

VILLEFRANCHE-SUR-MER ET SON ENVIRONNEMENT NATUREL : CADRE GÉOLOGIQUE ET DOMAINE MARIN

Villefranche-sur-Mer: its natural, geological and marine environment

Jean MASCLE¹, Laurent CAMÉRA², Alexandre DANO³, Sébastien MIGEON⁴

Résumé.- Villefranche-sur-Mer et sa rade sont enserrées au sein de formations géologiques à dominante calcaire datées du Jurassique moyen au Crétacé supérieur (entre 165 et 80 millions d'années). Ces calcaires furent jadis déposés sur la marge continentale d'un océan, aujourd'hui disparu mais qui a donné naissance aux Alpes, et se situait au nord. Ultérieurement, voici 35 millions d'années, les Alpes méridionales furent découpées quasi perpendiculairement par une cassure continentale ou « rift » qui a progressivement abouti à la création d'un nouvel espace océanique, le bassin ligure, élément de l'actuelle Méditerranée occidentale. À cette époque le site qu'occupe Villefranche se situait toujours en bordure d'un océan mais baignant alors la région le long de sa bordure méridionale. Voici 5-6 millions d'années, à la suite d'un abaissement temporaire, mais considérable du niveau de la Méditerranée, la région qu'occupe l'actuel site de Villefranche se situait en moyenne montagne (vers 1 500 m d'altitude). Enfin au cours du Quaternaire récent, vers -20 000 ans pendant le dernier stade glaciaire, le domaine qui correspond maintenant à la célèbre rade de Villefranche était une vallée aérienne vraisemblablement alimentée par plusieurs torrents s'écoulant dans les masses calcaires du Jurassique/Crétacé et sans doute soumises à des processus de « karstification »*. La remontée progressive du niveau de la mer, accompagnant la déglaciation, a peu à peu abouti à ennoyer cette vallée et à façonner le paysage actuel.

Mots-clés : géologie, Alpes, Méditerranée.

Abstract.- Villefranche, and its well-known marine bay, lies in the middle of geological formations mainly made of massive limestone of Jurassic to Cretaceous ages. These rocks were deposited, between 165 and 80 my ago, as relatively shallow calcareous marine sediments on the shelf and upper slope of the continental margin of an oceanic space that has progressively vanished concurrently with the ongoing creation of the Alps chain. In Oligocene times, about 35 my ago, the southern domains of the Alps have been truncated, almost orthogonally, by a rift system which later one led to the creation of a new oceanic space, the Ligurian oceanic basin, itself parts of the Western Mediterranean Sea. During this time span, and still today, the area of Villefranche lies on the upper parts of a new continental margin, the steep Ligurian continental margin. However during a short period of time (roughly between 6 and 5.3 my ago) the sea level of this new oceanic space lowered drastically, on the order of 1500m. By that time the area of Villefranche was temporarily located along an exposed mountain slope, submitted to strong erosion and carbonates dissolution (karst); the marine bay was then a deep aerial valley suddenly submerged by the sea level rise. In Quaternary time, particularly during the last glacial stage (around - 18.000y), when the sea level was at about -110/120m, the bay was exposed and acting as a shallow valley for more or less permanent torrents.

Keywords: geology, Alps, Mediterranean Sea.

1. Directeur CNRS émérite, Président de l'ASPMV, mascle.jean@gmail.com

2. Docteur en Géologie Marine, laurent.camera@gmail.com

3. Ingénieur CNRS, Géoazur, dano@geoazur.unice.fr

4. Professeur à l'Université P. et M. Curie de Paris et chercheur à Géoazur, migeon@geoazur.unice.fr

* de karst, région de Slovénie où des processus de dissolution des calcaires sous l'action de l'eau, et conduisant à des morphologies spécifiques, ont été décrits pour la première fois.

INTRODUCTION

Situées entre le Cap de Nice et le Cap Ferrat, la cité de Villefranche-sur-Mer et sa rade (fig. 1) offrent un paysage directement hérité de la formation de la chaîne alpine, voici plusieurs millions d'années (Ma). Il n'est donc pas surprenant que la ville soit surmontée, au nord le long de la grande corniche, par de grandes falaises façonnées dans des calcaires massifs, et à l'est comme à l'ouest, bordée par les barres rocheuses, également calcaires, du Cap Ferrat et du Cap de Nice. Ces affleurements rocheux, remontant à près de 180 millions d'années pour les plus anciens et originellement déposés dans un océan précédant la formation des Alpes ont, jusqu'au milieu du siècle passé, été exploités en carrières dont on remarque d'ailleurs les cicatrices le long des routes en corniches comme le long de la côte des deux caps. Outre à la formation des Alpes, au nord du territoire, c'est aussi à l'ouverture de la Méditerranée occidentale, au sud, que l'on doit le cadre géologique singulier de Villefranche-sur-Mer. Ainsi, alors que le point culminant des Alpes maritimes se situe au sein du massif du Mercantour à plus de 3 100 m (à environ une soixantaine de kilomètres au nord de la ville), la profondeur de la mer baignant la région atteint, à 20 km au large de la rade, -2 200 m ; il existe donc dans cette région une dénivelée, insoupçonnable, de près de 5 500 m, plus importante que l'altitude du Mont Blanc, en moins de 80 km !

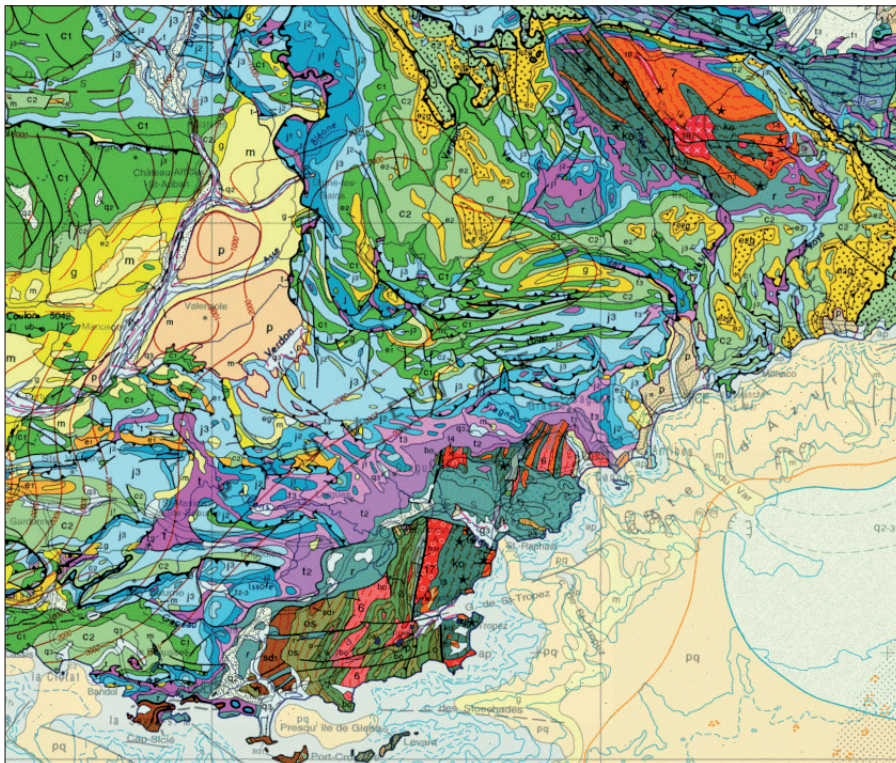


Fig. 1 : Sur une vue aérienne (Google Earth) ont été surlignées (en bleu) des principales barres calcaires qui surplombent le site de Villefranche-sur-Mer et qui parcourent le Cap Ferrat et le Mont Boron. La flèche rouge indique le sens de la compression alpine active il y a encore quelques millions d'années.

On a Google Earth view of the area of Villefranche and Cap Ferrat the various massive limestone cliffs have been underlined. The red arrow indicates the recent alpine compression direction.

