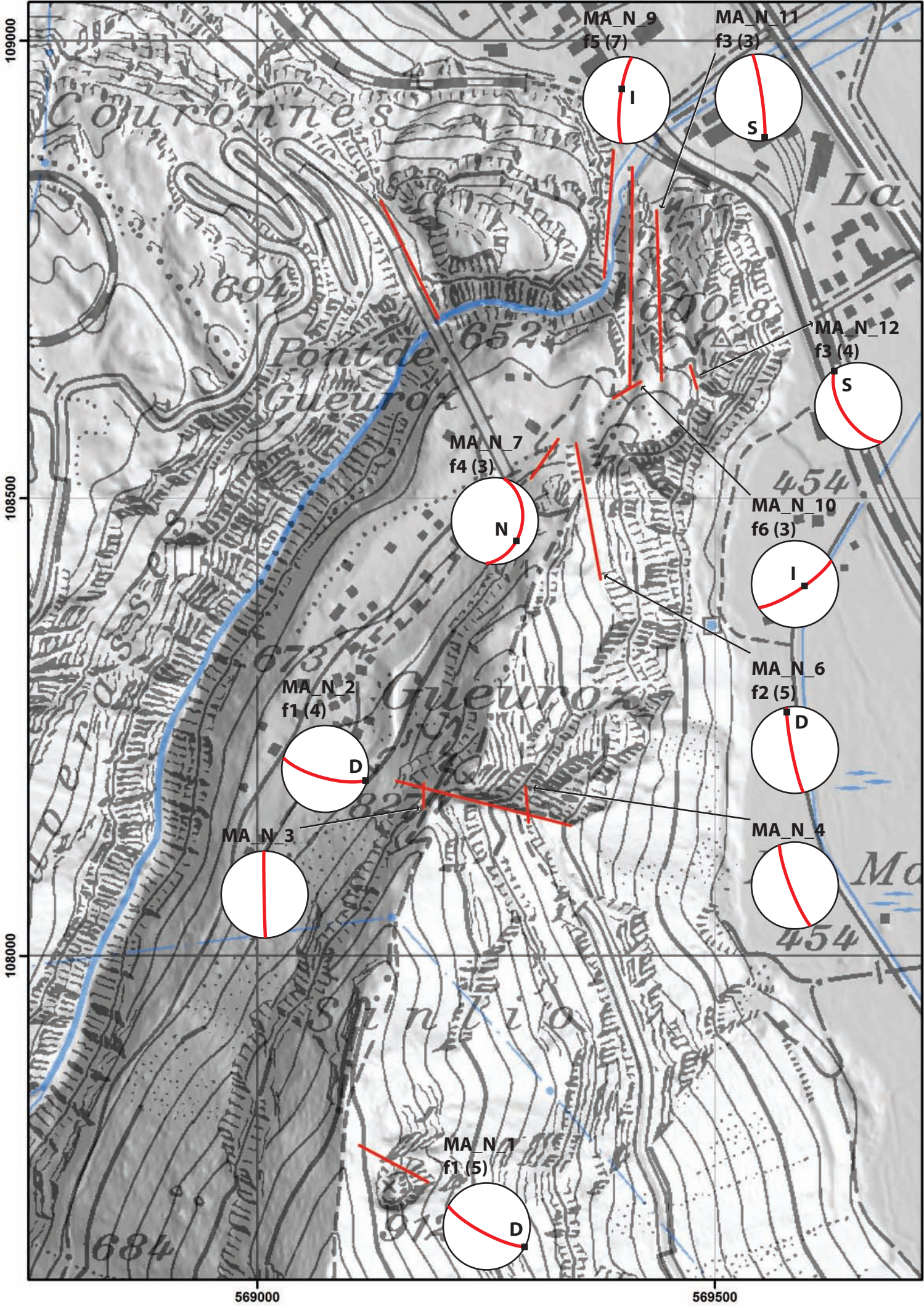
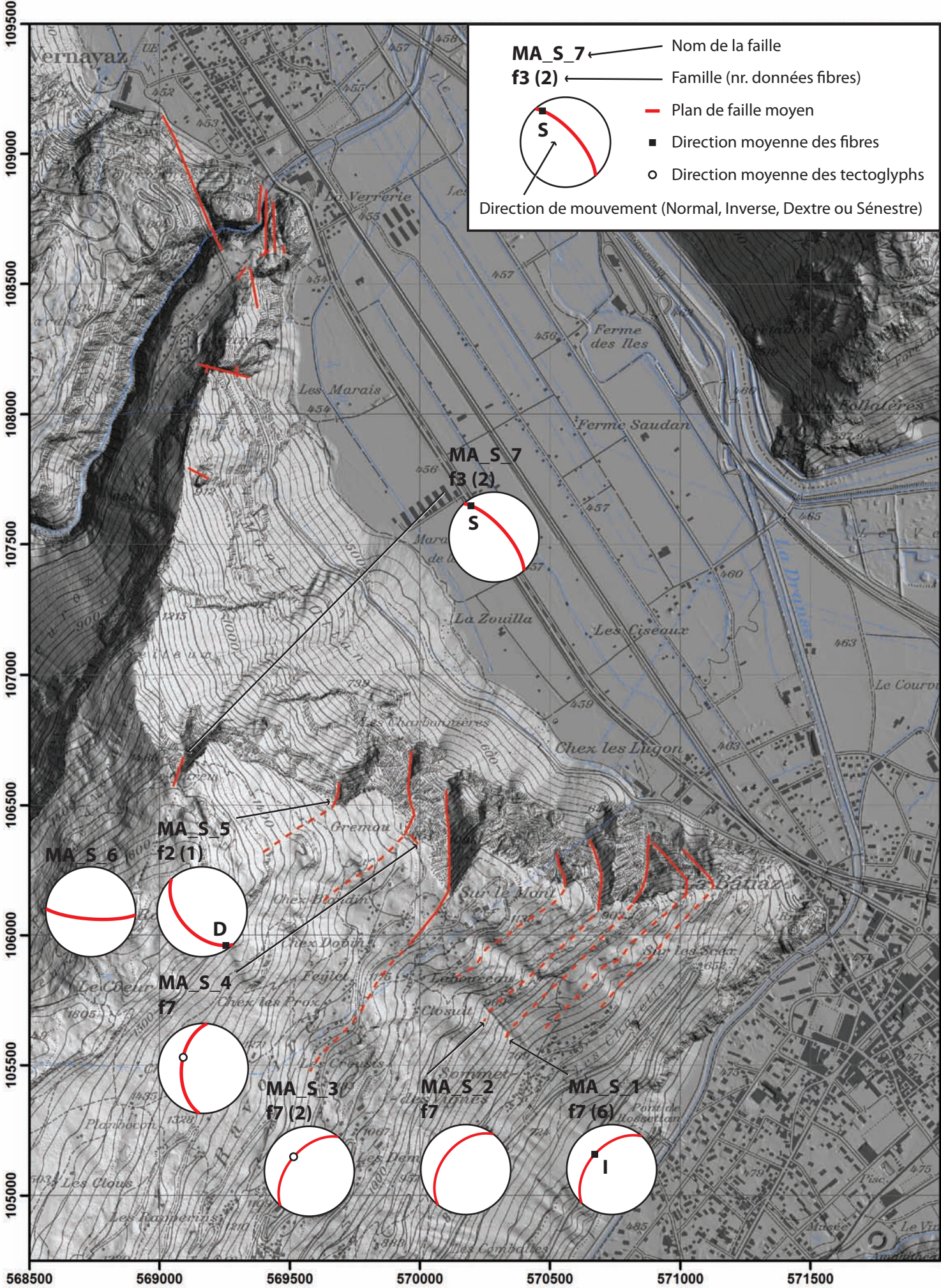


