

**UNIVERSITE DE NICE – SOPHIA ANTIPOLIS
FACULTE DES SCIENCES**

THESE

Présentée pour obtenir le grade de :
Docteur en Sciences de l'Université de Nice - Sophia Antipolis
Spécialité : Sciences de l'Univers

par :

Philippe MONDIELLI

**CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE
DE L'ALEA SISMIQUE EN
PRINCIPAUTE DE MONACO**

Soutenue le 3 novembre 2005 à l'Université de Nice devant le jury composé de :

Jean Marc LARDEAUX
Jean Pierre IVALDI
Jean FERRANDINI
Jean François SEMBLAT
Olivier BELLIER
Raoul CARUBA

Président du Jury
Directeur de Thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

**Travaux réalisés au sein de la Direction de l'Environnement
de l'Urbanisme et de la Construction de la Principauté de Monaco.
23 avenue Prince Héréditaire Albert, MC-98000 Monaco**

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1. Présentation de l'étude

1.1. Historique de l'étude

Cette étude a pour origine une réunion tenue le 1^{er} octobre 1996 en Principauté de Monaco qui a regroupé les spécialistes du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), les responsables du Service des Travaux Publics et ceux du Service de l'Environnement de Monaco. L'objectif de cette réunion était de définir des spectres normalisés, élastiques et de dimensionnement à appliquer dans les diverses zones de la Principauté en utilisant les résultats de l'étude du microzonage réalisée en 1991-1992. Cette réunion a de plus suggéré le développement d'études et de recherches dans au moins deux directions visant l'une à mieux définir les événements susceptibles d'intéresser la Principauté, l'autre à mieux préciser l'effet de l'action sismique sur des bâtiments fortement encastres dans le sol (note interne 502/PC-NM/2986-96).

A la suite de cette réunion, le Service de l'Environnement proposait d'entreprendre une étude approfondie destinée à réviser le séisme pris pour référence en Principauté de Monaco. La réglementation parasismique monégasque reposait alors et repose encore aujourd'hui sur l'hypothèse d'un séisme de magnitude 6.5 à 30 km. Cependant les éléments du raisonnement ayant conduit à ces valeurs ne sont pas définis. Cette étude devait confirmer ou proposer des modifications à cette hypothèse sur des données clairement établies et donc susceptibles, à plus long terme, d'analyses critiques aux fins de nouvelles actualisations ou contre-propositions (note interne JMM/ pad-97/ 212).

Cette étude pouvait être menée par un agent de l'administration monégasque du Service de l'Environnement en charge de la sismologie à Monaco, en collaboration avec le CETE de Nice et l'Université de Nice. Une convention est signée en mai 1998 par le Centre de Recherche de Géologie Méditerranéenne de l'Université de Nice Sophia-Antipolis, le laboratoire de Nice du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, la société Eosys et le Service de l'Environnement de Monaco.

1.2. La Principauté de Monaco entre Alpes et Méditerranée

La Principauté de Monaco est située sur la côte sud de l'Europe occidentale à égale distance du détroit de Gibraltar et de celui des Dardanelles. Le territoire de Monaco est la frange littorale d'un bassin versant qui, au-delà d'une altitude de 200 mètres environ est situé en France. Ce bassin versant fait partie de la façade maritime des Alpes occidentales, il est caractérisé par son relief prononcé dominant la Méditerranée. Le bassin versant qui abrite Monaco est un cirque montagneux. En moins de 3 km, l'altitude varie du niveau de la mer à 1143 m au Mont Agel qui en est son point culminant. Le relief sous-marin est comparable au relief terrestre et en moins de 6 km, en l'absence de plateau continental, les 2000 mètres de profondeur sont atteints.

Le bassin versant de Monaco est situé en bordure du domaine alpin et son histoire est intimement liée à la genèse des Alpes. Il y a 245 millions d'années (Ma), l'Europe et

l'Afrique appartenait à un même continent qui commençait à s'ouvrir à l'aplomb du futur domaine alpin. Au Jurassique, il y a 180 Ma, l'écartement continuant, un océan (la Téthys) est apparu entre ce qui allait devenir le continent eurasiatique et le continent africain. Les mouvements s'inversèrent il y a environ 120 Ma au Crétacé inférieur. A partir du Crétacé supérieur (80 Ma) et jusqu'à aujourd'hui, l'Afrique dont l'Apulie (Italie) ne vont plus cesser de se rapprocher de l'Europe. Ces rapprochements, s'accompagnant de collisions, conduisent à la structuration progressive des Alpes occidentales. Dans notre région, l'activité tectonique a atteint son paroxysme au Paléogène et au Néogène. La déformation des couvertures primaires (carbonifère et permien) et secondaire débute au Bartonien (43 Ma). Le soulèvement du massif cristallin de l'Argentera Mercantour à l'origine de ces déformations donna cette configuration de structure en écaillés qui caractérise le bassin versant de Monaco.

Par ailleurs, bien que de fréquence relativement modérée, mais parfois avec une intensité forte, la sismicité témoigne de l'activité actuelle de cette partie des Alpes méridionales.

1.3. La zone d'étude

Une zone d'étude est définie par l'aire géographique susceptible de contenir une faille active dont le jeu pourrait occasionner des dégâts humains ou matériels à Monaco.

L'étendue spatiale des zones étudiées est fonction des données disponibles et/ou exploitables qui sont adaptées à la problématique de chaque partie de cette étude.

La zone d'étude pour la partie sismotectonique est une aire géographique de 100 km de longueur sur 80 km de large c'est-à-dire de la longitude 7° à 8° et de la latitude 43°5' à 44° que nous nommerons Alpes maritimes franco-italiennes. Monaco y est légèrement excentré vers l'ouest (la zone à l'ouest d'Antibes étant considérée comme beaucoup moins sismique que l'extrémité sud-est des Alpes-Maritimes et la Ligurie en Italie).

La zone d'étude couverte par les images satellitales est plus restrictive : elle comprend la partie Sud-Est du département des Alpes-Maritimes et la partie Ouest de la Ligurie. Plus précisément cette zone s'étend de Saint-Laurent-du-Var à Bordighera et de la latitude d'Utelle à une vingtaine de kilomètres au sud de la côte.

Les limites de la zone d'étude pour la détermination détaillée des champs de contraintes locaux autour de Monaco sont celles d'une aire géographique de 10 km de large et de 20 km de haut. De Eze à Menton, elle est limitée au nord par les crêtes méridionales du bassin versant de Sospel.

Le choix de la zone d'étude au sens large s'est donc porté sur une aire géographique comprenant des systèmes géologiques bien distincts et délimités, comme l'arc de Nice dans la partie occidentale de cette aire et la nappe de Flysch à helminthoïde des unités penniques de la Ligurie dans sa partie orientale. Ces deux ensembles structuraux sont séparés par une zone complexe fortement écaillée connue dans la littérature sous le nom « d'arc de la Roya » (Gèze, 1960; Perez, 1975).

2.4. Composition et utilisation du S.I.G.

Nous avons agencé l'ensemble des données géomatiques, de terrain et sismologiques sous la forme d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.) référencé dans le système Français méridien de Paris sous la projection Lambert III sud.

a- Couches de base

- traitements des images Landsat été et hiver (Eosys),
- images SPOT (Spot),
- traitements MNT (Eosys),
- carte géologique numérisée (feuille Menton – Nice 1/50.000^e, Gèze, 1968),
- carte géologique numérisée (feuille de Nice : 1/250.000^e, Rouire, 1980),
- carte topographique IGN au 1/25.000^e, feuille Nice-Menton.

b- couches de travail

- alignements reconnus sur chacune des scènes traitées ou brutes (une couche par scène),
- alignements visibles sur l'ensemble des traitements ou images,
- banques de données sismologiques ReNaSS,
- paléochamps des déformations fragiles finies,
- champs et états de contraintes actuels.

2.5. Application des lois d'atténuation

La sismicité historique et instrumentale a été traitée au travers des principales lois d'atténuation permettant :

- de réaliser une hiérarchie des différents événements par rapport aux vitesses et aux accélérations mesurées ou calculées sur le territoire de la Principauté,
- d'évaluer les vitesses ou accélérations qui pourraient être atteintes à Monaco par les ondes issues d'une rupture sur l'un des principaux accidents mis en évidence.

2.6. Traitements de la sismicité instrumentale pour la détermination des effets de site

Les nouveaux enregistrements de la sismicité en divers points de la Principauté vont permettre de confirmer, d'infirmer ou de préciser les résultats de l'étude du microzonage de 1991. En effet, cette étude, réalisée sur un faible nombre d'événements exploitables, ne permettait pas de conclure de façon absolue (Duval, 1994).

Les méthodes classiques des rapports spectraux et des rapports H/V séismes sont appliquées aux séismes ayant présenté l'intensité la plus importante sur Monaco. Ces séismes sont situés à des distances variables de la Principauté : proches, tels les séismes de la crise de Blausasc

situés à moins de 10 km, lointains, tel celui de Boumerdès à 800 km et dont les ondes T ont été nettement ressenties par la population. Ces traitements ont pour buts affichés de :

- préciser les effets de site du plus grand terre-plein de la Principauté, celui du quartier de Fontvieille, en essayant d'évaluer une modification de ces effets en fonction de la distance et de l'azimut,
- s'assurer si le Rocher de Monaco est le meilleur site de référence sur le territoire de la Principauté, tel que défini dans le microzonage de 1991.

2.7. Etude macrosismique du séisme de 1887

L'exploitation des archives du Palais princier concernant le séisme du 23 février 1887 et plus particulièrement tous les rapports concernant les dégâts occasionnés au bâti permettent de :

- réaliser une carte des dommages,
- préciser l'intensité macrosismique,
- définir les facteurs aggravants : âge du bâti et effets de site.

2.8. Discussion sur l'aléa tsunami

La description des différents types de tsunamis qui pourraient atteindre Monaco et l'exploitation de l'enregistrement du microtsunami du 21 mai 2003 vont permettre de discuter l'hypothèse d'un tsunami majeur sur la Principauté.

2. Méthodologie.

Le but de cette phase de travail est de rechercher tous les alignements susceptibles d'avoir une signification en terme de *déformations fragiles* : linéaments, failles, champs de diaclase. L'ensemble de ces alignements compose ce que l'on appellera la fracturation de la zone d'étude. Certains indices de déformations récentes et notamment les anomalies morpho-structurales vont être mis en évidence avec une recherche de linéaments et failles sur des traitements d'images satellitaires et de Modèles Numériques de Terrains.

2.1. Choix d'un partenariat avec une entreprise spécialisée

Dans un souci d'efficacité nous avons fait le choix de bénéficier de l'expérience d'une entreprise spécialisée dans le traitement des images satellitaires en mettant au point un protocole d'étude avec un travail itératif entre nous et cette société.

