



FACULTE : DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE
LABORATOIRE: Géodynamique et Ressources Naturelles (LGRN)

Année: 2018

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

DOMAINE: Sciences de la Terre et de l'Univers

FILIERE: Géologie

SPECIALITE: Géodynamique et Ressources Naturelles

Thème

**LES SABLES SOMBRES COTIERS A MINERAUX LOURDS DE LA
REGION DE ANNABA / ALGERIE : CARACTERISTIQUES ET
PROVENANCE**

Présenté par:
CHEMAM Asma

Dirigé par:
HADJ ZOBIR Soraya

Jury de soutenance:

Président:	BOUABSA Lakhdar	Pr.	U.B.M. Annaba
Directrice :	HADJ ZOBIR Soraya	Pr.	U.B.M. Annaba
Co-Directrice :	DAIF Menana	Dr.	U.B.M. Annaba
Examineur:	TLILI Mohammed	Dr.	U.B.M. Annaba
Examineur:	TOUBAL Abderrahmane	Pr.	U.B.M. Annaba
Examineur:	CHABOU Moulley Charaf	Pr.	U. Setif

RESUME

La région étudiée (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) fait partie du Massif de l'Edough/Annaba/Algérie. A Ain Achir on distingue du sable brun clair et du sable sombre rougeâtre. Ce dernier est principalement mis en évidence après une tempête de mer. Celui de la Plage-Militaire et El Nasr sont de couleur sombre en permanence.

Les sables étudiés affleurent à proximité des micaschistes à grenat, staurotide et/ou à andalousite ou à disthène, des marbres, des skarns à épidote, des migmatites et des veines quartzo-feldspathiques à tourmaline.

Tous les échantillons de sable sont riches en minéraux lourds (HM) transparents (grenat, staurotide, disthène, tourmaline et épidote). Les grenats des trois plages révèlent des similitudes dans leur composition chimique, ils sont parfois zonés et sont riches en almandin. Les tourmalines sont de type schorl ou dravite. La tourmaline d'Ain Achir et la Plage-Militaire est schorlitique suggérant une source similaire, alors que celle d'El Nasr est dravitique indiquant une source du minéral différente de celle des deux autres plages.

Le sable des trois plages a été analysé en éléments majeurs, en traces, ainsi qu'en terres rares. Le sable clair, aussi bien que le sombre de la plage d'Ain Achir montrent d'importantes différences dans leurs compositions chimiques. Les concentrations de certains majeurs, traces et terres rares dans le sable clair sont inférieures à celles du sable sombre. Par contre la composition chimique des sables sombres des trois plages est similaire. Cette étude montre une forte corrélation positive de la teneur en éléments majeurs, traces, les terres rares et la composition modale. La corrélation est particulièrement bien marquée avec les minéraux du métamorphisme tels que le grenat, la staurotide, la tourmaline et l'épidote.

L'étude comparée des terres rares normalisées au Word Shale Average (WSA) des sables des trois plages et des affleurements rocheux proximaux indique qu'il existe de nombreuses similitudes dans l'allure des profils des terres rares. La distribution des terres rares légères (LREE) du sable et des roches est relativement linéaire et uniforme. Certains échantillons de sable montrent un enrichissement en terres rares lourdes (HREE) par rapport aux affleurements rocheux. La présence d'échantillons de sables enrichis en terres rares lourdes (HREE) ainsi que d'échantillons des sables à teneurs similaires en HREE par rapport aux affleurements rocheux confirme la mixité du sable sombre.

Mots clés : Minéraux lourds transparents, sable sombre côtier, minéralogie, corrélation chimique, provenance, Annaba / Algérie.

ABSTRACT

The study area (Ain Achir, Plage-Militaire, El Nasr Beaches) are part of the Edough massif / Annaba / Algeria. At Ain Achir there are two kinds of sand light brown sand and red dark sand. The latter is especially visible after a sea storm. Those of the Plage-Militaire and El Nasr beaches are permanently dark color.

The studied sand outcrops close to garnet, staurolite and / or Andalusite or kyanite micachists, marbles, epidote skarns, migmatic and quartzo-feldspathic tourmaline veins.

All sand samples are rich in transparent heavy minerals (garnet, staurolite, Kyanite, tourmaline and epidote). Garnets of the three beaches had similarities in their chemical composition; they are sometimes zoned and are rich in almandine. Tourmalines are schorl or dravite. In Ain Achir and Plage-Militaire beach tourmaline are schorlitic suggesting a similar source, while at El Nasr' it is dravitic indicating a different mineral source from that of two other beaches.

The sand of the three beaches was analyzed in major, traces and also rare earths elements. The light sand and the dark one of the Ain Achir beach show important differences in their chemical compositions. Concentrations of some major, trace and rare earth elements in light sand are lower than those of dark sand. On the other hand the chemical composition of the dark sands of the three beaches is similar. This study shows a strong positive correlation between major, traces, the rare earths element and modal concentration in heavy minerals and particularly with the minerals of metamorphism such as garnet, staurolite, tourmaline and epidote.

All samples (sand and rock) from the studied areas have been normalized to the World Shale Average. The comparison of the REE data sand samples with the data from the rock outcrops located relatively close to the studied sand beaches indicate many similarities in the appearance of the REE patterns. The rare earth, (LREE) distribution of sand and rocks is relatively linear and homogeneous. Some sand samples show rare earth enrichment (HREE) compared to rock outcrops. The presence of rare earth enriched sand (HREE) samples in addition to HREE-like sand samples compared rock outcrops confirm the mix of dark sand.

Key words: Transparent heavy minerals, coastal dark sand, mineralogy, chemical correlation, provenance, Annaba / Algeria.

الملخص

تعد المنطقة موضوع الدراسة (عين عشير ، الشاطئ -العسكري و شاطئ النصر) جزءاً من كتلة الايدوغ الصخرية / عنابة / الجزائر. تتميز منطقة عين عشير بوجود رمال بنية فاتحة ورمال محمرة قاتمة و قد ظهرت هذه الأخيرة بشكل خاص بعد عاصفة بحرية، أما الشاطئ- العسكري والنصر فيتميزان بوجود رمال داكنة و دائمة.

تظهر الرمال المدروسة بالقرب من الميكاشست ذي الغرانات والستروليت و الميكاشست ذي الأندلوسيت أو الديستان و الرخام و السكارن ذي ايبيدوت، المغماتيت و عروق ذي الكوارتز الفلسبار مع التورمالين.

جميع العينات الرملية المأخوذة من الشواطئ الثلاثة غنية بالفلزات الثقيلة الشفافة (الغرانات، الستروليت، الديستان، الترمالين، ايبيدوت). غرانات الشواطئ الثلاثة تكشف عن أوجه التشابه في تركيبها الكيميائي ، فهي غنية بالألماندين. إن التورمالين في عين عشير والشاطئ -العسكري من النوع شورليتيك ، مما يوحي بمصدر مشابه ، في حين أن تورمالين شاطئ النصر من نوع درافيت و تشير إلى مصدر معدني يختلف عن مصدر الشواطئ الأخرى.

تم تحليل رمال الشواطئ الثلاثة إلى العناصر الرئيسية ، الثانوية، وكذلك الأتربة النادرة. تظهر الرمال الفاتحة والداكنة لشاطئ عين عشير اختلافات مهمة في تراكيبها الكيميائية. تركيزات بعض العناصر الرئيسية ، ثانوية و النادرة في الرمال الفاتحة أقل من تلك الموجودة في الرمال الداكنة بالمقابل، التراكيب الكيميائية للرمال القاتمة من الشواطئ الثلاثة هو مماثل و هذا يوضح وجود روابط إيجابية قوية لمحتوى العناصر الرئيسية، الثانوية و الأتربة النادرة والتركيب الشكلي. و يكون هذا الارتباط بشكل خاص مع الفلزات المتحولة مثل (الغرانات، الستروليت، الترمالين و ايبيدوت)

وتشير الدراسة المقارنة حسب نظام (WSA) لرمال الشواطئ الثلاثة و النتوءات المجاورة إلى العديد من أوجه التشابه في شكل لمحات من العناصر الأرضية النادرة. إن توزيع العناصر الأرضية النادرة الخفيفة لرمل والصخور عبارة عن خط موحد و متناسب . بعض العينات من الرمل غنية بالعناصر الأرضية النادرة الثقيلة مقارنة بالنتوءات الصخرية وهذا يؤكد وجود مزيج من الرمال الداكن.

الكلمات المفتاح: فلزات ثقيلة شفافة ، رمال ساحلية داكنة ، علم الفلزات ، الارتباط الكيميائي، المصدر الأصلي، عنابة / الجزائر

DEDICACES

C'est avec toute mon affection que

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents qui m'ont apporté sans cesse soutien et encouragements, je ne pourrai jamais les remercier assez. Que Dieu les garde.

À toute ma famille en particulier ma sœur , mes deux frères et à tous les ami(e)s.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier en premier **ALLAH**, le tout puissant, de m'avoir donné la puissance et la force nécessaire pour accomplir ce travail.

Un grand merci à mon directeur de thèse Pr. HADJ ZOBIR Soraya et à mon co-directeur de thèse Mme DAIF Menana.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail

Mes plus vifs remerciements à tous les enseignants et personnels des départements de Géologie et des Mines de l'université Badji Mokhtar- Annaba.

Mes sincères remerciements vont à toute l'équipe de l'institut des Sciences de la Terre et de l'environnement de Potsdam /Golm (Allemagne), particulièrement au Pr. ALTENBERGER Uwe qui m'a accueillie durant 6 mois.

Je remercie La DAAD d'avoir financé les analyses et mon séjour à l'université de Potsdam /Allemagne.

Je remercie le directeur de GLOBAL CONCEPT / Laboratoire & Engineering à El Bouni/Annaba) qui m'a accueillie pour effectuer les analyses.

Liste des Tableaux

INTRODUCTION

Tableau 1: Exemple de quelques minéraux porteurs d'éléments traces.	1
--	---

CHAPITRE I : METHODOLOGIE

Tableau.I.1 : Interprétation des valeurs de l'asymétrie granulométrique	10
Tableau.I.2 : Interprétation des valeurs de la moyenne granulométrique	10
Tableau.I.3 : Interprétation des valeurs de l'indice de classement (Sorting)	11
Tableau.I.4 : Classes de granulométrie des sols	11

CHAPITRE IV : CARACTERISTIQUES PHYSICO-PETROGRAPHIQUES ET MINERALOGIQUES

Tableau.IV.1 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique du sable de la plage d'Ain Achir.	63
Tableau.IV.2 : Valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage d'Ain Achir	64
Tableau.IV.3 : Récapitulatif des essais au bleu de méthylène du sable de la plage d'Ain Achir	65
Tableau.IV.4 : Récapitulatif des essais calcimétriques du sable de la plage d'Ain Achir, V1I : volume Initial, V2 : volume CO ₂ dégagé par l'échantillon, CaCO ₃ %Ech : taux de carbonate dans l'échantillon.	66
Tableau.IV.5 : Composition chimique et formule structurale des grenats du sable d'Ain Achir. Alm : almandin, Sps : spessartite, Prp : Pyrope, Grs : grossulaire, Adr : andradite, Uv : ouvarovite (Whitney et al, 2010).	70
Tableau.IV.6 : Composition chimique et formule structurale des staurotides du sable d'Ain Achir.	73
Tableau.IV.7 : Composition chimique et formule structurale des tourmalines du sable de la plage d'Ain Achir.	77

Tableau.IV.8 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique du sable de la Plage-Militaire	82
Tableau.IV.9 : Valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage-Militaire	82
Tableau.IV.10 : Récapitulatif des essais au bleu de méthylène du sable de la	84
Tableau.IV.11 : Récapitulatif des essais calcimétriques du sable de la Plage-Militaire, V1I : volume Initial, V2 : volume CO ₂ dégagé par l'échantillon, CaCO ₃ %Ech : taux de carbonate dans l'échantillon.	85
Tableau.IV.12 : Composition chimique et formule structurale des grenats du sable de la Plage-Militaire. Alm : almandin, Sps : spessartite, Prp : Pyrope, Grs : grossulaire, Adr : andradite, Uv : ouvarovite.....	89
Tableau.IV.13 : Composition chimique et formule structurale des staurotides du sable de la Plage-Militaire.	93
Tableau.IV.14 : Composition chimique et formule structurale des tourmalines du sable de la Plage-Militaire	97
Tableau.IV.15 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique du sable de la plage El Nasr.....	100
Tableau.IV.16 : Valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage Plage – Militaire.....	102
Tableau.IV.17 : Récapitulatif des essais au bleu de méthylène du sable de la plage d'El Nasr	103
Tableau.IV.18 : Récapitulatif des essais calcimétriques du sable de la plage d'El Nasr, V1I : volume Initial, V2 : volume CO ₂ dégagé par l'échantillon, CaCO ₃ %Ech : taux de carbonate dans l'échantillon.	103
Tableau.IV.19 : Composition chimique et formule structurale des grenats du sable de la plage El Nasr.....	107
Tableau.IV.20 : Composition chimique et formule structurale des staurotides du sable de la plage El Nasr.....	109
Tableau.IV.21 : Composition chimique et formule structurale des tourmalines du sable de la plage El Nasr.....	112

CHAPITRE V : SIGNIFICATION DES VARIATIONS CHIMIQUES DES SABLES

Tableau.V.1 : Abondance des éléments majeurs (%), traces (ppm) et terres rares (ppm) du sable d'Ain Achir. UCC: Croûte Continentale supérieure, Av SC: moyenne chimique du sable Clair; Av SS: moyenne chimique du sable sombre.	122
Tableau.V.2. Composition minéralogique moyenne (%) du sable clair et sable sombre de la plage d'Ain Achir. Grt :grenat, St :staurotide, Ky :disthène, Tur, tourmaline, Ep : épidote, Qz : quartz, cal : calcite, HM : minéraux sombres, LM : minéraux clairs	125
Tableau.V.3. Matrice de corrélation simple entre la composition minéralogique, les éléments traces et les terres rares , Ep: épidote, Grt: grenat, Ky: disthène, St: staurotide, Tur: tourmaline, Qz: quartz, Cal: Calcite	127
Tableau.V.4. Matrice de variabilité des minéraux, traces et terres rares pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3et F4).	132
Tableau.V.5. Abondance des éléments majeurs, traces et terres rares du sable de la Plage-Militaire. UCC: Croûte Continentale supérieure, Av SS: moyenne chimique du sable sombre.	134
Tableau.V.6. Composition minéralogique moyenne du sable sombre de la Plage-Militaire Grt : grenat, St : staurotide, Ky :disthène, Tur, tourmaline, Ep : épidote, Qz : quartz, cal : calcite, HM : minéraux sombres, LM : minéraux clairs	137
Tableau.V.7. Matrice de corrélation simple entre la composition minéralogique, les éléments traces et les terres rares , Ep: épidote, Grt: grenat, Ky: disthène, St: staurotide, Tur: tourmaline, Qz: quartz, Cal: Calcite	140
Tableau.V.8. Matrice de variabilité des minéraux, traces et terres rares pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3 et F4).	144

Tableau.V.9. Composition chimique du sable et de la Croûte Continentale Supérieure (UCC). UCC : Croûte Continentale supérieure, Av SC : moyenne chimique du sable Clair ; Av SS : moyenne chimique du sable sombre.....	147
Tableau.V.10 : Composition minéralogique moyenne du sable sombre de la plage El Nasr. Grt : grenat, St : staurotide, Ky : disthène, Tur, tourmaline, Ep : épidote, Qz : quartz, cal : calcite, HM : minéraux sombres, LM : minéraux clairs.....	150
Tableau.V.11. Matrice de corrélation simple entre la composition minéralogique, les éléments traces et les terres rares, Ep: épidote, Grt: grenat, Ky: disthène, St: staurotide, Tur: tourmaline, Qz: quartz, Cal: Calcite.	152
Tableau.V.12. Matrice de variabilité des minéraux, traces et terres rares pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3et F4).	156

CHAPITRE VI : CARACTERISATION DE LA SOURCE DU SABLE SOMBRE

Tableau.VI.1. Composition en terres rares (REE) des affleurements rocheux proximaux de chaque plage étudiée (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr). ...	160
Tableau.VI.2. Récapitulatif des analyses en terres rares du sable d'Ain Achir et du WSA (World Shale Average), LS: sable clair, DS: sable sombre	164
Tableau.VI.3 : Récapitulatif des analyses en terres rares du sable de la Plage-Militaire et du WSA (World Shale Average), DS: sable sombre.....	169
Tableau.VI.4 : Récapitulatif des analyses en terres rares du sable de la plage El Nasr et du WSA (World Shale Average), DS: sable sombre.....	174

CHAPITRE VII : POTENTIEL ECONOMIQUE DU SABLE DES PLAGES DE : AIN ACHIR, PLAGE- MILITAIRE ET EL NASR

Tableau.VII.1 : Composition chimique du grenat de (Anthracite Filter Media Company) et des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr)	180
Tableau.VII.2 : Valeurs moyennes du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la plage Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr	181

Tableau.VII.3 : Composition chimique des grenats utilisés comme abrasifs de deux industriels (Kuhmichel Allemagne, Lm Minig (Jiangsu, Chine) et des grenats des plages de Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr.	182
Tableau.VII.4 : Composition chimique (a) et composition minéralogique (b) des grenats des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) et de quelques industriels de référence.....	183
Tableau.VII.5 : a) Composition chimique, b) la composition minéralogique du sable à staurotide des compagnies Green Cove Springs staurotide Associated Mineral USA Florida, TrailRidge Du Pont Biasill Florida USA et TrailRidge du Pont Starblast Florida USA et des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr).	185

Liste Des Figures

CHAPITRE I : METHODOLOGIE

Fig.I 1 : Photo de terrain montrant le point de prélèvement des échantillons de sable. .	5
Fig.I 2 : Homogénéisation du sable	6
Fig.I 3 : Photo montrant l'aplatissement du sable	7
Fig.I 4 : Photo montrant le quartage.	7
Fig.I 5 : Photo montrant une tamiseuse électrique.....	8
Fig.I 6 : Triangle de classification d'après Folk et Ward, 1957	8
Fig.I 7 : Agitateur contenant la solution de bleu de méthylène (GLOBAL CONCEPT / Laboratoire & Engineering à El Bouni/Annaba).....	12
Fig.I 8 : Test de la tache positif indiquant la présence de minéraux argileux dans le sable d'Ain Achir (AA3c) et dans celui de la Plage-Militaire (PMS 6a).....	13
Fig.I 9 : Exemple de la feuille d'essai de la détermination de la valeur de Bleu de Méthylène au laboratoire de GLOBAL CONCEPT / Laboratoire & Engineering à El-Bouni/Annaba.....	14
Fig.I 10 : Calcimètre de Bernard du Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre /Université Badji-Mokhtar/Annaba.	15
Fig.I 11 : Exemple de montage des échantillons de sable sur film adhésif, (échantillons du sable mixte de la plage Ain Achir).....	16
Fig.I 12 : Exemple d'une lame mince d'un échantillon de sable (Plage-Militaire).....	17
Fig.I 13 : a,) matériel de préparation des échantillons, b) mise en poudre de l'échantillon, c) porte-échantillon, d) appareil de diffractométrie de type EMPYREAN, e) Exemple de composition minéralogique du sable sombre de la plage d'Ain Achir.....	18
Fig.I 14 : Exemple d'un diffractogramme : a) d'une staurotide, b) d'un disthène	19

Fig.I 15 : a) cylindres porte-échantillons, b) matériels de métallisation des minéraux, c) Porte-objet du MEB Jeol JSM 6510 avec les cylindres portant les grains des minéraux à étudier, d) MEB Jeol JSM 6510	20
Fig.I 16 : Exemple d'une image au MEB d'un cristal de disthène	21
Fig.I 17 : a) lames minces métallisées, b) microsonde de type : JEOL JXA-8200	21

CHAPITRE II : LOCALISATION ET CADRE PHYSICO- GEOGRAPHIQUE

Fig.II 1 : a) Localisation du littoral d'Annaba (ANDI 2013), b) Principales plages du littoral d'Annaba, (Google Earth 2016)	22
Fig.II 2 : Photos Google 2016 montrant les plages à sable : a) clair de Chapuis et Saint Cloud, b) mixte (clair et sombre) d'Ain Achir et sombre de La Plage-Militaire ; c) sombre d'El Nasr, • point d'échantillonnage.....	23
Fig.II 3 : Evolution de la température : a) durant la période 2009-2016 (temperatureweather.com, 2016), b) sur une période de 12 mois, année 2015 (meteoblue, 2016).....	24
Fig.II 4 : Evolution de la pluviométrie : a) durant la période 2009-2016 (temperatureweather.com, 2016), b) sur une période de 12 mois, année 2015 (meteoblue, 2016).....	25
Fig.II 5 : a) Force du vent durant la période 20012-2016, b) direction moyenne du vent pour la période 2012-2016 (fr.wisuki.com/2016). c) Vitesse du vent et direction (en degré 0°=Nord, 90°=Est, 180°=Sud et 270° =Ouest, les points violets représentent la direction du vent pour l'année 2015(meteoblue, 2016).....	26
Fig.II 6 : a) amplitude de la houle en été, b) aspect de la mer sur les côtes d'Annaba, c) hauteur des vagues pour la période 20012-2016, d) direction moyenne de la houle pour la période 2012-2016, (fr.wisuki.com/2016).	27
Fig.II 7 : Carte du réseau hydrographique de la région d'Annaba (Hilly 1962), modifiée.....	28
Fig.II 8 : a) carte des pentes du massif de l'Edough (Oularbi et Zeghiche, 2009, modifiée), b) vue panoramique du massif de l'Edough (Google Earth, 2016).	29

Fig.II 9 : Carte de sensibilité à l'érosion du massif de l'Edough (Oularbi et Zeghiche, 2009, modifiée)	30
---	----

CHAPITRE III : CADRE GEOLOGIQUE

Fig.III 1 : Carte géologique du massif de l'Edough modifiée (Hilly, 1962; Bossière et al., 1976; Ilavsky et Snopkova, 1987; Gleizes et al., 1988; Ahmed-Said et Leake, 1993; Caby et al., 2001; Hammor et al, 1991, 1992 ; Laouar et al., 2002, HadjZobir et al. 2007, 2012, 2013, 2014).	32
Fig.III 2 : Carte géologique simplifiée du Cap de Garde, modifiée, (Ahmed Said et al. 1993; Caby et al. 2001, Hadj Zobir et al. 2014).	36
Fig.III 3 : Vues d'ensemble des affleurements géologiques d'Ain Bent Soltane.	37
Fig.III 4 : Photographies de terrain de : a) micaschiste à grenat et andalousite, b) détail des poches à andalousite.....	38
Fig.III 5 : Photographies de terrain : a) séricitoschiste massif, b) détails des nodules de quartz laiteux	38
Fig.III 6 : Photographies de terrain de : a) chloritoschistes massifs, b) détail du chloritoschiste massif.	39
Fig.III 7 : Photographies de terrain : a) bancs métriques de cipolins, b) détails d'un niveau de cipolin	39
Fig.III 8 : Photo montrant les calcarénites au niveau d'Ain et Bent Soltane.....	39
Fig.III 9 : Vues d'ensemble de la Carrière : alternance de micaschiste à grenats et cipolins, et quelques affleurements de cipolin avec des niveaux centimétriques d'amphibolites.	40
Fig.III 10 : Affleurement de micaschiste alumineux en position sub-vertical en contact avec les cipolins.....	41
Fig.III 11 : Photographies de terrain montrant : a) les couches millimétriques à centimétriques d'amphibolites au sein du cipolin, b) les amphibolites altérées à traces d'oxydation.	41