Figure A7 - Secteur d'Ardon, carte tectonique 1:100'000 (tiré de Steck et al. 1999) et coupes tectoniques (tirées de Steck et al. 2001)

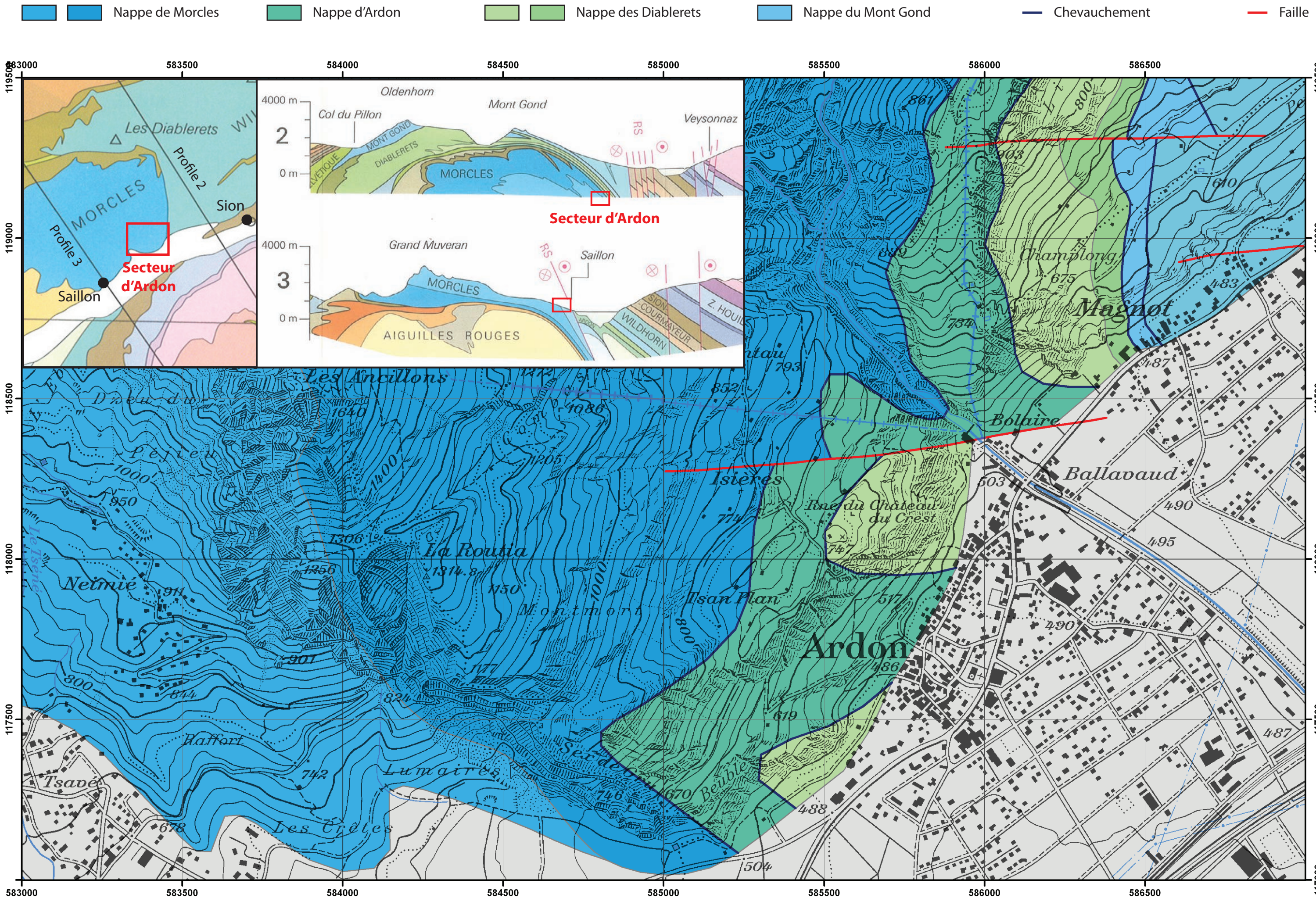
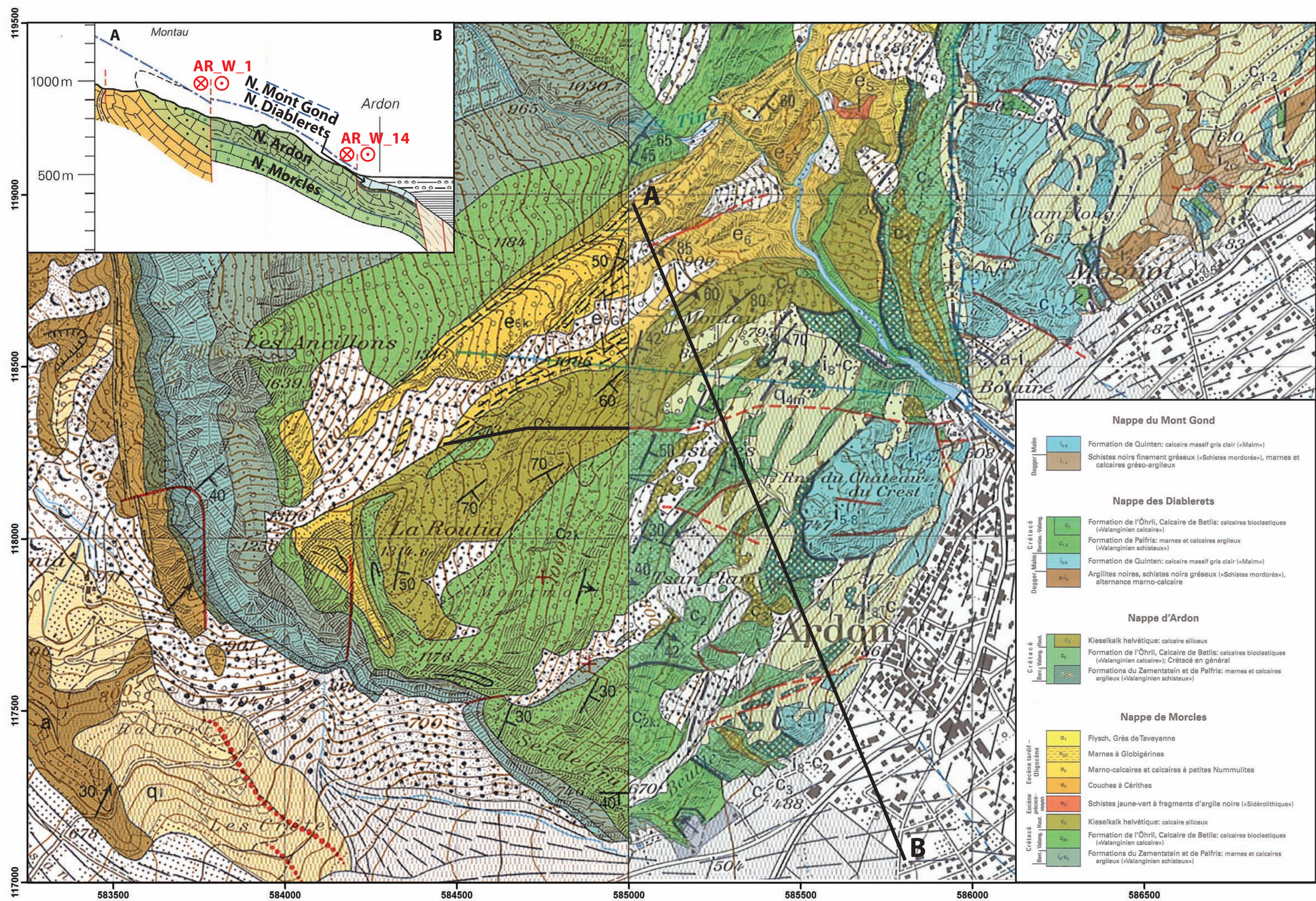