Dans le cadre de la convention signée en 1998, c'est la société Eosys, spécialisée dans le traitement d'images et des M.N.T appliqués à la géologie, qui a été retenue. Cette entreprise a acquis une solide expérience dans la région avec plusieurs applications, notamment l'étude sur le tunnel du Mercantour et celle sur le tunnel descendant de la Moyenne corniche-Monaco.

Plusieurs traitements d'images nous ont été proposés dans un premier temps. En fonction de ces résultats (meilleure combinaison, traitement particulier d'un M.N.T), de nouveaux traitements plus performants ont été réalisés dans certains secteurs.

2.2. Description de la méthodologie appliquée dans cette étude

Le but de cette méthode est donc d'avoir d'une part, une vue synthétique des grandes directions structurales marquant la morphologie autour de la zone de Monaco et d'autre part, d'identifier des alignements qui pourraient être des accidents tectoniques à jeu ou rejeu récents.

Des alignements visibles sur plusieurs types de données ont plus de chance de correspondre à une réalité que ceux visibles sur un seul type d'image (Hintigton et Raiche, 1978 ; Carrère, 1990). Dans notre étude l'existence des alignements majeurs sera validée par leur présence sur plusieurs types d'images satellitaires (Landsat Hiver, Landsat Été, Spot et MNT).

Des calculs statistiques permettront d'apprécier les directions de fracturation privilégiées de la région. Deux classements seront réalisés dans cette étude :

- le classement des alignements en fonction de leur direction,
- le classement de ces alignements en fonction de leur longueur, qu'ils soient déjà répertoriés dans la littérature scientifique ou non.

Les alignements les plus visibles seront vérifiés sur le terrain pour s'assurer de leur nature tectonique. Si les indices sont suffisamment nombreux et cohérents ils pourront être interprétés comme des accidents à jeu ou rejeu récents. Les accidents les plus importants en terme de longueur, une fois contrôlés et expliqués, seront comparés avec les données géologiques cartographiques actuelles (feuille Menton – Nice 1/50.000^e, Gèze, 1968) et les données sismotectoniques connues (Larroque *et al.*, 2001). Cette comparaison permettra d'apprécier les nouveaux accidents mis en évidence tout en confirmant l'applicabilité de cette méthode à notre problématique.

Rappelons enfin que l'importance de la magnitude d'un séisme est proportionnelle à la longueur de la faille. Les observations réalisées dans cette étude concernent uniquement la partie visible des failles. A défaut de définir une magnitude précise, ces parties visibles pourront donner des renseignements qualitatifs sur le potentiel de l'accident. L'identification des linéaments est une des principales applications de la télédétection en géologie.

2.3. Les particularités des images de Landsat 5

Ce sont les images du satellite Landsat 5 qui sont utilisées dans cette étude. Ce satellite répète le cycle héliosynchrone tous les 16 jours à l'altitude moyenne de 705 km. L'orbite polaire héliosynchrone permet au satellite de passer toujours à la même heure solaire locale sur un même point de la Terre. Landsat 5 contient les systèmes MSS et TM (Thematic Mapper) ; Le système Landsat 5 enregistre les données en sept bandes spectrales (Tableau 4), six bandes réfléchies et une bande thermique (bande 6). Les six bandes réfléchies couvrent respectivement :

- la partie visible (bandes 1,2 et 3),
- l'infrarouge proche (bande 4),
- l'infrarouge moyen (bandes 5 et 7).

Bandes	Longueur d'onde (µm)	Caractéristiques
BANDE 1	0.45 - 0.52	Bleu-vert. Maximum de pénétration dans l'eau, très utile en cartographie bathymétrique dans l'eau peu profonde et aussi pour distinguer le sol de la végétation.
BANDE 2	0.52 - 0.60	Vert. Coïncide avec le maximum de réflexion de la végétation dans le domaine visible
BANDE 3	0.63 - 0.69	Rouge. Coïncide avec la bande d'absorption de la végétation, importante dans la discrimination des types de végétations.
BANDE 4	0.76 - 0.90	IR. Contient l'information due à la présence du fer et maximum de réflexion de la végétation
BANDE 5	1.55 - 1.75	MIR. Forte sensibilité aux radicaux OH ⁻ et intéressante pour les interprétations structurales
BANDE 6	10.4 - 12.50	IR thermique. Les images prises durant la nuit sont utiles en cartographie thermique et pour l'estimation de l'humidité du sol
BANDE 7	2.08 - 2.35	IR. Coïncide avec une bande d'absorption liée à la présence d'ions hydroxydes dans les minéraux.

Tableau 4 : Les bandes du satellite américain Landsat 5 avec leurs longueurs d'ondes et leurs caractéristiques.

La bande 6 couvre la partie infrarouge thermique du spectre dans l'intervalle 10,4-12,5µm. Les images Landsat couvrent une surface de 170 x 185 km, avec une résolution de 30 m pour les bandes réfléchies, et de 120 m pour la bande émise (thermale). Les avantages des scènes Landsat est qu'elles incluent la combinaison de la grande résolution avec la grande surface de

la couverture. De plus les sept bandes permettent une meilleure discrimination des matériaux de surface. Les combinaisons multibandes les plus utilisées et leurs particularités sont présentées au tableau suivant.

Composition colorée	Les caractéristiques
3-2-1	Couleurs réelles de l'image
1-3-5	Très intéressant pour discerner les limites lithologiques entre les roches
7-5-4	Le meilleur résultat à utiliser pour l'analyse géologique ; la bande 4 est concernée à la présence du fer, la bande 5 caractérise l'albédo général des matériaux, et la bande 7 celle des minéraux hydroxydes
7-4-1	Fournit le minimum de redondance des données, le meilleur résultat pour différencier les différentes unités des roches
2-5-4	Permet une bonne perception des structures géologiques
7-4-3	Bonne séparation entre les végétaux et sols nus, et aussi entre les différents niveaux d'activités de la végétation

Tableau 5 : Différentes compositions de 3 bandes du satellite Landsat 5 avec leurs caractéristiques. Les bandes sont présentées dans l'ordre rouge – vert - bleu [Lillesand et Kieffer, 1987]

Par exemple dans le bassin de l'Ebro (nord-est de l'Espagne) Arlegui et Soriano (1998) ont examiné différentes combinaisons des trois bandes de Landsat 5, les images présentant les meilleures qualités visuelles ont été obtenues avec une image en fausse couleur utilisant les bandes 2, 4 et 7. Cette combinaison avait déjà été utilisée avec succès dans des régions arides (White, 1993).

Toutes les autres combinaisons que celles présentées dans le Tableau 5 -notamment celles qui utilisent la bande 6 de l'infrarouge thermique- ont des caractéristiques non établies qui dépendent de plusieurs facteurs : état de la végétation, époque de la prise de vue, type de terrains etc. Les traitements sélectionnés dans cette étude sont ceux qui, sur une prise de vue particulière, font ressortir des détails de la morphologie plus nettement que sur d'autres traitements.

Les systèmes de télédétection s'intéressent aux deux catégories du rayonnement, celui absorbé ou réfléchi par la surface de la Terre et le rayonnement émis par la surface elle-même. Ces rayonnements sont décrits en **annexe 2**.

2.4. Les Modèles Numériques de Terrains (M.N.T.) et les variables morphométriques

Les valeurs de l'altitude topographique exprimées sous forme digitale sont connues sous le nom de modèle numérique de terrain (MNT). Le MNT est la représentation numérique du relief, interpolée à partir d'un échantillonnage de la surface. Il consiste en un maillage en deux dimensions qui contient les valeurs d'altitude (z) où $z=f(x,y)$. Il détermine une surface en trois dimensions où les nœuds de maillage s'alignent en lignes et colonnes selon les axes x et y .

Les MNT peuvent être obtenus à partir de données différentes : dans cette étude certains sont obtenus par photos aériennes et d'autres par les données cartographiques de l'IGN (BDTopo).

La qualité d'un MNT dépend essentiellement de sa précision et sa résolution : la précision indique l'écart qui existe entre les altitudes du MNT et les altitudes réelles. La résolution, par contre, indique la dimension des plus petits objets séparables et dépend de la densité des points du MNT par unité de surface (taille au sol des mailles formées par les points du MNT). On parle de "pas du MNT" quand on définit la taille de ces mailles, donc la distance entre les

points du MNT dans le sens horizontal. Il est évident que le choix d'un pas dépend de la densité des données échantillonnées au départ.

Des traitements morphologiques sont réalisés sur le M.N.T pour son exploitation. Les traitements de base mettent en exergue les différentes pentes et le taux de changement des pentes d'une surface topologique de terrain. De même l'application d'un ombrage au relief offre de la profondeur aux images topographiques. Ce sont donc essentiellement ces variables morphométriques qui sont modifiées dans les différents traitements et qui sont explicitées en annexe 3.

3. Les traitements

Pour la reconnaissance des alignements, trois documents de base ont été exploités lors de cette première phase de travail : deux images du satellite Landsat et un M.N.T. composite terre-mer

3.1. Images satellitaires

Un cliché Landsat réalisé le 23 juillet 1984 avec comme limites géographiques (Figure 20) :

- au sud, la plage d'Eze sur mer,
- à l'ouest, Saint-Laurent-du-Var,
- à l'est, Bordhigera,
- au nord, le Brec d'Utelle .



Figure 20 : Cliché Landsat 5 du 23 juillet 1984, traitements en fausses couleurs à partir des images des canaux 4,5 et 6. © Eosys – DEUC.

Un cliché Landsat réalisé le 6 février 1987 avec comme limites géographiques (Figure 21) :

- au sud, la côte,
- à l'ouest, Saint-Laurent-du-Var,
- à l'est, Ventimiglia,
- au nord, l'extrémité sud de Sospel.



Figure 21 : Cliché Landsat du 6 février 1987, traitement en fausses couleurs à partir des images des canaux 5, 3 et 1. © Eosys –DEUC.

Ces deux documents de base sont traités afin de faire ressortir au mieux les accidents morphologiques. Une vingtaine de traitements ont été réalisés sur chacun des clichés.

Les traitements retenus ont été les suivants :

- fausses couleurs à partir des images des différents canaux (canaux 1, 2 et 3 ; canaux 4, 5, et 6, canaux 1, 3 et 5, canaux 1, 2, 3 et 5) ;
- combinaison des canaux 4, 5 et 7 et leurs gradients en X ;
- combinaisons de ratios : canal 7/canal 5, canal 5/canal 4, et canal 3/canal 2, canal 4/canal 3, et canal 3/1.

3.2. M.N.T.

Pour étudier la région deux MNT composites à différentes échelles (régionale et locale) ont été réalisés.

3.2.1. MNT composite terre-mer à pas de 50 m

Il a été réalisé par l'assemblage de deux MNT (Figure 22) :

- un MNT terrestre au 1/25.000^e à partir des données altimétriques de l'Institut Géographique National (I.G.N) issues de photogrammétrie au 1/60.000^e. Ce MNT correspond à une zone de 200 km² restituée sous forme de grille à pas de 50 m ;
- un MNT marin à partir des données bathymétriques de l'IFREMER, SHOM et LHF qui, après traitement, ont été échantillonnées au pas de 50m.