Fig.III 12 : Photographies de terrain montrant: a) un cipolin blanc cristallin, b) un cipolin de nuances gris-blanche ou franchement grise.	42
Fig.III 13 : Vue d'ensemble des affleurements géologiques au niveau de la zone du Phare.....	43
Fig.III 14 : Photographies de terrain montrant: a) un cipolin massifs à nuance grise-blanche, b) un cipolin bleuté à gris foncé.....	43
Fig.III 15 : Photos de terrain de : a) micaschistes à muscovite et grenats visibles à l'œil nu, b) micaschistes fortement altérés et à diaclases.	43
Fig.III 16 : Photographies de terrain : a) skarns dans la zone de contact entre les cipolins et les micaschistes, b) détails du skarns.....	44
Fig.III 17 : Vues partielles des affleurements de la zone du Vivier: a) les gneiss, b) les micaschistes.....	44
Fig.III 18 : Photos de terrain des gneiss du Vivier montrant :a) des gneiss migmatitiques très déformés, b) des gneiss clairs à texture rubanée, riches en lits blancs quartzo-feldspathiques, c) des gneiss sombres très riches en biotite avec quelques niveaux quartzo-feldspathiques.....	45
Fig.III 19 : Photos des différents types de micaschistes: a) micaschiste à grenats, b) et c) micaschiste à disthène, d) micaschiste à niveaux quartzo-feldspathique riches en en baguettes de tourmaline.	46
Fig.III 20 : Affleurement de grenatites dans les micaschistes	47
Fig.III 21 : Affleurement quartzo-feldspathique pegmatitique d'environ 50 cm de large, b) cristaux centimétriques de muscovite.	47
Fig.III 22 : Les différents types de micaschistes : a) et b) à intercalations de niveaux quartzo-feldspathiques déformés, c) à staurotide, d) à grenats bien visibles à l'œil nu, e) et f) à andalousite	49
Fig.III 23 : Affleurement de cipolin : a , b) massif grisâtre et massif très fracturé , c) cipolin altéré et déformé.....	50
Fig.III 24 : Photos des skarns fortement altérés.....	50
Fig.III 25 : Photos de terrain montrant : a) un affleurement de grenatites dans la partie Nord de la plage, b) détail des grenats de différentes tailles, allant du millimètre à	

plus d'un cm de diamètre, c) intercalation de quartzite à grenat entre les grenatites et les micaschistes, d) détail de la couche de quartzite à grenat.	51
Fig.III 26 : a)Photos du sable de la plage d'Ain Achir: b) sable clair localisé dans la partie basse de la plage (près de la rive) et sable rougeâtre à brunâtre localisé dans la partie haute de la plage (près de la berge), c) sable rougeâtre près des affleurements rocheux.	52
Fig.III 27 : Photos de terrain des cipolins de la Plage-Militaire: a) Cipolin sub-vertical de la partie Sud de la plage, b) Cipolin sub-vertical de la partie Nord de la plage.	53
Fig.III 28 : Skarns localisé dans la zone de contact entre les micaschistes et les cipolins, l'ensemble est fortement altéré.	53
Fig.III 29 : a) Micaschiste en position sub-verticale, à intercalations quartzo-feldspathiques, b) formations quartzo-feldspathiques en nodules.	54
Fig.III 30 : Vue panoramique de la plage Plage-Militaire.....	54
Fig.III 31 : A affleurement de la zone de contact entre les plages Ain Achir et Plage-Militaire (Vue du côté de la Plage-Militaire).	55
Fig.III 32 : a) Vue du mur de béton recouvrant les formations géologiques, b) affleurement de micaschiste à staurotide dans la partie nord de la plage El Nasr.	56
Fig.III 33 : Vue du sable sombre de la plage El Nasr.	56
Fig.III 34 : Photos de différents affleurements affectés par des déformations souples: a) plis et microplis bien visibles dans les intercalations quartzo-feldspathiques des micaschistes, b) micaschiste fortement déformé, c) gneiss montrant des plis en chevrons, d) plis en fer à cheval dans les cipolins, e) plis et microplis (déformations secondaires) dans les gneiss.....	57
Fig.III 35 :Photos de terrain montrant: a) un panorama du miroir de faille dans les cipolins affleurants dans la zone du Phare, b) des failles recoupants les micaschistes de la zone du Vivier du Cap de Garde, c) des micaschistes affectés par de nombreuses diaclases à remplissage secondaire, d) des cipolins traversés par des diaclases linéaires, e) des cipolins à diaclases en réseaux.	58

CHAPITRE IV : CARACTERISTIQUES PHYSICO-PETROGRAPHIQUES ET MINERALOGIQUES

Fig.IV 1 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des micaschistes d'Ain Achir ; Bt : biotite, Grt : grenat, Ms : muscovite, St : staurotide, Qz : quartz (Abréviations selon Whitney et Evans, 2010)	61
Fig.IV 2 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des cipolins d'Ain Achir ; Cal : Calcite	61
Fig.IV 3 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des skarns de la plage d'Ain Achir : a , b) calcite sub-automorphe à automorphe et présence de cristaux de plagioclases altérées, c, d) épidote à teintes de polarisation en manteau d'arlequin.	62
Fig.IV 4 : Caractéristiques granulométriques : a) Triangle de classification de Folk et Ward, (1957), b) Courbes de distribution granulométrique du sable de la plage d'Ain Achir.	64
Fig.IV 5 : Diffractogrammes du sable d'Ain Achir : a) sable clair, b) sable sombre...	67
Fig.IV 6 : Photographies au microscope binoculaire du sable d'Ain Achir : a, b) sable clair ; c, d et e) sable sombre. Qz : quartz, Grt: Grenat, Ep: Epidote, St: Staurotide, Tur: tourmaline, Cal: calcite,	68
Fig.IV 7 : Photo au microscope binoculaire : a) grain de quartz jaune-brunâtre ; b et c) de quartz laiteux, d, e, f) de cristaux de calcite	68
Fig.IV 8 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de quartz : a) sub-arrondis et lisse, b) très usé avec de nombreuses traces de choc.	69
Fig.IV 9 : Photo au microscope binoculaire de grenats : a-e) subautomorphes à xénomorphes de couleur rose à rougeâtre, e) grenats à inclusions.	69
Fig.IV 10 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de grenat : a) Vue d'ensemble d'un grain avec des traces de choc, b) détails des traces de chocs en V à contours anguleux.	69
Fig.IV 11 : Classification des grenats du sable d'Ain Achir dans le diagramme ternaire de Locock, 2008. AA S1: sable clair, AAS 2 : sable sombre, Prp : pyrope, Alm : almandin, Sp : spessartine, Grs : grossulaire	70

Fig.IV 12 : Profils bord-bord et cartographie multiéléments sur grenats : a) grenat homogène non zoné, b) grenat zoné sans inclusions, c) grenat zoné avec des inclusions.....	71
Fig.IV 13 : Photo au microscope binoculaire : a) d'une macle partielle en croix de la staurotide, b et c) de débris de staurotide xénomorphe ; d) de staurotide prismatique et automorphe ; e) grain de staurotide à traces d'usure.	72
Fig.IV 14 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de staurotide : a) Vue d'ensemble des figures de corrosion, b) détails des traces de chocs en V et des stries d'arrachement. V : traces de chocs en V, L : lignes d'arrachements	72
Fig.IV 15 : Diagramme de Droop (1987) des staurotides du sable d'Ain Achir: a) AFM, b) $X_{Fe}-X_{Mg}-X_{Zn}$. $A=(Al/2)/(Al+Mg+Fe)/2$, $F=Fe/(Al+Mg+Fe)/2$, $M=Mg/(Al+Mg+Fe)/2$, $X_{Fe}=Fe/(Fe+Mg)/2$, $X_{Mg}=Mg/(Mg+Fe)/2$, $X_{Zn}=Zn/(Zn+Fe+Mg)$	73
Fig.IV 16 : Photo au microscope binoculaire de grains d'épidote	74
Fig.IV 17 : Photo au microscope binoculaire de cristaux prismatiques de disthène.	74
Fig.IV 18 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de disthène : a) à traces de dissolution, b) à traces de dissolutions et de denticulations.....	74
Fig.IV 19 : Photo au microscope binoculaire de tourmalines : a-f) en débris plus ou moins arrondis par l'usure ; a, d et e) en grains en forme triangulaire (cassure basale) ; g et h) prismatiques.....	75
Fig.IV 20 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de tourmaline : a) Vue d'ensemble des figures de dissolution, b) détails des figures de dissolutions.	75
Fig.IV 21 : Classification des tourmalines du sable d'Ain Achir dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en : a) Ca et les alcalins (Jiang et al. 1995, 1996), b) en fer de Henry et Guidotti, 1985.	76
Fig.IV 22 : a , c) Diagrammes de distribution du Fe et Mg dans les tourmalines, b) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée, d) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée à inclusions.	78
Fig.IV 23 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des micaschistes de la Plage-Militaire ; Bt : biotite, Grt : grenat, Ms : muscovite, St : staurotide, Qz : quartz, Ky : disthène.....	79

Fig.IV 24 : Microphotographie en lumière polarisée analysée des cipolins de la Plage-Militaire ; Cal : Calcite, Ep : Epidote.....	80
Fig.IV 25 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des skarns de la Plage-Militaire	80
Fig.IV 26 : Caractéristiques granulométriques : a) Triangle de classification des formations meubles de Folk et Ward (1957), b) Courbes de distribution du sable de la Plage-Militaire.	83
Fig.IV 27 : Diffractogramme du sable sombre de la Plage-Militaire.	86
Fig.IV 28 : Photo au microscope binoculaire de grains de quartz laiteux.....	86
Fig.IV 29 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de quartz : a) automorphe et quasiment non usé, b) sub-arrondi et à traces de chocs en V.....	87
Fig.IV 30 : Photographies au microscope binoculaire du sable sombre de la Plage-Militaire. Abréviations selon Whitney et Evans, 2010, Grt : Grenat, Ep: Epidote, St: Staurotide, Tur: tourmaline, Ky : disthène	87
Fig.IV 31 : Photo au microscope binoculaire de grenats en débris de couleur rose à rougeâtre à inclusions.....	88
Fig.IV 32 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de grenat : a)vue d'ensemble d'un grain avec des traces de choc, b) détails des traces de chocs en cuvette à contours rudes, c) détails des traces de chocs en V à contours lisse.....	88
Fig.IV 33 : Classification des grenats du sable de la plage Plage-Militaire dans le diagramme ternaire de Locock (2008) .PMS : sable sombre, Prp : pyrope, Alm : almandin, Sp : spessartine, Grs : grossulaire.....	90
Fig.IV 34 : Profils bord-bord et cartographie multiéléments sur grenats : a, b) grenat homogène non zoné avec des inclusions ; d, f) grenat zoné avec des inclusions. .	91
Fig.IV 35 : Photo au microscope binoculaire : a, b) de débris de staurotide xénomorphe ; c, d, e) de staurotide prismatique et automorphe ; f) de grains de staurotide à traces d'usure.	91
Fig.IV 36 : Photos rétrodiffusées au MEB d'un grain de staurotide : a) vue d'ensemble des figures de corrosion, b et c) détails des traces de chocs sous forme de cavités et de stries d'arrachements.	92

Fig.IV 37 : Diagramme de Droop (1987) des staurotides du sable de la Plage-Militaire : a) AFM, b) XFe-XMg-XZn. $A = (Al/2)/(Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe/(Al+Mg+Fe)/2$, $M = Mg/(Al+Mg+Fe)/2$, $XFe = Fe/(Fe+Mg)/2$, $XMg = Mg/(Mg+Fe)/2$, $XZn = Zn/(Zn+Fe+Mg)$	94
Fig.IV 38 : Photo au microscope binoculaire de grains d'épidote.	94
Fig.IV 39 : Photo au microscope binoculaire de cristaux prismatiques de disthène.	95
Fig.IV 40 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de disthène : a) vue d'ensemble des figures de corrosion ; b) traces de dissolution.	95
Fig.IV 41 : Photo au microscope binoculaire de tourmalines : a, b et c) prismatiques à contours émoussés ; d et e) en grains sub-arrondis.	95
Fig.IV 42 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de tourmaline : a) vue d'ensemble des figures de dissolution, b) détails des figures de dissolutions.	96
Fig.IV 43 : Classification des tourmalines du sable de la Plage-Militaire : a) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en Ca et en alcalins de Jiang et al. (1995, 1996), b) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en fer de Henry et Guidotti, 1985.	98
Fig.IV 44 : Microphotographie à la loupe binoculaire d'une lame mince montrant une tourmaline.	98
Fig.IV 45 : a) Diagramme de distribution du Fe et Mg dans les tourmalines, b) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée.	99
Fig.IV 46 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des micaschistes de plage El Nasr. Bt : biotite, Grt : grenat, Ms : muscovite, St : staurotide, Qz : quartz	100
Fig.IV 47 : Caractéristiques granulométriques : a) Triangle de classification des formations meubles de Folk et Ward (1957), b) Courbes de distribution du sable de la plage El Nasr.	102
Fig.IV 48 : Diffractogramme du sable sombre de plage El Nasr.	104
Fig.IV 49 : Photo au microscope binoculaire de grains de quartz laiteux.	104

Fig.IV 50 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain quartz : a) contours anguleux, b) contours sub-arrondis et à traces de chocs à contours lisses, c) à traces d'arrachement en écailles	105
Fig.IV51 : Microphotographies du sable sombre de la plage El Nasr : a et b) au microscope binoculaire, c et d) en lames minces. Abréviations selon Whitney et Evans, 2010, Grt : Grenat, St: Staurotide, Tur: tourmaline, Ky : disthène.	106
Fig.IV 52 : Photo au microscope binoculaire de débris de grenats transparents et à inclusions solides.....	106
Fig.IV 53 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de grenat : a) Vue d'ensemble d'un grain avec des traces de choc, b) détails des traces de chocs en V à contours lisses.	106
Fig.IV 54 : Classification des grenats du sable sombre de plage El Nasr dans le diagramme ternaire de Locock (2008). Prp : pyrope, Alm : almandin, Sp : spessartine, Grs : grossulaire	107
Fig.IV 55 : a) Profils bord-bord de l'almandin, du pyrope et du grossulaire, b) cartographie multiéléments effectuée le long d'une bande traversant le grain de part en part.....	108
Fig.IV 56 : Photo au microscope binoculaire de : a) débris de staurotide anguleux ; b) grain poli et arrondi, c) de staurotide prismatique et automorphe.	108
Fig.IV 57 : Photo rétrodiffusée au MEB: a) vue d'ensemble d'un grain sub-arrondis à surface plus ou moins lisse et recouverte d'une fine pellicule argileuse, b) détails de la figure 57.....	109
Fig.IV 58 : Diagramme de Droop (1987) des staurotides du sable de plage El Nasr : a) AFM, b) $X_{Fe}-X_{Mg}-X_{Zn}$. $AA = (Al/2) / (Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe / (Al+Mg+Fe)/2$, $M = Mg / (Al+Mg+Fe)/2$	110
Fig.IV 59 : Photo au microscope binoculaire de cristaux prismatiques de disthènes.	110
Fig.IV 60 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de disthène : a, b) prismatique à contours sub-arrondis, c) détails de la photo précédente montrant les traces d'arrachement.....	111

Fig.IV 61 : Photo au microscope binoculaire de tourmalines : a, b) en grains prismatiques, (c, d, f) en débris plus ou moins arrondis par l'usure ou en grains de forme triangulaire (cassure basale).	111
Fig.IV 62 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de tourmaline : a) vue des cassures conchoïdales du minéral, b) détails des figures de choc et des stries d'arrachement.	112
Fig.IV 63 : Classification des tourmalines du sable de la plage El Nasr : a) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en Ca et les alcalins (Jiang et al. 1995, 1996), b) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en fer de Henry et Guidotti, (1985).	113
Fig.IV 64 : a, Diagrammes de distribution du Fe et Mg dans les tourmalines, b) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée.	113
Fig.IV 65 : a, b) Microphotographies rétrodiffusées de grenats (microsonde) avec des inclusions solides, c) diffractogrammes de grenats détritiques à inclusions de quartz	114
Fig.IV 66 : a, b) Microphotographies rétrodiffusées de staurotides avec des inclusions solides, c) diffractogramme de staurotides détritiques à inclusions d'ilménite, d) diffractogramme de staurotides détritiques à inclusions de grenat de type almandin, e) diffractogramme de staurotides détritiques à inclusions d'almandin, de zircon et ilménite.	116
Fig.IV 67 : diffractogramme de staurotides détritiques à inclusions de grenats.	116

CHAPITRE V : SIGNIFICATION DES VARIATIONS CHIMIQUES DES SABLES

Fig.V. 1 : Abondance et distribution des éléments chimiques majeurs (en %) dans le sable clair et celui sombre de la plage d'Ain Achir.	122
Fig.V. 2: Abondance et distribution de quelques éléments chimiques traces (ppm) dans le sable clair et celui sombre de la plage d'Ain Achir.	123

Fig.V. 3: Abondance et distribution des terres rares (ppm) dans le sable clair et celui sombre de la plage d'Ain Achir.	124
Fig.V. 4 : Distribution des minéraux lourds (%) dans le sable clair et sable sombre de la plage d'Ain Achir.	125
Fig.V. 5 : Variations des minéraux lourds (HM) et les éléments majeurs dans le sable d'Ain Achir.....	126
Fig.V. 6 : Diagrammes de corrélations du : a) grenat avec le chrome; b) du grenat avec le vanadium; c) de la staurotide avec le chrome; d) de la staurotide avec le vanadium.	128
Fig.V. 7: Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le zinc et le grenat; b) le zinc et la staurotide.....	128
Fig.V. 8: Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le zirconium et le grenat; b) le zirconium et la staurotide.....	129
Fig.V. 9 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le strontium et la calcite; b) le strontium et le quartz.	129
Fig.V. 10 : Diagramme montrant la corrélation positive entre l'yttrium et: a) le grenat; b) la staurotide.....	130
Fig.V. 11 : Diagrammes montrant une forte corrélation entre les terres rares et: a) les grenats, b) les staurotides	130
Fig.V. 12 : Diagrammes montrant l'absence de corrélation significative entre les terres rares et: a) la tourmaline; b) le disthène; c) l'épidote et le quartz et une corrélation négative avec : e) la calcite.....	131
Fig.V. 13 : Cercle de corrélation (ACP) des minéraux lourds, des éléments traces et des Terres Rare du sable de la plage d'Ain Achir.....	133
Fig.V. 14 : Abondance et distribution des éléments chimiques majeurs dans le sable sombre de la Plage-Militaire.	135
Fig.V. 15: Abondance et distribution de quelques éléments chimiques en traces dans le sable sombre de la Plage-Militaire.	136
Fig.V. 16 : Abondance et distribution des terres rares dans le sable sombre de la Plage-Militaire.....	136

Fig.V. 17 :.Distribution des minéraux lourds dans le sable sombre de la Plage-Militaire.	138
Fig.V. 18: Variations des minéraux lourds (HM) et des éléments majeurs dans le sable de la Plage -Militaire.	139
Fig.V. 19 : Diagrammes de corrélations : a) de la staurotide avec le chrome ; b) du grenat avec le chrome, c) du grenat avec le vanadium ; c) de la staurotide avec le vanadium.	141
Fig.V. 20 : Diagrammes montrant la corrélation : a) significative entre le zinc et la staurotide, b) négligeable entre le Zn et le grenat.	141
Fig.V. 21 : Diagrammes montrant la corrélation : a) positive entre le zirconium et le grenat, b) négligeable du zirconium avec la staurotide.	142
Fig.V. 22 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) le strontium et la calcite ; b) le strontium et le quartz.	142
Fig.V. 23 : Diagramme montrant la corrélation positive entre l'Yttrium et : a) le grenat ; b) la staurotide	142
Fig.V. 24 : Diagrammes montrant la présence de corrélation entre les terres rares et : a) le grenat ; b) la staurotide.	143
Fig.V. 25 : Diagrammes montrant une corrélation négative entre les terres rares et : a) la tourmaline ; b) le disthène ; c) l'épidote ; d) la calcite et e) le quartz.	143
Fig.V. 26 : Cercle de corrélation (ACP) des minéraux lourds, des éléments traces et des Terres Rare du sable de la Plage-Militaire.	146
Fig.V. 27 : Teneurs et distribution des éléments chimiques majeurs dans le sable sombre de la plage El Nasr.	148
Fig.V. 28 : Abondance et distribution de quelques éléments chimiques en traces dans le sable sombre de la plage El Nasr.	149
Fig.V. 29 : Abondance et distribution des terres rares dans le sable sombre de la plage El Nasr.	150
Fig.V. 30: Distribution des minéraux dans le sable sombre de la plage El Nasr.	151
Fig.V. 31 : Variations des minéraux lourds (HM) et les éléments majeurs dans le sable de Plage El Nasr.	152

Fig.V. 32 : Diagrammes de corrélations : a) du grenat avec le chrome ; b) de la staurotide avec le chrome; c) de la tourmaline avec le chrome ; d) du grenat avec le vanadium; e) de la staurotide avec le vanadium.....	153
Fig.V. 33 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) le zinc et le grenat b) le zinc et la staurotide.....	154
Fig.V. 34 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) l'yttrium et le grenat; b) l'yttrium et la staurotide.....	154
Fig.V. 35 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) le zirconium et le grenat ; b) le zirconium et la staurotide.....	154
Fig.V. 36 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le strontium et la calcite; b) le strontium et le quartz.	155
Fig.V. 37 : Diagrammes montrant la présence d'une corrélation entre les terres rares et: a) le grenat ; b) la staurotide.....	155
Fig.V. 38 : Diagrammes montrant l'absence de corrélation ou une corrélation négative entre les terres rares et: a) la tourmaline; b) le disthène; c) la calcite et d) le quartz.	156
Fig.V. 39 : Cercle de corrélation (ACP) des minéraux lourds, des éléments traces et des Terres Rare du sable de la Plage El Nasr.....	158

CHAPITRE VI : CARACTERISATION DE LA SOURCE DU SABLE SOMBRE

Fig.VI. 1: Profils des terres rares normalisées au Word Shale Average (WSA) des formations géologiques des trois plages étudiées, R: roche.....	161
Fig.VI. 2: Composition des grenats dans le diagramme discriminant de Mange et Morton (2007). A: grenats de métasédiments et de roches magmatiques intermédiaires felsiques du faciès granulitique; B: métasédiments du faciès amphibolitique; Bi: roches magmatiques intermédiaires felsiques; Ci: roches mafiques de haut grade; Cii: roches ultramafiques riches en Mg (pyroxénites and périclites); D: formations métasomatiques.	162
Fig.VI. 3: Position des échantillons de tourmalines dans le diagramme de Henry et Guidotti (1985), 1: Granitoïdes riches en Li, pegmatites et aplites; 2: Granitoïdes	

pauvres en Li et leurs pegmatites associées; 3: métapelites riches en Ca, métapsammites et roches calco-silicatées; 4: métapelites pauvres en Ca, métapsammites et roches à quartz-tourmaline; 5:méta-carbonates; 6: méta-ultramafiques	163
Fig.VI. 4: Diagramme binaire comparant les facteurs de fractionnement ($LREE_N/HREE_N$) et ($MREE_N/HREE_N$) du sable d'Ain Achir avec les affleurements rocheux des trois plages, R: roche, LS: sable clair, DS: sable sombre.	165
Fig.VI. 5: Profils des terres rares du sable d'Ain Achir comparés aux profils des affleurements rocheux de: a) Ain Achir, b) Plage-Militaire et c) El Nasr	166
Fig.VI. 6: Composition des grenats dans le diagramme discriminant de Mange et Morton (2007). A: grenats de métasédiments et de roches magmatiques intermédiaires felsiques du faciès granulitique; B: métasédiments du faciès amphibolitique; Bi: roches magmatiques intermédiaires felsiques; Ci: roches mafiques de haut grade; Cii: roches ultramafiques riches en Mg (pyroxénites et périclites); D: formations métasomatiques.	168
Fig.VI. 7: Position des échantillons de tourmalines dans le diagramme de Henry et Guidotti (1985), 1: Granitoïdes riches en Li, pegmatites et aplites; 2: Granitoïdes pauvres en Li et leurs pegmatites associées; 3: métapelites riches en Ca, métapsammites et roches calco-silicatées; 4: métapelites pauvres en Ca, métapsammites et roches à quartz-tourmaline; 5:méta-carbonates; 6: méta-ultramafiques.	168
Fig.VI. 8: Diagramme binaire comparant les facteurs de fractionnement ($LREE_N/HREE_N$) et ($MREE_N/HREE_N$) du sable de la Plage-Militaire avec les affleurements rocheux des trois plages, R: roche, S: sable.	170
Fig.VI. 9 : Profils des terres rares du sable de la Plage-Militaire comparés aux profils des affleurements rocheux de: a) Plage-Militaire, Ain Achir et c) El Nasr	171
Fig.VI. 10: Composition des grenats dans le diagramme discriminant de Mange et Morton (2007). A: grenats de métasédiments et de roches magmatiques intermédiaires felsiques du faciès granulitique; B: métasédiments du faciès amphibolitique; Bi: roches magmatiques intermédiaires felsiques; Ci: roches	

mafiques de haut grade; Cii: roches ultramafiques riches en Mg (pyroxenites and périclites); D: formations métasomatiques.	172
Fig.VI. 11: Position des échantillons de tourmalines dans le diagramme de Henry et Guidotti (1985), 1: Granitoïde riche en Li, pegmatites et aplites; 2: Granitoïdes pauvres en Li et leurs pegmatites associées; 3: métapelites riches en Ca, métapsammites et roches calco-silicatées; 4: métapelites pauvres en Ca, métapsammites et roches à quartz-tourmaline; 5:méta-carbonates; 6: méta-ultramafiques.	173
Fig.VI. 12: Diagramme binaire comparant les facteurs de fractionnement ($LREE_N/HREE_N$) et ($MREE_N/HREE_N$) du sable de la plage El Nasr avec les affleurements rocheux des trois plages, R: roche, S: sable.	175
Fig.VI. 13: Profils des terres rares du sable de la plage El Nasr comparés aux profils des affleurements rocheux de: a) El Nasr, b) Ain Achir et c) Plage-Militaire....	176
Fig.VI. 14: Profils des terres rares normalisés au WSA du sable sombre et du zircon (Standard 91500, Sano et al.2002): a) Ain Achir, b) Plage-Militaire et c) plage El Nasr.	178