Figure A8 - Secteur d'Ardon, carte géologique 1:25'000 (tirées de: est, Sartori et al, 2011; ouest, Badoux, 1971) et coupe géologique (tirée de Sartori et Epard, 2011)



NOM PLATEAU

— faille observée

- - - faille supposée

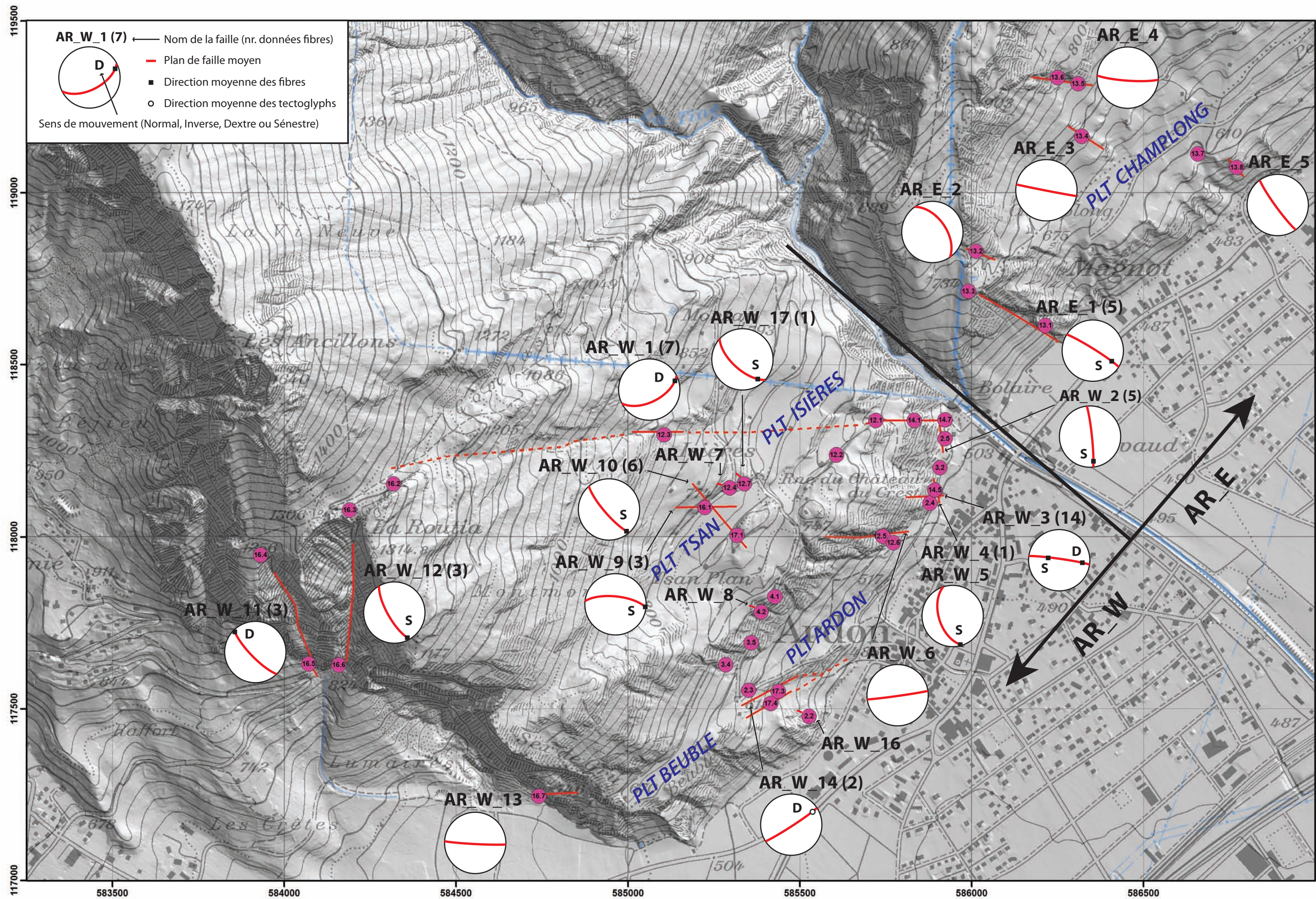


Figure A.10 - Secteur d'Ardon, Carte des linéations et relief ombré

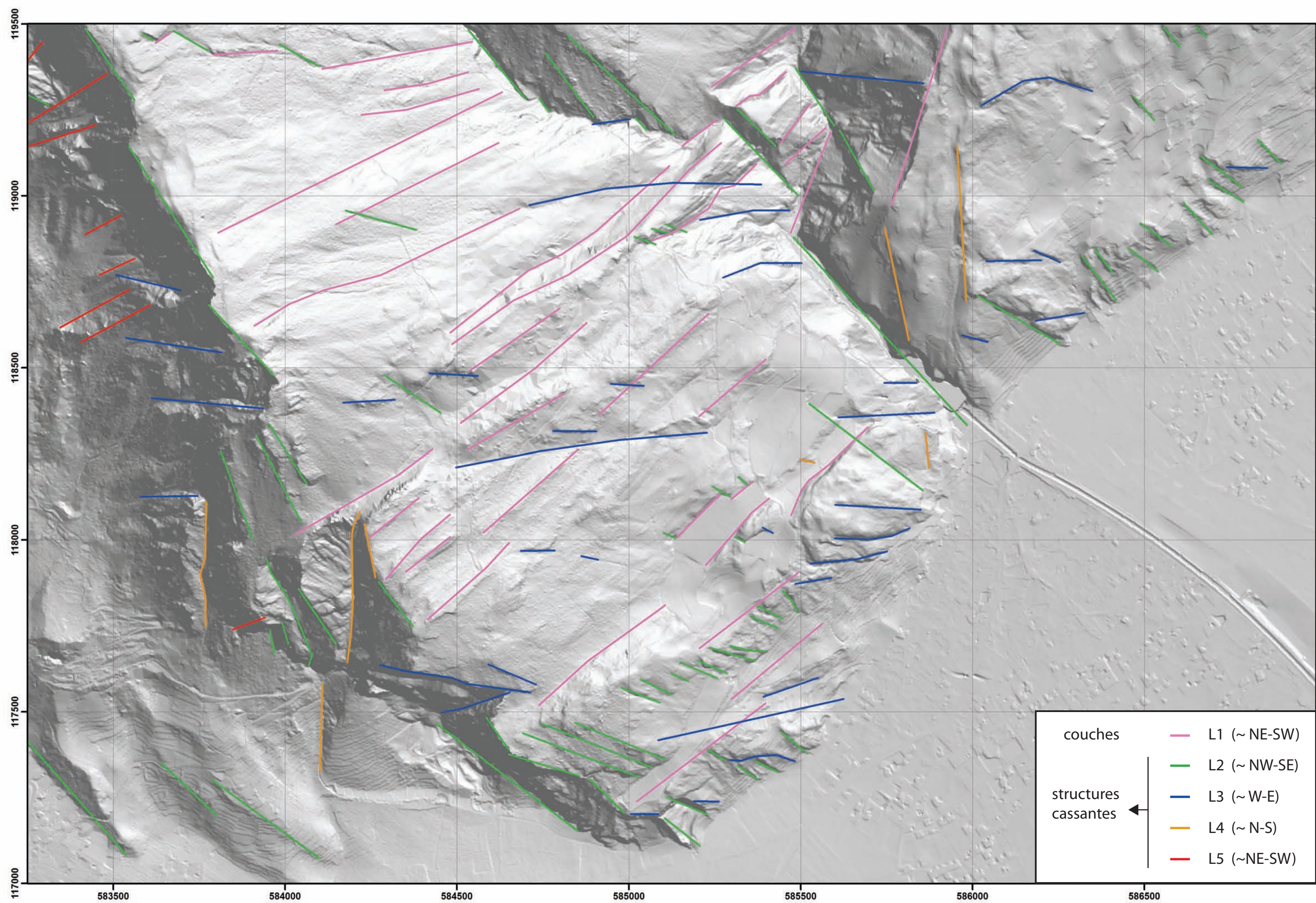


Figure A.11 - Secteur d'Ardon, carte des modèles géométriques pour la faille pour la faille AR_W_1