Figure 22 : MNT au 1/25.000^e terre et mer calculé respectivement à partir des données altimétriques de l'Institut Géographique National (IGN) issues de photogrammétrie au 1/60.000^e et d'une compilation des données bathymétriques de l'IFREMER, SHOM et LHF © Eosys – DEUC.

Les limites géographiques du MNT composite au 1/25.000^e à pas de 50 mètres sont :

- au sud, à 15 km au large de la côte,
- à l'ouest, Saint-Laurent-du-Var,
- à l'est, la frontière italienne,
- au nord, le Brec d'Utelle.

3.2.2. MNT composite à pas de 10 mètres autour de Monaco

Ce MNT composite comprend trois MNT au 1/5.000^e.

Un MNT au 1/5.000^e de Monaco dérivé des données topographiques au 1/5.000^e.

Les limites géographiques du MNT au 1/5.000^e de Monaco à pas de 10 mètres sont :

- au sud à 10 km au large de la côte,
- à l'ouest, le Cap Mala,
- à l'est, la baie de Roquebrune,
- au nord, le Pas des Cabanelles.

Deux MNT au 1/5.000^e, réalisés à partir de deux triplets de photos aériennes de la mission IGN FD-06/250 de juin 1999, ont complété le premier traitement :

- Secteur 1 (nord) : photos 605, 606, 607 couvrant les villages de Peille, Gaudisart, les Camps, le Rivet, Segra, jusqu'aux environs de Ste Agnès.
- Secteur 2 (ouest) : photos 628, 629, 630 couvrant les villages de Drap, Sainte Thèle, Peillon, La Grave-de-Peille, Blausasc, La Vernéa jusqu'aux environs de Contes.

La jonction de ces deux secteurs se situe à l'ouest de Peille. Deux MNT au pas de 10 mètres ont été calculés pour ces deux secteurs. Le MNT du secteur nord couvre une superficie de 5,4 x 6 km. et celui du secteur ouest une superficie de 5,8 x 6,2 km.

Ces trois MNT ont été fusionnés avec le MNT au pas de 50 mètres extrait de la BDTopo d'IGN échantillonnée avec un pas de 10 mètres. Le MNT composite couvre ainsi une superficie de 11,5 x 15,8 km (Figure 23).

Avec le même objectif que pour le traitement des images satellitales, les traitements des M.N.T choisis sont ceux qui font ressortir au mieux la fracturation. L'ensemble de ces traitements résulte d'une combinaison de la pente, de la courbure de l'altitude et de l'ombrage du relief. Sur certains un calcul spécifique a été réalisé pour faire ressortir les crêtes et les réseaux de drainages.

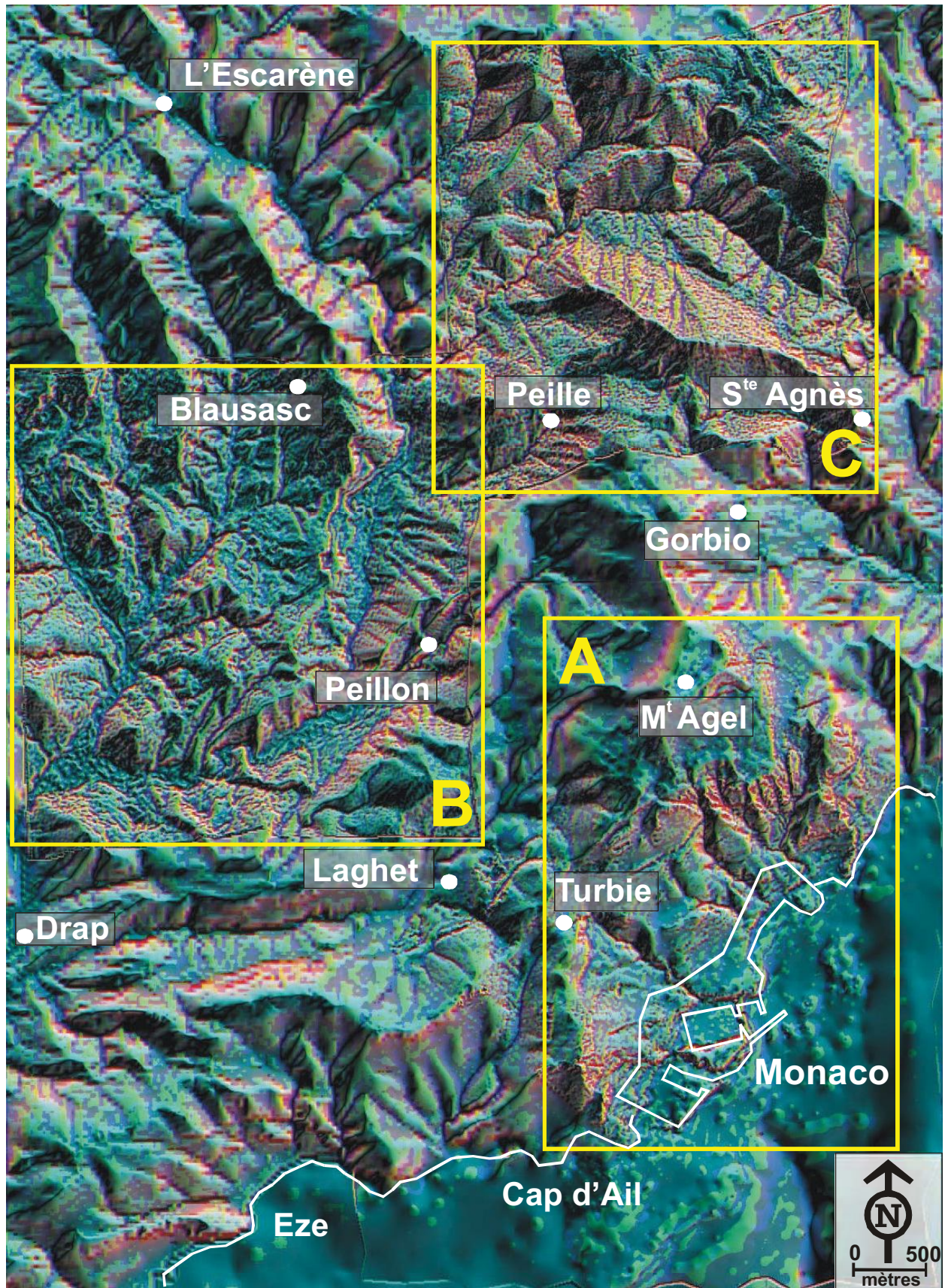


Figure 23 : MNT composite au 1/5.000^e réalisé à partir du MNT de Monaco dérivé des données topographiques à 1/5.000^e (A) et des MNT issus de deux triplets de photos aériennes de l'IGN, secteur nord (C) et secteur ouest (B); Ces trois MNT sont fusionnés sur le fond MNT au pas de 50m extrait de la BD-Topo d'IGN © Eosys – DEUC.

3.3. Remarques sur la qualité des documents bruts

La scène d'été est fortement affectée par la végétation et par la proximité de la mer qui crée des conditions de brume atmosphérique variables.

La scène d'hiver, plus riche en renseignements lithostructuraux et pétrographiques, est affectée à la fois par l'éclairage rasant du soleil qui crée des ombrages et par une couverture neigeuse sur les hautes montagnes.

Parmi ces traitements les combinaisons fausses couleurs se sont avérées les plus riches en informations pour ce qui concerne les accidents morphologiques.

Pour la bathymétrie, les traitements des données IFREMER présentent un bruitage qui masque des détails pouvant affecter la détermination de certains alignements mineurs. Cependant la morphologie du relief marin permet de tirer quelques enseignements utiles notamment dans la continuité des accidents terrestres en mer.

3.4. Procédure d'analyse des documents

L'objectif est de faire ressortir les principales directions structurales et de déterminer les alignements principaux.

Tous les alignements morphologiques sont tracés (Figure 24), sous Système d'Information Géographique, sur l'ensemble des images traitées (images satellitales ou M.N.T.). Seuls les alignements qui se retrouvent sur une majorité de traitements sont retenus (Hintigton et Raiche, 1978 ; Carrère, 1990). Cela permet de s'affranchir d'artefacts qui découleraient de traitements particuliers.

Le traitement statistique de ces alignements permet de les hiérarchiser suivant leur direction et leur longueur. Ce traitement se fera aux échelles régionale au 1/25.000° et locale au 1/5.000°.

Dans un premier temps la hiérarchisation des directions de ces alignements est présentée sous forme de rosaces bidirectionnelles par pas de 10°. Nous déterminerons trois groupes principaux avec par ordre décroissant d'importance : les directions majeures, secondaires et mineures. Deux classements de ces directions sont réalisés :

- pour l'ensemble de ces alignements (sans considération de leur longueur),
- par séries de longueurs supérieures à 2500 m, comprises entre 2500 et 1500 m et inférieures à 1500 m.

Ces grandes directions seront comparées avec celles de la déformation fragile finie (Gèze, 1968 ; Guardia et Ivaldi, 1996) et pourront ainsi valider la méthode.

Dans un second temps la hiérarchisation de ces alignements se fera suivant leur taille. Les alignements majeurs seront comparés aux accidents connus (Gèze, 1968) ou supposés actifs (Larroque *et al.*, 2001).



Figure 24 : Totalité des alignements observés sur le MNT composite terre-mer au 1/25.000^e sans aucune distinction de fraîcheur, de taille ni de signification tectonique © Eosys – DEUC.