CHAPITRE VII : POTENTIEL ECONOMIQUE DU SABLE DES PLAGES DE : AIN ACHIR, PLAGE- MILITAIRE ET EL NASR

Fig.VII. 1: Utilisation industrielle du grenat (USGS, 2012).....	179
Fig.VII. 2: Composition chimique moyenne des grenats de Anthracite Filter Media Company comparée avec celle des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr).	180
Fig.VII. 3 : Composition chimique des grenats utilisés comme abrasifs par les compagnies Kuhmichel (Allemagne) et Lm Minig (Jiangsu , Chine) comparée avec les grenats des plages d'Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr.	182
Fig.VII. 4: Composition chimique des grenats utilisés pour la découpe comparée avec des grenats des plages d'Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr.....	184

INTRODUCTION ET GENERALITES

1. INTRODUCTION	1
2. PROBLEMATIQUE ET BUT DU TRAVAIL	2
3 : STRUCTURE DE LA THESE	3

CHAPITRE I : METHODOLOGIE

I.1 TRAVAUX DE TERRAIN	4
<i>I.1.1. Choix du site</i>	<i>4</i>
<i>I.1.2. Echantillonnage</i>	<i>4</i>
A - Prélèvement des échantillons de roches	4
B - Prélèvement des échantillons de sable	4
I.2. TRAVAUX DE LABORATOIRE	5
<i>I.2.1. Analyses chimiques des affleurements rocheux et du sable</i>	<i>5</i>
A- Les échantillons Consolides	6
B- Les échantillons Meubles	6
B.1. Etude granulométrique	6
B.1.1-Préparation des échantillons pour la granulométrie	6
a- Diagramme de classification des sols	8
b- Les courbes	9
c- Paramètres granulométriques	9
B.2. Etude minéralogique	11
B.2.1-Minéraux argileux	12
B.2.2-Minéraux carbonatés	14
B.2.3-Minéraux non argileux	16
a- Etude au microscope binoculaire :	16
b- Etude au microscope polarisant :	17

c- Etude minéralogique par diffractométrie (DRX) :	17
d- Etude exoscopique :	19
e- Analyse microsonde :	21

CHAPITRE II : LOCALISATION ET CADRE PHYSICO- GEOGRAPHIQUE

II.1 LOCALISATION DES SITES RETENUS POUR L'ETUDE	22
II.2 LE CLIMAT	24
<i>II.2.1. La température</i>	24
<i>II.2.2. La pluviométrie</i>	25
<i>II.2.3. Le vent</i>	25
<i>II.2.4. Vague et Houle</i>	26
II.3 HYDROGRAPHIE	27
II.4 RELIEF ET EROSION	28
II.5 CONCLUSION	30

CHAPITRE III : CADRE GEOLOGIQUE

III.1. APERÇU GEOLOGIQUE GENERAL.	31
<i>III.1.1. Les formations cristallophylliennes et roches associées</i>	31
A. Les formations cristallophylliennes	31
B. Les roches associées aux formations cristallophylliennes	33
<i>III.1.2. Les formations magmatiques</i>	34
<i>III.1.3. La couverture sédimentaire</i>	34
III.2. APERÇU GEOLOGIQUE DES ZONES ETUDIEES	34
<i>III.2.1. Secteur du Cap de Garde</i>	35
A- Ain Bent Soltane	37
A.1- Les micaschistes à grenat et andalousite :	37
A.2- Les séricitoschistes :	38
A.3- Les chloritoschistes :	38
A.4- Les cipolins :	39

A.5- Les calcarénites :	39
B- La Carrière	40
B.1- Les micaschistes à grenats :	40
B.2- Les amphibolites :	41
B.3- Les cipolins :	42
C- Le Phare	42
C.1- Les cipolins :	43
C.2- Les micaschistes à grenats :	43
C.3- Les skarns :	44
D. Le Vivier	44
D.1- Les Gneiss :	44
D.2- Les micaschistes :	45
D.3- Les grenatites :	46
D.4 - Les affleurements quartzo-feldspathiques pegmatitiques :	47
E Zone de la plage d'Ain Achir et de la plage Plage-Militaire	48
E.1- Plage d'Ain Achir	48
E.1.1-Les micaschistes :	48
E.1.2-Les cipolins :	49
E.1.3-Les skarns :	50
E.1.4-Les grenatites :	50
E.1.5-Les formations récentes :	51
E. 2-. Plage-Militaire	52
E.2.1-Les cipolins :	52
E.2.2-Les Skarns :	53
E.2.3-Les micaschistes :	53
E.2.4-Les formations récentes :	54
F. La zone de contact entre les plages Ain Achir et Plage-Militaire	54
III.2.2. Secteur du Port :	55
A. - plage El Nasr	55
A.1. - Les micaschistes :	55
A.2. - Les formations récentes :	56

III.3. APERÇU TECTONIQUE DES SECTEURS ETUDIÉS.....	56
III.3.1. <i>Tectonique souple</i> :	56
III.3.2. <i>Tectonique cassante</i>	58

CHAPITRE IV : CARACTERISTIQUES PHYSICO- PETROGRAPHIQUES ET MINERALOGIQUES

IV. 1. INTRODUCTION	59
IV. 2. CARACTERISATION DES AFFLEUREMENTS	60
IV.2.1. <i>La zone du Cap De Garde (Ain Achir Et Plage-Militaire)</i>	60
A. Plage d'Ain Achir	60
A.1- Les affleurements rocheux proximaux.....	60
A.1.1. Pétrographie-Minéralogie	60
a. Les Micaschistes :	60
b. Les cipolins :	61
c. Les Skarns :	62
A.2- Les roches meubles (sable)	62
A.2.1. Paramètres granulométriques des sables.....	62
A.2.2. Identification minéralogique	64
a. Les minéraux argileux :	65
b. Les carbonates :	65
c. Les minéraux non argileux :	66
B. Plage-Militaire.....	78
B.1- Les affleurements rocheux proximaux	78
B.1.1. Pétrographie-Minéralogie.....	78
a. Les Micaschistes :	78
b. Les cipolins :	80
c. Les skarns :	80
B.2- Les roches meubles (sable)	81
B.1.1. Classification granulométrique	81
B.1.2. Identification Minéralogique	84

a. Les minéraux argileux :	84
b. Les carbonates :	84
c. Les minéraux non argileux :	85
<i>IV.2.2. La zone du port</i>	99
C. Plage El Nasr.....	99
C.1- Les affleurements rocheux proximaux.....	99
C.1.1 .Pétrographie-Minéralogie.....	99
a. Les Micaschistes :	99
C.2 - Les roches meubles (sable)	100
C.2.1- Paramètres granulométriques des sables.....	100
C.2.2- Identification minéralogique	102
a. Les minéraux argileux :	103
b. Les carbonates :	103
c. Les minéraux non argileux :	103
<i>IV.3. LES MINERAUX EN INCLUSION</i>	113
IV.3.1. Le grenat :	114
IV.3.2. La staurotide :	114
IV.3.3. Le disthène :	116
IV.4. CONCLUSION.....	117

CHAPITRE V : SIGNIFICATION DES VARIATIONS CHIMIQUES DES SABLES

V.1. INTRODUCTION.....	118
V.2. LA ZONE DU CAP DE GARDE (AIN ACHIR ET PLAGE-MILITAIRE).....	118
<i>V.2.1. Plage d'ain achir</i>	118
A. Distribution des éléments chimiques	122
A.1. Les éléments majeurs	122
A. 2. Les éléments traces.....	122
A.3. Les Terres rares	123
B. Relation entre composition minéralogique et chimique	124

B.1. Relation entre composition minéralogique - éléments majeurs:	124
B.2. Relation entre composition minéralogique - Eléments traces et Terres rars :	126
B.2.1. Méthodes statistiques simples	126
B.2.2. Analyses en Composantes Principales (ACP).....	131
<i>V.2.2. Plage-Militaire</i>	<i>133</i>
A. Distribution des éléments chimiques	135
A.1. Les éléments majeurs	135
A.2. Les éléments traces.....	135
A.3. Les terres rares.....	136
B. Relation entre composition minéralogique et chimique	137
B.1. Relation entre composition minéralogique - éléments majeurs:	137
B.2. Relation entre composition minéralogique - Eléments traces et Terres rars :	139
B.2.1. Méthodes statistiques simples	139
B.2.2. Analyses en Composantes Principales (ACP).....	144
V. 3. LA ZONE DU PORT.....	146
<i>V.3.1. La plage El Nasr.....</i>	<i>146</i>
A. Distribution des éléments chimiques	147
A.1. Les éléments majeurs	147
A.2. Les éléments traces.....	148
A.3. Les Terres rares	149
B. Relation entre composition minéralogique et chimique	150
B.1. Relation entre composition minéralogique – Eléments majeurs :	150
B.2. Relation entre composition minéralogique – Eléments traces et Terres rars :	151
B.2.1. Méthodes statistiques simples	151
B.2.2. Analyses en Composantes Principales (ACP).....	156

CHAPITRE VI : CARACTERISATION DE LA SOURCE DU SABLE SOMBRE

VI.1. INTRODUCTION	159
VI.2. CARACTERISTIQUES GENERALES DES AFFLEUREMENTS ROCHEUX COHERENTS	159
VI.3. DISCRIMINATION DES ROCHES-SOURCES POTENTIELLES	161
<i>VI.3.1. La zone du Cap De Garde (Ain Achir Et Plage-Militaire)</i>	161
A. Plage D'Ain Achir	161
A.1.Roches-sources potentielles des grenats et des tourmalines	161
A.1.1.Les Grenats.....	161
A.1.2. Les tourmalines	162
A.2. Discrimination des roches-sources potentielles du sable a partir des terres rares	163
A.2.1.Les facteurs de fractionnement.....	163
A.2.2. Les Profils REE normalisés du sable et des affleurements rocheux	165
B. Plage-Militaire.....	167
B.1.Roches-sources potentielles des grenats et des tourmalines.....	167
B.1.1. Les Grenats.....	167
B.1.2 Les tourmalines	167
B.2 .Discrimination des roches-sources potentielles du sable a partir des terres rares	169
B.2.1.Les facteurs de fractionnement.....	169
B.2.2Les Profils REE normalisés du sable et des affleurements rocheux .	170
<i>VI.3.2. La zone du port</i>	172
C. Plage El Nasr	172
C.1. Roches-sources potentielles des grenats et des tourmalines.....	172
C.1.1.Les Grenats.....	172
C.1.2. Les tourmalines	173
C.2. Discrimination des roches-sources potentielles du sable a partir des terres rares	173
C.2.1. Les facteurs de fractionnements	173

C.2.2. Les Profils REE normalisés du sable et des affleurements rocheux	175
VI.4. SOURCE DES ANOMALIES EN TERRES RARES LOURDES (HREE) DU SABLE DES TROIS PLAGES	176
VI.5. CONCLUSION	178

CHAPITRE VII : POTENTIEL ECONOMIQUE DU SABLE DES PLAGES DE : AIN ACHIR, PLAGE- MILITAIRE ET EL NASR

VII.1. INTRODUCTION.....	179
VII.2. INTERET ECONOMIQUE DU GRENAT	179
<i>VII.2.1. Le Grenat Comme Matière Filtrante</i>	<i>180</i>
<i>VII.2.2. Le grenat comme matière abrasive.....</i>	<i>181</i>
<i>VII.2.3. Le grenat comme matière première pour la coupe au jet d'eau</i>	<i>182</i>
VII.3. INTERET ECONOMIQUE DE LA STAURITIDE	184
<i>VII.3.1. La Stauritide comme matière abrasive</i>	<i>184</i>
VII.5. CONCLUSION	185

INTRODUCTION ET GENERALITES

1. INTRODUCTION

Le *sable* est un matériau naturel, constitué de grains plus ou moins fins, dont la dimension varie de 0,15 mm à 4,76 mm. Il provient de l'érosion des roches sous l'effet d'agents tels que l'eau, la température et le vent.

La composition minéralogique du sable des plages modernes dépend de la nature de la roche-mère à partir de laquelle la matière détritique a été dérivée. On distingue les sables clairs qui sont les plus abondants et les sables sombres.

Les sables clairs : ce sont des sables constitués essentiellement par des minéraux blancs légers tels que le quartz, la calcite, les micas et feldspaths. Ils sont généralement utilisés pour la construction, la verrerie, la céramique...

Les sables sombres : il s'agit principalement de sables à minéraux lourds (densité supérieure à 2,87). Ces sables sont le produit de l'érosion de roches riches en minéraux lourds tels que l'ilménite, le rutile, le grenat, la tourmaline et le zircon.

Certains minéraux lourds tels que les tourmalines, des variétés de grenats et zircons sont utilisés en bijouterie. D'autres, comme par exemple la monazite, certains grenats, et l'ilménite fournissent la matière première (éléments traces et terres rares) des produits de haute technologie, très recherchées. Un exemple de quelques minéraux porteurs d'éléments traces compatibles est présenté dans le tableau 1 (Rösler et Lange 1976).

Tableau 1: Exemple de quelques minéraux porteurs d'éléments traces.

Minéraux	Formule chimique	Eléments traces
Staurotide	$(\text{Fe, Mg})_2(\text{Al, Fe})_9\text{O}_6[\text{SiO}_4](\text{OOH})$	Zn, Cr, Co, Li
Grenat	$(\text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Mn, Ca})_3(\text{Al, Fe}^{3+}, \text{Ti, Cr})_2(\text{SiO}_4)_3$	HREE, Cr, V, Y, Yb, Hf, Th, U
Tourmaline	$\text{NaFeAl}_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$	Li, F, Ga, V, Cr, Sr, Zn,
Zircon	ZrSiO_4	Hf, U
Ilménite	FeTiO_3	Co, Ni, Cr, Y, V

De nombreuses études ont été réalisées sur les sables de la côte Algérienne. La plupart d'entre elles concernent les sables dunaires ou les sables clairs de plage (Bouzenoune et Remoum 2008) et récemment (Kermani et al, 2016).

La wilaya d'Annaba présente 80 km de littoral constitué d'une succession de falaises abruptes rocheuses entrecoupées de plages à sable clair et parfois sombre. Uniquement trois (03) plages à sables sombres (sable rouge-brunâtre) ont été recensées, il s'agit de la plage d'Ain Achir, la Plage-Militaire et celle d'El Nasr.

Les affleurements rocheux proximaux de ces trois plages sont des micaschistes à grenat-staurotide et/ou andalousite ou disthène, des marbres, des skarns épidotiques, des migmatites et des nombreuses veines quartzo-feldspathiques à tourmaline.

Le sable d'Ain Achir est constitué de sable clair et de sable sombre. Après une tempête le sable sombre peut constituer 70% de la plage. Le sable de la Plage-Militaire et El Nasr est en permanence brun foncé. La composition minéralogique du sable brun de ces trois plages est dominée par des minéraux lourds et transparents tels que le grenat, la staurotide, le disthène, la tourmaline et l'épidote. Ces derniers présentent une concentration modale qui peut atteindre plus de 80%, ce qui nous permet de classer les sables de ces trois (03) plages comme des micro-placers à minéraux lourds.

L'Etude détaillée des caractéristiques minéralogiques (phases minéralogiques et compositions chimiques correspondantes) et celle chimique globale (majeurs traces et terres rares) de ces sables permet l'identification des relations qui pourraient exister entre les minéraux lourds observés (grenats, staurotide, disthène, tourmaline et épidote) et la composition chimique du sable. Cette étude permet également de déterminer la/ou les sources de ces sables à minéraux lourds.

Les résultats pourraient fournir des indices pour les analyses de provenance des gisements placers à minéraux lourds dans la wilaya d'Annaba, dans lesquels la connaissance de la source présente une valeur économique importante.

2. PROBLEMATIQUE ET BUT DU TRAVAIL

La présence de trois plages (03) (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) à sable sombre est un cas unique dans la wilaya d'Annaba.

Les principales questions qui sont soulevées sont : Quelle est la raison de la couleur sombre ?, Quelle est la composition minéralogique et chimique de ces sables ? Y a-t-il une relation entre la composition minéralogique et chimique ?, Quelle est la source et la provenance du sable sombre?

L'objet de cette thèse est :

- 1- de réaliser une étude détaillée de ces sables qui n'a jamais été réalisée auparavant,
- 2- de répondre aux questions précédentes en identifiant :
 - les minéraux responsables de la couleur sombre du sable,
 - les relations qui pourraient exister entre les minéraux lourds observés (grenat, staurotide, disthène, tourmaline et épidote) et la composition chimique du sable
 - la provenance des minéraux lourds et par la suite celle du sable,
 - l'importance économique éventuelle des minéraux lourds de la région.

3 : STRUCTURE DE LA THESE

Cette thèse, est structurée en 7 chapitres débute par une introduction et des généralités pour poser brièvement la problématique et le but de cette étude.

Le chapitre I présente les différentes méthodes analytiques et techniques utilisées dans ce travail.

Le chapitre II est consacré aux caractéristiques physico-géographiques des zones étudiées.

Le chapitre III décrit le contexte géologique général du massif de l'Edough et en détails celui des secteurs étudiés.

Le chapitre IV est entièrement consacré à l'étude pétrographique et minéralogique des affleurements rocheux proximaux, ainsi que des sables des plages retenues.

Le chapitre V présente les résultats des différentes analyses et leurs traitements par différentes méthodes statistiques et géochimiques. Il explique la relation entre la composition chimique et minéralogique.

Le chapitre VI est consacré à la détermination de la provenance des sables sombres étudiés.

Le chapitre VII est consacré à l'étude du potentiel économique éventuel du sable des 3 plages en raison de l'importance des sables à minéraux lourds.

La conclusion générale

Une annexe comportant les deux (02) articles publiés dans le cadre de cette thèse.

CHAPITRE I : METHODOLOGIE

La récolte des données s'est effectuée en deux étapes principales :

- ✓ Des travaux de terrain (choix du site, échantillonnage...)
- ✓ Des travaux de laboratoire (analyse granulométrique, minéralogique, chimique...et autres).

I.1 TRAVAUX DE TERRAIN

I.1.1. Choix du site

Le but de cette opération est de localiser les plages à sable de couleur sombre. La couleur sombre du sable reflète souvent la présence de minéraux sombres qui sont généralement des minéraux lourds tels que le grenat, la staurotide, la tourmaline et autres.

I.1.2. Echantillonnage

Deux types d'échantillons ont été prélevés dans notre zone d'étude :

- ✓ Des échantillons de roches représentatifs de la lithologie affleurant au niveau de chaque plage.
- ✓ Des échantillons de sable.

A - Prélèvement des échantillons de roches

Dans le but d'assurer la représentativité lithologique des affleurements côtiers, la taille des échantillons de la roche fraîche est en moyenne de 20x15cm avec un poids minimal de 2Kg.

Chaque échantillon a été découpé en trois (03) parties destinées respectivement à l'analyse chimique, à la fabrication de lames minces et comme témoin.

B - Prélèvement des échantillons de sable

Les échantillons de sable ont été prélevés dans les zones suivantes : El Nasr, Plage-Militaire et Ain Achir).

Le prélèvement s'est fait avec une tarière manuelle selon une maille régulière recouvrant toute la surface de la plage. Chaque échantillon a été prélevé à une profondeur de 0-25 cm (Fig.1) et suivant une maille tenant compte de la superficie de

la plage. Le prélèvement s'est effectué le long de 03 profils : 1) près de l'affleurement rocheux côtier, 2) près de la ligne du rivage et 3) entre les deux précédents profils. Chaque échantillon, d'un poids approximatif de 4-5 Kg, a été mis dans des sachets étiquetés. Le pas de prélèvement est en fonction de la taille de la plage :

- ✓ Ain Achir : La taille de la plage est en moyenne 275x30m. Dix-huit (18) échantillons ont été prélevés à un intervalle moyen de 20m.
- ✓ Plage-Militaire : Dans cette plage de dimension similaire à la précédente (236x20m), 17 échantillons ont été prélevés à un intervalle moyen de 15m.
- ✓ Plage El Nasr: Neuf (09) échantillons de sable ont été prélevés sur cette plage.



Fig.I. 1 : Photo de terrain montrant un point de prélèvement des échantillons de sable.

I.2. TRAVAUX DE LABORATOIRE.

Cette étape consiste à préparer les échantillons de roches et de sables aux différents essais et analyses.

I.2.1. Analyses chimiques des affleurements rocheux et du sable

Les analyses des éléments chimiques ont été réalisées au laboratoire GeoForschungs Zentrum Potsdam (GFZ) et à l'Institut des Sciences de la Terre et de l'Environnement de Potsdam, Allemagne. Les éléments majeurs ont été analysés par un spectromètre à fluorescence X automatique sur des pastilles préparées avec Spectromelt A12 (Merck). Les éléments traces et les terres rares ont été déterminées par ICP-MS (Plessen, 1997; Grabe-Schönberg, 1993) et ICP-AES (Zuleger et Erzinger, 1988).

A- Les échantillons consolidés

- ✓ **Les lames minces** : Une lame mince a été confectionnée à partir de chaque échantillon de roche.
- ✓ **Analyse minéralogique** : Chaque lame mince a été étudiée au microscope polarisant dans le but de déterminer sa composition minéralogique.

B- Les échantillons meubles

B.1. Etude granulométrique

B.1.1-Préparation des échantillons pour la granulométrie

L'analyse granulométrique permet de déterminer la nature du sable à partir de l'étude des différentes fractions granulométriques. L'analyse consiste à séparer et à classer à l'aide des tamis les grains de sable selon leur diamètre.

Pour effectuer une analyse granulométrique il est nécessaire d'avoir un échantillon représentatif de chaque échantillon prélevé. La préparation de cet échantillon a été réalisée au Département des Mines de la Faculté des Sciences de la Terre de l'Université Badji-Mokhtar / Annaba.

L'étude granulométrique passe par plusieurs étapes :

Homogénéisation : cette opération consiste à bien mélanger le sable et à le mettre sous forme de cône (Fig.2).