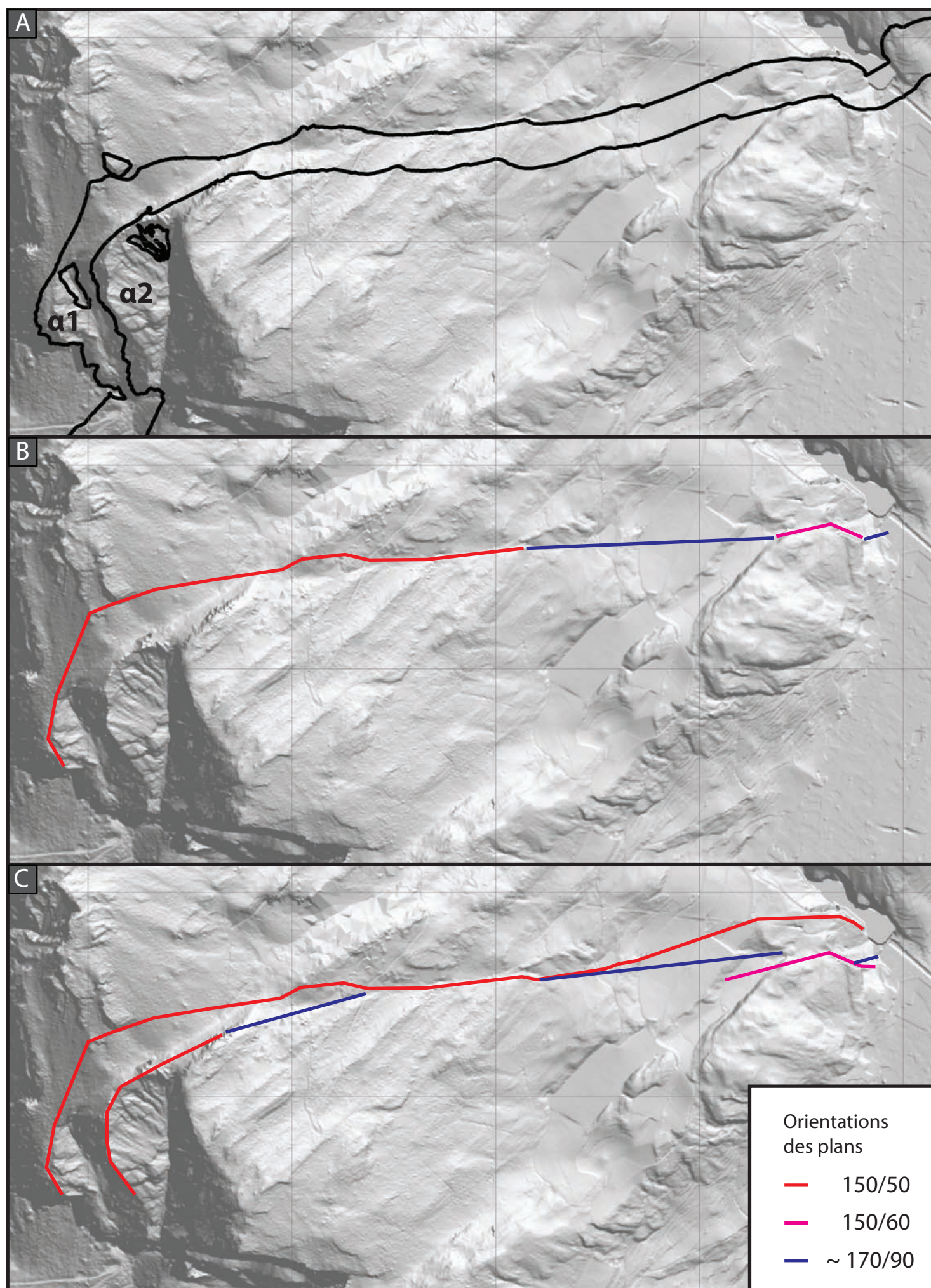
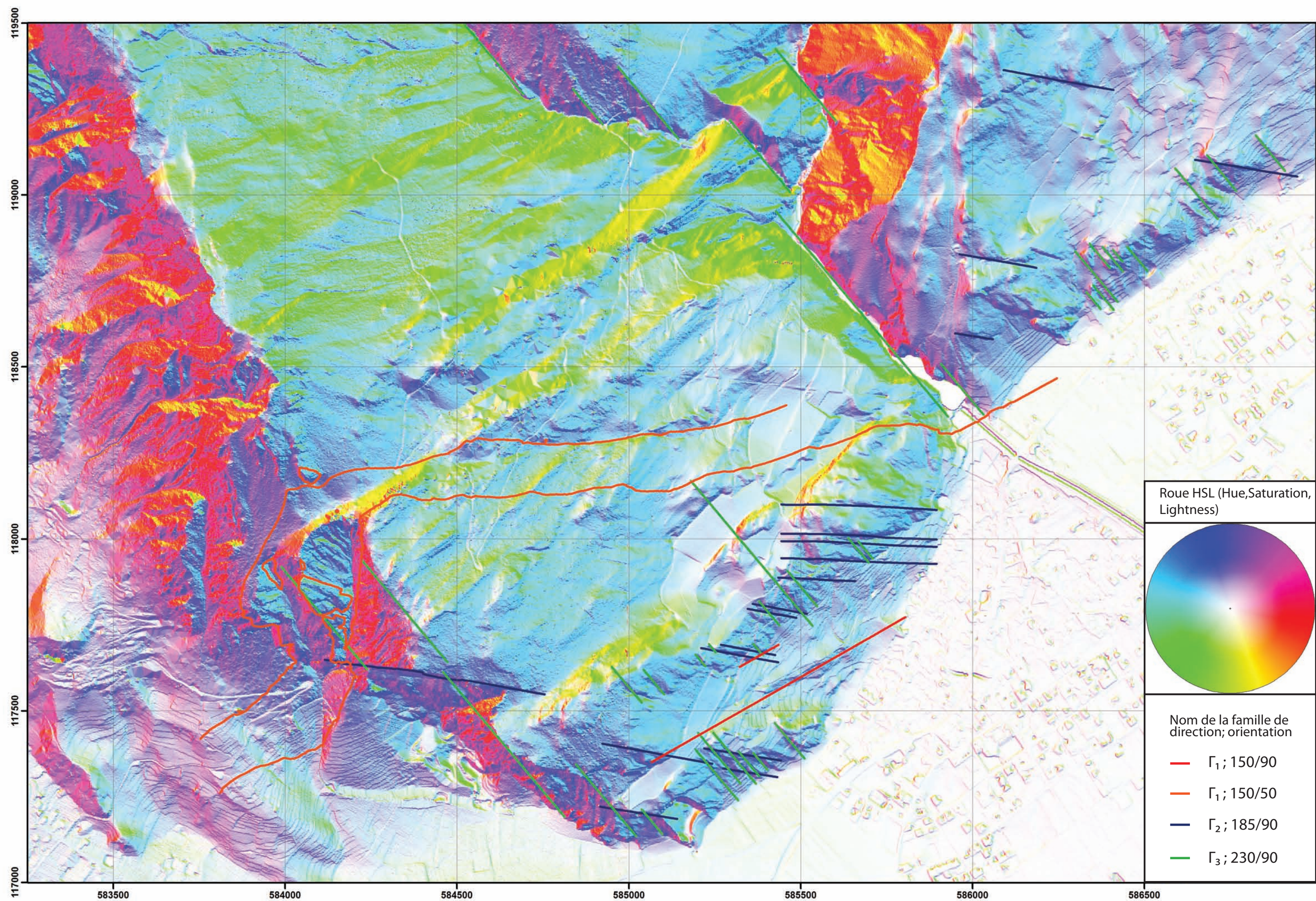