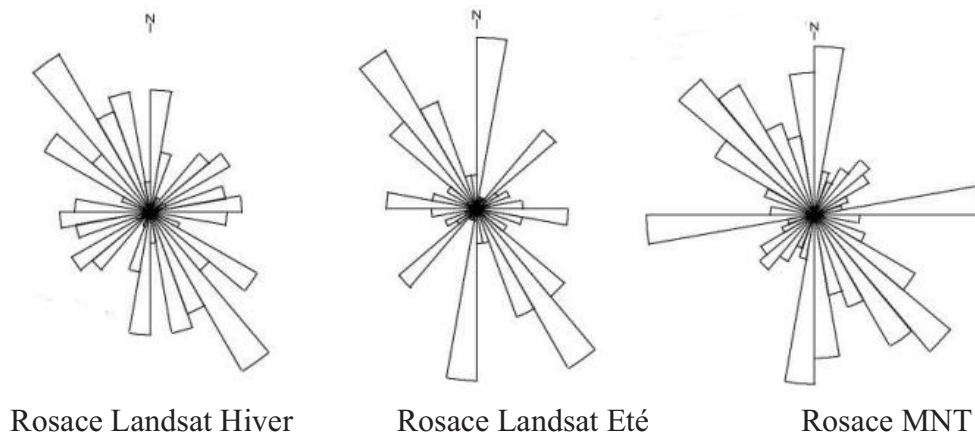
4. Résultats

4.1. Les familles d'alignement d'extension régionale

4.1.1. Domaine terrestre

4.1.1.1. Hiérarchisation des familles de directions de ces alignements

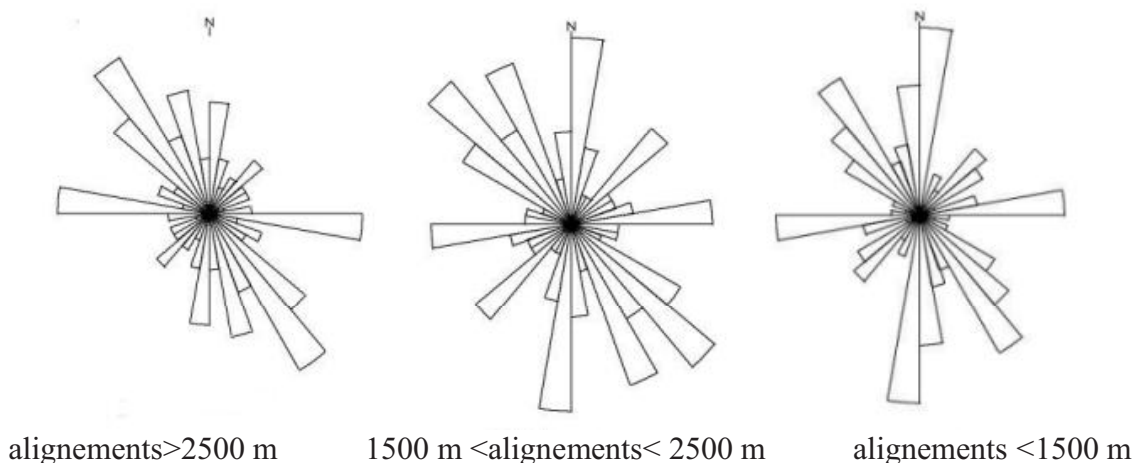
a) hiérarchisation de la totalité des structures linéaires sans considération de leur longueur



Documents	Direction majeure	Direction secondaire	Direction mineure
Landsat hiver	140-150° E	0-10° E ; 120-130° E	50-60° E
Landsat été	140-150° E	0-10° E	40-50° E
MNT	130-140° E, 80-90° E	0-10° E	140-150° E
Total TT	130-150° E ; 0-10° E	80-90° E	50-60° E

Figure 25: Directions principales observées sur chacun des documents (images satellitales et M.N.T.).

b) Hiérarchisation des directions des structures linéaires par séries de longueur



Séries en m	Direction majeure	Direction secondaire	Direction mineure
>2500	140-150° E	90-100° E	130-140° E
2500-1500	0-10° E	130-140° E	150-160° E
<1500	0-10° E	140-150° E	80-90° E

Figure 26 : Directions principales observées pour l'ensemble des documents par différentes classes de longueur.

Les trois directions principales d'alignements à l'échelle régionale sont N140-150°E, N0-10°E et E-O (Figure 25 - Figure 26).

Les directions N140-150°E, sont les plus importantes en nombre mais aussi en taille. Elles s'apparentent à la famille linéamentaire à laquelle se rattache l'accident Saorge-Taggia (accident principal situé, dans cette analyse, hors de notre zone d'étude). Ces directions sont particulièrement visibles dans les zones qui encadrent à l'est et à l'ouest le chaînon du Férion. Ce type d'analyse confirme donc la position dominante de cette direction structurante dans la région. Le chevauchement Rocca Seira-Ongrand situé à la partie interne de l'arc de Nice (Guardia et Ivaldi, 1996) fait partie de cette famille, toutefois aucune des failles actives reconnues (Larroque *et al.*, 2001) dans notre secteur d'étude n'a cette orientation. Au niveau de la déformation fragile les accidents de cette direction sont présents, pour la plupart, à l'Est de l'accident Monaco-Sospel-Breil-Saorge.

Les directions N0-10°E s'apparentent aux failles Monaco – Gorbio et Sainte Agnès - Sospel ainsi que celle de Peille - Cap d'Ail. Les directions subméridiennes visibles dans la totalité des Alpes-Maritimes sont bien marquées dans la terminaison sud-est du massif de l'Argentera – Mercantour c'est-à-dire en périphérie nord de notre site d'étude. Elles guident la morphologie et les alignements des principaux lacs d'altitude très récents comme ceux des vallées de la Valmasque et des Merveilles (Guardia et Ivaldi, 1996). Elles correspondent à un épisode de diaclasation de la croûte certainement récent compte-tenu de la fraîcheur des marqueurs de la déformation.

Les directions N90-100°E ne s'apparentent à aucune famille linéamentaire connue dans notre zone d'étude. Elles sont par contre connues plus au nord avec la zone décrochante du bord sud de l'Argentera qui s'étend de Belvédère à Carmo Gerbontina (Ivaldi *et al.*, 1986 ; Guardia et Ivaldi, 1996). Elles sont surtout mises en évidence sur le MNT, car les ombres portées sur les images satellitales par le relief fractionnent les alignements de cette direction. Concernant les directions des alignements majeurs (>2500m), ces directions N90-100°E ne représentent en nombre qu'une direction secondaire.

En résumé :

- les directions N140-150°E sont majeures dans la classe des alignements de longueur supérieure à 2500 m ;
- les directions N0-10°E sont dominantes dans les classes inférieures ;
- les directions N90-100°E apparaissent clairement comme des directions majeures sur le MNT et secondaires dans la classe des alignements supérieurs à 1500 m sur l'ensemble des traitements.

La méthodologie adoptée dans cette étude a permis de retrouver les principales directions structurantes connues de la zone d'étude. La cohérence des résultats valide cette méthodologie. La fracturation régionale est ainsi mise en évidence par la détermination des directions principales issues du traitement statistique de l'ensemble des alignements. Un classement quantitatif des directions structurantes a fait ressortir les directions principales d'alignements N140-N150°E. De plus cette méthodologie a mis en évidence l'importance des directions N90-100°E jusqu'à présent méconnues dans notre zone d'étude.

4.1.1.2. Hiérarchisation des principaux alignements en terme de longueur

Dans cette analyse, les successions d'alignements de même direction ont été regroupées en alignements d'ordre supérieur (Tableau 8). Ces alignements seront interprétés comme les alignements majeurs régionaux.

❖ image Landsat été

Direction en ° E	Longueur en m	Lieu
100	13163	Col Saint Michel - Sospel
150	10391	L'Escarène, Blausasc, Peillon
150	9229	Bendejun (vallée du Paillon)
0	8926	Linéament NS au sud de Sospel
110	8056	Oblique Italie
120	7732	Cros d'Utelle-Férion-Coaraze

❖ image Landsat hiver

Direction ° E	Longueur en m	Lieu
100	9421	Virgation du Paillon (Cantaron)
150	8165	Levens-Tourette Levens
120	7966	Cros d'Utelle – Férion - Coaraze
160	7604	Linéament NS au sud de Sospel
150	6558	L'Escarène, Blausasc, Peillon
145	6328	Bendejun (vallée du Paillon)

❖ MNT

Direction en ° E	Longueur en m	Lieu
100	10105	Col St Michel-Sospel
120	9854	Cros d'Utelle – Férion - Coaraze
165	6842	Linéament NS au sud de Sospel
130	5200	Menton - Baudon
150	4336	Levens – la Vésubie
90	4296	Linéament EW à Peille

Tableau 8 : directions et longueurs des alignements majeurs relevés sur les scènes Landsat (Eté, hiver) et le M.N.T.

Sur la scène Landsat Eté l'alignement le plus important, et un des mieux marqués, est celui qui s'étend du col Saint-Michel près de Duranus, dans la Vallée de la Vésubie, jusqu'à Sospel. Seule une partie de cet alignement N100°E est visible sur la scène Landsat hiver (la limite septentrionale de cette scène se situe plus au Sud que celle de l'été) et n'y est donc pas prise en compte. L'alignement le plus important de la scène Landsat hiver est celui de direction N100°E au niveau de Cantaron qui semble perturber les 2 branches du Paillon et qui se poursuit jusqu'à Beausoleil. Sur le MNT cette structure linéaire composée d'une succession de petits alignements y apparaît nettement. Il sera dans la suite de cette étude nommé alignement de Paillon-Monaco.

4.1.1.3. Etude de la réalité tectonique des principaux alignements régionaux mis en évidence

La réalité tectonique des principaux alignements y est ici discutée en fonction de la netteté des informations issues de cette analyse géomatique (Figure 36).

- a) le faisceau d'accidents N0-10°E composites Monaco – Sospel est bien connu dans la littérature comme étant l'accident sub-méridien majeur de la région marquant la limite orientale de l'arc de Nice. Cet accident est visible mais peu marqué sur les diverses images et MNT traités. Aucune sismicité n'a été enregistrée à ses abords contrairement à l'accident N40°E Breil-Saorge situé dans sa continuité septentrionale (Hoang Trong *et al.*, 1987).
- b) Le double accident Peille – Cap d'Ail et Peille – Laghet – Eze est également connecté dans sa partie septentrionale au grand linéament N40°E Roya – Bévéra – Basse vallée du Paillon (dont fait partie l'accident Breil-Saorge) par une succession de failles (Ritz, 1992).