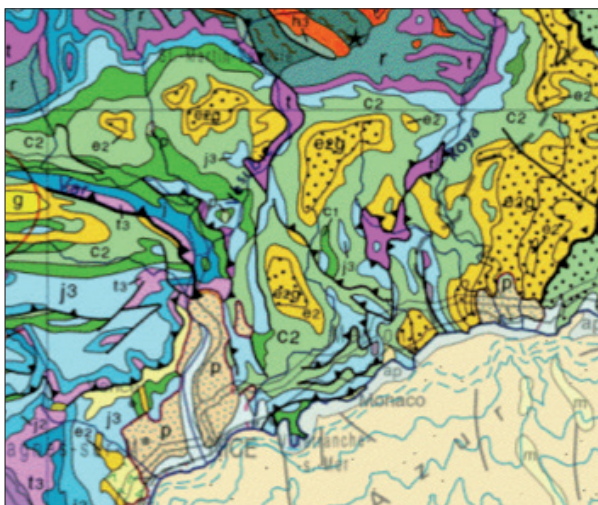
VILLEFRANCHE ET SON ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE TERRESTRE

L'examen d'une carte géologique du sud-est de la France (fig. 2) indique que la région allant des Maures à la frontière italienne comporte trois principaux ensembles géologiques : 1) le massif paléozoïque - entre 400 et 250 Ma - des Maures (en rouge et vert foncé), bordé au nord par une grande dépression d'âge permo-triasique - entre 250 et 200 Ma (en violet), et se prolongeant vers le nord-est par les massifs du Tanneron et de l'Estérel, 2) les « arcs » de Castellane et de Nice, ou chaînes subalpines (en bleu et vert), constituées pour l'essentiel de séries sédimentaires d'âge jurassique à crétacé - entre 190 et 70 Ma -, déformées et transportées vers le sud lors des derniers épisodes de l'évolution alpine, enfin 3) à l'est, un « noyau », également constitué de roches



▲ **Fig. 2:** Les grands ensembles géologiques du S-E de la France (extrait de la carte géologique de France du BRGM au 1/1 000 000, 2017).

The main geological units of South-Eastern France (from BRGM geological map of France at 1/1 000 000, 2017).



◄ **Fig. 3:** Détail de la carte géologique entre Nice et la frontière italienne; on remarque que Villefranche-sur-Mer se situe grosso modo à l'extrémité orientale de l'arc de Nice (extrait de la carte géologique de France du BRGM, 2017).

Enlargement of the geological map between Nice and the Italian borders (from BRGM geological map of France at 1/1.000.000, 2017).

paléozoïques, formant le massif de l'Argentera-Mercantour (en rouge et vert foncé) émergeant au cœur de la chaîne alpine dont il constitue en quelque sorte l'épine dorsale.

Séparée de l'arc de Nice/Castellane par la dépression du Var (fig. 2 et 3), la région de Villefranche se situe sensiblement au contact des chaînes subalpines et de la bordure sédimentaire, également déformée, du massif de l'Argentera-Mercantour. Les ensembles géologiques qui y affleurent sont des fragments de la couverture sédimentaire déposée sur la bordure d'un espace océanique dit « alpin » (ou encore Téthys alpine) déformé et disparu au cours de la collision alpine; ces sédiments, décollés de leur substratum, furent transportés vers le sud entre les derniers -20 et -5 Ma et sont devenus de nos jours des roches calcaires, massives, provenant de la transformation de sédiments marins (boues et vases calcaires, constructions récifales) déposés à partir du Jurassique inférieur (voici près de 190 Ma), et ce durant 100 Ma, sur la bordure,

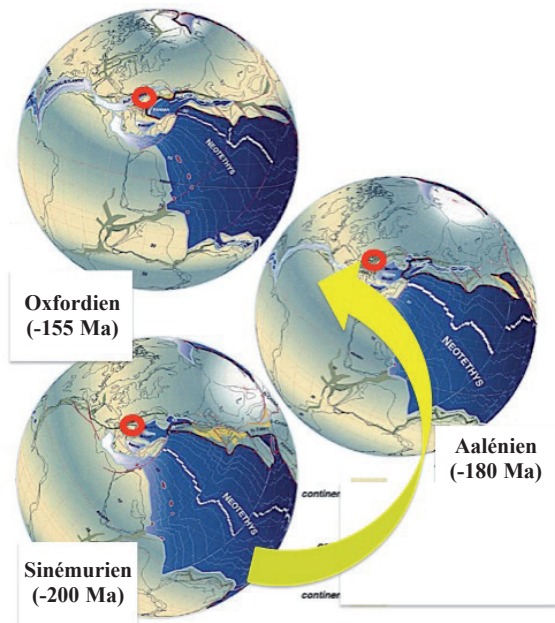


Fig. 4: Trois grandes phases de la création de l'océan «alpin» (ou Thethys alpine) au cours du Jurassique; le futur territoire de Villefranche (cercle rouge) se situait alors en bordure de l'océan «alpin», lui-même branche orientale de l'Atlantique central en train de s'ouvrir depuis -190 Ma (d'après Stampfli et Borel, 2002).

Three stages of creation of the Alpine Ocean during Jurassic. The red circle indicates the approximate location of Villefranche area (adapted from Stampfli and Borel, 2002).

ou marge continentale de l'océan «alpin» (fig. 4), lui-même espace marin étroit, dépendance de l'Océan Atlantique central en train de s'ouvrir.

Dès le Crétacé supérieur, voici environ 80 Ma, l'océan «alpin» commence à se résorber à la suite de changements cinématiques entre les deux grandes plaques africaine et européenne qui commencent à converger l'une vers l'autre. L'espace océanique «alpin» commence alors à se fermer inéluctablement et disparaît peu à peu (on parle de subduction) vers le sud. Ce mouvement entraîne le rapprochement progressif des deux marges de l'océan, l'une septentrionale, celle de l'Europe, et l'autre méridionale, celle d'un bloc continental antérieurement détaché de l'Afrique et englobant, entre autres, la péninsule ibérique, le bloc corso-sarde, la Calabre, et les futures Kabyliés (fig. 5).

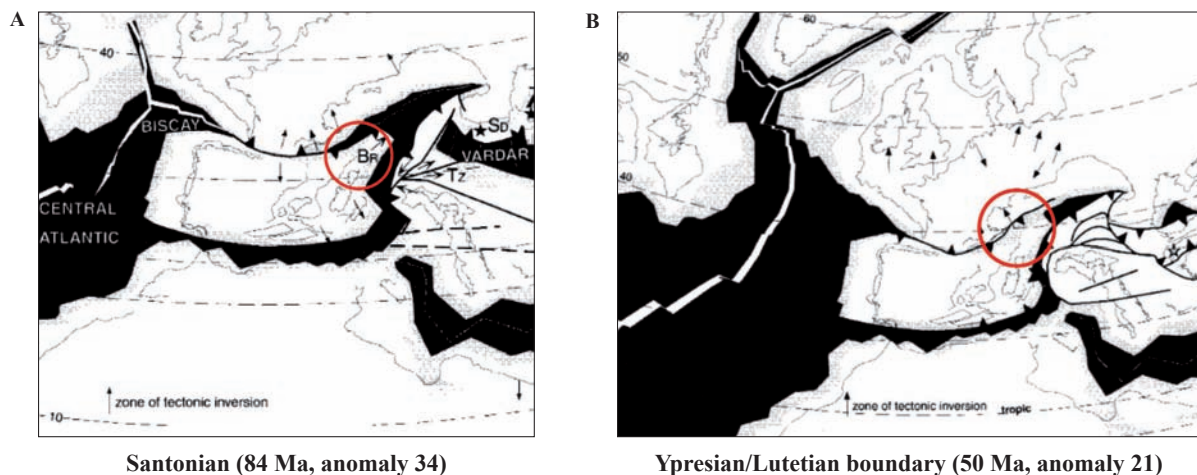


Fig. 5: Deux stades de l'évolution de l'océan alpin (d'après Stampfli *et al.*, 2001) au cours du Crétacé supérieur. **A)** au Santonien (vers - 85 Ma) alors que s'initie la subduction, vers le sud, de l'océan alpin et, **B)** à la fin du Crétacé supérieur, au Maastrichtien (-70 Ma) quand l'océan a presque entièrement disparu; les terrains constituant la future région de Villefranche (cercle rouge) se situent alors vraisemblablement sur la marge continentale du bloc corso-sarde, élément avec la péninsule ibérique d'une microplaque coincée entre les plaques Afrique et Eurasie.