Figure A.12 - Secteur d'Ardon, Vérification des orientations des familles de failles (carte de l'intersection des failles avec la topographie numérisée) et image Hue Saturation Lightness (HSL)



Annexe B

Données de mouvement

Les données de mouvement des failles ont été publiées dans les suivantes tableaux. Ces tableaux incluent le nom de la faille (Nom), le nom de l’affleurement (Affl.), l’orientation du plan de faille (Azimuth et Dip), et l’orientation du vecteur de mouvement (Rake). Une deuxième colonne décrit le mouvement, de façon redondante, sous la forme plus lisible de direction de mouvement (Pitch) et sens de mouvement (N = normal, I = inverse, D = dextre, S = sénestre, - = fibre cassée ou tectoglyph).

TABLE B.1: Martigny - Données de mouvement des failles

Lieu de mesure		Plan de faille		Mouvement	Mouvement	
Nom	Affl.	Azimuth	Dip	Rake	Pitch	Sense de mouvement
MA_S_1	#10.2	308	42	106	74 S	I
MA_S_1	#10.2	320	42	088	88 NE	I
MA_S_1	#10.2	324	38	092	88 SW	I
MA_S_1	#10.2	320	34	100	80 SW	-
MA_S_1	#10.2	300	50	086	86 NE	-
MA_S_1	#10.2	320	32	094	86 SW	-
MA_S_5	#18.3	240	54	168	54 SW	D
MA_S_7	#18.4	046	60	-022	22 NW	S
MA_S_7	#18.4	048	78	-010	10 NW	-
MA_N_1	#18.5	208	86	-172	8 W-NW	D
MA_N_1	#18.5	206	84	-172	8 NW	D
MA_N_1	#18.5	204	74	176	4 SW	D
MA_N_1	#18.5	212	60	172	8 SW	D
MA_N_1	#18.5	210	80	172	8 SW	D
MA_N_2	#15.6	200	70	176	4 E	D
MA_N_2	#15.6	198	74	174	6 E	D
MA_N_2	#15.6	188	78	172	8 E	D
MA_N_2	#15.6	202	66	-176	4 W	D

MA_N.6	#15.7	258	72	-176	4 N	D
MA_N.6	#15.7	258	82	-164	16 N	D
MA_N.6	#15.7	260	90	-162	18 N	D
MA_N.6	#15.7	080	84	-174	6 N	D
MA_N.6	#15.7	260	82	-162	18 N	D
MA_N.7	#19.7	104	32	-120	60 S	N
MA_N.7	#19.7	098	48	-118	62 S	N
MA_N.7	#19.7	106	30	-108	72 S	N
MA_N.9	#19.2	276	74	084	84 N	bloc W monté
MA_N.9	#19.2	282	72	078	78 N	-
MA_N.9	#19.2	280	70	082	82 N	-
MA_N.9	#19.12	260	84	-140	40 N	bloc W descendu
MA_N.9	#19.12	278	66	060	60 N	bloc W monté
MA_N.9	#19.12	284	72	068	68 N	bloc W monté
MA_N.9	#19.12	288	82	066	66 N	bloc W monté
MA_N.10	#19.2	140	72	100	80 NE	bloc SE monté
MA_N.10	#19.2	150	82	108	72 NE	bloc SE monté
MA_N.10	#19.2	150	78	100	80 E-NE	bloc SE monté
MA_N.11	#19.11	100	80	108	72 N	bloc W descendu
MA_N.11	#19.11	068	90	-008	8 N	S
MA_N.11	#19.11	068	84	-010	10 N	S
MA_N.12	#19.5	230	58	-004	4 SE	S
MA_N.12	#19.5	240	60	004	4 NW	S
MA_N.12	#19.5	234	60	008	8 NW	S
MA_N.12	#19.5	242	58	-002	2 SE	S