Fig.I. 2 : Homogénéisation du sable

Aplatissement : consiste à aplatir à une épaisseur homogène le sable préalablement homogénéisé



Fig.I. 3 : Photo montrant l'aplatissement du sable

Quartage : cette opération a pour but d'avoir, à partir de 1 Kg d'échantillon initial, 250 g de sable destiné à subir les opérations de tamisage. On divise le sable en quatre (04) parties égales (Fig.4a) et on prend les deux (02) parties opposées (Fig.4b).

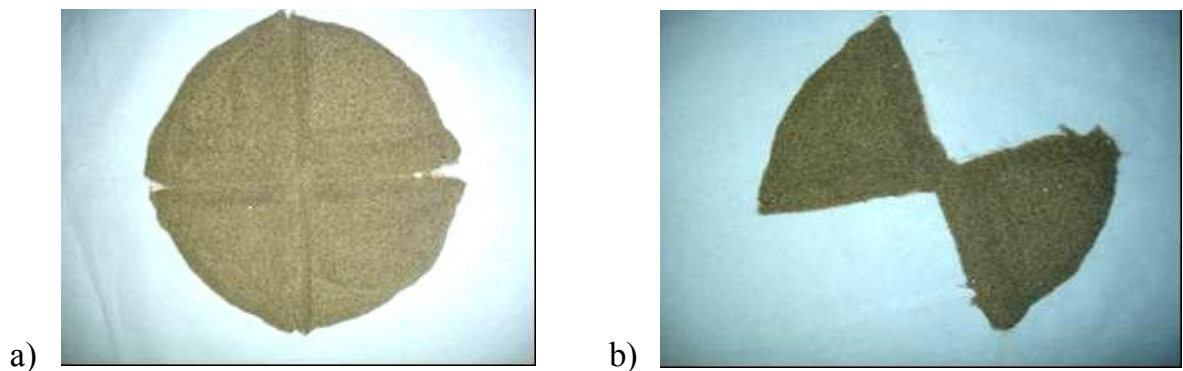


Fig.I. 4 : Photo montrant le quartage.

Séchage : s'effectue dans une étuve à une température de 80°C, pendant 35 minutes. L'échantillon est considéré comme sec, lorsque la différence de poids après deux essais est constante.

Tamisage : le tamisage a été fait à partir de 250 g de sable sec. Pour chaque échantillon nous avons utilisé une colonne de 8 tamis de la série A.F.N.O.R dont les mailles sont: 4mm - 2mm - 1mm - 500µm - 250µm - 125µm - 63µm - 45 µm.

Chaque échantillon a fait l'objet d'un tamisage pendant 15 minutes avec une tamiseuse électrique à vibration horizontale et verticale (Fig.5). Les refus récoltés sur chaque tamis sont pesés sur une balance dont la précision est de 0.01 g.



Fig.I. 5 : Photo montrant une tamiseuse électrique

B.1.2- Résultats de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de caractériser les roches meubles, dans notre cas le sable, de point de vue type, distribution granulométriques et autres.

Les résultats de l'analyse granulométriques sont représentés sous forme de :

- ✓ Diagrammes de classification des roches meubles, exemple le diagramme de Folk et Ward, 1957.
- ✓ courbes telle que la courbe de fréquence.
- ✓ paramètres granulométriques (indice d'asymétrie (Skewness :Sk), de classement ou de tri (Sorting : σ), de taille de grain Moyenne (Mean :Mz) et le coefficient d'uniformité (Cu).

a- Diagramme de classification des sédiments meubles

Cette classification est représentée à l'aide d'un triangle dont les trois côtés correspondent respectivement aux pourcentages de sable, de limon et d'argile (Folk et Ward, 1957).

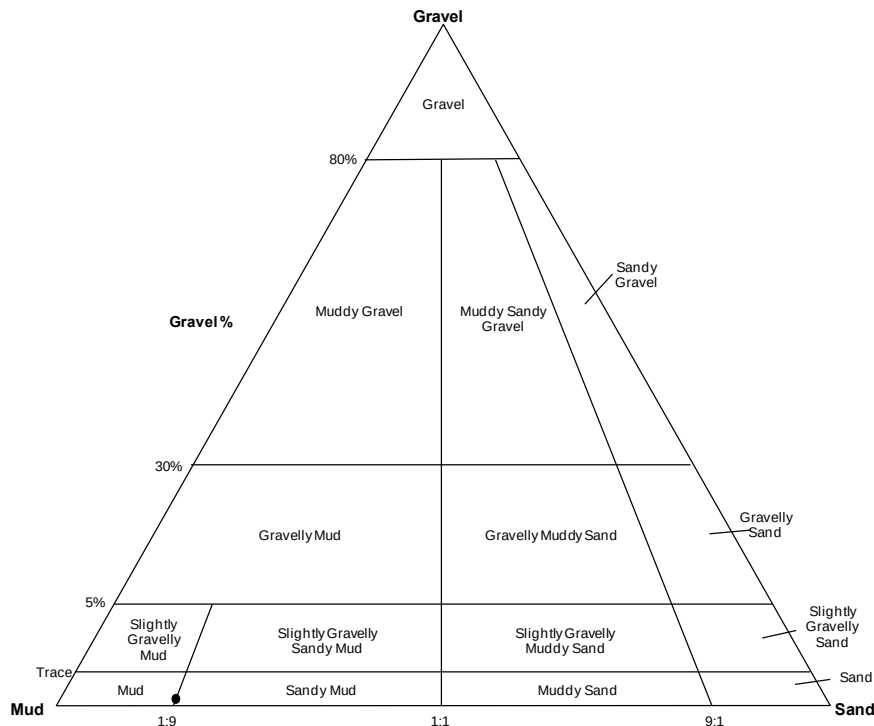


Fig.I. 6 : Triangle de classification d'après Folk et Ward, 1957

b- Les courbes

La Courbe de fréquence : la forme de la courbe indique le degré de classement du sédiment. Si la courbe est dissymétrique, on peut avoir :

- ✓ - Asymétrie négative : particules grossières bien classées
- ✓ - Asymétrie positive : particules fines bien classées.

La courbe de fréquence peut être unimodale formée par une seule population ou plurimodale témoignant d'un mélange au niveau des sédiments. (Miskovsky et De Bard, 2002).

c- Paramètres granulométriques

Indice d'asymétrie ou Skewness (Sk) (Tab.1): les courbes de fréquence peuvent avoir des formes irrégulières. Cette irrégularité est calculée par le coefficient d'asymétrie ou Skewness. Cet indice est un indicateur de l'environnement de dépôt.

$$Sk = Q3 \times Q1 / (Q2)^2$$

Où :

Q1 : point de la courbe pour lequel 25% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 25%).

Q2 ou médiane Md : point de la courbe pour lequel 50% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 50%).

Q3 : point de la courbe pour lequel 75% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 75%).

Tableau.I.1 : Interprétation des valeurs de l'asymétrie granulométrique

Valeur	Asymétrie	Interprétation
Sk<1	Négative	Courant fort : le classement meilleur du côté des sables grossiers
Sk=1	Symétrie	Courant régulier : autant de grossiers que de fins
Sk>1	Positive	Courant faible : le classement meilleur du côté des sables fins

Moyenne (Mz) (Tab.2) : cet indice caractérise la taille des éléments :

$$\mathbf{Mz \text{ (en Phi)} = (Q16 + Q50 + Q84) / 3}$$

Où :

Q16: point de la courbe pour lequel 16% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 16%).

Q50 ou médiane Md : point de la courbe pour lequel 50% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 50%).

Q84 : point de la courbe pour lequel 84% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 84%).

Tableau.I.2 : Interprétation des valeurs de la moyenne granulométrique

Valeur	Interprétation
Mz < 1	Sable grossier
1 < Mz < 2	Sable moyen
2 < Mz < 3	Sable fin
Mz > 3	Sable très fin

Indice de classement (Sorting, σ) (Tab.3) : cet indice caractérise la qualité du tri du sable :

$$S_{\sigma} = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}$$

Où :

Q1 : point de la courbe pour lequel 25% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 25%).

Q3 : point de la courbe pour lequel 75% du matériel est d'une taille inférieure à celui de la taille considérée (abscisse correspondant à l'ordonnée 75%).

Tableau.I.3 : Interprétation des valeurs de l'indice de classement (Sorting)

Valeur	Interprétation
$\sigma_1 < 0,35$	sable très bien trié
$0,35 < \sigma_1 < 0,5$	sable bien trié
$0,5 < \sigma_1 < 1$	sable moyennement trié
$1 < \sigma_1 < 2$	sable mal trié
$2 < \sigma_1 < 4$	sable très mal trié
$\sigma_1 > 4$	sable extrêmement mal trié

Coefficient d'uniformité (Tab.4) : permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique :

$$Cu = D_{60}/D_{10}$$

Où:

D60 = diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant.

D10 = diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

Selon la valeur du coefficient d'uniformité, on reconnaît cinq classes de granulométrie.

Tableau.I.4 : Classes de granulométrie des sols

coefficient d'uniformité	classes de granulométrie
$Cu \leq 2$	granulométrie très serrée.
$2 < Cu \leq 5$	granulométrie serrée.
$5 < Cu \leq 20$	granulométrie semi-étalée.
$20 < Cu \leq 200$	granulométrie étalée.
$200 < Cu$	granulométrie très étalée.

B.2. Etude minéralogique

Cette étape consiste à déterminer la composition minéralogique des différents échantillons de sable. Plusieurs méthodes ont été utilisées et chacune d'elles tient compte de la nature de la roche.

B.2.1-Minéraux argileux

Essai au bleu de méthylène : Détermination de la présence d'argile dans le sable. L'essai au bleu de méthylène (Fig.7), développé par TranNgoc Lan (1977), permet de déterminer le degré argileux d'une roche ou d'un sédiment. Il s'agit de mesurer la capacité d'adsorption des phases argileuses de la roche ou du sédiment en introduisant des quantités croissantes de bleu de méthylène jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées.



Fig.I. 7 : Agitateur contenant la solution de bleu de méthylène (GLOBAL CONCEPT / Laboratoire & Engineering à El Bouni/Annaba).

La capacité d'adsorption correspond à la quantité de bleu de méthylène (en gramme) nécessaire pour recouvrir les surfaces externes et internes des phases argileuses présentes dans 100 g de roche ou de sédiment. La quantité de bleu de méthylène adsorbée par les minéraux argileux est représentée par la valeur du bleu (V_B). L'adsorption s'effectue sur 30 g de matériau.

Le principe de l'essai consiste à introduire des quantités croissantes de bleu de méthylène par petites doses successives jusqu'à l'observation d'un excès de bleu qui marque la fin de l'expérience que l'on détermine par le test dit à la tâche. L'excès de bleu et la fin de l'expérience se traduit par l'apparition de cette auréole. Si la tâche est sans auréole le test est négatif, indiquant l'absence de minéraux argileux dans l'échantillon. Si la tache bleue est entourée d'une auréole le test est dit positif et cela traduit la présence de minéraux argileux dans l'échantillon (Fig.8a, 8b).

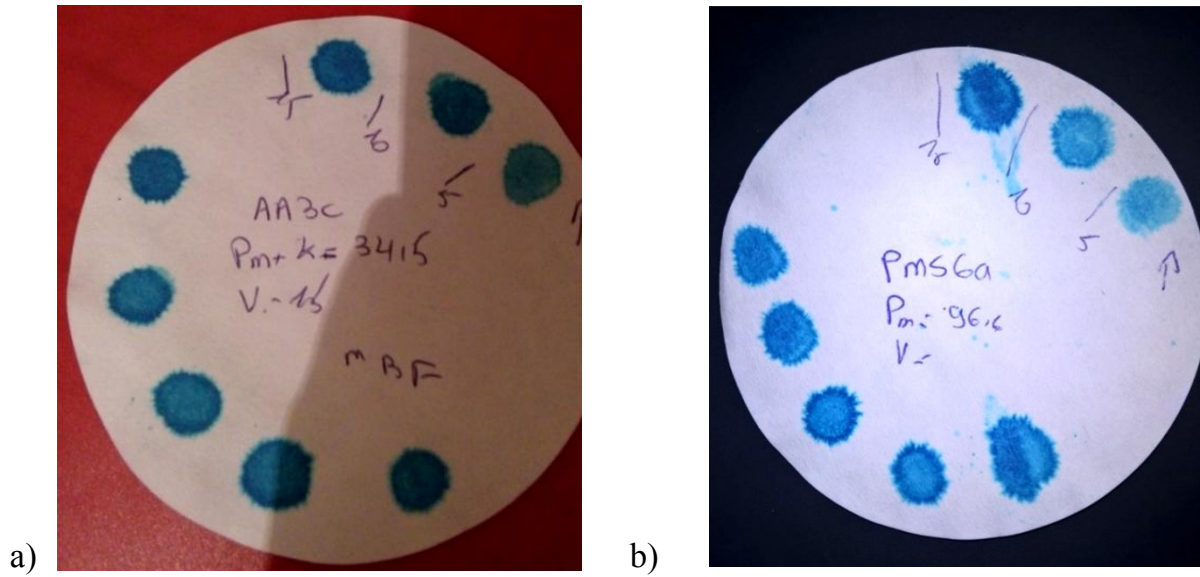


Fig.I. 8 : Test de la tache positif indiquant la présence de minéraux argileux dans le sable d'Ain Achir (AA3c) et dans celui de la Plage-Militaire (PMS 6a).

Cet essai a été réalisé selon les normes NF EN 933-9 et selon la feuille d'essai au laboratoire de GLOBAL CONCEPT / Laboratoire & Engineering à El Bouni/Annaba (Fig.9).

 		
Client :	Feuille d'essai de laboratoire	
Dossier N°:	Détermination De La Valeur De Bleu De Méthylène pour les gravillons MBF	Document de référence NF EN 933-9
Echantillon N° :		
Provenance du matériau:		Date de prélèvement:
Classe granulaire d/D :		Date d'essai:
Expression des résultats		
Echantillon	Prise 01	Prise 02
Masse sèche de la prise d'essai de fraction granulaire 0/0.125mm (M1) (g)		
Volume du bleu introduit (v' = 30 x MBk) (matériau pauvre en élément fins) (cm ³)		
Volume du bleu introduit (V) (cm ³)		
$MBF = 10 \frac{V-1}{M-1}$		
Matériau pauvre en éléments fins $MBF = 10 \frac{V-1-v'}{M-1}$		
Mode opératoire		
1- Sécher le sous échantillon à 110 ml ± 5 °C. 2- Tamiser à sec l'échantillon à analyser au tamis de 0.125 mm. 3- Récupérer un sous échantillon 0/0.125 mm de 30 gr. 4- Peser une masse de 200 gramme minimum soit : M1. 5- Placer la masse M1 dans un bûcher contenant 500 ml ± 5 ml d'eau déminéraliser. 6- Mettre en agitation à 600 tr/min pendant 5 minutes l'ensemble (Eau + Masse) ou (Eau + Masse + Kaolinite). 7- Cas d'un matériau pauvre en élément fins on ajoute dans le bûcher 30 gr ± 0.1 gr de Kaolinite séchée à 105 °C de valeur de bleu connue MBk V' = 30 MBk V' exprimé en ml de solution de bleu absorbé par cette Kaolinite. 8- Mettre en agitation à 400 tr/min pendant la durée de l'essai. 9- Injecter v' millimètres de solution de bleu de méthylène à l'aide de la burette. 10- Après 2 minutes ajouter une dose de 5 ml de solution de bleu. 11- Prélever à l'aide d'une baguette de verre une en suspension et déposer la sur le papier filtre (la goutte prélevé doit être avoir un diamètre de dépôt 8 à 12 mm. (le teste est dit positif, si dans la zone humide apparaît autour du dépôt central une auréole bleu claire persistant) on procède jusqu'il devienne positif. 12- Effectuer des tests à la tache de minute en minute pendant 5 minutes. 13- Expression des résultats : Valeur de bleu de Méthylène MB exprimé en gr de bleu pour 1 Kg de la fraction 0/0.125 mm - cas d'un matériau riche en éléments fins : $MB = 10 \frac{V-1}{M-1}$ Cas d'un matériau pauvre en éléments fins : $MB = 10 \frac{V-1-v'}{M-1}$ V1 volume total de solution injectée (ml). V' volume de solution de bleu agissant sur Kaolinite (ml) M1 masse de la prise d'essai (gr).		

Fig. 9 : Exemple de la feuille d'essai de la détermination de la valeur de Bleu de Méthylène au laboratoire de GLOBAL CONCEPT / Laboratoire & Engineering à El-Bouni/Annaba.

B.2.2-Minéraux carbonatés

Essai calcimétriques : détermination du taux de carbonates dans les échantillons de sable.

La calcimétrie ou mesure du pourcentage de CaCO_3 dans la roche ou le sédiment est mesurée à l'aide du Calcimètre de Bernard (Fig.10). Les essais ont été effectués en partie au laboratoire de travaux publics GLOBAL CONCEPT / El Bouni/Annaba et en partie au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre de l'Université Badji-Mokhtar/Annaba.



Fig.I. 10 : Calcimètre de Bernard du Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre /Université Badji-Mokhtar/Annaba.

Le calcul du pourcentage de CaCO_3 dans les échantillons étudiés se fait en comparaison avec un échantillon témoin de carbonate pur (100 % CaCO_3).

Exemple de détermination du taux de carbonate d'un échantillon de sable prélevé à la plage d'Ain Achir :

- Echantillon témoin ($V_{\text{CO}_2\%t}$) :

Le poids initial de notre échantillon témoin de carbonate est de 0.3g. Pour l'échantillon témoin (carbonate pur) le volume de CO_2 dégagé est :

$$V_{\text{CO}_2t} = V_2 - V_{1t} = 261 - 65 = 196 \text{ ml de } \text{CO}_2 \text{ dégagé.}$$

Où :

V_{CO_2t} : Volume de CO_2 dégagé par l'échantillon témoin, en ml.

V_2 : Volume final de la solution saline, en ml.

V_{1t} : Volume initial de la solution saline.

Sachant que le carbonate pur témoin, contient 100 % de CaCO_3 et a libéré 196 ml de CO_2 . Une simple règle de trois permet de calculer le taux de CO_2 (%) libéré par notre échantillon de sable :

$$\text{Taux de } \text{CO}_2 \text{ (\%)} \text{ libéré par l'échantillon} = (100 \times 30) / 196 = 15.31\%$$

D'où le taux de carbonate ($\text{Tot CaCO}_{3\text{Ech}}$ (%)) dans l'échantillon AA1a est = 15.31 %

B.2.3-Minéraux non argileux

a- Etude au microscope binoculaire :

Détermination des minéraux non argileux du sable. Une première détermination de la composition minéralogique a été effectuée à la loupe binoculaire. Cette étape a permis de distinguer deux groupes de minéraux : un premier groupe dominant, constitué de minéraux transparents et de couleur sombre, un second groupe constitué de quelques rares minéraux clairs. Cette étude a été effectuée au sein du Département de Géologie de la Faculté des Sciences de la Terre de l'Université Badji-Mokhtar / Annaba.

Dans le but de faciliter l'observation minéralogique des sables, ces derniers ont été montés sur du film adhésif (Fig.11).



Fig.I. 11 : Exemple de montage des échantillons de sable sur film adhésif, (échantillons du sable mixte de la plage Ain Achir).

b- Etude au microscope polarisant :

Des lames minces des échantillons de sable.

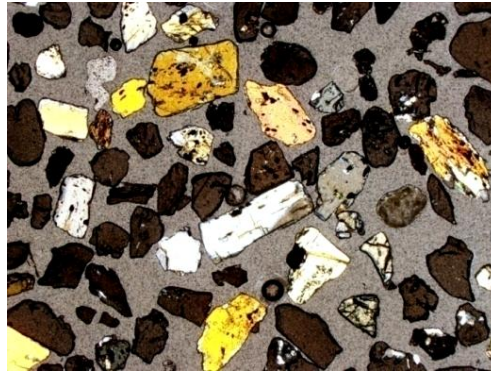
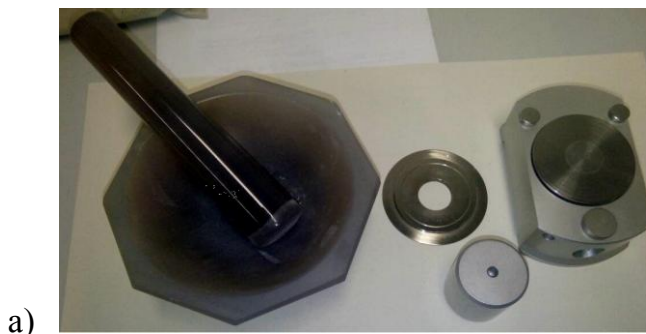


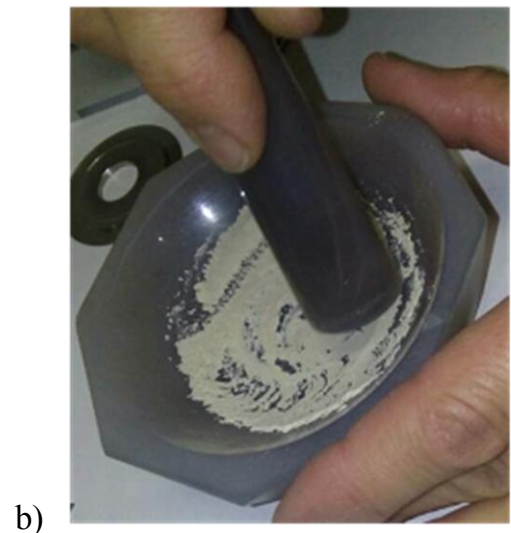
Fig.I. 12 : Exemple d'une lame mince d'un échantillon de sable (Plage-Militaire).

c- Etude minéralogique par diffractométrie (DRX) :

Cette étape a été effectuée avant les observations effectuées au microscope polarisant et à la loupe binoculaire. L'analyse DRX a été réalisée au laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre et de l'Environnement de Potsdam, Allemagne. Les échantillons ont été réduits en poudre (Fig.13a,13b) et placés dans un porte-échantillon (Fig.13c) puis placé dans le diffractomètre de type EMPYREAN (Fig.13d). La composition minéralogique est obtenue sous forme d'un diffractogramme (Fig.13e).



a)



b)

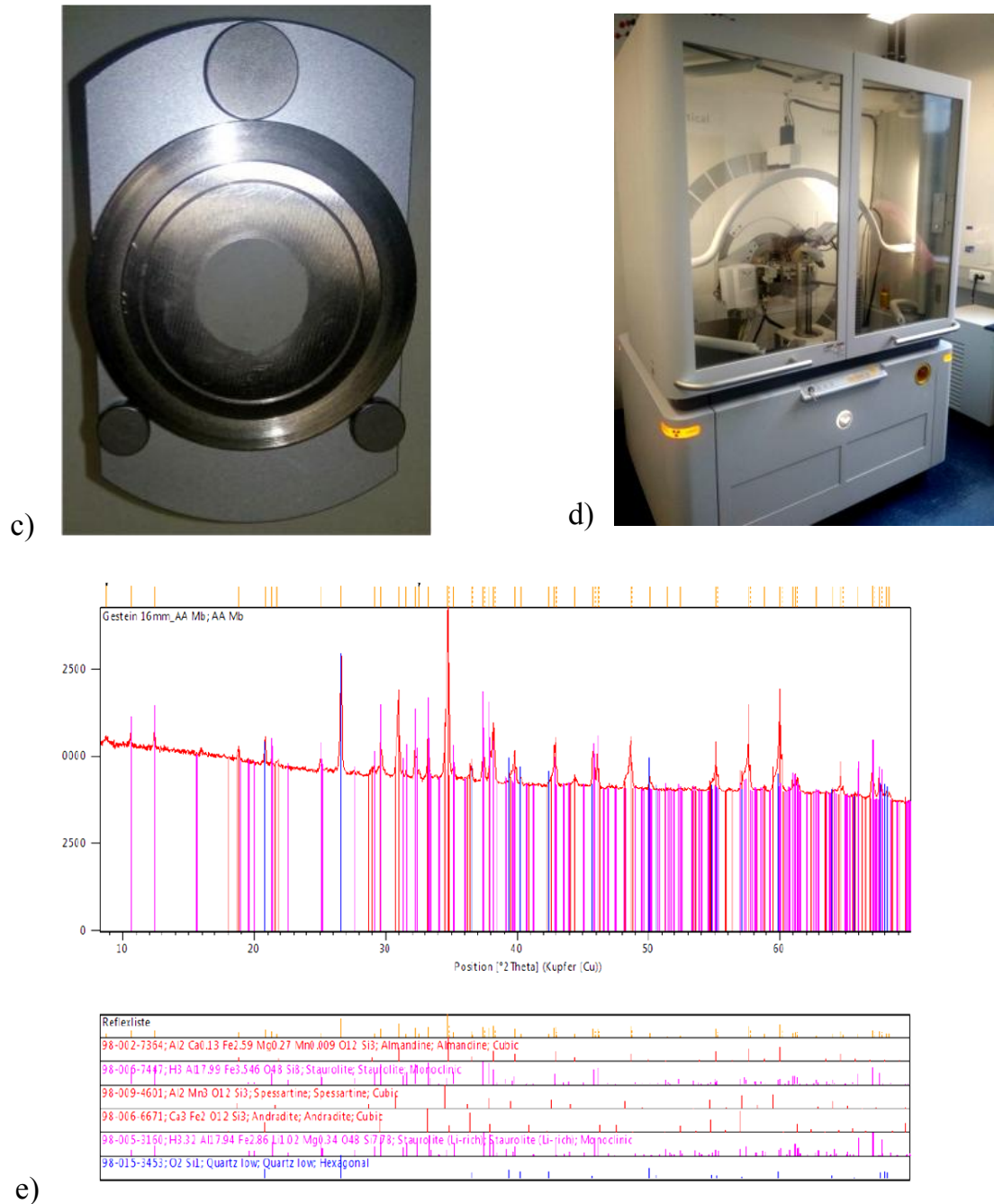


Fig.I.13 : a,) matériel de préparation des échantillons, b) mise en poudre de l'échantillon, c) porte-échantillon, d) appareil de diffractométrie de type EMPYREAN, e) Exemple de composition minéralogique du sable sombre de la plage d'Ain Achir.