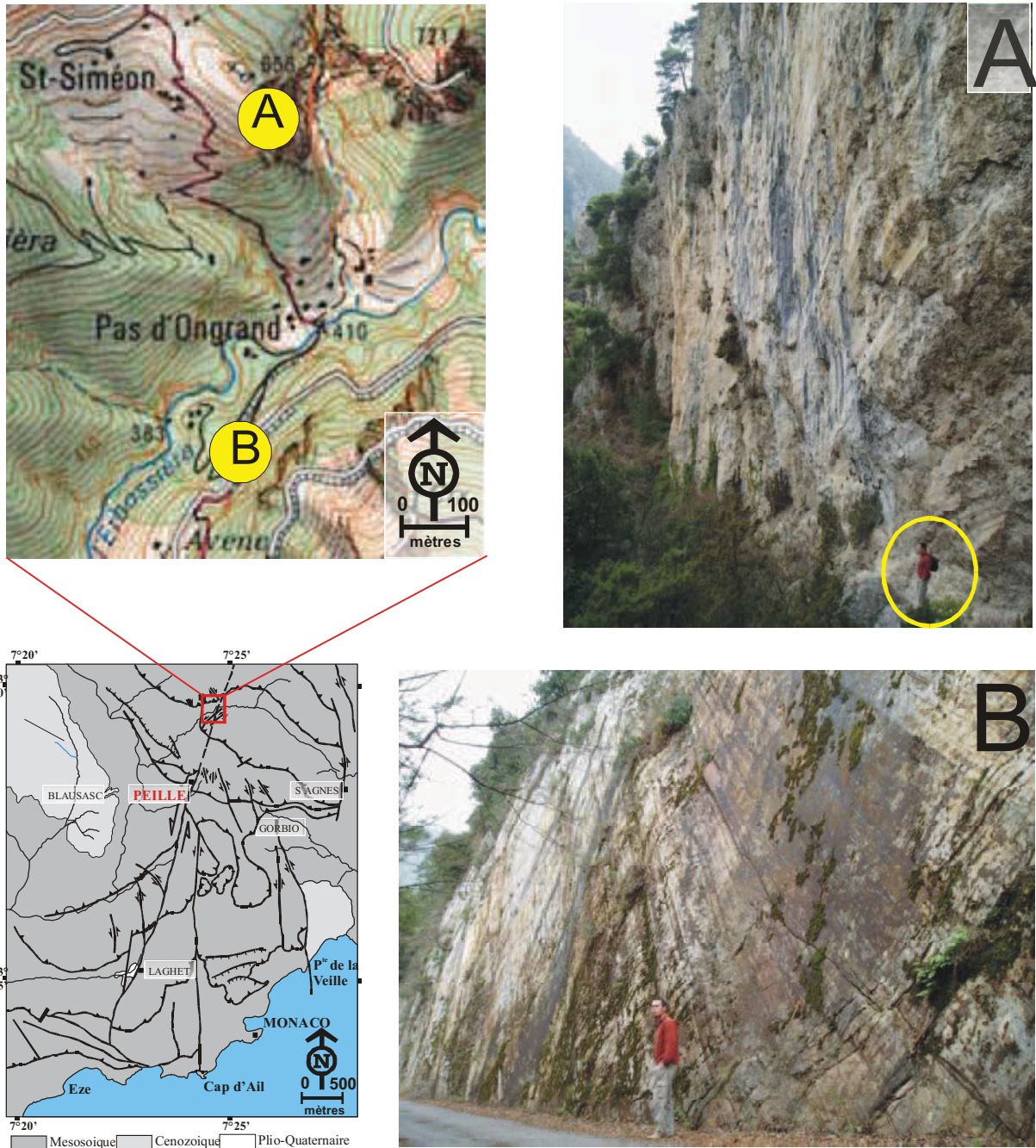


Figure 27 : Imposants miroirs de faille dans le prolongement nord supposé de l'accident de Peille-Laghet dans le vallon de la source du Rivet (A) et près de Virounours (B).

Ces accidents sont visibles mais peu marqués sur les différents documents traités. Rappelons que l'amas de séismes de la crise sismique de Blausasc se trouve à l'emplacement de l'actuel cours du Paillon de 2 à 3 km à l'Ouest de ces accidents (Courboulex, 2003). La continuité supposée de cet accident au nord de Peille (Charreau, 2002) n'est pas visible sur les différents documents. De même les imposants miroirs de faille de Virounours et des gorges de La source du Rivet (Figure 27) y sont invisibles. Nous avançons comme hypothèse que ces accidents représentés par ces miroirs de faille pluridécamétriques n'ayant pas joué récemment, leur environnement immédiat n'a plus été perturbé. La conséquence est que la trace de ces « vieux » accidents a été gommée du paysage et est invisible par les analyses géomatiques.

c) l'accident N120-140°E Cros d'Utelle – Férion – Coaraze, bien connu dans la littérature (Gèze, 1968) est l'accident le plus marqué de tout le secteur. Sa terminaison sud-est ne semble pas se prolonger en direction de Monaco ni au niveau de l'observation des alignements sur les images satellitales et les MNT ni au niveau de la déformation fragile finie.

d) les trois alignements N130-150° E guidant le réseau hydrographique du Paillon.

- L'alignement cime de la Blanchière – Blausasc – Peillon. Dans sa partie Nord il coïncide avec le ruisseau de Fighière. Il prolonge ensuite le flanc oriental du synclinal de Contes puis il rejoint une faille mineure au niveau de Peillon. Cette faille mineure coupée dans son extrémité orientale par la faille de Peille-Laghet fait également partie de l'accident actif N130°E Contes – Peillon mis en évidence lors de la crise sismique de Blausasc en décembre 2000 (page 42). Ces deux accidents qui encadrent le synclinal de Contes font partie de la même famille linéamentaire N130-150°E et peuvent donc être considérés comme actifs. Toutefois leur extension géographique limitée ne semble pas pouvoir être à l'origine d'un séisme de magnitude importante.
- L'alignement Bendejun – Contes, sur lequel est installée la branche du Paillon de Contes, influence la morphologie mais n'est pas reconnu comme accident tectonique.
- L'alignement « Levens – Tourette-Levens » sur le côté Ouest de la chaîne du Férion est formé d'une succession de petites failles (Gèze, 1968). Il est situé 2 km à l'Est de l'accident N150°E de St Blaise – Aspremont dont l'activité a déjà été démontrée (Tableau 3). La remobilisation de ce dernier pourrait entraîner celle de l'alignement « Levens – Tourette-Levens ».

e) Les directions EW sont actives à toutes les époques dans les Alpes maritimes franco-italiennes, et ce depuis le permien. Elles ont influencé la paléogéographie, la sédimentation et la tectogénèse notamment la mise en place des nappes alpines au cours du Paléogène. L'accident le plus connu est localisé en bordure sud de l'Argentera entre Belvédère et le Carmo Gerbontina (Ivaldi et Guardia, 1986, 1987 ; Guardia et Ivaldi, 1996). Deux alignements de même direction ont été individualisés dans notre zone d'étude aux latitudes respectives de Sospel et de Monaco.

*** l'alignement N100°E Col St Michel - Sospel**

L'analyse des traitements des images satellitales et du M.N.T. révèle l'existence d'un important alignement orienté en moyenne N100°E entre le Col St Michel et Sospel. Cet alignement est situé, au plus près, à 16 kilomètres de Monaco et sa partie visible a une longueur de plus de 20 kilomètres. Il n'est pas répertorié comme accident tectonique dans la littérature géologique actuelle.

Il peut s'agir d'un alignement sans valeur géologique ou d'un accident tectonique à jeu ou rejeu récent, marquant fortement la morphologie sans pour autant décaler nettement les structures géologiques. L'objectif est ici de lever cette incertitude.

Sur les photographies aériennes au niveau du Col Saint Michel sont visibles deux types d'accidents : d'une part, le chevauchement de la Rocca Seira, orienté N155°E et d'autre part, des accidents plurihectométriques orientés N90° à N100°. Parmi ces derniers figurent :

- l'accident de Roccasparviera – Auriéras – col St Roch
- la faille du col Saint Michel très visible dans le paysage et qui recoupe de nombreuses structures à l'emporte pièce (Diracca, 1999).

Ces accidents, situés quelques centaines de mètres au Nord de l'alignement N100°E Col Saint Michel - Sospel, font probablement partie du même couloir de failles.



Figure 28. Partie occidentale de l'alignement N100°E Col Saint Michel – Sospel marquant fortement la morphologie sur image Spot.

L'alignement N100°E est décelable d'Ouest en Est dans les secteurs suivants (Figures 28-29)

- son passage au Col de Huesti (Nord du Cros d'Utelle) est assez net,
- la Vésubie a son cours descendant NS dévié vers le Sud Ouest à son passage,
- le prolongement de cet alignement est visible dans la partie inférieure du vallon de Duranus et ce jusqu'au Collet de St-Esprit puis jusqu'à la tête de Miamande à environ 500 m au Sud du col Saint Michel,
- un interfluve séparant les vallons de Campon au Nord et de Villard au Sud marque sa présence, puis il se poursuit jusqu'au Paillon de Contes qui présente une virgation de son cours vers l'Ouest à son passage,
- cette structure linéaire est bien visible des deux côtés du col de Savel puis jusqu'au village de Lucéram,
- à 1 km environ au nord-ouest du col de Braus, cet alignement apparaît clairement en décalant toujours vers l'Ouest la partie Sud de la crête de Montauri (Figure 30), puis se prolonge jusqu'au bassin Est-Ouest de Sospel, avant de disparaître progressivement en direction de l'Est.



Figure 29 : Tracé de l'alignement N100°E à partir de l'analyse des images satellitales sur fond topographique de la carte IGN au 1/25.000^e.

L'alignement N100°E du "Col Saint Michel - Sospel" marque donc la morphologie par des déviations de cours d'eau (Vésubie, Paillon de Contes), par des cols (collets col de Huesti, Saint Esprit, Savel) et par des ruptures de pente importantes qui sont l'indice d'une réalité tectonique.

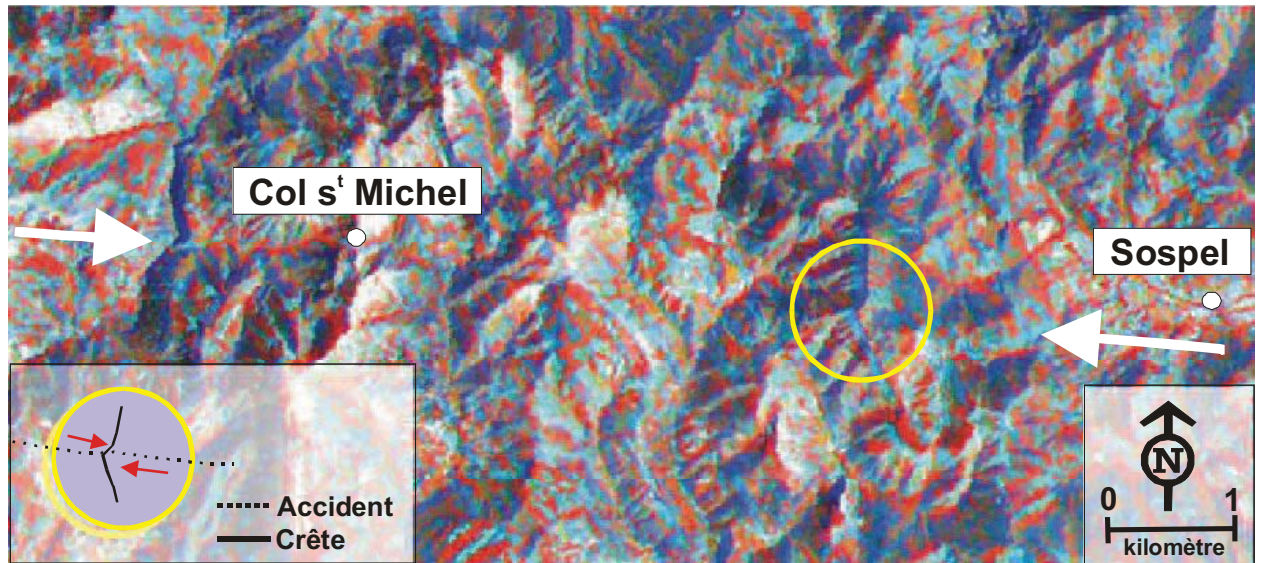


Figure 30 : Mise en évidence du décalage de la crête de Montauri au passage de l'accident Col Saint Michel – Sospel sur traitement d'image Landsat © Eosys –DEUC.