*Two stages of evolution of the Alpine Ocean during Cretaceous and early Tertiary (respectively in Santonian and Lutetian times) (after Stampfli *et al.*, 2001).*

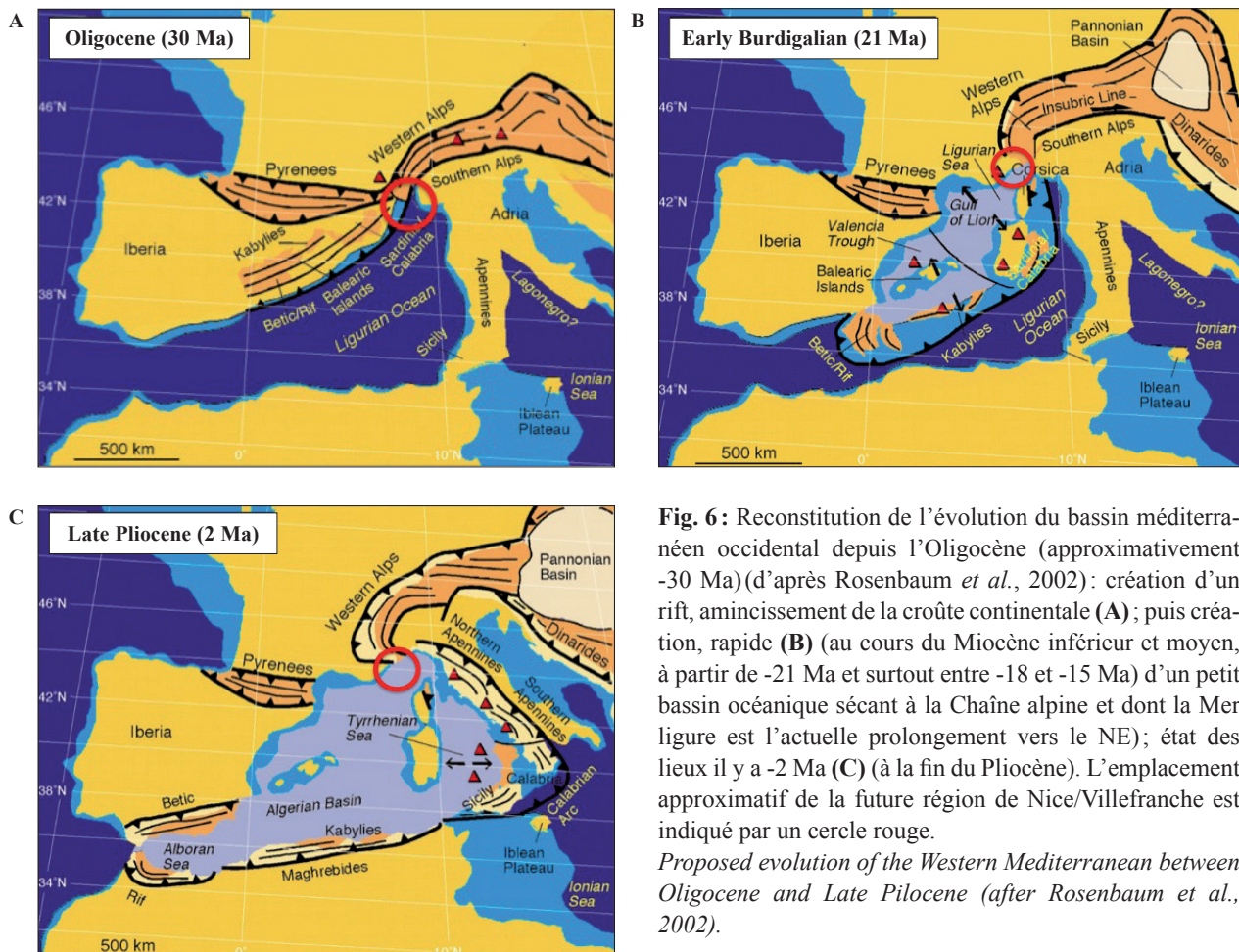


Fig. 6 : Reconstitution de l'évolution du bassin méditerranéen occidental depuis l'Oligocène (approximativement -30 Ma) (d'après Rosenbaum *et al.*, 2002) : création d'un rift, amincissement de la croûte continentale (A) ; puis création, rapide (B) (au cours du Miocène inférieur et moyen, à partir de -21 Ma et surtout entre -18 et -15 Ma) d'un petit bassin océanique sécant à la Chaîne alpine et dont la Mer ligure est l'actuelle prolongement vers le NE) ; état des lieux il y a -2 Ma (C) (à la fin du Pliocène). L'emplacement approximatif de la future région de Nice/Villefranche est indiqué par un cercle rouge.

*Proposed evolution of the Western Mediterranean between Oligocene and Late Pliocene (after Rosenbaum *et al.*, 2002).*

C'est au cours du Crétacé terminal que démarre la dynamique de rapprochement des plaques qui va progressivement conduire à l'édification de la Chaîne alpine. Les sédiments carbonatés, déposés en haut de la marge européenne, commencent à se déformer et participent à la mise en place de grands ensembles structuraux qui vont constituer les futures Chaînes alpines occidentale et méridionale. Ce mouvement de convergence se poursuit sans modification majeure jusqu'au Miocène (approximativement entre -23 et -6 Ma) période durant laquelle se mettent en place les différents segments des chaînes subalpines, dont l'arc de Nice/Castellane, qui viennent chevaucher à la fois les terrains de l'ancienne bordure continentale et ceux provenant des produits de l'érosion affectant les ensembles méridionaux (Corse, Sardaigne, etc.).

Alors que le serrage alpin est toujours actif, démarre, à partir de l'Oligocène terminal (vers -26 Ma), une nouvelle phase géodynamique dont la conséquence majeure va être l'ouverture d'un nouvel espace océanique : la Méditerranée occidentale.

Cette révolution s'initie d'abord par l'activité, au cours de l'Oligocène, d'un système de grandes fractures intracontinentales (ou rift) découpant une partie du bâti structural européen (fig. 6). Seule la branche orientale de ce rift, entre le bloc des Baléares et le golfe de Gênes, évolue tout en découpant, presque orthogonalement, les Alpes méridionales dont un tronçon constitue depuis cette période le nord de la Corse (le Cap Corse).