Différents minéraux (grenats, tourmaline, staurotide, disthène et épidote) ont été prélevés à la main et soumis à l'analyse diffractométrique. Cette étape a été réalisée dans le but de confirmer le type minéralogique des minéraux observés à la loupe binoculaire (Fig.14).

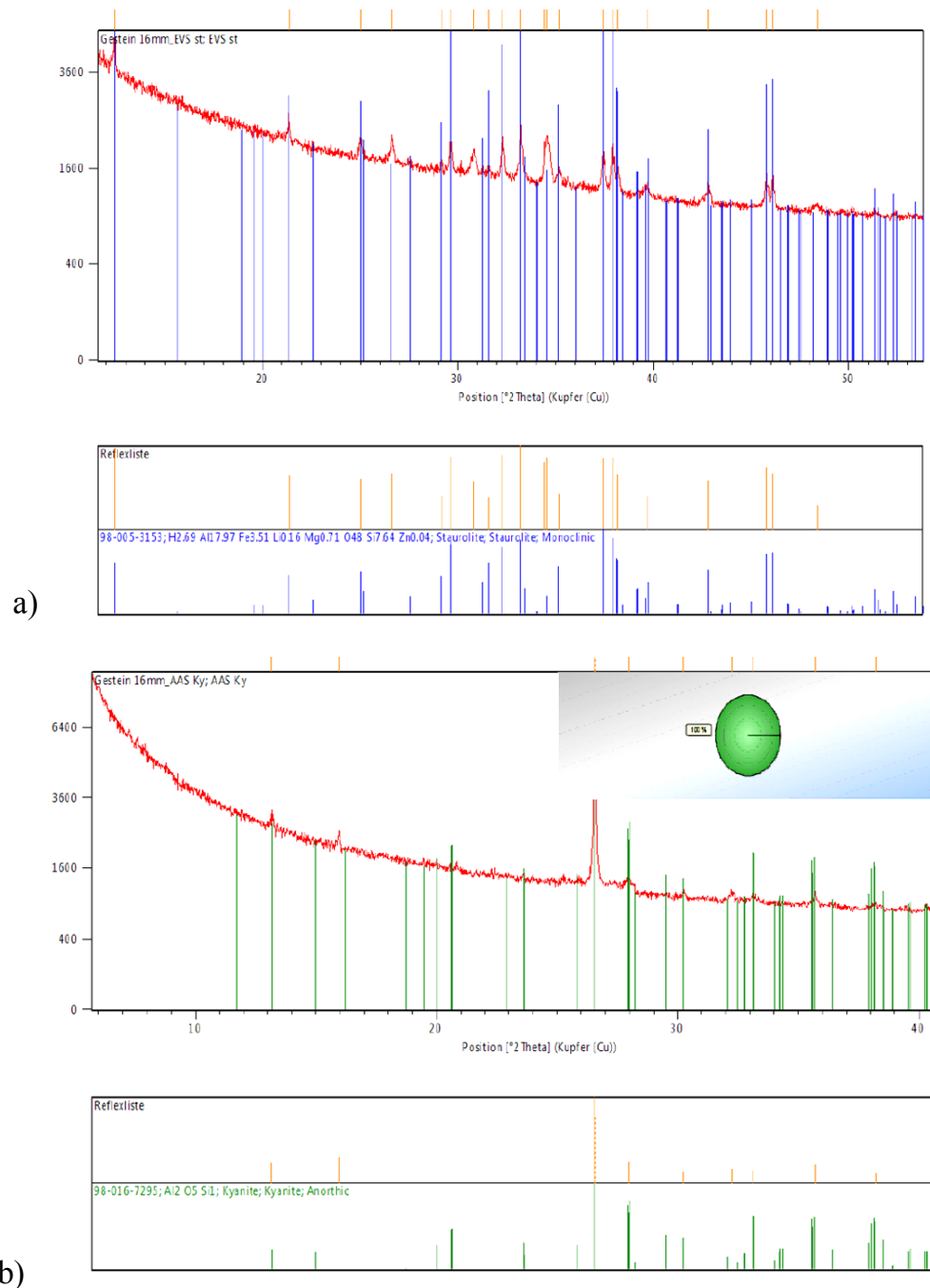


Fig.I. 14 : Exemple d'un diffractogramme : a) d'une staurotide, b) d'un disthène

d- Etude exoscopique :

La méthode consiste à analyser la morphologie de la surface des minéraux au microscope électronique à balayage (MEB). L'étude a été effectuée au laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre et de l'Environnement de Potsdam, Allemagne sur le MEB Jeol JSM 6510.

La méthode exoscopique utilisée dans cette étude est celle préconisée par Ribault (1978). Les grains des minéraux à étudier (grenat, staurotide, disthène, tourmaline) ont

été montés à l'aide de pastilles autocollantes sur des cylindres en aluminium (Fig.15a) puis soumis à la métallisation (Fig.15b). Les cylindres ont été introduits dans le porte objet (Fig.15c) et soumis à l'analyse au MEB (Fig.15d).

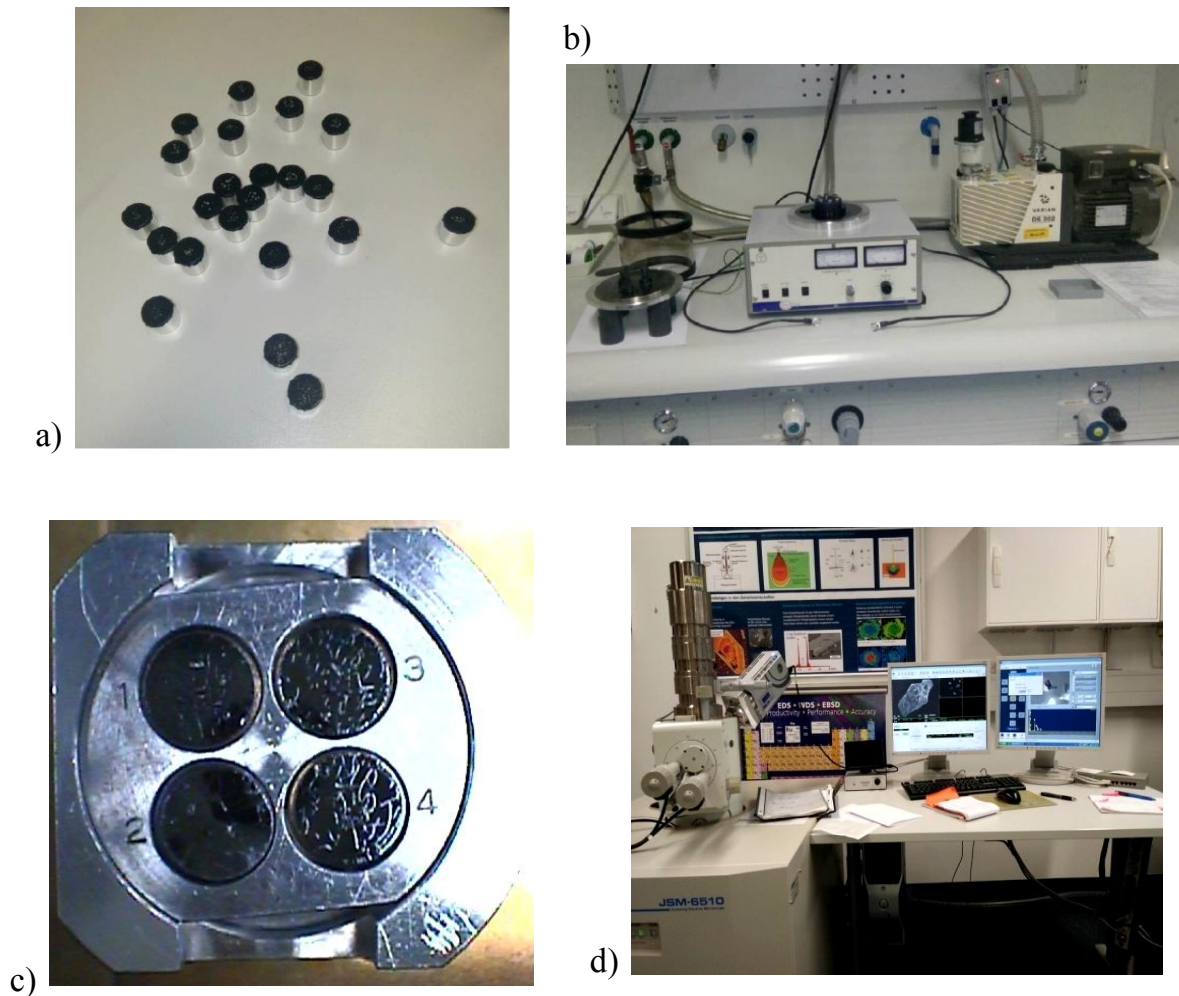


Fig.I. 15 : a) cylindres porte-échantillons, b) matériels de métallisation des minéraux, c) Porte-objet du MEB Jeol JSM 6510 avec les cylindres portant les grains des minéraux à étudier, d) MEB Jeol JSM 6510

Le microscope électronique à balayage (MEB) permet d'obtenir une image 3D du relief du minéral (Fig.16).

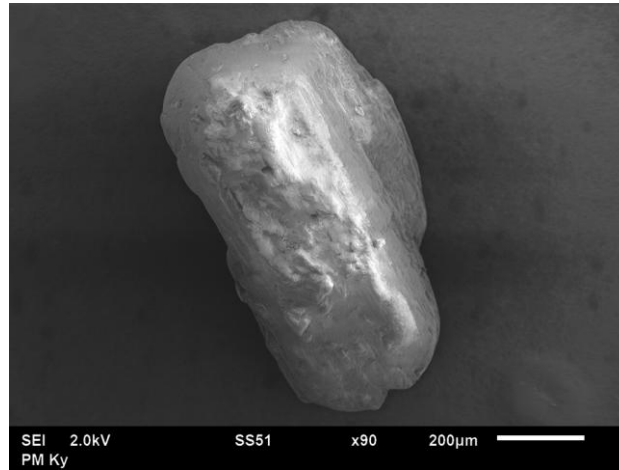


Fig.I. 16 : Exemple d'une image au MEB d'un cristal de disthène

e- Analyse microsonde :

Cette étape permet de déterminer avec plus de précision la nomenclature de chaque minéral. L'analyse a été effectuée sur les lames minces métallisées (Fig.17a) au laboratoire de l'Institut des Sciences de la Terre et de l'Environnement de Potsdam, Allemagne avec une microsonde de type : JEOL JXA-8200 (Fig.17b)

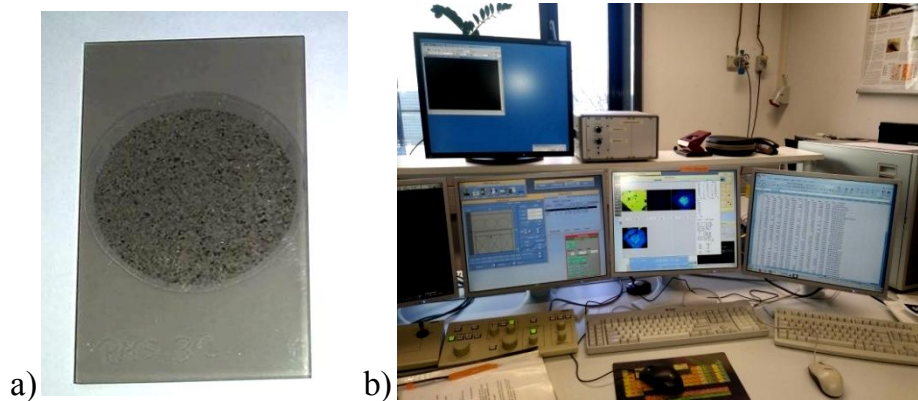


Fig.I. 17 : a) lames minces métallisées, b) microsonde de type : JEOL JXA-8200

CHAPITRE II : LOCALISATION ET CADRE PHYSICO-GEOGRAPHIQUE

II.1 LOCALISATION DES SITES RETENUS POUR L'ETUDE

La zone d'étude fait partie de la pointe extrême Est du littoral de la Wilaya d'Annaba/ Algérie et du massif de l'Edough (Fig.II.1). Ce littoral est ouvert sur la méditerranée sur 80 km (Fig.II.1a), il est délimité au Nord par la mer Méditerranée, à l'Ouest par la Wilaya de Skikda et à l'Est par la limite de la Wilaya d'El Tarf. De nombreuses plages à sable fin jalonnent le littoral (Fig.II.1b).

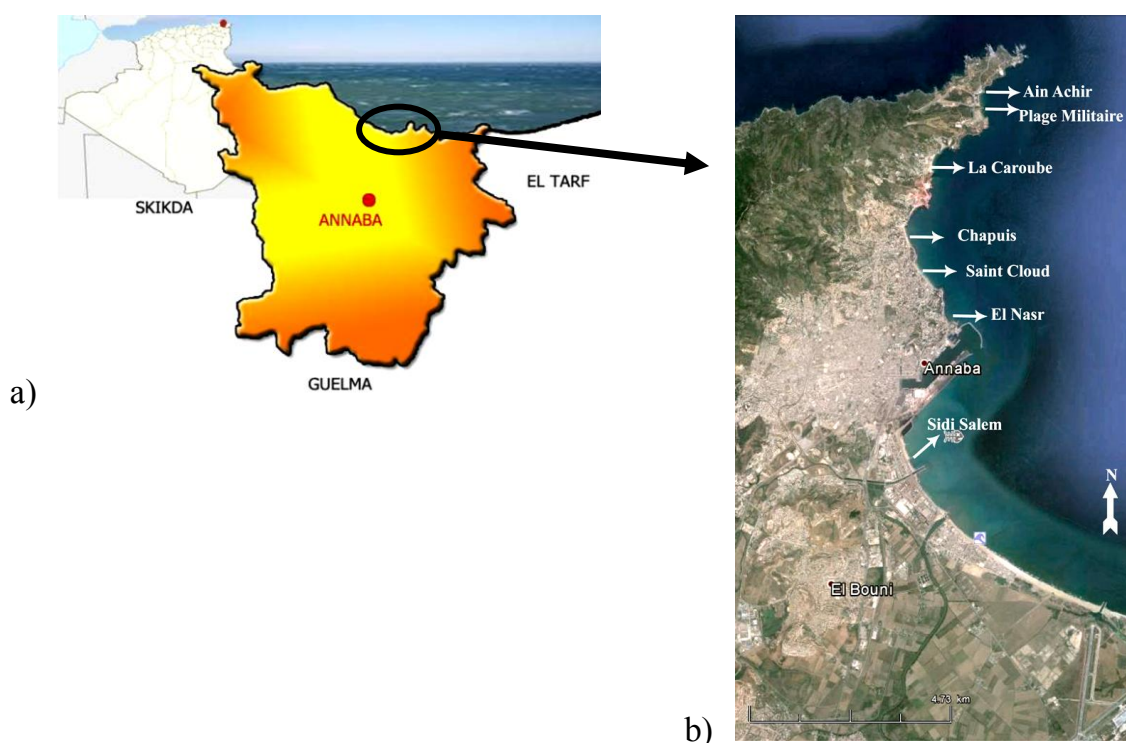


Fig.II. 1 : a) Localisation du littoral d'Annaba , b) Principales plages du littoral d'Annaba, (Google Earth 2016)

L'inventaire des plages a montré que celles à sable clair sont les plus répandues, par exemple : la plage Sidi Salem localisée au Sud-est de la ville d'Annaba et celles de Saint Cloud (Rezgui Rachid) et Chapuis (Rizi Amor) localisées au Nord de la ville d'Annaba (Fig.II.2a).

Les plages à sable de couleur sombre sont relativement rares. Uniquement trois (03) plages ont été recensées : Plage-Militaire et Ain Achir, situées au Cap de Garde, à l'extrême Nord de la ville d'Annaba (Fig.II.2b) et El Nasr (connue localement par El Vedro) localisée au Nord du port de la ville d'Annaba (2c). Ce sont ces trois (03) plages qui ont été retenues pour cette étude.

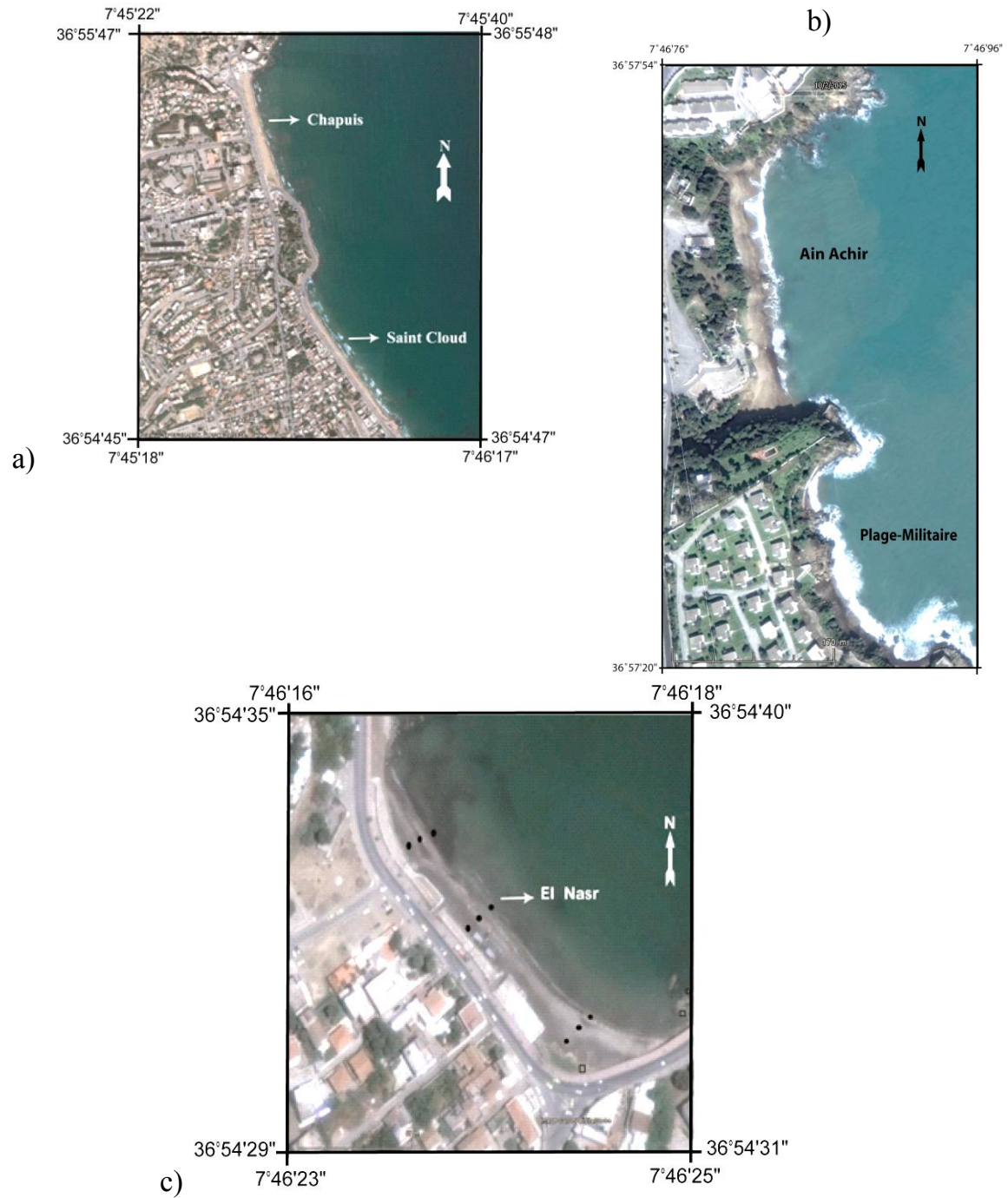


Fig.II. 2 : Photos Google 2016 montrant les plages à sable : a) clair de Chapuis et Saint Cloud, b) mixte (clair et sombre) d'Ain Achir et sombre de La Plage-Militaire ; c) sombre d'El Nasr, ● point d'échantillonnage.

II.2 LE CLIMAT

II.2.1. La température

La Wilaya d'Annaba se caractérise par un climat dit tempéré chaud. La carte climatique de Köppen-Geiger (Hufty, 2001) classe le climat comme étant de type **Csa** (Climat tempéré chaud à été chaud et Sec).

Annaba affiche 18.4 °C de température en moyenne sur toute l'année. Il tombe en moyenne 712 mm de pluie par an. Les courbes de températures sur 8 ans (2009-2016) (temperatureweather.com, 2016) de la figure 3a montrent que le climat de la wilaya d'Annaba est marqué par des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

Les températures moyennes maximales en été (Mai, juillet) varient de 25 à 35° C et celles moyennes minimales en hiver (novembre, janvier) varient de 15 à 20 °C avec parfois des températures exceptionnellement élevées comme ce fut le cas durant l'année 2015 (Fig.II.3b) (meteoblue, 2016).