L'analyse structurale à l'échelle cartographique permet de faire un certain nombre d'observations :

D'Ouest en Est, l'alignement N100°E est souligné par les caractères géologiques suivants :

- un affleurement de poudingue Plio-Quaternaire de direction moyenne Est-Ouest situé à un peu plus de 1000 m d'altitude au collet d'Huesti (Vernet 1981; Geze,1968),
- des terminaisons brutales d'écailles (terminaison Nord-Est de l'écaille de Castellar entre Vésubie et Férion, limite des écailles des rochers de Miamande et de l'Autaret plus à l'Est, enracinement méridional de la Rocca Seira).
- individualisation en partie due à l'érosion du synclinal du Savel, à cœur Paléogène, par rapport au synclinal de Peira-Cava.

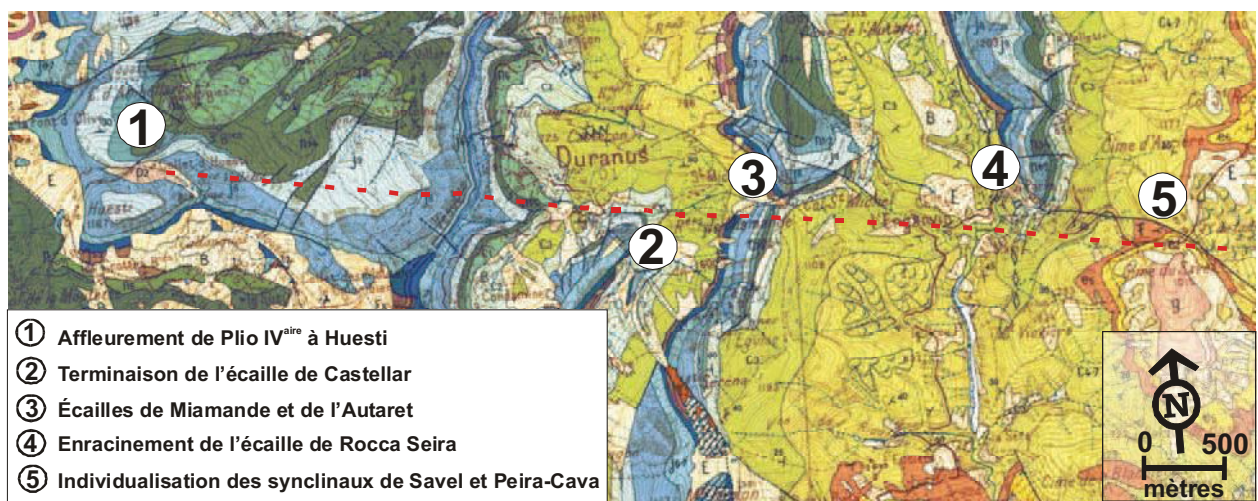


Figure 31 : Tracé de l'alignement N100°E sur carte géologique au niveau du Col Saint Michel (fond cartographique : feuille Menton – Nice 1/50.000°, Gèze, 1968)

A l'échelle de l'affleurement, l'alignement N100°E du "Col Saint Michel - Sospel" est souligné par d'importantes ruptures de pentes vers le Nord et vers le Sud et également par de très nombreuses failles de même direction. Citons parmi elles, les failles décamétriques à hectométriques qui découpent à l'emporte pièce le front de l'écaïlle de la Rocca Seira, et en direction de l'Est les failles qui marquent la terminaison nord du synclinal du Col de Braus.

Des indices de terrain ont été recherchés le long de cet accident, notamment dans les terrains éocènes marneux (Figure 32). Ces terrains souples et facilement érodables ont tendance à amortir les failles (exemple la faille Monaco-Sospel amortie dans les marnes Crétacé du bassin de Gorbio). Si des indices géologiques sont présents, ils attesteraient d'une faille récente et probablement active.

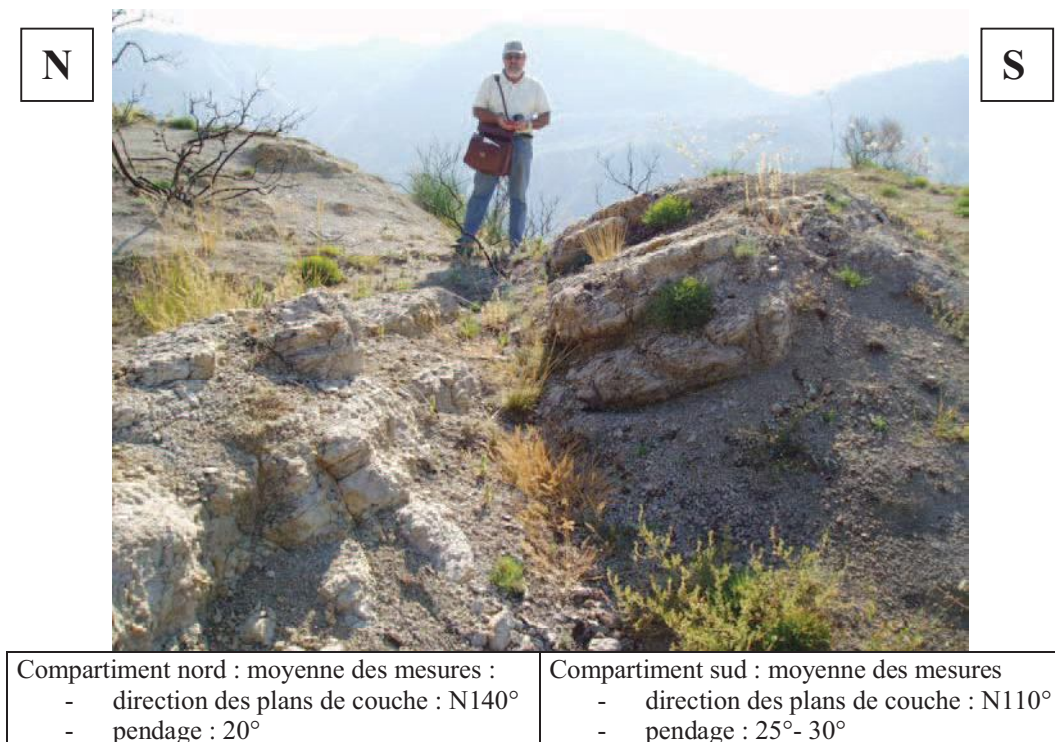


Figure 32 : Passage d'un accident Est-Ouest dans les marnes grises du Priabonien supérieur à l'Ouest de Lucéram avec décalage du compartiment nord par rapport au sud. La crête de Montauri est visible à l'arrière plan.

Plusieurs indices ont été observés :

- des traces de fracturations qui se placent sur cette ligne de vallon, sans cassure mais avec des inflexions très nettes ;
- des décalages de bancs et des affaissements du compartiment sud par rapport au compartiment nord sur une ligne globalement Est – Ouest.

Parmi les indices présents, des accidents EO ont été relevés alors qu'ils sont peu répandus à cette latitude dans l'arc de Nice. De plus les directions régionales N150°E dextre et N50°E senestre d'accidents sont fréquemment perturbées par ces accidents Est – Ouest. Vers Lucéram sur le tracé de cet alignement, de nombreux glissements de terrains ont été observés (Comm. orale Perez, 2004) et pourraient trouver leur origine dans les ruptures de pentes dues à

cet accident. Ces traces même ténues peuvent marquer un accident plus profond dont le jeu récent offre quelques indices de surface même dans des terrains souples.

Le paléojou de cet accident déduit de l'analyse morphostructurale est dextre dans la grande majorité des cas.

La structure linéaire N100°E révélée par l'analyse des images satellitales et du M.N.T. présente des caractères morphologiques, structuraux et microstructuraux qui permettent de conclure à sa nature tectonique.

*** L'alignement N100° Paillon - Monaco**

Moins étendu et moins marqué que le précédent, il débouche dans sa partie orientale sur Monaco et mérite toute notre attention.

L'alignement est assez visible sur les images Spot et Landsat, ainsi que sur le M.N.T au 1/5.000°. Contrairement à l'accident "Col Saint Michel - Sospel" qui apparaît comme continu, l'alignement "Paillon - Monaco" se présente comme une succession de segments disjoints mais alignés suivant une direction moyenne N100-110°E qui marquent peu la morphologie (Figure 33). Seul le cours du Paillon d'orientation EW à l'Ouest de Ste Thècle se calque sur cet accident. Ces segments se succèdent depuis la confluence des Paillon de Contes et de l'Escarène aux lieux dits "Pont de Peille - La Condamine" jusqu'à la Turbie au niveau du col de Guerre.

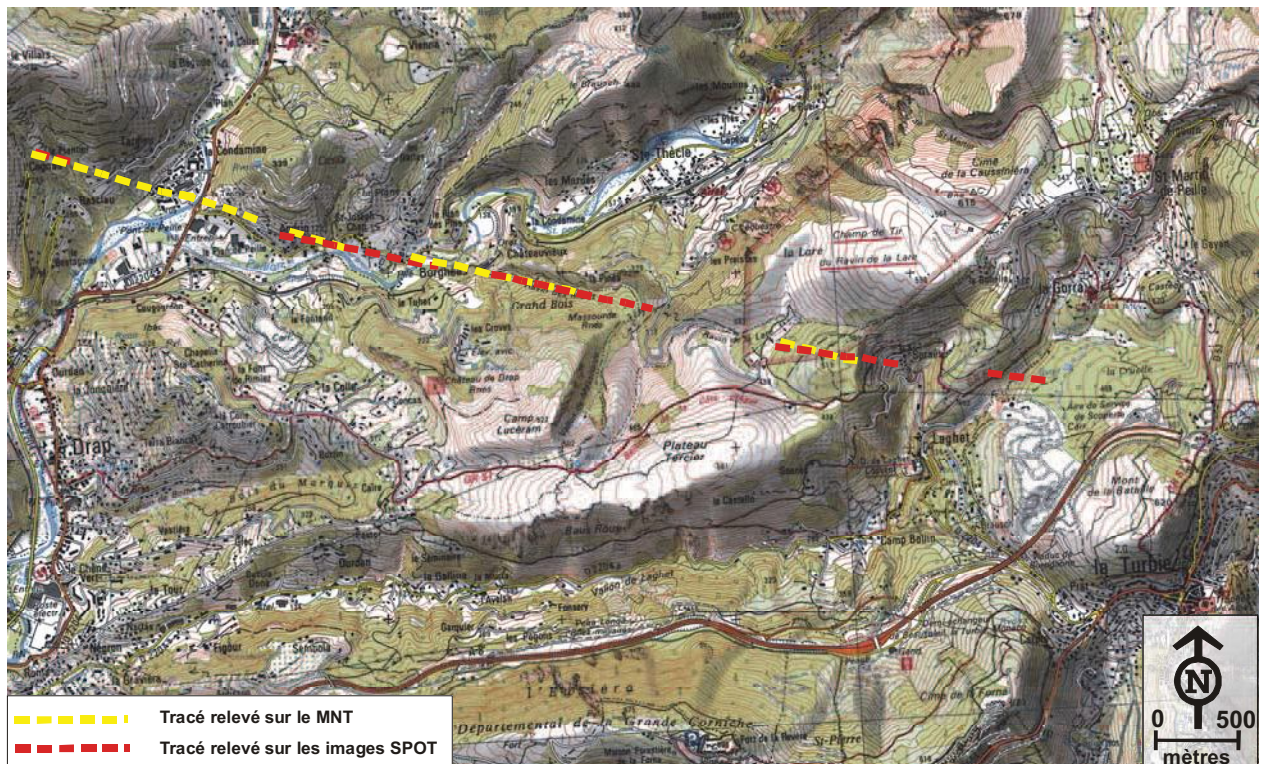


Figure 33 : Localisation de l'alignement N100°E "Paillon-Monaco" sur carte topographique I.G.N. Menton-Nice au 1/25.000°.