Quelques bassins marins résiduels, alimentés en sédiments dérivés de l'érosion du bloc corso-sarde et provenant du sud, sont alors progressivement incorporés à la Chaîne alpine ; de nos jours on retrouve la trace de ces bassins sous la forme de grès et de conglomérats à proximité

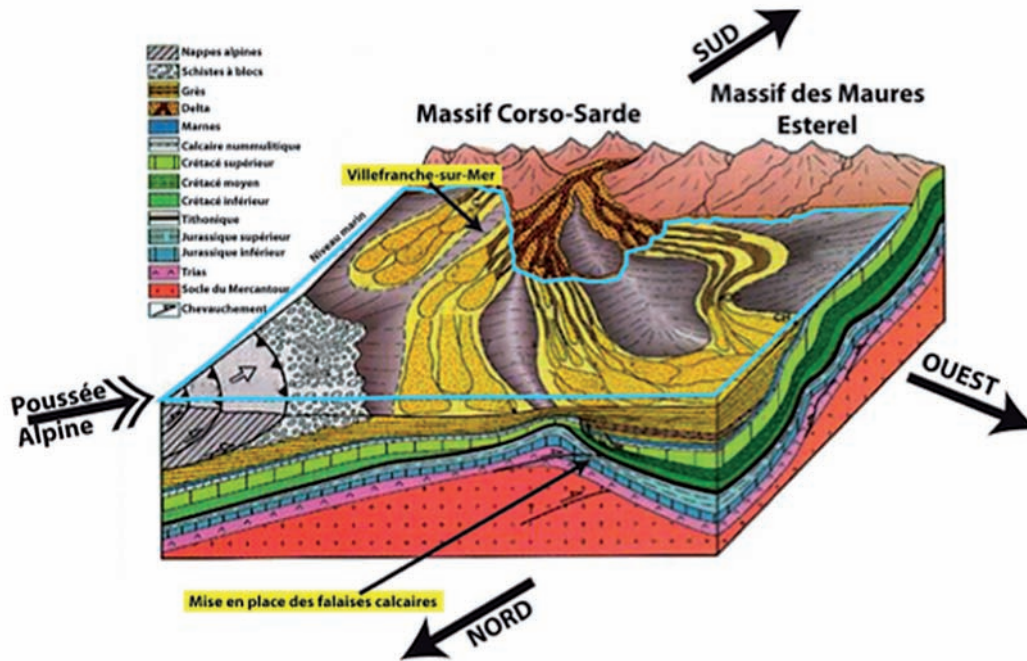


Fig. 7 : Il y a 30 à 32 millions d'année le futur site de Villefranche se situait sous la mer, en bordure d'un bassin marin aujourd'hui disparu et au sein duquel se produisaient des déformations liées à la naissance des futures chaînes sub-alpines. Des dépôts de sables et de galets (de futurs grès et conglomérats, en jaune sur la figure) transportés par des rivières s'écoulant à partir du sud à travers les massifs formant les futures Corse et Sardaigne, se déposent dans ce bassin. On connaît ces dépôts de Menton à Annot.

Localization of Villefranche area, around 30 My ago, nearby a northern marine basin bounded to the South by a continental domain including Corsica and Sardinia.

de Menton ou encore d'Annot. Le futur territoire de Villefranche se trouve encore peut-être sous l'eau mais à proximité des rivages du bloc corso-sarde qui le domine au sud (fig. 7).

Au cours de l'Oligocène, entre 32 et 26 Ma, d'une situation au sein de laquelle le futur site de Villefranche alors en bordure d'un continent situé au sud et au sein d'un bassin marin s'étendant au nord, on aboutit à une nouvelle géographie où le secteur de Villefranche est désormais baigné par un espace marin mais qui se situe au sud de la région comme de nos jours. À cette époque le rift méditerranéen s'élargissant le bloc corso-sarde s'éloigne vers le sud-est et c'est alors l'érosion des reliefs alpins, en cours de formation, qui va fournir la plus grande part des apports sédimentaires ; ces derniers vont désormais s'accumuler dans un nouveau bassin marin qui va donner naissance à la Méditerranée.

Autrement dit en quelques millions d'années la géographie de la région a été totalement bouleversée ; la direction du transport sédimentaire s'est inversée passant de sud- nord à nord-sud tandis que la région de Villefranche, antérieurement à proximité d'une mer située au nord, borde un océan se mettant en place au sud !

GÉOLOGIE DE VILLEFRANCHE ET DE SES ABORDS IMMÉDIATS

Un extrait de la carte géologique Nice/Menton (fig. 8) illustre l'extension des principales formations géologiques qui affleurent au sein de la commune de Villefranche-sur-Mer et autour de sa rade. On y observe trois grands groupes de couleurs :

- **Bleu et brun** (clair et foncé) : ces couleurs indiquent des affleurements de roches d'âge jurassique (entre -190 et -145 Ma) constituées pour l'essentiel de gros bancs calcaires massifs,



Fig. 8 : Carte géologique détaillée de la région de Villefranche (extrait de la feuille Menton/Nice au 1/50 000 du BRGM, 1973).

Detailed geological map of Villefranche area (from BRGM Nice/Menton sheet at 1/50.000 scale).

blancs à brunâtres, formant l'armature du Mont Boron et celle du Cap Ferrat ainsi que d'une bonne partie des falaises surplombant la ville.

- **Vert** (clair et foncé) : cette couleur indique des affleurements de roches constituées de marnes, grès, et calcaires (en petits bancs) d'âge crétacé (entre -145 et -65 Ma). Ces dépôts caractérisent surtout la bordure orientale de la rade de Villefranche ainsi qu'une partie du Cap Ferrat ; on les retrouve çà et là en bordure du Mont Boron, ainsi qu'en bandes étroites au sein des calcaires jurassiques dominant la haute corniche.

- **Beige** : cette couleur, que l'on remarque surtout dans les zones les plus basses de la région, correspond à des dépôts, éboulis et limons d'âge quaternaire recouvrant indistinctement les calcaires jurassiques et crétacés et autres formations anciennes.

Ces affleurements sédimentaires sont affectés par un certain nombre d'accidents tectoniques (failles, chevauchements) témoignant à la fois de l'activité tectonique alpine, qui persiste pratiquement jusqu'à nos jours, et des événements aboutissant à l'ouverture de la Méditerranée occidentale.

La nature dominante des roches, surtout des calcaires, constituant le territoire de Villefranche-sur-Mer et de ses abords (fig. 9) explique en partie la relative abondance de sources ; au cours du temps ces roches ont en effet été soumises à des phénomènes de dissolution par les eaux météoritiques favorisant la circulation et la résurgence d'eaux souterraines. Ainsi ayant d'abord induit, par la création des deux promontoires du cap de Nice et du cap Ferrat, le façonnement d'un port naturel bien protégé de la plupart des vents dominants et des mers fortes la géologie a, associée au climat, facilité l'installation sur le territoire de sources d'eau douce. Grâce à son évolution géologique la région a ainsi bénéficié d'un décor naturel prêt pour l'Histoire qui pouvait commencer quelques dizaines de millions d'années plus tard !



Fig. 9: Affleurements de calcaires autour de la rade de Villefranche ou à sa proximité; **a)** le long de la basse corniche et **b)** à la base de la citadelle des calcaires massifs du Jurassique supérieur (environ -150 Ma); **c)** sur la pointe St-Hospice, calcaire à petits bancs du Crétacé supérieur (vers -85 Ma), localement affectés de failles (**d**) (photos J. Masclé et J.-J. Pangrazi).

Examples of various limestone outcrops around Villefranche bay: a) along the main road, b) nearby Villefranche citadelle, c) along the Cap Ferrat trail, d) locally cut by recent faults.

LE DOMAINE MARIN

UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA CRÉATION DE LA MARGE ET DE L'OcéAN LIGURO-PROVENÇAL

Comme le montre la figure 6, la région sur laquelle sera plus tard installée Villefranche-sur-Mer est affectée à la fois par les soubresauts de la compression alpine et par les effets d'une nouvelle phase géologique : l'installation progressive d'un système de « rifts » qui, comme actuellement en Afrique orientale, sont la trace en surface d'une rupture et d'un amincissement à l'échelle de la croûte continentale, et ce depuis environ -30 Ma. Contrairement à d'autres branches de ce système nées à la même époque (vallée du Rhône, plaine d'Alsace, rift nord Baléares) qui ont avorté, le rift « liguro-provençal » a continué quant à lui à évoluer jusqu'à rupture complète de la croûte continentale ; il est en effet sous l'influence directe de la convergence Afrique/Europe qui en représente en quelque sorte son moteur ; de ce fait le rift s'est élargi progressivement entraînant la dérive vers le SE d'un bloc continental englobant Corse, Sardaigne, futures Calabre et Kabylies. Dix millions d'années plus tard Corse et Sardaigne sont séparées de leur continent d'origine (l'Europe) par un océan, au sens géologique du terme (c'est-à-dire un espace marin recouvrant une mince croûte basaltique créée à l'axe d'une dorsale océanique) ; ce petit espace océanique, la Méditerranée occidentale, atteint sa forme actuelle voici environ -15 Ma. Depuis cette époque le bassin a conservé les mêmes dimensions.