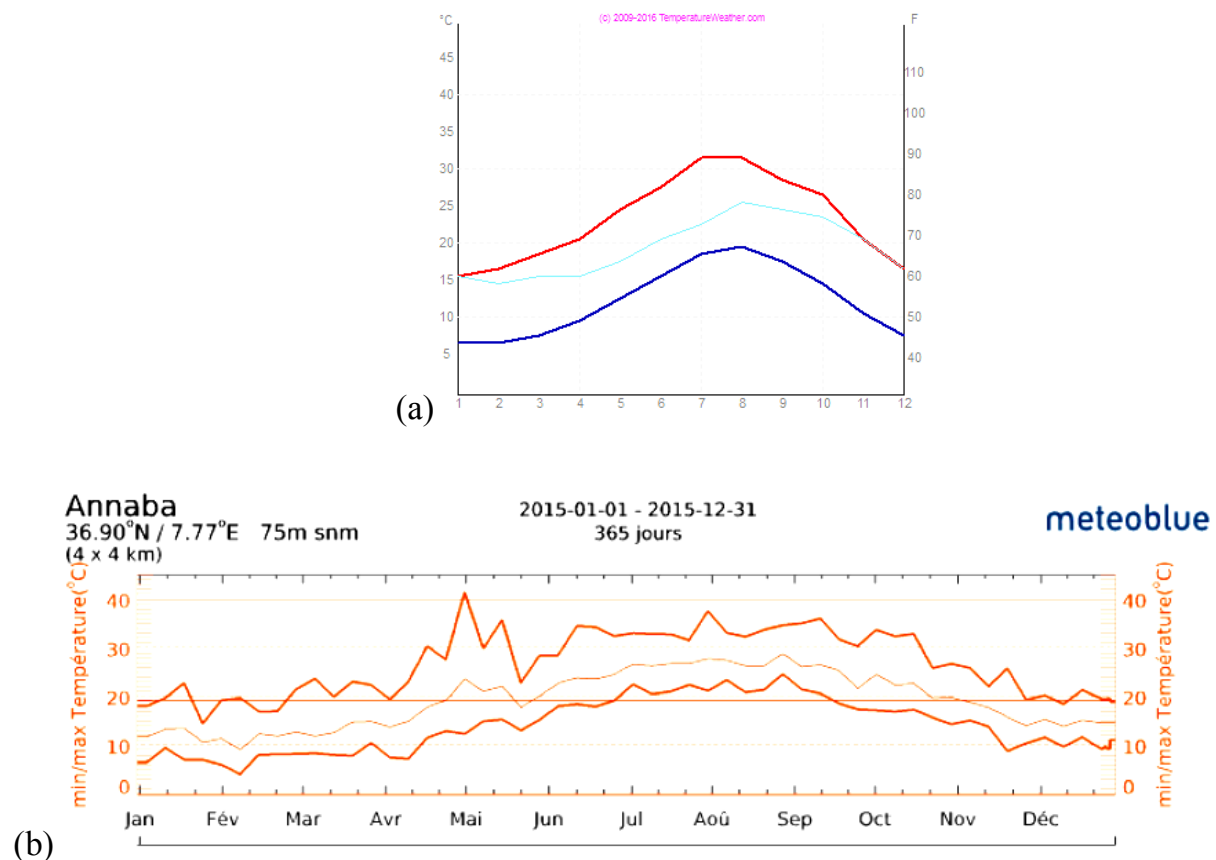


Fig.II. 3 : Evolution de la température : a) durant la période 2009-2016 (temperatureweather.com, 2016), b) sur une période de 12 mois, année 2015 (meteoblue, 2016)

II.2.2. La pluviométrie

La probabilité de pluie (temperatureweather.com, 2016) est très élevée durant la période janvier-mars et durant octobre-décembre (Fig.II.4a). L'année 2015 a été marquée par une faible pluviométrie (meteoblue, 2016) (Fig.II.4b). Hors les années exceptionnelles, la pluviométrie varie en moyenne entre 650 et 1000 mm/an (ANDI 2013).

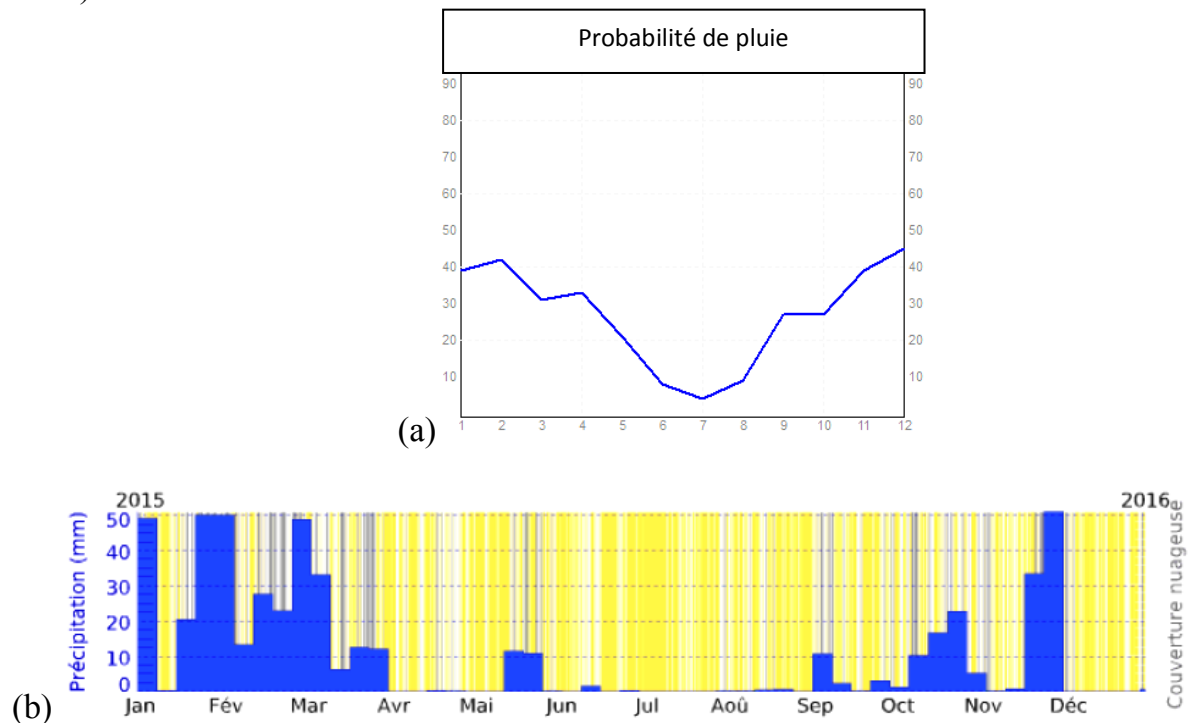


Fig.II. 4 : Evolution de la pluviométrie : a) durant la période 2009-2016 (temperatureweather.com, 2016), b) sur une période de 12 mois, année 2015 (meteoblue, 2016)

II.2.3. Le vent

La Wilaya d'Annaba se caractérise durant les mois de janvier à mars et novembre à décembre par des vents (fr.wisuki.com/, 2016) dont la force peut atteindre sur l'Echelle de Beaufort 5 à 6 BFT (respectivement 29-38 à 39-49 km/h) (Fig.II.5a). La direction moyenne du vent est ONO (fr.wisuki.com/, 2016, (Fig.II.5b). Le mois de mars et celui de décembre de l'année 2015 ont enregistré des vents dont la vitesse a dépassé les 60 km/h (Fig.II.5c) (meteoblue, 2016).

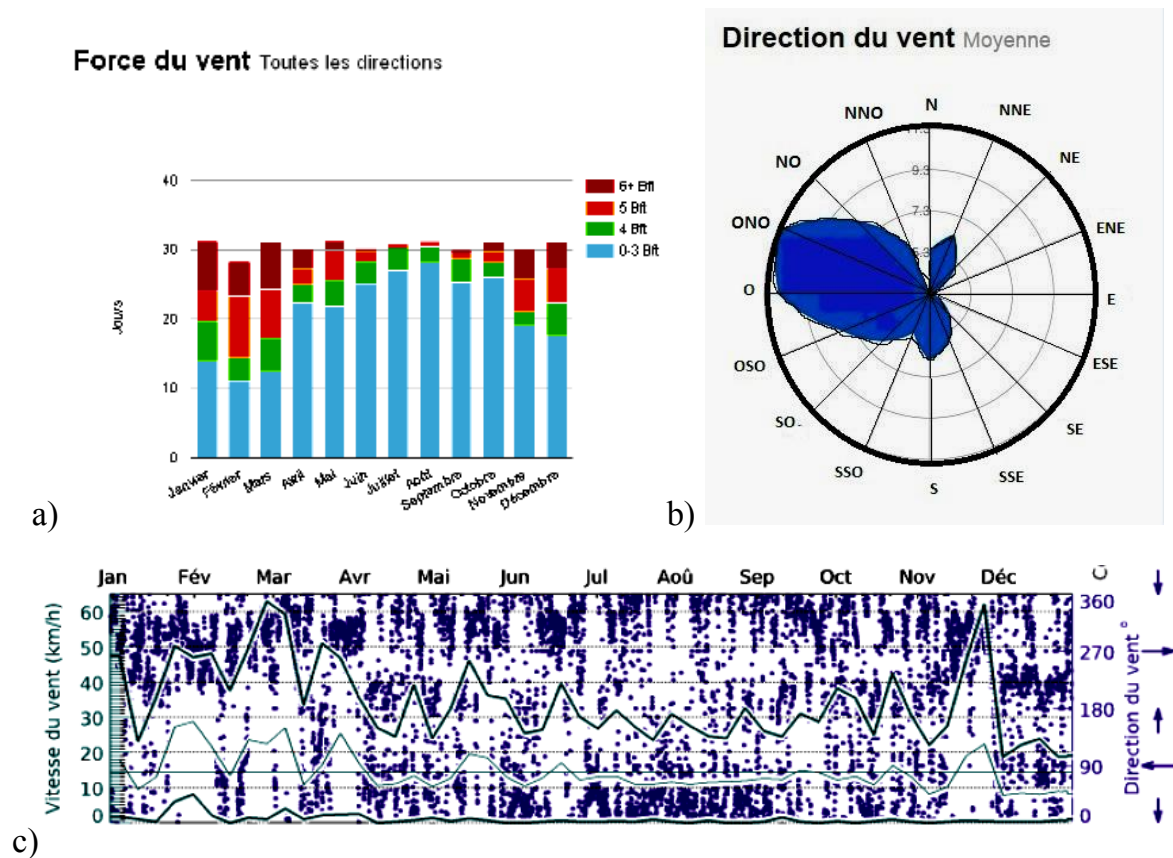


Fig.II. 5 : a) Force du vent durant la période 20012-2016, b) direction moyenne du vent pour la période 2012-2016 (fr.wisuki.com/2016). c) Vitesse et direction du vent (en degré 0° =Nord, 90° =Est, 180° =Sud et 270° =Ouest, les points violets représentent la direction du vent pour l'année 2015(meteoblue, 2016).

II.2.4. Vague et Houle

La houle se définit par des oscillations périodiques de la surface de la mer formées lorsque la force de vent est forte.

La mer de la région d'Annaba est souvent agitée (Fig.II.6a, 6b). En hiver la hauteur des vagues est élevée et peut dépasser les 3 m. En été la hauteur des vagues est faible (Fig.II.6c) et ne dépasse pas 1m (fr.wisuki.com/2016). Les côtes d'Annaba se caractérisent par une houle de direction Nord-Nord-Ouest (Fig.II.6d) (fr.wisuki.com/2016).

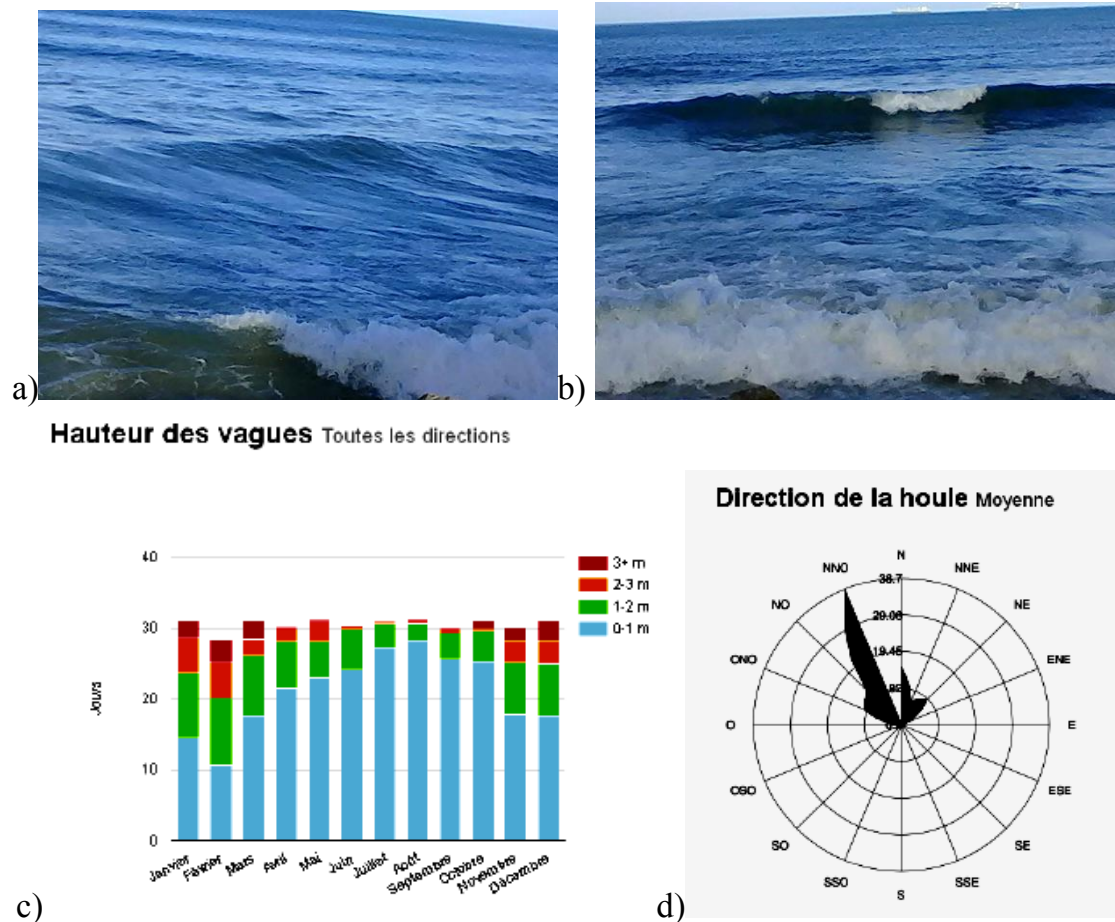


Fig.II. 6 : a) amplitude de la houle en été, b) aspect de la mer sur les côtes d'Annaba, c) hauteur des vagues pour la période 2012-2016, d) direction moyenne de la houle pour la période 2012-2016, (fr.wisuki.com/2016).

II.3 HYDROGRAPHIE

Le réseau hydrographique de la région d'Annaba est assez dense, ramifié avec parfois un écoulement torrentiel (Hilly 1962) (Fig.II.7). Il est principalement constitué du lac Fetzara (eau douce) qui s'étend sur 18670 ha et de l'Oued Seybouse d'une longueur de 127,5 km (ANDI, 2013).

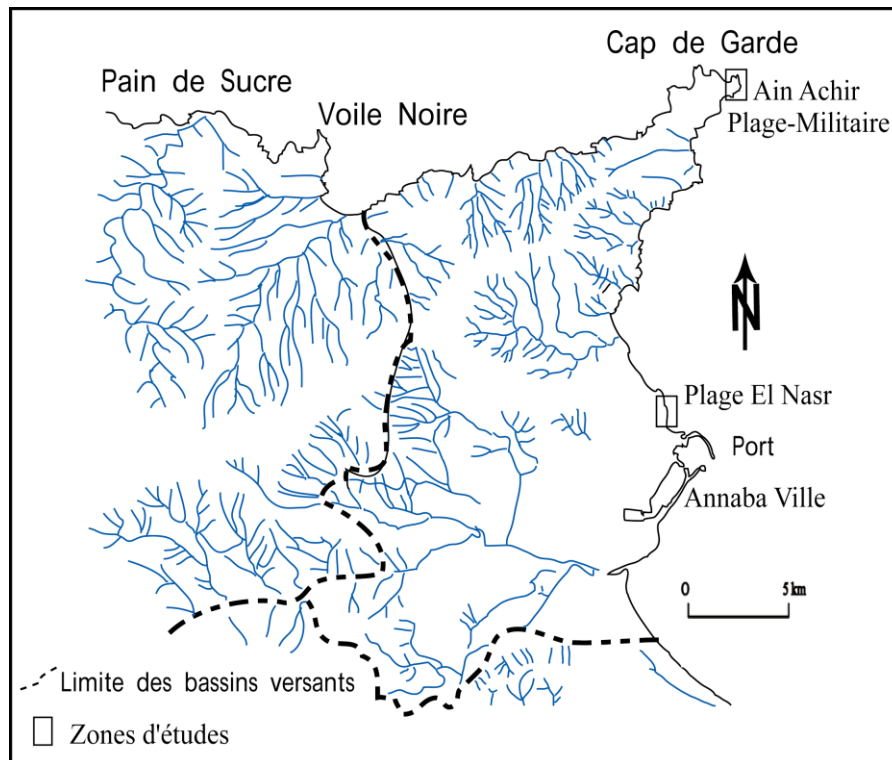


Fig.II. 7 : Carte du réseau hydrographique de la région d'Annaba (Hilly 1962), modifiée.

II.4 RELIEF ET EROSION

Le relief (Fig.II.8a) de la Wilaya d'Annaba est représenté principalement par le massif de l'Edough (52%), des collines (28%) et des plaines représentées par la plaine de Kherraza (18%) (fr.wikipedia.org, 2016).

Le massif de l'Edough (Fig.II.8b) s'allonge sur une longueur de 50 Km en direction du SO-NE. La partie centrale du massif culmine à 1008m (Bouzizi). Les altitudes du flanc Sud-ouest et Nord-est (Cap de garde) sont faibles, en moyenne 200 à 300 m. (Oularbi et Zeghiche, 2009)

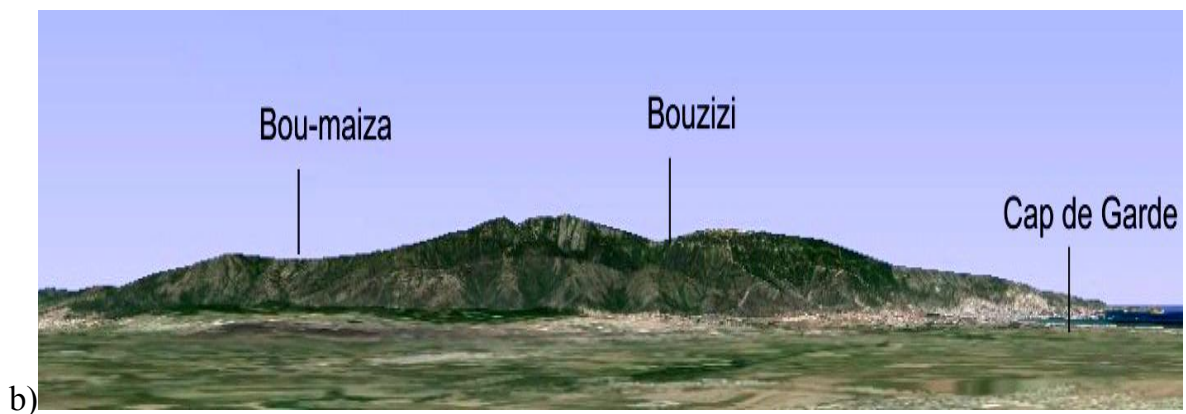
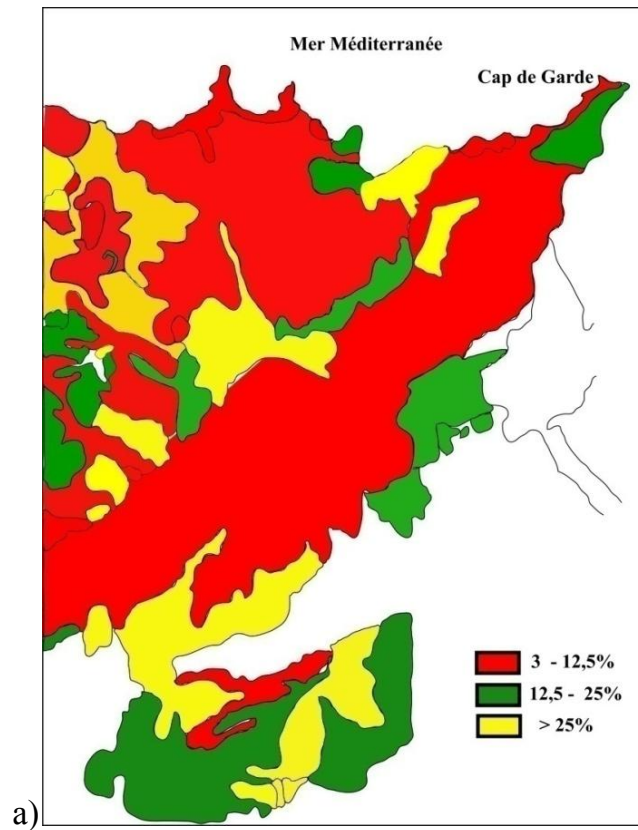


Fig.II.8 :a) carte des pentes du massif de l'Edough (Oularbi et Zeghiche, 2009, modifiée), b) vue panoramique du massif de l'Edough (Google Earth, 2016).

Les côtes sont bordées de falaises abruptes pouvant dépasser 200m de hauteur. Oularbi et Zeghiche (2009) ont montrés que le relief de la région d'Annaba est sensible à l'érosion. Selon l'intensité de l'érosion, les auteurs distinguent dans le massif de l'Edough quatre principales classes (Fig.II.9) : (1) érosion intense, (2) érosion moyenne, (3) érosion faible et (4) érosion nulle.

La carte de sensibilité à l'érosion (Oularbi et Zeghiche, 2009) montre que la zone d'étude (Plage Ain Achir et la Plage-Militaire) localisée au Cap de Garde est dans la

classe à « Erosion nulle », alors que la zone de la plage El Nasr se situe dans la zone à « Erosion modérée ».

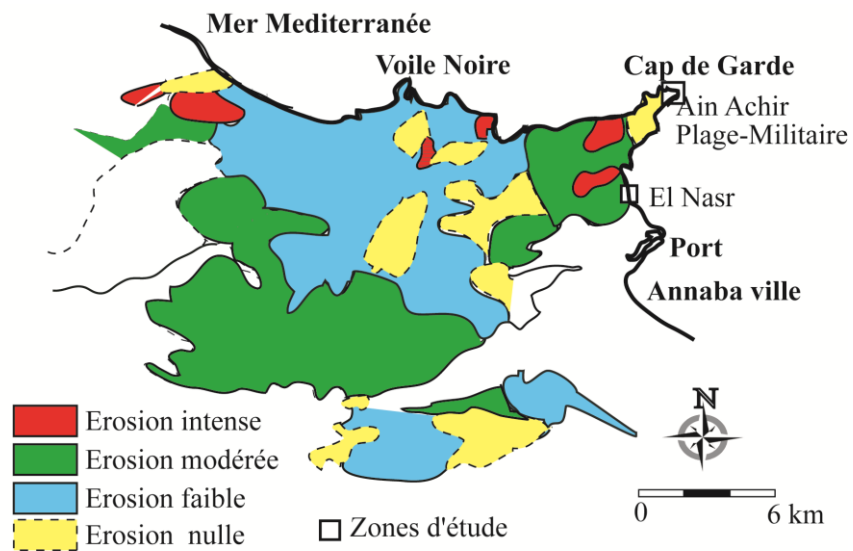


Fig.II. 9 : Carte de sensibilité à l'érosion du massif de l'Edough (Oularbi et Zeghiche, 2009, modifiée)

CHAPITRE III : CADRE GEOLOGIQUE

III.1 APERÇU GEOLOGIQUE GENERAL.

Les zones d'études, Plage-Militaire et Ain Achir (situées au Cap de Garde, à l'extrême Nord de la ville d'Annaba) et El Nasr (localisée au Nord du port de la ville d'Annaba) font partie du vaste ensemble cristallophyllien du massif de l'Edough. Ce dernier, qui est un massif d'environ 50km de long et 20km de large, a été étudié par de nombreux auteurs (Exemple : Hilly, 1962; Vila,1970; Bossière et al. 1976; Ilavsky et Snopkova, 1987; Gleizes et al. 1988; Monié et al.,1992; Ahmed-Said et Leake, 1993; Caby et al. 2001; Hammor et al. 1992, Laouar et al. 2002, Bruguier et al. 2009, Hadj Zobir et al. 2007, 2012, 2013, 2014). Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats de ces travaux.

Le massif de l'Edough se caractérise par une lithologie très variée (Fig.III.1) représentée par des roches métamorphiques, magmatiques et une couverture sédimentaire. Les différentes unités métamorphiques ont subi une première déformation oblique caractérisée par des plis syn-métamorphiques suivis d'un cisaillement générant des plis droits de direction N140, des anticlinaux de direction N50 à N60 et des sens de cisaillement de N120 à N160.