TABLE B.2: Ardon - Données de mouvement des failles

Lieu de mesure		Plan de faille		Mouvement	Mouvement	
Nom	Affl.	Azimuth	Dip	Rake	Pitch	Sense de mouvement
AR.W_1	#12.1	120	78	162	18 E	D
AR.W_1	#12.1	144	48	-172	08 W	D
AR.W_1	#12.3	174	88	118	62 E	D,N
AR.W_1	#14.1	154	54	156	24 E	D
AR.W_1	#14.1	152	58	158	22 E	D
AR.W_1	#14.1	150	62	152	28 E	-
AR.W_1	#14.1	154	60	146	34 E	-
AR.W_2	#2.5	088	82	036	36 S	S
AR.W_2	#2.5	082	82	037	37 S	S
AR.W_2	#2.5	088	86	008	08 S	S
AR.W_2	#2.5	084	88	018	18 S	S
AR.W_2	#2.5	084	88	002	02 S	S
AR.W_3	#2.4	188	82	038	38 NW	S
AR.W_3	#2.4	012	82	-156	24 E	D

ANNEXE B. DONNÉES DE MOUVEMENT

AR_W_3	#2.4	008	82	-173	07 E	D
AR_W_3	#2.4	008	82	-132	48 E	D
AR_W_3	#2.4	004	88	-156	24 E	D
AR_W_3	#2.4	358	86	-142	38 E	D
AR_W_3	#2.4	000	82	-132	48 E	D
AR_W_3	#2.4	016	88	-032	32 W	S
AR_W_3	#2.4	178	84	044	44 W	-
AR_W_3	#2.4	188	86	048	48 W	S
AR_W_3	#2.4	014	78	-038	38 W	S
AR_W_3	#2.4	008	76	-148	32 E	D
AR_W_3	#2.4	012	78	-152	28 E	D
AR_W_3	#2.4	012	88	-032	32 W	S
AR_W_4	#14.5	246	52	004	04 N	S
AR_W_4	#14.5	252	58	-016	16 S	S
AR_W_4	#14.5	248	54	-018	18 S	S
AR_W_4	#14.5	248	50	002	02 N	S
AR_W_4	#14.5	250	52	-010	10 S	S
AR_W_4	#14.5	260	48	-008	08 S	S
AR_W_7	#12.4	207	87	142	38 SE	D
AR_W_8	#4.1	194	84	-110	70 W	I
AR_W_9	#16.1	008	72	010	10 E	S
AR_W_9	#16.1	008	62	-002	02 W	S
AR_W_9	#16.1	002	72	002	02 E	S
AR_W_10	#17.1	226	78	-010	10 SE	S
AR_W_10	#17.1	228	88	008	08 NW	S
AR_W_10	#17.1	230	90	002	02 NW	S
AR_W_10	#17.1	228	70	-032	32 SE	S
AR_W_10	#17.1	230	76	-014	14 SE	S
AR_W_10	#17.1	232	64	-012	12 SE	S
AR_W_11	#16.5	230	72	-174	06 NW	D
AR_W_11	#16.5	234	90	-176	04 NW	D
AR_W_11	#16.5	224	76	-170	10 NW	-
AR_W_12	#16.6	238	78	-008	08 SE	S
AR_W_12	#16.6	242	72	-012	12 SE	S
AR_W_12	#16.6	240	68	-008	08 SE	S
AR_W_14	#17.4	152	88	162	18 NE	-
AR_W_14	#17.4	150	82	166	14 NE	-
AR_W_16	#2.2	014	89	-089	89 W	N
AR_W_17	#12.7	222	64	-022	22 SE	S
AR_E_1	#13.1	022	90	030	30 SE	S
AR_E_1	#13.1	022	90	032	32 SE	S
AR_E_1	#13.1	022	90	026	26 SE	S
AR_E_1	#13.1	208	78	-038	38 SE	S
AR_E_1	#13.1	208	88	-034	34 SE	S
AV_1	#4.3	174	88	158	22 E	D
AV_1	#4.3	174	88	152	28 E	D
AV_1	#4.3	174	88	171	09 E	D

ANNEXE B. DONNÉES DE MOUVEMENT

AV_1	#4.3	174	88	168	12 E	D
AV_1	#4.3	174	88	172	08 E	D
AV_1	#4.3	006	78	-168	12 E	-
AV_1	#4.3	006	80	-158	22 E	-
AV_1	#4.3	012	75	-165	15 E	-