La continuation de l'alignement en direction du bassin versant de Monaco est moins nette, hormis sur le versant méridional du Mont Agel où un segment plurihctométrique, légèrement décalé vers le nord, y est nettement visible sur le M.N.T. (Figure 34).

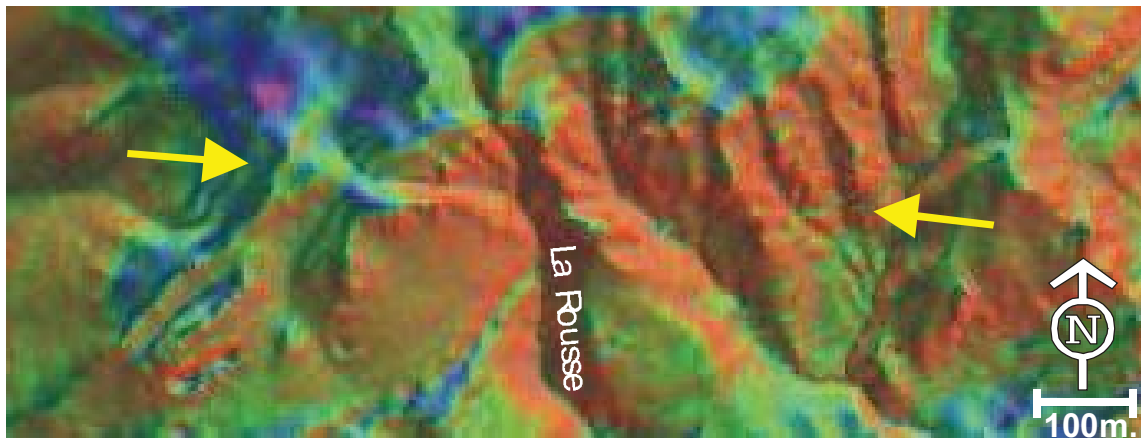


Figure 34 : Vallon de la Rousse et talwegs NS du versant méridional du Mont Agel perturbés par le passage de l'extrémité orientale de l'alignement Paillon-Monaco N100°E sur le MNT au 1/5.000° © Eosys-DEUC.

Ce segment correspond à la branche Ouest de la partie amont du vallon de "La Rousse" au lieu dit du "Pont des demoiselles". Il s'agit d'un accident qui affecte les écaïlles frontales situées sous le chevauchement du mont Agel (Figure 35).

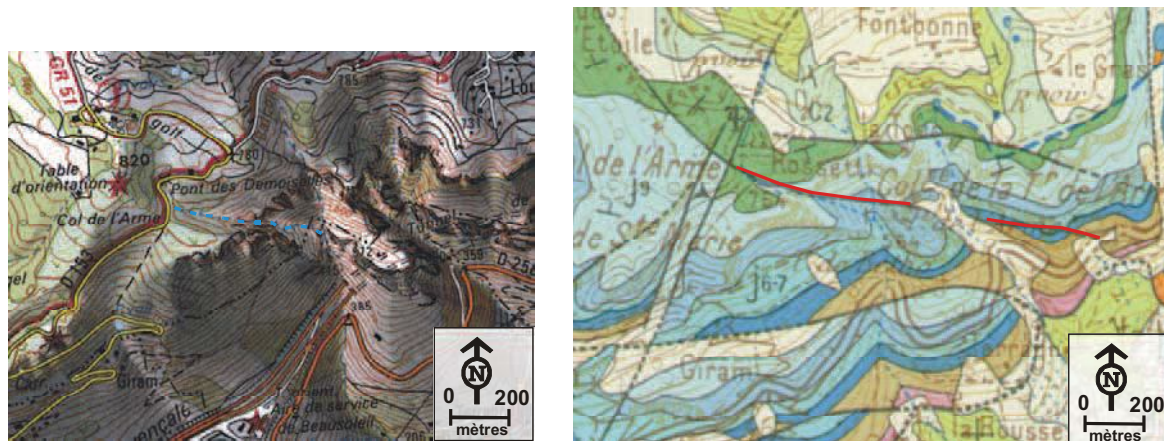


Figure 35 : L'accident N100°E du Vallon de La Rousse sur le versant méridional du Mont Agel sur fond de carte topographique (IGN Menton-Nice au 1/25000° et sur fond de carte géologique (feuille Menton-Nice 1/50.000°, Gèze, 1968).

A l'échelle cartographique, l'alignement "Paillon - Monaco" n'affecte qu'assez peu les structures géologiques qu'il recoupe, contrairement à l'accident du "Col Saint Michel - Sospel".

Nous pouvons toutefois relever d'est en ouest :

- la faille transverse du vallon de la Rousse,
- la faille du lieu dit "La Gorre" qui affecte la terminaison Nord de l'écaïlle du mont Bataille,
- l'existence des brèches de "Spraès" attribuées au Plio-Quaternaire à son intersection avec l'accident de "Peille - Laghet",

- la présence d'une faille N110°E au niveau du tunnel de La Condamine. Cette faille pourrait être à l'origine de l'important ressaut de près de 10 m de la terrasse alluviale mis à jour par les données des sondages réalisés pour l'étude géologique de ce tunnel (Ivaldi, 2003).

Les études morphostructurales, cartographiques et microstructurales démontrent que l'alignement mis en évidence par analyses toponumériques et satellitales a une valeur tectonique. Cependant les marqueurs morphologiques et tectoniques de cet accident sont d'apparence moindre que leurs homologues des accidents "Col Saint Michel - Sospel" et "Belvédère Carno Gerbontina".

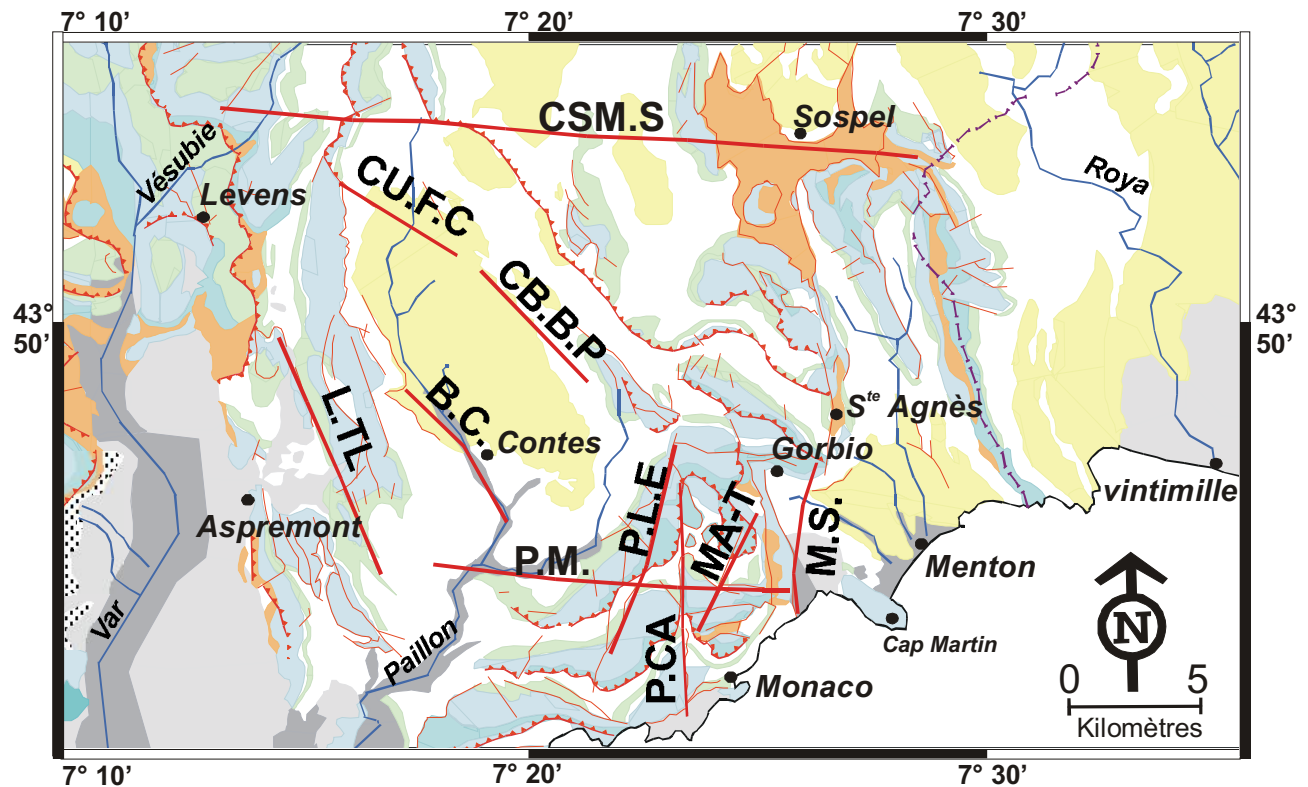


Figure 36 : Principaux alignements reportés sur carte géologique au 1/50.000° : CU.F.C : Cros d'Utelle - Férier - Coaraze ; L.TL : Levens-Tourette - Levens ; B.C : Bendejun - Contes ; CB.B.P Cime de la Blanchière - Blausasc - Peillon ; P.M. : Paillon-Monaco ; P.L.E Peille - Laghet - Eze ; P.CA Peille - Cap d'Ail ; MA-T : Mont Agel - Turbie ; S.D : Sainte Devote ; M.S : Monaco - Sospel ; CSM-S : Col Saint Michel - Sospel.

4.1.2. Domaine marin

La qualité du MNT marin ne permet pas une analyse fine des alignements. On peut tout de même observer d'importantes vallées NS qui prolongent les zones de fracturation NS rencontrées à terre et qui coupent les vallées NO-SE. La zone de fracturation de Monaco – Sospel, limite orientale de l'arc de Nice, se poursuit très nettement au travers d'un canyon sous-marin (Figure 37).

Les données bathymétriques proches (Campagne Pirelli, 1995) mettent en évidence un canyon très prononcé d'orientation N140°E. Le manque de données au sud et à l'est de ce canyon ne permet pas de conclure sur son comportement à l'approche de la continuité marine de l'accident Sospel-Monaco.