III.1.1. Les formations cristallophylliennes et roches associées

A. Les formations cristallophylliennes

Les nombreuses études (Brunel et al, 1988 ; Caby et Hammor, 1992 ; Ahmed Said et Leake, 1993) sur le métamorphisme du massif de l'Edough ont permis de déduire que celui-ci a subi plusieurs événements métamorphiques: (i) un métamorphisme de haut degré (HP-HT) correspondant aux conditions du facies granulites, un métamorphisme prograde de moyen degré (MP-MT) et (ii) un métamorphisme de basse pression et de haute température (BP-HT).

Gleizes et al, 1988 distinguent dans le massif de l'Edough, trois (03) unités cristallophylliennes: Une unité dite "inférieure", une seconde dite "supérieure" et une troisième dite "intermédiaire".

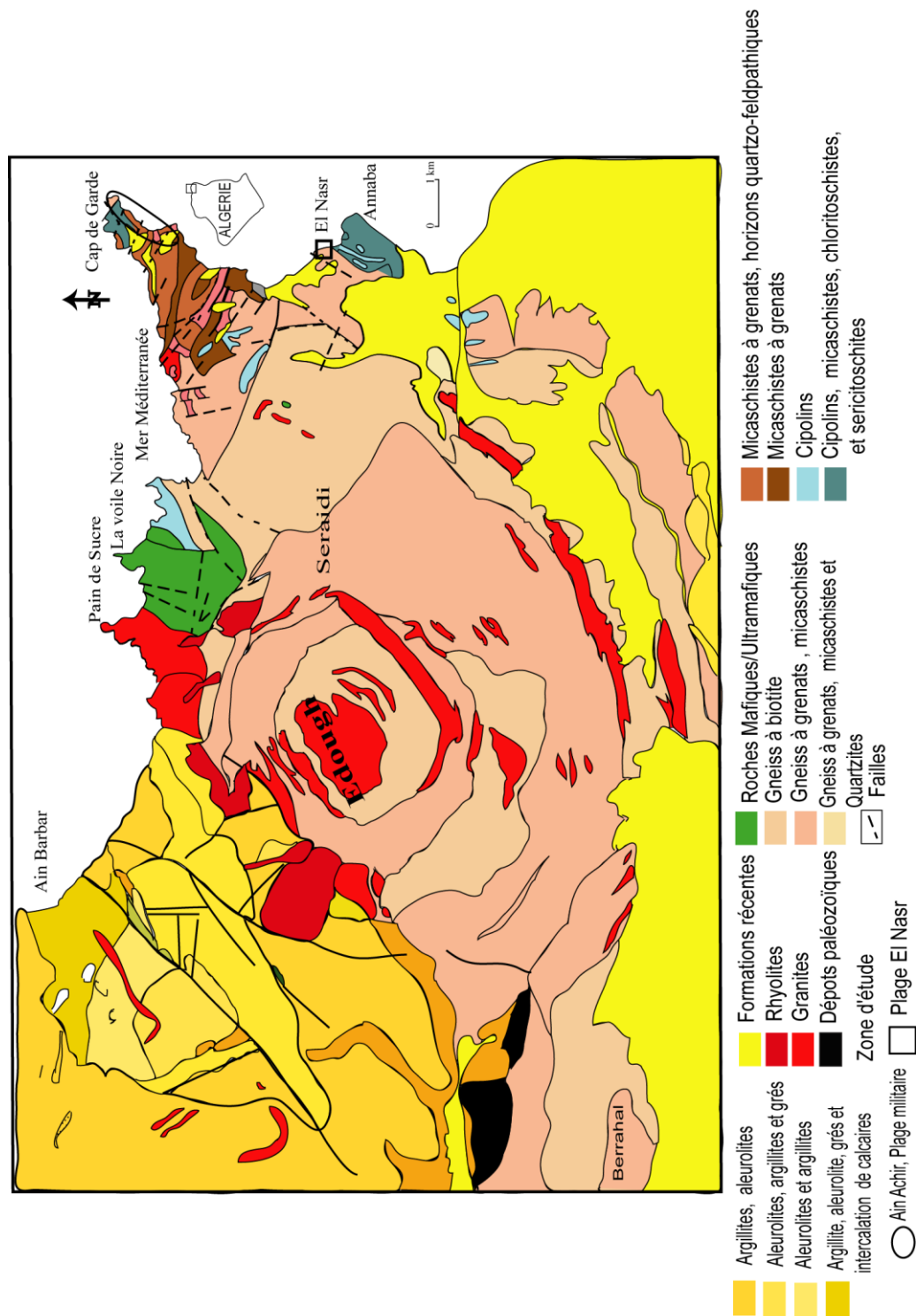


Fig. 1 : Carte géologique du massif de l'Edough modifiée (Hilly, 1962; Bossière et al., 1976; Ilavsky et Snopkova, 1987; Gleizes et al., 1988; Ahmed-Said et Leake, 1993; Caby et al., 2001; Hammor et al, 1991, 199 2 ; Laouar et al., 2002, HadjZobir et al. 2007, 2012, 2013, 2014).

- *L'unité inférieure*: elle est constituée essentiellement par un socle métamorphique gneissique d'âge Hercynien (Bruguier et al. 2009). Ce socle gneissique (Ahmed-Said et Leake, 1993, Caby et al. 2001, Hammor et al. 1992, 1998) a parfois subi un fort taux de fusion partielle qui a conduit à la formation de diatexites à protolithe arkosiques (Hadj Zobir et Mocek. 2012, Hadj Zobir 2012). Aux diatexites sont parfois associées des formations ultrabasiques et basiques (Bossière et al. 1976, Hadj Zobir et al. 2007, Hadj Zobir et Oberhansli, 2013, Hadj Zobir et al. 2014).

- *L'unité supérieure*: cette unité affleure principalement au Nord de la ville d'Annaba. Elle est constituée d'une alternance de micaschistes riche en muscovite, en grenat, en bancs centimétriques à métriques de quartzites feldspathiques à tourmaline et parfois en poches de quartz associées à de l'andalousite rose. Dans ces micaschistes, la découverte d'Acritarches par Ilavsky et Snopkova (1987) indique que cette série est d'âge paléozoïque (Ordovicien supérieur à Dévonien).

- *L'unité intermédiaire* : elle est constituée par une alternance de micaschiste à grenat et staurotide et de bancs de marbre. Le contact entre les marbres et les micaschistes est souvent souligné par des skarns de réaction.

B. Les roches associées aux formations cristallophylliennes

Le massif de l'Edough se caractérise par la présence de quelques affleurements et pointements ultrabasiques et basiques.

Les affleurements basiques sont principalement représentés par des amphibolites et se rencontrent en plusieurs endroits:

- ✓ A la Voile-Noire, au Nord-ouest du massif de l'Edough (Ahmed Said et al. 1992),
- ✓ Au niveau du pointement de roche ultrabasique de Sidi Mohamed sur la route de Séraïdi sous forme de metabasites (Hadj Zobir et al. 2007).
- ✓ Sous forme de bancs centimétriques de cendres volcaniques basiques métamorphisées dans les cipolins du Cap de Garde (Hadj Zobir et al. 2014).

Contrairement aux roches basiques, les formations ultrabasiques sont plus rares et se présentent sous forme de petits pointements dispersés:

- ✓ A la Voile-Noire, elles sont associées aux amphibolites (Ahmed Said et al. 1992),
- ✓ A la baie de l'Oued Begrat (région de Séraïdi) Toubal, (1986) décrit des "boules vertes " très denses et compactes.

- ✓ A Sidi Mohamed en contact anormal avec les gneiss encaissants. Les roches ultrabasiques (harzburgites) plus ou moins recristallisées et serpentinisées (Bossière et al, 1976, Hadj Zobir et Oberhansli 2013).

III.1.2. Les formations magmatiques

Les roches magmatiques sont représentées par:

- ✓ Des leucogranites qui apparaissent sous forme de dykes ou d'affleurements lenticulaires décamétriques dans la région de Bouzizi, de Seraïdi et à El Bir, au Nord-est du massif de l'Edough.
- ✓ Des pegmatites affleurant aussi bien dans les gneiss que dans les micaschistes. Ces datations géochronologiques par la méthode $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ sur des muscovites de pegmatites donnent un âge burdigalien ($17 \pm 0,3$ Ma; Monié et al. 1992; Aïssa et al. 1994) à la mise en place du magmatisme leucogranitique et pegmatitique.
- ✓ Des microgranites affleurent aussi bien dans les gneiss que dans les micaschistes sous forme de laccolites ou de dômes. Ils forment les massifs de Sidi Bou Guenna, Sidi Saadi et Kef Bou Assida (Hilly, 1962; Marignac, 1985; Laouar, 2002).
- ✓ Des rhyolites affleurent sous forme de dykes décimétriques à centimétriques et forment les massifs de Kef Guelaâ, Koudiet el Ahrach, Kef El Fedjel et Ain Barbar (Hilly, 1962; Marignac et al. 1985; Laouar et al. 2002).

III.1.3. La couverture sédimentaire

Les formations sédimentaires du massif de l'Edough sont allochtones. Elles sont représentées par des nappes de flysch de différents âges. On distingue:

- ✓ Les nappes de flysch Crétacé de la région d'Ain Barbar et du Malah (Marignac et Zimmermann, 1983 ; Marignac, 1985)
- ✓ La nappe numidienne d'âge Oligo-Miocène (Lahondère et al, 1979) qui correspond à des formations gréseuses massives et de minces niveaux argileux (Hilly, 1962 ; Marignac, 1985).

III.2 APERÇU GEOLOGIQUE DES ZONES ETUDIEES

L'étude du terrain, de point de vue géologique, s'est faite sur les affleurements métamorphiques les plus représentatifs de la géologie locale.

En fonction de la localisation des sites retenus, la zone d'étude a été subdivisée en deux secteurs :

- ✓ Le secteur du Cap de Garde
- ✓ Le secteur du Port

III.2.1. Secteur du Cap de Garde

Le Cap de Garde est localisé dans la partie NE du massif de l'Edough et plus précisément au N.E. de la ville d'Annaba. Il se prolonge dans la mer méditerranée avec une longueur de 1785 m et une largeur de 785 m. La zone est limitée au Nord-ouest et Sud-est par la mer méditerranéenne et au Sud-ouest par le prolongement du massif de l'Edough proprement dit.

De nombreuses formations cristallophylliennes forment le Cap de Garde (Fig.III.2). Elles sont représentées par : différents types de gneiss, des micaschistes, des micaschistes en alternance avec des bancs de marbres, des skarns, des séricitoschistes, des chloritoschistes, des quartzites et des grenatites.

Les formations récentes sont représentées par les calcarénites qui couvrent partiellement les roches métamorphiques et par le sable sous forme de plages.

Les principaux affleurements métamorphiques étudiés sont ceux de :

- ✓ Ain Bent Soltane
- ✓ La Carrière
- ✓ Le Phare
- ✓ Le Vivier
- ✓ Secteur Ain Achir et Plage-Militaire
- ✓ Secteur du port : la plage El Nasr

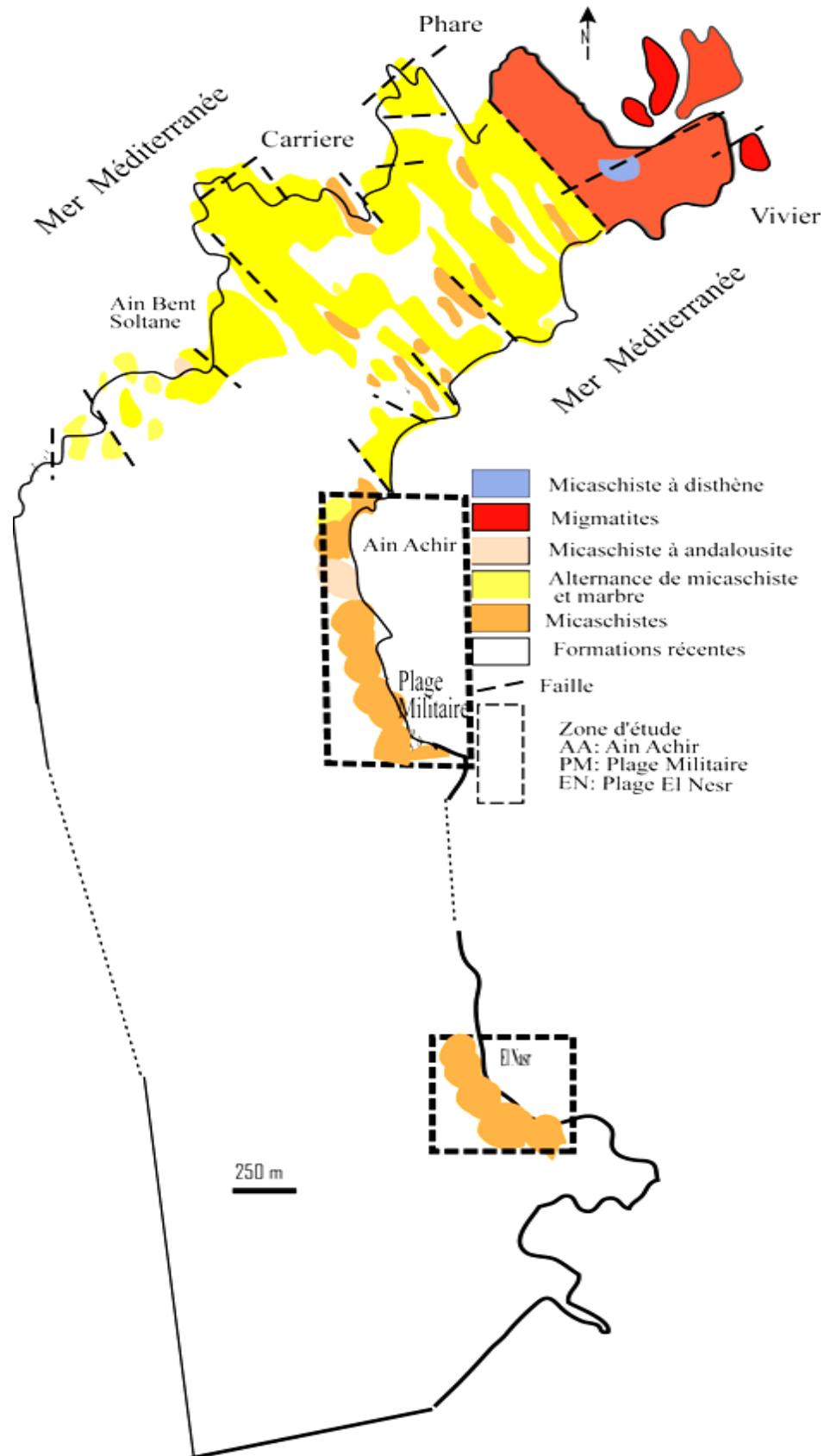


Fig.III. 2 : Carte géologique simplifiée du Cap de Garde, modifiée, (Ahmed Said et al. 1993; Caby et al. 2001, Hadj Zobir et al. 2014).

A- Ain Bent Soltane

Ce secteur se caractérise par une grande variété de roches métamorphiques (Fig.III.3). On y distingue:

- ✓ Les micaschistes à grenat et à andalousite
- ✓ Les séricitoschistes
- ✓ Les chloritoschistes
- ✓ Les cipolins
- ✓ Les calcarénites.

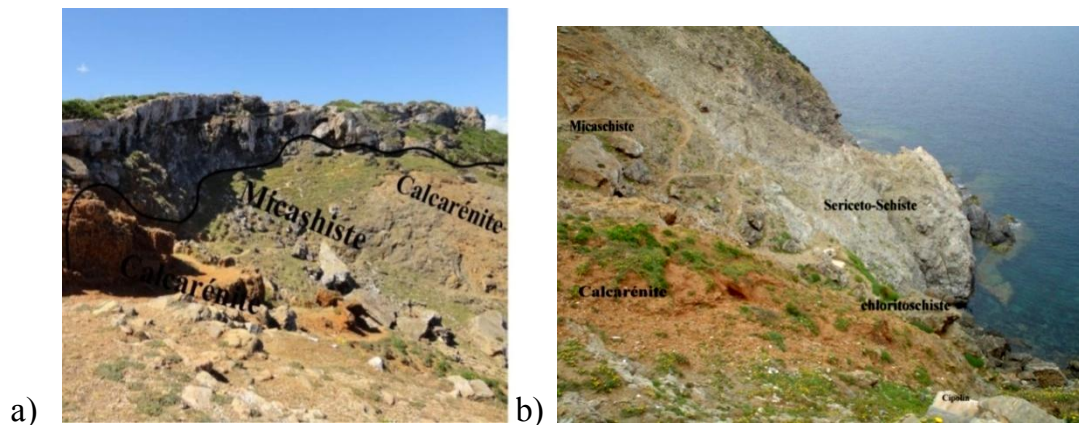


Fig.III. 3 : Vues d'ensemble des affleurements géologiques d'Ain Bent Soltane.

A.1- Les micaschistes à grenats et andalousites :

Les micaschistes à grenats et à poches d'andalousite affleurent directement sous les calcarénites (Fig.III.4). Il s'agit de micaschistes alumineux, riches en grenats globuleux (Fig.III.4a) avec de nombreuses poches d'andalousite associées à des nodules de quartz laiteux (Fig.III.4b).

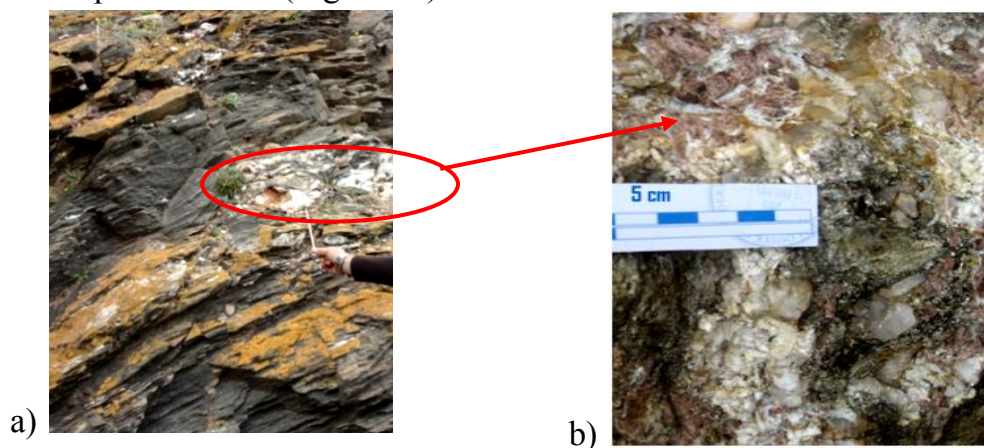


Fig.III. 4 : Photographies de terrain de : a) micaschiste à grenat et andalousite, b) détail des poches à andalousite.

A.2- Les séricitoschistes :

Ces formations affleurent directement en contact anormal avec les micaschistes à grenat et andalousite. Elles sont massives et de couleur gris-argentée (Fig.III.5a). L'aspect général est soyeux. Les paillettes de séricite sont discernables à l'œil nu. Les nodules de quartz laiteux y sont abondants (Fig.III.5b).

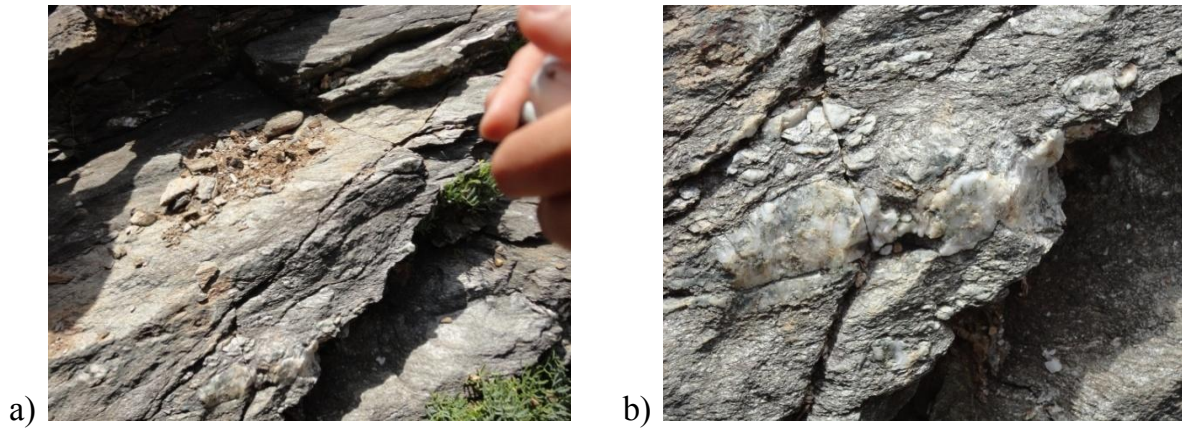


Fig.III. 5 : Photographies de terrain : a) séricitoschiste massif, b) détails des nodules de quartz laiteux.

A.3- Les chloritoschistes :

Ces roches apparaissent au contact avec les séricitoschistes. Elles sont composées de chlorite en paillettes de couleur verte, visibles à l'œil nu (Fig.III.6).

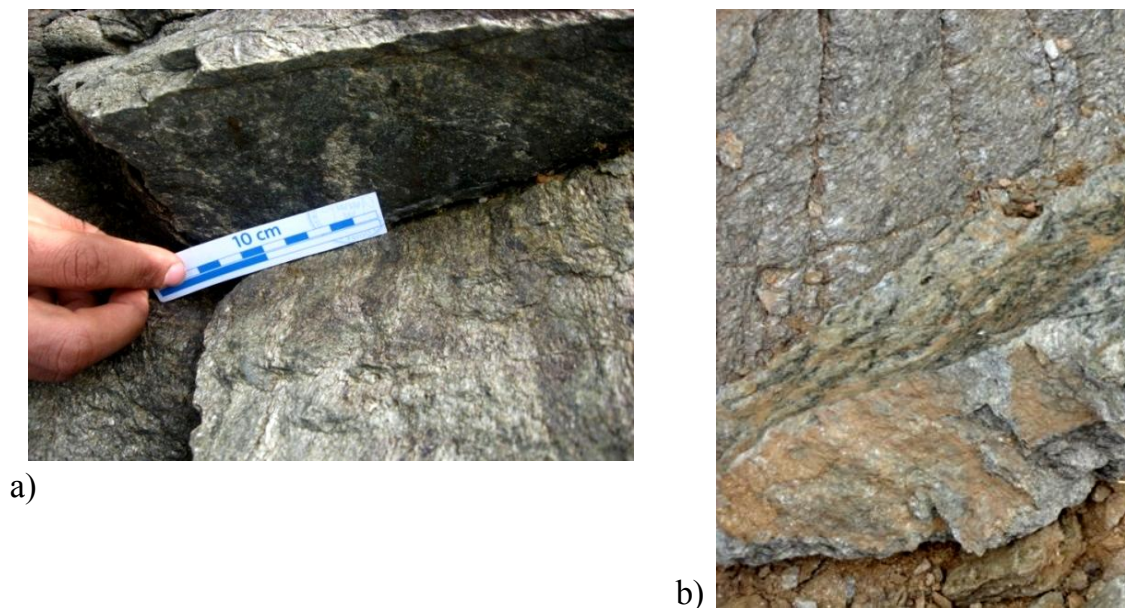


Fig.III. 6 : Photographies de terrain de : a) chloritoschistes massifs, b) détail du chloritoschiste massif.

A.4- Les cipolins :

A Ain Bent Soltane les cipolins affleurent sous forme de bancs métriques (Fig.III.7a). Parfois ils sont en alternance avec les micaschistes à grenat et andalousite. Les cipolins sont légèrement grisâtres, homogènes et massifs (Fig.III.7b).