LA PENTE CONTINENTALE LIGURO-PROVENÇALE

La région s'étendant du Golfe du Lion, à l'ouest, vers l'extrémité orientale de la Mer ligure, et incluant donc le futur territoire de Villefranche, représente au sein de ce nouveau cadre géographique ce que les géologues nomment une « marge continentale ». Il s'agit de la bordure septentrionale du nouvel espace océanique méditerranéen dont la marge méridionale est représentée par le rebord occidental de la Corse et de la Sardaigne (fig. 10).

Voici donc près de 30 Ma que les Alpes méridionales furent tronçonnées en deux segments séparés par un petit océan. Au nord les Alpes-Maritimes, centrés autour des massifs anciens de l'Argentera et du Mercantour, atteignent les côtes de la Riviera et de la Ligurie ; au sud, un second tronçon des Alpes constitue la majeure partie du Cap Corse.

Une telle évolution a bien entendu laissé des traces au large de la Côte d'Azur ; la première, et la plus visible d'entre elles, est la présence d'une pente continentale particulièrement raide au large de la Riviera ; on y passe en effet du zéro marin (le trait de côte) à des profondeurs voisines de 2200 m en moins d'une vingtaine de kilomètres. Par ailleurs cette pente est transversalement découpée par de nombreuses vallées, ou canyons sous-marins, sensiblement perpendiculaires à la côte (fig. 11).

Ces canyons sous-marins sont quant à eux le résultat de deux grands épisodes géologiques superposés : a) ils ont d'abord été creusés à la suite de la déchirure continentale (rift) affectant la région et qui a abouti à créer un bassin profond ; rivières et fleuves accompagnent alors la formation des pentes qui se créent et creusent des vallées ; ces dernières sont ensuite peu à peu ennoyées au fur et à mesure de la subsidence du bassin (due au refroidissement de la croûte après la phase de rifting) et de la montée des eaux ; b) ces canyons ont de plus été soumis à un important surcreusement, du moins dans la partie supérieure de leur cours (jusqu'à -1 500 m).

Il y a un peu moins de 6 Ma en effet, lors d'une période qui a duré quelques centaines de milliers d'années, la Méditerranée fut isolée de ses contacts avec l'océan Atlantique ; cet isolement, temporaire, aboutit à une évaporation généralisée qui conduisit à un abaissement considérable

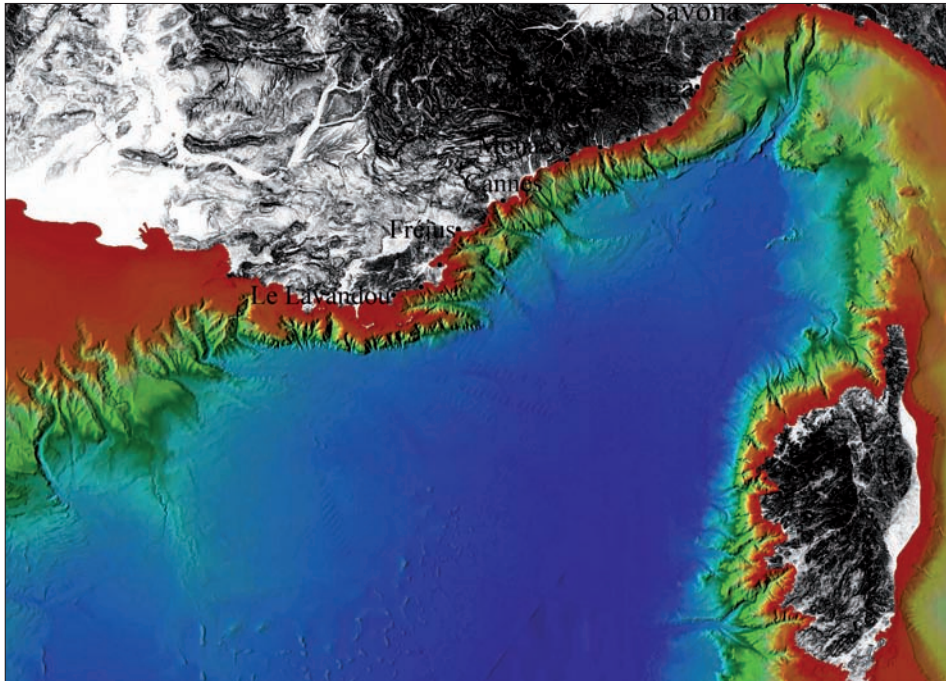


Fig. 10 : Morphologie (d'après Migeon, communication personnelle) des deux marges continentales, liguro-provençale et corse, de l'Océan ligure (extrémité septentrionale de la Méditerranée occidentale). Ces deux marges représentent la cicatrice de la déchirure continentale ayant affecté la bordure européenne ; elles dominent actuellement les fonds abyssaux de l'Océan liguro-provençal dont la profondeur est en moyenne de 2 500 m.

Bathymetric map of the Ligurian basin and of its continental margins (after Migeon personal communication). The basin and its continental borders result from the rifting and opening which have occurred between 30 and 15 My ago.

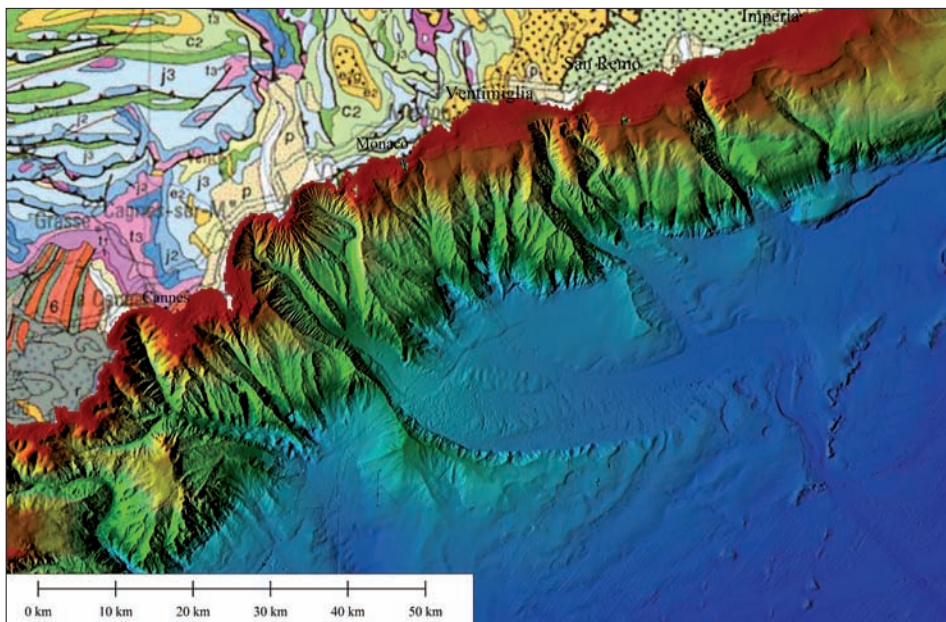


Fig. 11 : Morphologie de la pente continentale au large de la Côte d'Azur et de la Ligurie occidentale (Migeon, communication personnelle). On remarque la raideur de la pente continentale ; on passe en effet de la côte et du plateau continental (entre 0 et -150 m en rouge) à des profondeurs de près de 2 500 m (bleu foncé) en moins de 20/25 km. Par ailleurs on remarque que cette pente sous-marine est entaillée de nombreux canyons sous-marins, dont les plus importants se situent au débouché de fleuves côtiers tels la Siagne, le Var, ou la Roya. Ces fleuves, dont le débit est de nos jours assez faible, ont eu un pouvoir érosif beaucoup plus important pendant le Messinien (très fort abaissement du niveau marin) et au cours des périodes glaciaires.