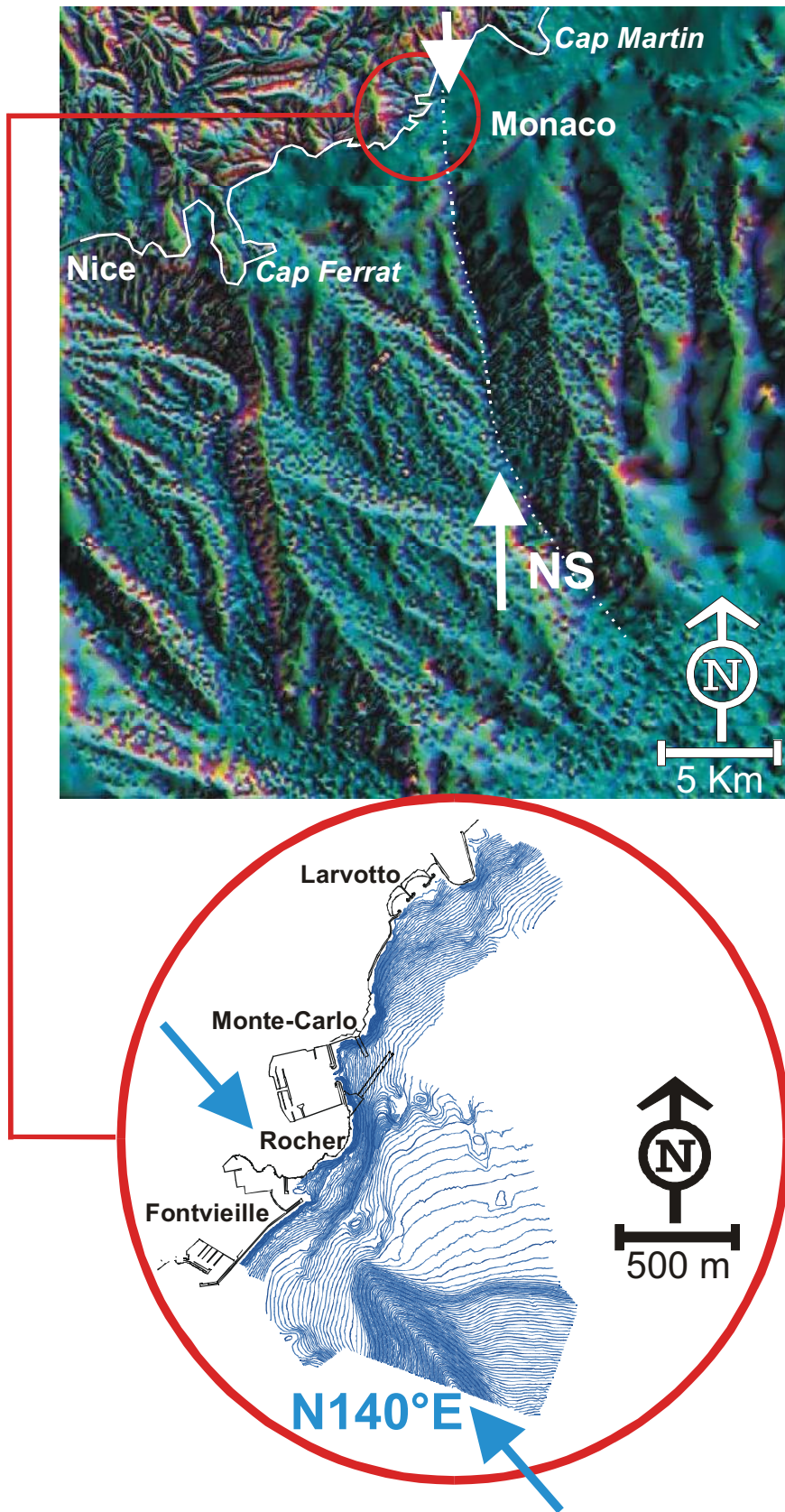
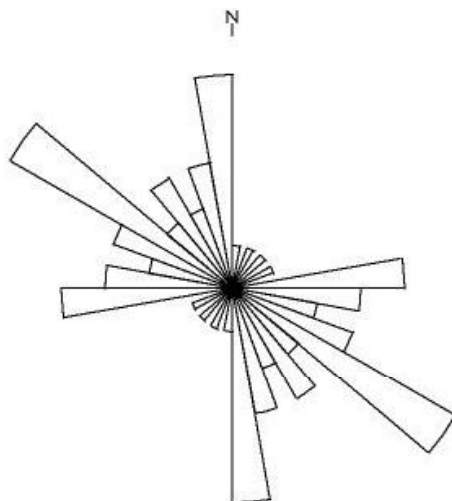


Figure 37: Les canyons sous-marins, le NS dans le prolongement de l'accident sub-méridien Sospel-Monaco mis en évidence sur le MNT marin – © Eosys – DEUC, et le N140°E très prononcé au large de Fontvieille (Campagne Pirelli, 1995).

Les directions d'alignements principales N-S et NO-SE sont identiques à celles du domaine terrestre. Elles présentent le même classement (Figure 38) que celles rencontrées à terre. Elles sont essentiellement dictées par l'orientation des vallées sous-marines.



Documents	Direction Majeure	Direction secondaire	Direction mineure
MNT marin	140-150° E	170-180° E	80 - 90° E

Figure 38 : Directions principales d'alignements observés sur le M.N.T marin au 1/25.000°.

L'analyse du MNT a mis en évidence, dans le secteur d'étude, deux domaines distincts avec à l'Ouest les vallées NO-SE et à l'Est des vallées NS, reconnues jusqu'au large de San Remo (Chaumillon, 1994). Cette frontière, marquée par un canyon dont la continuité est l'accident Sospel-Monaco confirme l'importance structurale au niveau régional de cet accident majeur. Nous avançons l'hypothèse que le canyon N140°E beaucoup plus prononcé, et appartenant à la famille de vallées NO-SE, pourrait signer la présence d'un accident plus récent que la prolongation de l'accident NS Sospel-Monaco. Cette hypothèse devrait être confirmée par l'obtention de données bathymétriques supplémentaires. En conclusion, la Principauté de Monaco est située à terre, comme en mer à la frontière de deux domaines structuraux bien délimités.

4.2 . Les familles d'alignements d'extension locale

La fracturation crustale du site de Monaco a été établie à partir de l'analyse conjointe des images satellitaires et d'un M.N.T. composite terre - mer au 1/5.000° (Figure 39).

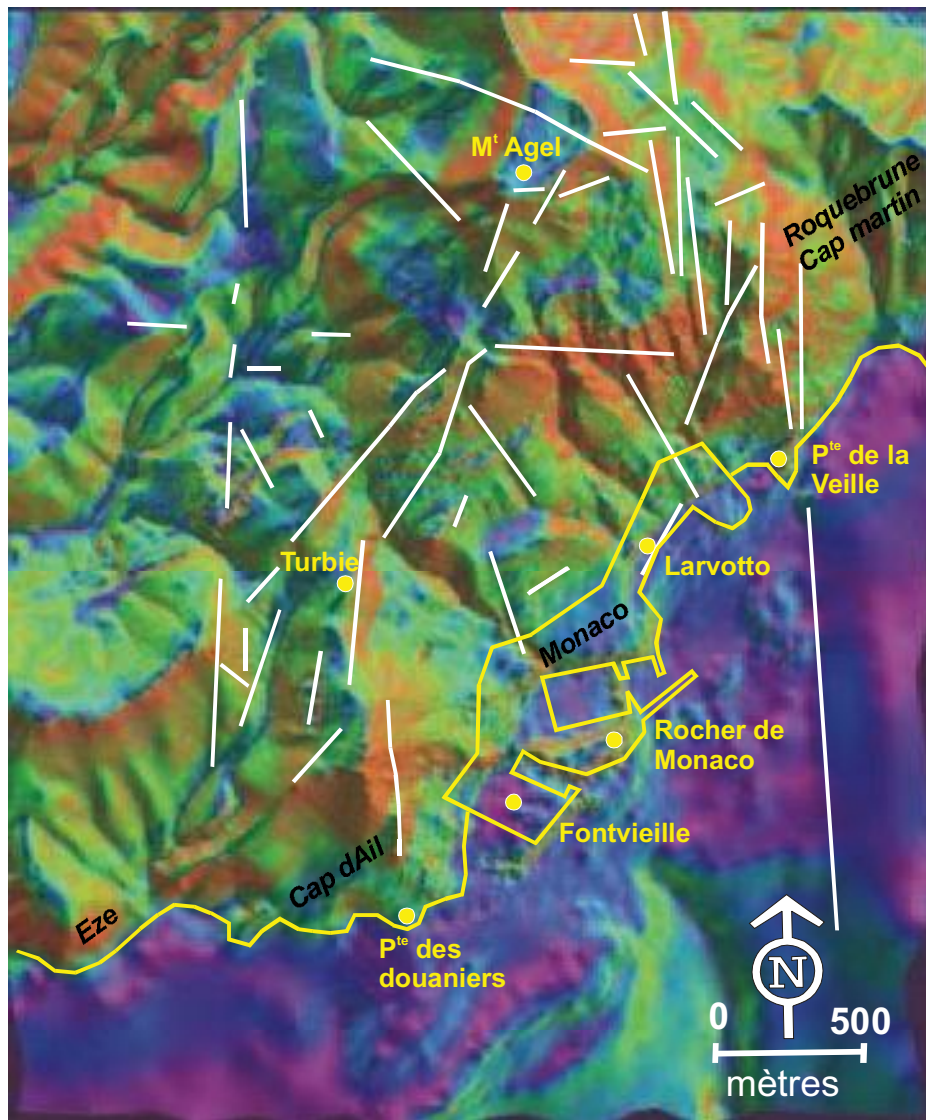


Figure 39 : Les alignements tracés sur le traitement MNT au 1/5.000^e du Bassin Versant de Monaco
© Eosys – DEUC.

- Les directions NS dominent la fracturation du site de Monaco (Figure 40) contrairement à la fracturation régionale. Ceci s'explique par la présence de deux directions structurantes majeures sur le secteur de Monaco : à l'est de Monaco, la zone de fracturation Monaco – Gorbio, et à l'ouest l'accident Cap d'Ail – Peille. L'accident principal en terme de longueur est la zone de fracturation de Monaco – Gorbio qui semble se prolonger en mer d'après le MNT marin.
- La direction N40°E est représentée par une faille kilométrique qui découpe les structures écaillées du bassin versant de Monaco depuis le Mont Agel jusqu'à la Turbie avec une continuité probable sur Cap d'Ail. Cette faille pourrait être à la fois un relais entre les deux accidents de Sospel – Monaco et de Peille- Cap d'Ail et aussi une faille satellite du grand linéament Roya – Bévéra – basse vallée du Paillon. La faille du Larvotto appartient également à cette famille. Elle est interrompue par l'accident nord-sud de Monaco – Gorbio.