The Riviera and Liguria continental margins. Note the extreme narrowness of the continental slope, rapid transition between the shallow shelf (in red) and the deep abyssal plain (circa 2200/2500m in blue) and its intense cutting by numerous submarine canyons.

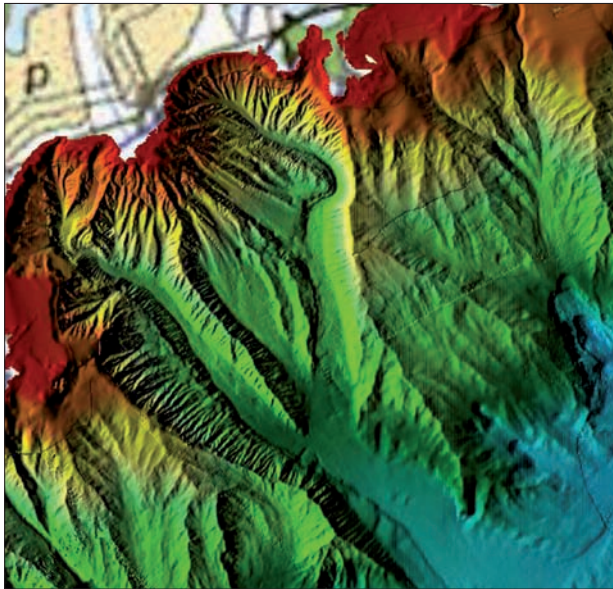


Fig. 12 : Le delta profond du Var, au large de Nice, encadré par les deux canyons du Var et du Paillon ; c'est sur ce dernier que débouche la rade de Villefranche-sur-Mer que l'on peut remarquer en haut de la carte.

The submarine Var delta and sedimentary cone, bounded by the Var and Paillon canyons. Villefranche bay is directly open on the eastern side of the Paillon canyon.

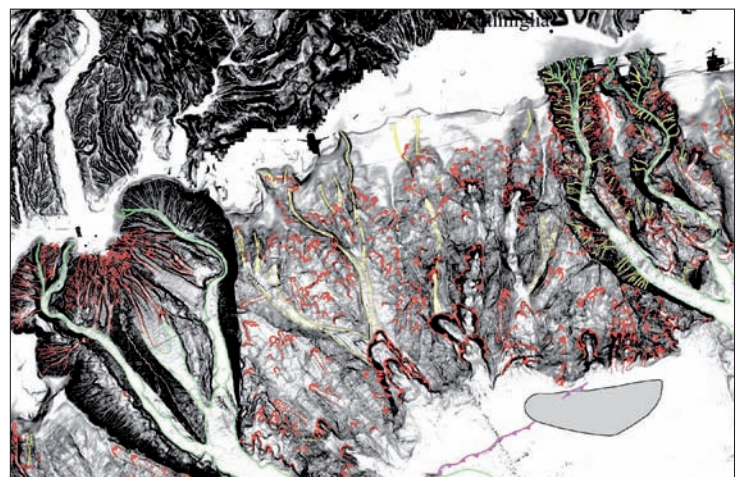
logique) les cours supérieurs des anciennes vallées terrestres, immergées depuis 20 à 25 Ma, et donc devenues des canyons sous-marins, se trouvèrent à nouveau émergés et soumis à d'intenses processus d'érosion aérienne. Il en résulta un surcreusement des canyons/vallées par où transitèrent les produits d'une érosion particulièrement active compte tenu de la raideur des pentes devenues en grande partie aériennes.

La principale caractéristique de la pente continentale au large de Nice réside dans la présence d'un vaste cône profond, dont la morphologie est comparable à celle d'un delta aérien, résultant de l'empilement, au cours des 5 derniers Ma, des apports sédimentaires transportés par les deux fleuves côtiers que sont le Var et le Paillon (fig. 12). Ces fleuves recyclent les produits de l'érosion des Alpes méridionales et les déposent tout au long de la pente continentale sous forme de sédiments détritiques (sables, galets). Ces dépôts, ainsi que des vases gorgées d'eau, mis en place sur une pente très raide sont particulièrement instables. Une secousse sismique, même faible comme il s'en produit souvent dans la région, peut déclencher des glissements en masse.

Les nombreuses cicatrices de glissements sous-marins que l'on peut observer sur des cartes détaillées des fonds marins (fig. 13) attestent bien de la fréquence de ces mécanismes d'instabilités sédimentaires qui, dans certains cas, peuvent être à l'origine de tsunamis locaux (par exemple le tsunami d'octobre 1979 dans la région de Nice).

Fig. 13 : Détail de la topographie des fonds marins entre Nice et Vintimille (Migeon, communication personnelle). On peut remarquer (en vert) les principaux canyons sous-marins (Var, Paillon, Roya), quelques canyons secondaires (en jaune), par exemple au large de Monaco, et surtout les nombreuses cicatrices de glissements (en rouge) qui soulignent l'extrême instabilité sédimentaire de la pente continentale au large de la Riviera.

Details of the submarine morphology between Nice and Vintimiglia. One may observe several canyons (Var, Paillon, Monaco, Roya) and numerous sedimentary scars resulting from large scale submarine slides.



LA RADE DE VILLEFRANCHE

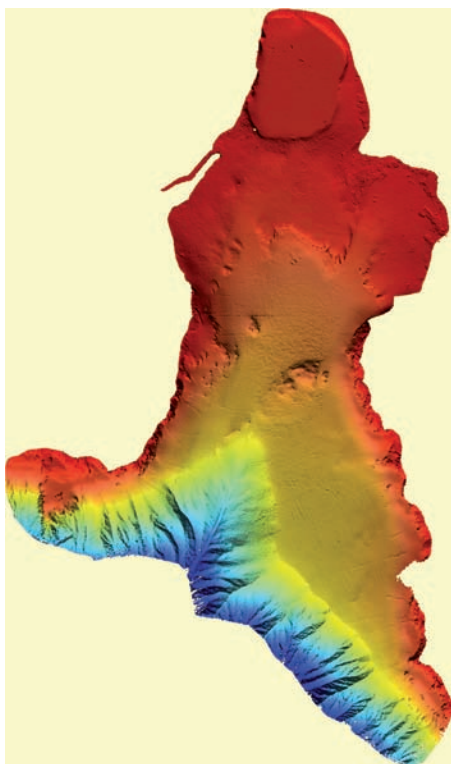
Les mêmes techniques, dites de bathymétrie « haute résolution », que celles utilisées pour obtenir la cartographie des fonds marins plus profonds ont été mises en œuvre pour accéder à la morphologie sous-marine de détail de la rade de Villefranche-sur-Mer (fig. 14). On peut distinguer sur ce document trois domaines :

- **En rouge** (de 0 à environ 30 m), un domaine caractérisé par de petits reliefs irréguliers indiquant vraisemblablement des affleurements rocheux prolongeant les calcaires « karstifiés » constituant le cap de Nice et le cap Ferrat. On observe également, au pied de la ville et à proximité de la plage des Marinières, une vaste dépression subcirculaire de quelques centaines de mètres de diamètre et d'une profondeur de quelques mètres.

- **En jaune orangé**, un fond plus régulier, assez plan, mais d'où émergent çà et là quelques reliefs irréguliers ; cette zone en pente douce et qui s'étend sensiblement entre -30 m à -130 m, correspond à un fond plus vaseux se prolongeant jusqu'à la limite du plateau continental.

- Dans la **gamme des bleus** est représenté le début de la pente continentale avec de nombreuses ravines convergeant vers l'axe d'une petite vallée sous-marine.

Cette morphologie est en grande partie résiduelle ; elle résulte surtout des effets d'une érosion ayant affecté un domaine aérien peu à peu ennoyé par la remontée du niveau de la mer lors des dernières glaciations. On sait en effet que voici environ -18 000 ans avant notre ère, au cours de la dernière glaciation, le niveau de la mer se situait à -120/130 m par rapport à l'actuel. Autrement dit, à cette époque, la rade de Villefranche-sur-Mer était une vallée aérienne par où s'écoulaient des torrents côtiers telle la *Barmassa*. Par ailleurs, demeurés à l'air libre pendant plusieurs milliers d'années (au moins 100 000 ans, fig 15), les calcaires constituant la presque totalité du substratum de la région ont été soumis à des processus de dissolution chimique par circulation des eaux météoritiques (« karstification ») qui peuvent avoir abouti à la formation de micro-reliefs typiques (lapiez, chaos ruiniformes, etc.) et potentiellement à de petites dépressions ou



◀ **Fig. 14 :** Morphologie de la rade de Villefranche résultant d'une cartographie haute résolution réalisée en 2009 (Dano, 2011).
Morphology of Villefranche bay as provided by high resolution bathymetric survey (Dano, 2011).

▼ **Fig. 15 :** Synthèse des variations du niveau marin au cours des dernières glaciations. En bleu, la courbe de variation du niveau marin ; en jaune et brun, les différents stades glaciaires et interglaciaires (Domaine public, Wikipedia.org).
Sea level fluctuation curve for the last 120.000 years; in yellow and brown respectively the main glacial and interglacial periods.

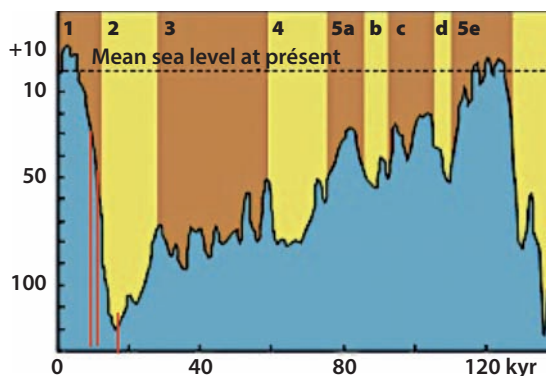




Fig. 16 : a) La dépression circulaire visible en fond de rade de Villefranche et **b)** une doline sur le causse de Sauveterre ; ces deux dépressions, créées sur un substratum calcaire, ont des dimensions comparables (quelques dizaines de mètres de diamètre, 3-4 mètres de profondeur).

a) The subcircular shallow depression seen in the northern Villefranche bay and b) a so-called doline in a karstic area. Both offer a similar size, morphology and depth.

dolines. Il est possible que la dépression semi-circulaire actuellement observable en fond de rade (fig. 16) soit la trace d'une doline créée au cours des derniers 100 000 ans (éventuellement bien avant), submergée au cours des derniers 10 à 12 000 ans.

L'IMPACT DES VARIATIONS RÉCENTES DU NIVEAU MARIN ET DE LA CRISE « MESSINIENNE »

LES VARIATIONS DU NIVEAU MARIN AU COURS DU QUATERNAIRE

Comme l'indique la courbe de la figure 15, le niveau des mers, et donc celui de la Méditerranée, n'a pas cessé de fluctuer au cours du Quaternaire, particulièrement au cours des 120 derniers milliers d'années, sous l'effet des diverses glaciations et déglaciations affectant la Terre durant cette période. La dernière grande glaciation, connue en Europe sous le nom de Würm, a provoqué un abaissement du niveau de la mer de l'ordre de 130 m, qui a nécessairement eu un impact sur la morphologie côtière ainsi que sur celle du plateau continental. Un essai de reconstitution de la remontée du niveau de la mer, processus qui aboutira en final à transformer la vallée de Villefranche en une baie marine (fig. 17), illustre le lien probable entre les caractéristiques morphologiques actuelles des fonds de la rade et leur contrôle par les variations du niveau marin au cours des derniers 20 000 ans.

LA CRISE « MESSINIENNE »

Il semble important de conclure cette brève évocation de l'environnement naturel de Villefranche-sur-Mer, et de son évolution au cours du temps, en évoquant un autre épisode de l'histoire géologique qui a, temporairement mais considérablement, affecté cette région.

Voici environ un peu moins de 6 Ma l'océan qui baigne actuellement Villefranche-sur-Mer, la Méditerranée, a vu son niveau s'abaisser considérablement pendant près de 300 000 ans ; les spécialistes estiment cet abaissement de l'ordre de -1 500 mètres par rapport au niveau actuel !

Pourquoi et comment ? La Méditerranée est un espace marin en déficit d'eau douce ; l'évaporation y est en effet plus importante que l'apport en eau douce par les fleuves et les précipitations ;

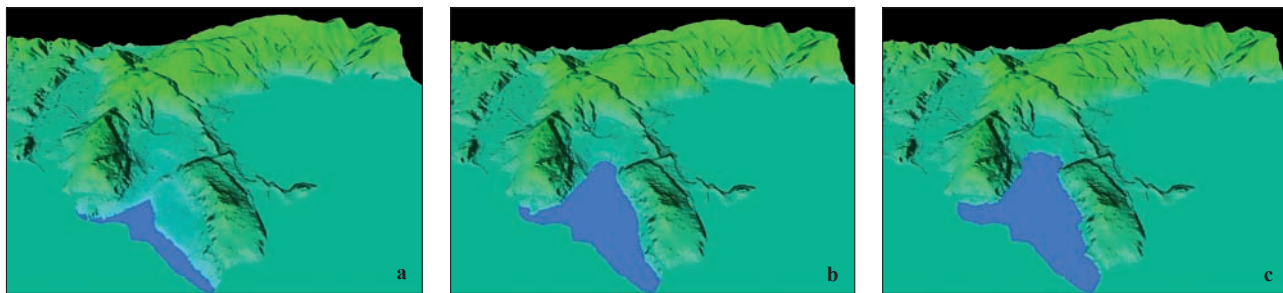


Fig. 17 : Essais de reconstitution (A. Dano) illustrant trois stades de la remontée du niveau marin (en bleu) depuis les derniers 20 000 ans au sein de la vallée de Villefranche et son impact sur le fond marin actuel de la rade ; a) vers -18 000 ans, le niveau marin se situe à -120 m par rapport à l'actuel ; la rade de Villefranche est alors une vallée creusée au sein de massifs calcaires façonnés par l'érosion karstique ; cette vallée constitue le débouché sur la mer de torrents côtiers tels la future *Barmassa* ; b) vers -12 000 ans la vallée est déjà en partie ennoyée et devient progressivement une baie marine ; c) enfin vers -7/8 000 ans, le niveau de la mer se situe à -30 m et n'atteint donc pas encore le fond de la rade actuelle, une doline, créée antérieurement est toujours fonctionnelle. Les fonds irréguliers décelables sur la carte (fig. 14) représentent vraisemblablement un ancien rivage limité par un chaos calcaires (lapiez), comme de nos jours sur le pourtour du cap Ferrat et d'une partie de la rade. Ce paléo-rivage semble interrompu par le débouché de deux petits cours d'eau, dont la future *Barmassa* (sur la gauche) ; un second torrent, plutôt originaire de la zone basse entre Beaulieu et St-Jean-Cap-Ferrat, se jetait alors probablement dans la baie.

A attempt to show the evolution of Villefranche subaerial valley (around -18.000y, on the left) towards a sea bay (around -8000y on the right) as a consequence of the progressive sea level rise in recent times (since the last -20.000y).

l'apport en eaux moins salées (35g/l) de l'Atlantique, transitant par le détroit de Gibraltar, ne compense que tout juste la sortie vers l'Atlantique des eaux plus salées (37 à 38 g/l) et plus denses de la Méditerranée ; pour la Méditerranée la conséquence est un équilibre hydrologique et biologique particulièrement fragile. Ainsi lors d'une période géologique récente dite du « Messinien » (plus spécifiquement entre -5.6 et -5.3 Ma pour les géologues) cet équilibre a été rompu car les connexions entre les deux espaces marins ont été interrompues. Il en résulta une intense évaporation du bassin, qui se transforma en un immense marais salant, ainsi qu'un inéluctable abaissement du niveau marin. Un tel phénomène entraîna l'exposition à l'air libre de l'ensemble des bordures de la Méditerranée et ce jusqu'à des profondeurs proches de -1 500 mètres ; cet abaissement modifia bien évidemment considérablement l'emplacement de la ligne de rivage. La pente continentale de la Riviera ne fut bien sûr pas épargnée et fut soumise à d'importants processus d'érosion dont les produits transitaient par les canyons sous-marins, redevenus dans leurs cours supérieurs des vallées terrestres ; en pied de pente ces sédiments se déposaient en masses considérables sous forme de cônes détritiques tandis que le bassin marin profond se transformait peu à peu en une série de vastes lacs de saumures.

En abaissant artificiellement le niveau de la mer de 1 500 m on peut estimer qu'à cette époque le futur site de Villefranche-sur-Mer se situait à environ 12/15 km du rivage et en moyenne montagne par environ 1500 mètres d'altitude (fig. 18).

Autrement dit, si à cette époque l'homme avait été présent, il aurait vraisemblablement habité des grottes creusées dans les masses calcaires karstifiées constituant le site de « Villefranche-es-Montagne », et aurait pu distinguer, par temps favorable, les reliefs lointains de la Corse émergeant d'une vaste étendue de saumures déposées au pied d'une pente raide et en partie recouverte de débris sédimentaires grossiers (fig. 19).

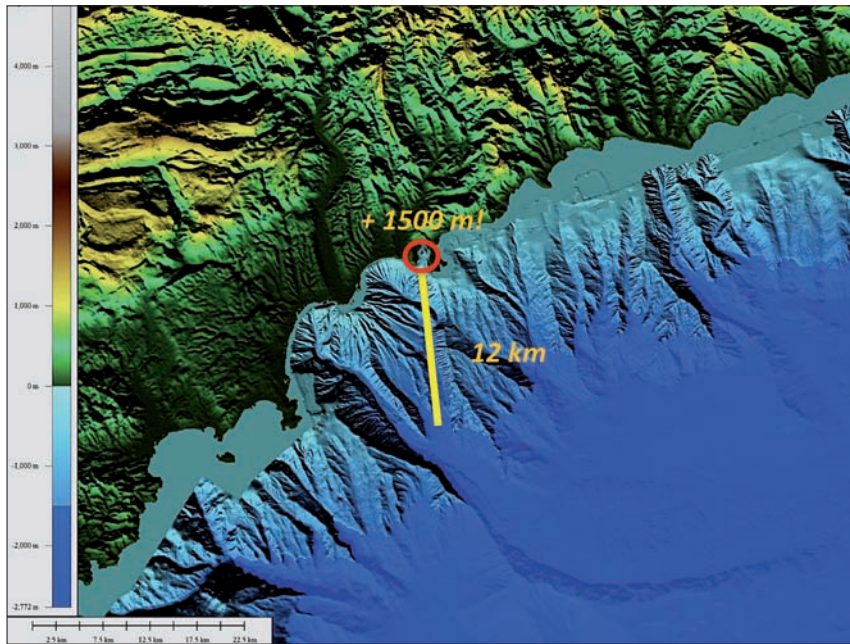


Fig. 18: Un abaissement du niveau marin de -1 500 m entraîne *ipso facto* que le site de Villefranche se situe en moyenne montagne vers 1 500 m d'altitude et à une douzaine de kilomètres du rivage d'alors!

A an approximate -1500 m sea level drop (in Messinian times circa -6My) implies that by that time Villefranche area was located in a middle mountain environment at about 1500m high! The coast lines were at about 12km south of the today coasts.



Fig. 19: Ce qu'aurait pu avoir été le site de Villefranche au cours du Messinien, installé à plusieurs kilomètres du rivage sur une pente pierreuse, dominant un bassin marin rempli de saumures avec, dans le lointain, les reliefs des massifs montagneux de la Corse, jadis rattachée au continent. (Il s'agit ici d'un analogue moderne, une vue d'un grand lac salé de l'Alti-plano bolivien!)

What could have been the landscape of Villefranche area during Messinian times: a dry and sharp mountain slope overhanging a deep desiccated and salt-covered basin. To the south the reliefs of Corsica once parts the main continent. (The picture shows an area of the Altiplano in Bolivia with a large salty lake.)

CONCLUSIONS

Les liens de Villefranche avec la mer remontent à plus de 160 Ma quand, dans un espace océanique alors en création mais aujourd'hui disparu (qui a donné naissance à la chaîne alpine), se déposaient de grandes épaisseurs de sédiments à dominante calcaire. La future région de Villefranche se situait alors vraisemblablement par faibles profondeurs d'eau sur la bordure méridionale de cet espace océanique.

120 millions d'années plus tard, alors que ces sédiments se sont peu à peu déformés et transformés en calcaires massifs, le secteur se trouvait toujours à proximité d'un espace marin devenu résiduel mais recevant alors des sédiments surtout détritiques (grès, conglomérats) provenant du démantèlement et de l'érosion d'un bloc continental méridional comportant, entre autres, Corse, Sardaigne et massif des Maures.

Vers -30 Ma survient une inversion de la polarité géologique : la croûte continentale européenne, et la chaîne alpine en cours de création, commencent toutes deux à se fracturer pour donner naissance à un rift puis, quelques millions d'années plus tard, à un petit espace océanique, la Méditerranée, qui se crée à proximité du site qu'occupera plus tard Villefranche-sur-Mer, mais au sud de la région.

En quelques millions d'années le secteur, d'abord proche d'un espace marin situé au nord et recevant alors des produits d'érosion originaires du sud, se retrouve en bordure d'une mer localisée au sud et reçoit des sédiments provenant du nord et issus du démantèlement de la chaîne alpine en cours d'édification !

Depuis cette époque la région est baignée par la Méditerranée. La marge continentale nouvellement créée est par la suite soumise aux effets des variations du niveau marin qui aboutissent à envoyer progressivement une petite vallée aérienne et à créer la rade de Villefranche-sur-Mer que nous connaissons de nos jours.

Si elle est un processus lent l'évolution géologique est cependant continue : dans un futur proche (quelques millions d'années malgré tout !) il est donc vraisemblable que la région de Villefranche-sur-Mer, comme l'ensemble de la marge liguro-provençale, seront à nouveau soumises à des contraintes et déformations tectoniques dues au rapprochement, progressif, mais inéluctable, de l'Afrique et de l'Europe ; les quelques tremblements de terre, de magnitudes encore assez faibles, qui affectent de temps à autre la région, constituent autant de prémisses d'un processus qui se terminera vraisemblablement par une collision continentale généralisée entre Afrique et Europe ; cette collision s'initiera d'abord par la convergence entre la Corse/Sardaigne et la Provence/Côte d'Azur qui s'étaient pourtant séparées l'une de l'autre quelque 30 Ma d'années auparavant.

BIBLIOGRAPHIE

- BRGM** (2017).— *Carte géologique de la France métropolitaine échelle 1/1 000 000* (6^e édition révisée).
- DANO A.** (2011).— High-Resolution Echo sounder Survey in Villefranche Bay, *Sea Technology*, pp. 47-48.
- ROSENBAUM G., LISTER G. S., DUBOZ, C.** (2002).— Reconstruction of the tectonic evolution of the western Mediterranean since the Oligocene. In: ROSENBAUM, G. and LISTER G. S. 2002. Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan orogeny. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, pp. 107-130.
- STAMPFLI G.M., BOREL G.D., CAVAZZA MOSAR J., ZIEGLER P.A.** (2001).— *Palaeo-tectonic and palaeo-geographic evolution of the Western Tethys and Peri-Tethyan domain (IGCP Project 369)*, Episodes 24, pp. 222-228.
- STAMPFLI G.M., BOREL G.D.** (2002).— A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons, *Earth and Planetary Science Letters*, 196, pp. 17-33.