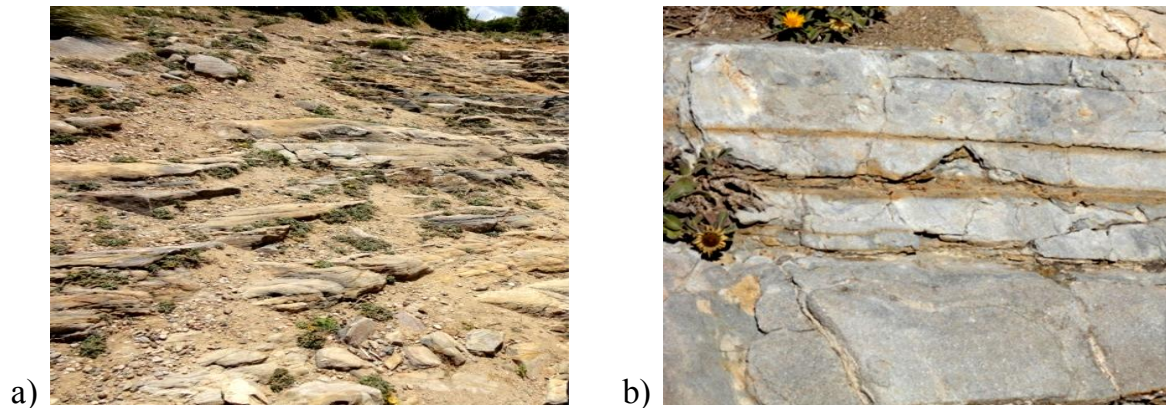


Fig.III. 7 : Photographies de terrain : a) bancs métriques de cipolins, b) détails d'un niveau de cipolin.

A.5- Les calcarénites :

Ces calcarénites correspondent à un ancien fond marin qui se présente sous forme d'une couverture surmontant généralement les micaschistes. Les différents débris coquilliers sont bien visibles à l'œil nu (Fig.III.8).



Fig.III. 8 : Photo montrant les calcarénites au niveau d'Ain Bent Soltane.

B- La Carrière

Il s'agit d'une ancienne carrière de marbre (Fig.III.9). Les principales formations géologiques rencontrées sont:

- ✓ Les micaschistes à grenat
- ✓ Les amphibolites

✓ Les cipolins



Fig.III. 9 : Vues d'ensemble de la Carrière : alternance de micaschiste à grenats et cipolins, et quelques affleurements de cipolin avec des niveaux centimétriques d'amphibolites.

B.1- Les micaschistes à grenats :

Ces formations apparaissent en position sub-horizontale à sub-verticale avec les cipolins (Fig.III.10). Leur épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres. Ces micaschistes sont très riches en grenats de différentes tailles (1-3mm). Certains niveaux de micaschistes sont très alumineux et on y note la prédominance de micas blancs (muscovite). Les nodules de quartz centimétrique n'y sont pas rares.

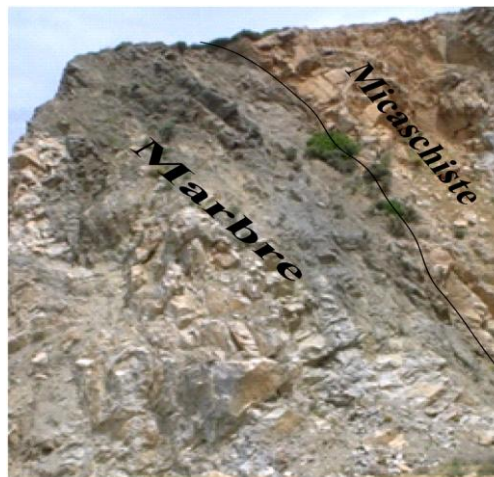


Fig.III. 10 : Affleurement de micaschiste alumineux en position sub-vertical en contact avec les cipolins.

B.2- Les amphibolites :

Elles affleurent sous forme de couches millimétriques à centimétriques au sein du cipolin (Fig.III.11a). Les couches suivent l'orientation de la stratification principale. La texture est assez massive et sa couleur varie du noire au vert foncé. Les amphibolites sont souvent altérées et montrent des traces d'oxydation (Fig.III.11b). Ces amphibolites sont d'anciennes cendres volcaniques sub-marines et métamorphisées (Hadj Zobir et al, 2013).

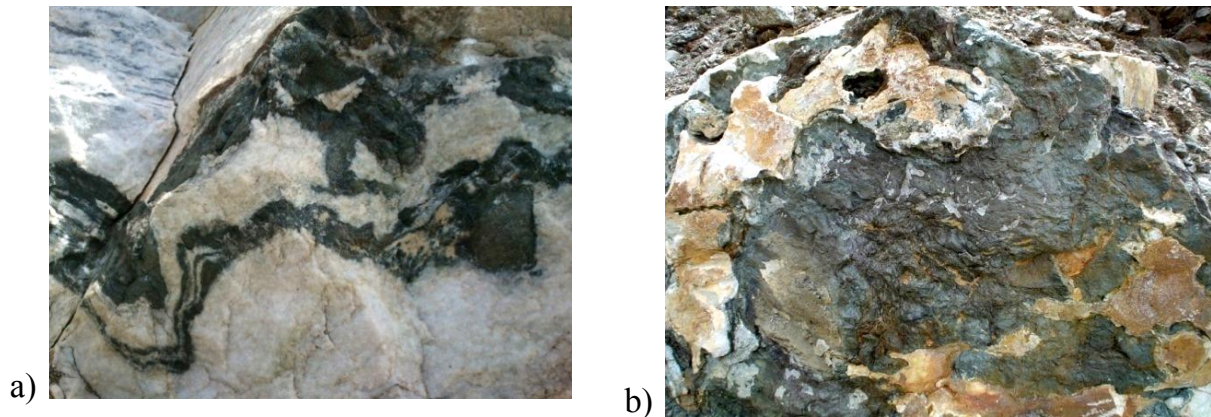


Fig.III. 11 : Photographies de terrain montrant : a) les couches millimétriques à centimétriques d'amphibolites au sein du cipolin, b) les amphibolites altérées à traces d'oxydation.

B.3- Les cipolins :

Ce sont des roches massives bien cristallisées. Deux types de cipolin affleurent au niveau de la carrière : (i) un cipolin blanc cristallin (Fig.III. 12a) et (ii) un cipolin à nuances grise-blanche ou franchement grises (Fig.III. 12b).

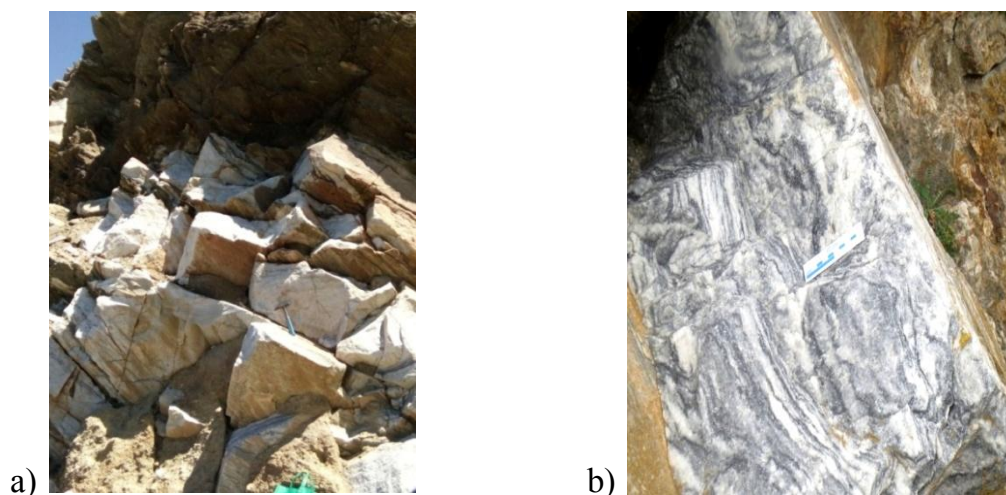


Fig.III. 12 : Photographies de terrain montrant: a) un cipolin blanc cristallin, b) un cipolin de nuance gris-blanche ou franchement grise.

C- Le Phare

Au niveau du phare les formations métamorphiques qui apparaissent sont (Fig.III.13):

- ✓ Les cipolins
- ✓ Les micaschistes à grenat
- ✓ Les skarns



Fig.III. 13 : Vue d'ensemble des affleurements géologiques au niveau de la zone du Phare.

C.1- Les cipolins :

Ce sont des roches métamorphiques souvent en bancs massifs à nuance grise-blanche (Fig.III.14a) ou bleutée à gris foncé (Fig.III.14b).

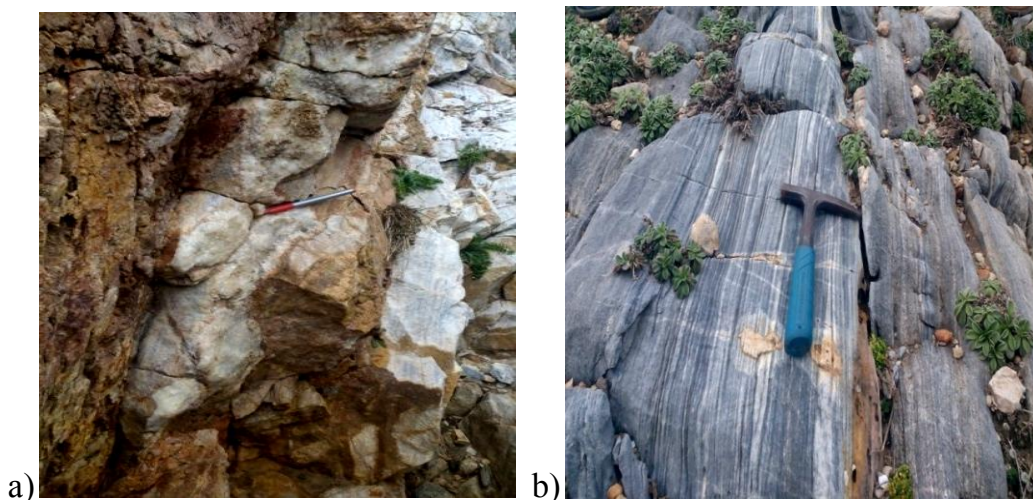


Fig.III. 14 : Photographies de terrain montrant: a) un cipolin massif à nuance grise-blanche, b) un cipolin bleuté à gris foncé.

C.2- Les micaschistes à grenats :

Ces roches affleurent sous forme de bancs d'épaisseur centimétrique à métrique en contact anormal avec les cipolins. Ils sont riches en lamelle de micas et en grenats (Fig.III.15a). Les micaschistes sont fortement altérés et présentent souvent des diaclases (Fig.III.15b).

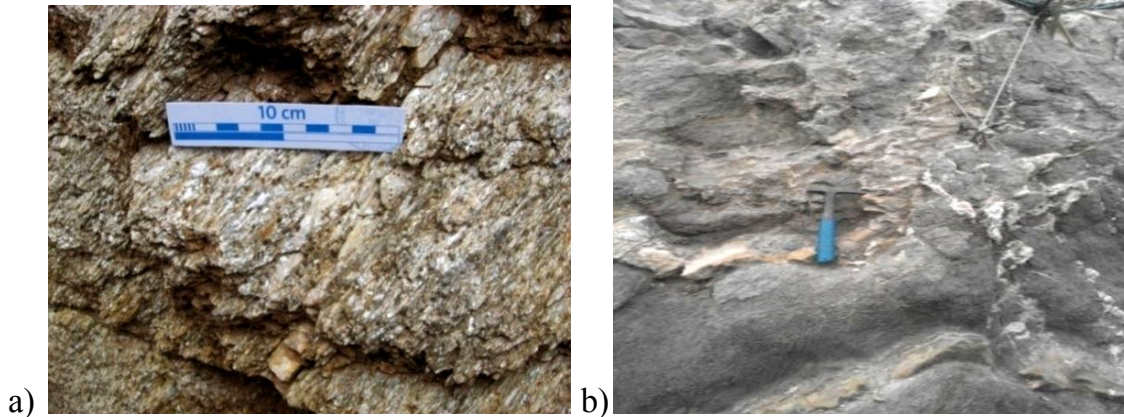


Fig.III. 15 : Photos de terrain de : a) micaschistes à muscovites et grenats visibles à l'œil nu, b) micaschistes fortement altérés et à diaclases.

C.3- Les skarns :

Il s'agit de skarns de réaction, ils se développent dans les zones de contact entre les cipolins et les micaschistes (Fig.III.16a). Ces skarns sont durs, de couleur verdâtre (présence d'amphiboles) (Fig.III.16b).

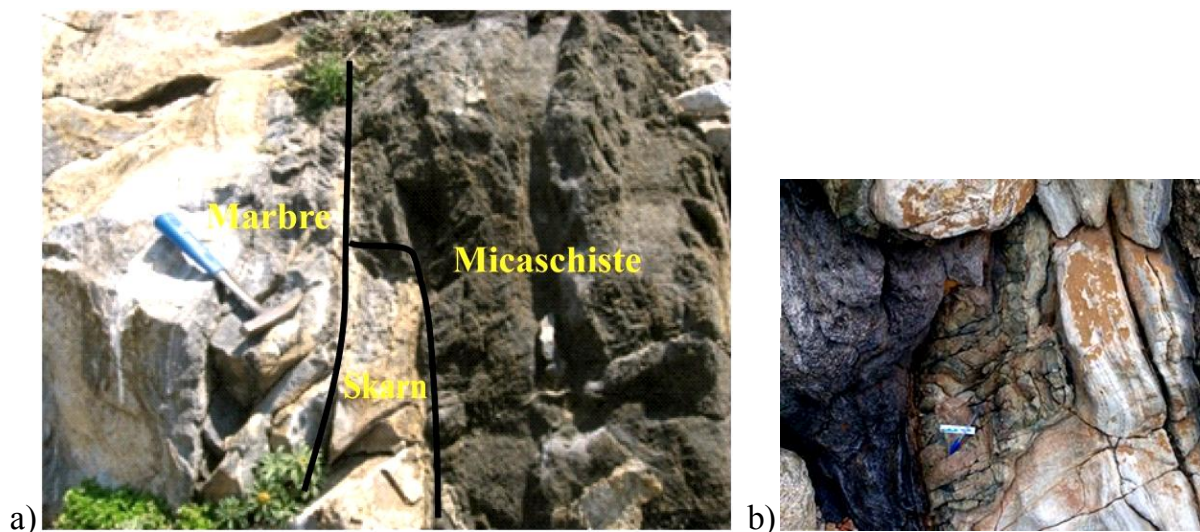


Fig.III. 16 : Photographies de terrain : a) skarns dans la zone de contact entre les cipolins et les micaschistes, b) détails du skarns.

D. Le Vivier

Dans le secteur du Vivier, qui représente la zone extrême Est du Cap de Garde, on rencontre :

- ✓ Les gneiss
- ✓ Les micaschistes
- ✓ Les grenatites
- ✓ Les affleurements quartzo-feldspathiques pegmatitiques

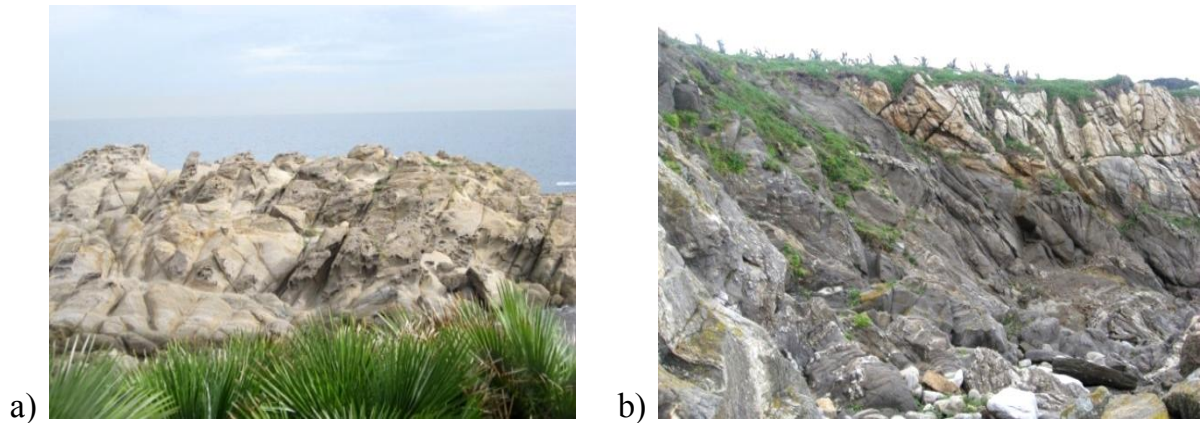


Fig.III. 17 : Vues partielles des affleurements de la zone du Vivier: a) les gneiss, b) les micaschistes.

D.1- Les gneiss :

Les gneiss du Vivier sont des formations qui ont subi un fort taux de fusion. Il s'agit de migmatites souvent très déformées (Fig.III.18a). Selon le taux de fusion, on distingue : (i) des gneiss clairs représentés par des bancs de taille métrique, souvent à texture rubanées, riches en lits blancs quartzo-feldspathiques (Fig.III.18b) et (ii) des gneiss sombres très riches en biotite avec des rares lits quartzo-feldspathiques (Fig.III.18c).

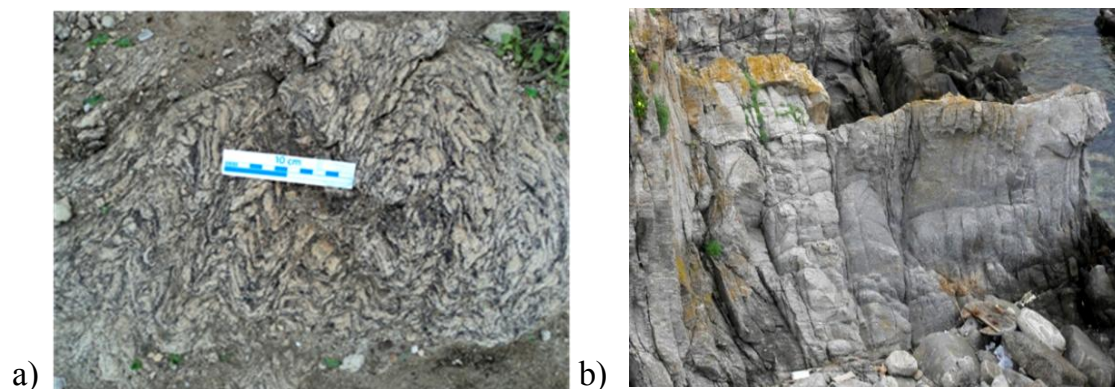




Fig.III. 18 : Photos de terrain des gneiss du Vivier montrant : a) des gneiss migmatitiques très déformés, b) des gneiss clairs à texture rubanée, riches en lits blancs quartzo-feldspathiques, c) des gneiss sombres très riches en biotite avec quelques niveaux quartzo-feldspathiques.

D.2- Les micaschistes :

C'est le faciès le plus répandu au Cap de Garde et au niveau du Vivier, il apparaît souvent en contact anormal avec les gneiss. Les micaschistes sont à grains généralement moyens, très riches en lamelles de mica blanc (muscovite) ce qui leur donne leur couleur clair. Ces micaschistes peuvent être à grenats (Fig.III.19a), à disthène (Fig.III.19b, 19c) ou à tourmaline dans les niveaux quartzo-feldspathiques (Fig.III.19d, 19e).

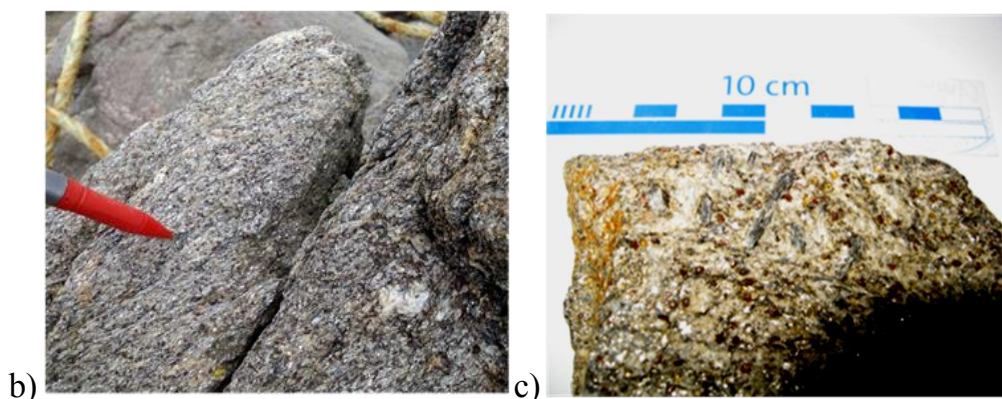




Fig.III. 19 : Photos des différents types de micaschistes: a) micaschiste à grenats, b) et c) micaschiste à disthène, d) micaschiste à niveaux quartzo-feldspathique riches en baguettes de tourmaline.

D.3- Les grenatites :

Ce sont des roches à structure grenue, composées essentiellement par des grenats, intercalées dans les micaschistes à niveaux quartzo-feldspathique à tourmaline.



Fig.III. 20 : Affleurement de grenatites dans les micaschistes.

D.4 - Les affleurements quartzo-feldspathiques pegmatitiques :

Il s'agit d'un affleurement quartzo-feldspathique pegmatitique d'environ 50 cm de large dans les micaschistes (Fig.III.21a). La formation se caractérise par la présence de cristaux centimétriques de muscovite (Fig.III.21b).

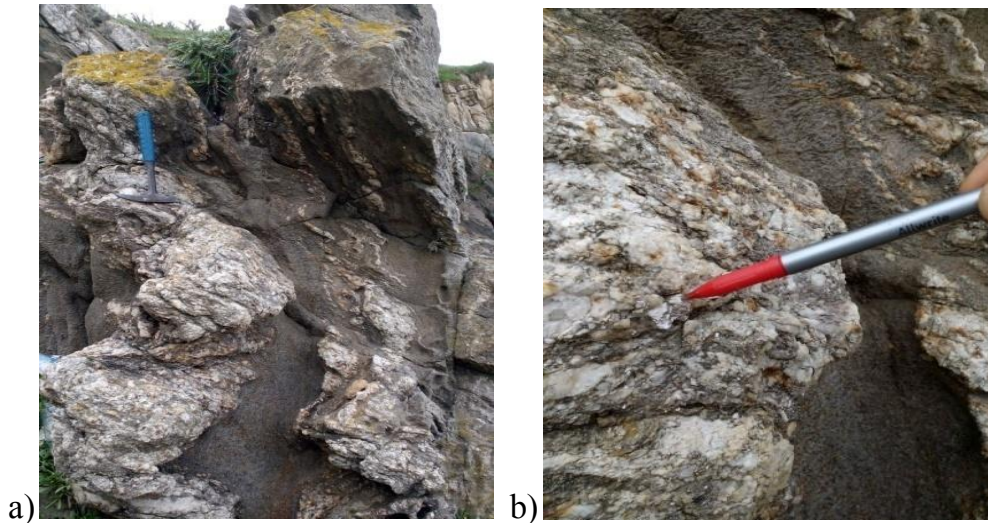


Fig.III. 21 : Affleurement quartzo-feldspathique pegmatitique d'environ 50 cm de large, b) cristaux centimétriques de muscovite.

E. Zone de la plage d'Ain Achir et de la plage Plage-Militaire

La zone de la plage d'Ain Achir et de la Plage-Militaire sont deux plages voisines avec des formations géologiques presque similaires.

E.1- Plage d'Ain Achir

Au niveau de la plage d'Ain Achir on rencontre les formations métamorphiques suivantes:

- ✓ Les micaschistes
- ✓ Les cipolins
- ✓ Les skarns
- ✓ Les grenatites
- ✓ Le sable de plage

E.1.1-Les micaschistes :

Les affleurements de micaschistes forment la limite supérieure de la plage. Certains micaschistes sont frais et d'autres sont très altérés et contiennent souvent des intercalations quartzo-feldspathiques centimétriques très plissées (Fig.III.22a et 22b). Selon la composition minéralogique, on distingue plusieurs types de micaschistes : à

staurotide (Fig.III.22c), à grenats bien visibles à l'œil nu (Fig.III.22d) et à andalousite (Fig.III.22e et 22f).

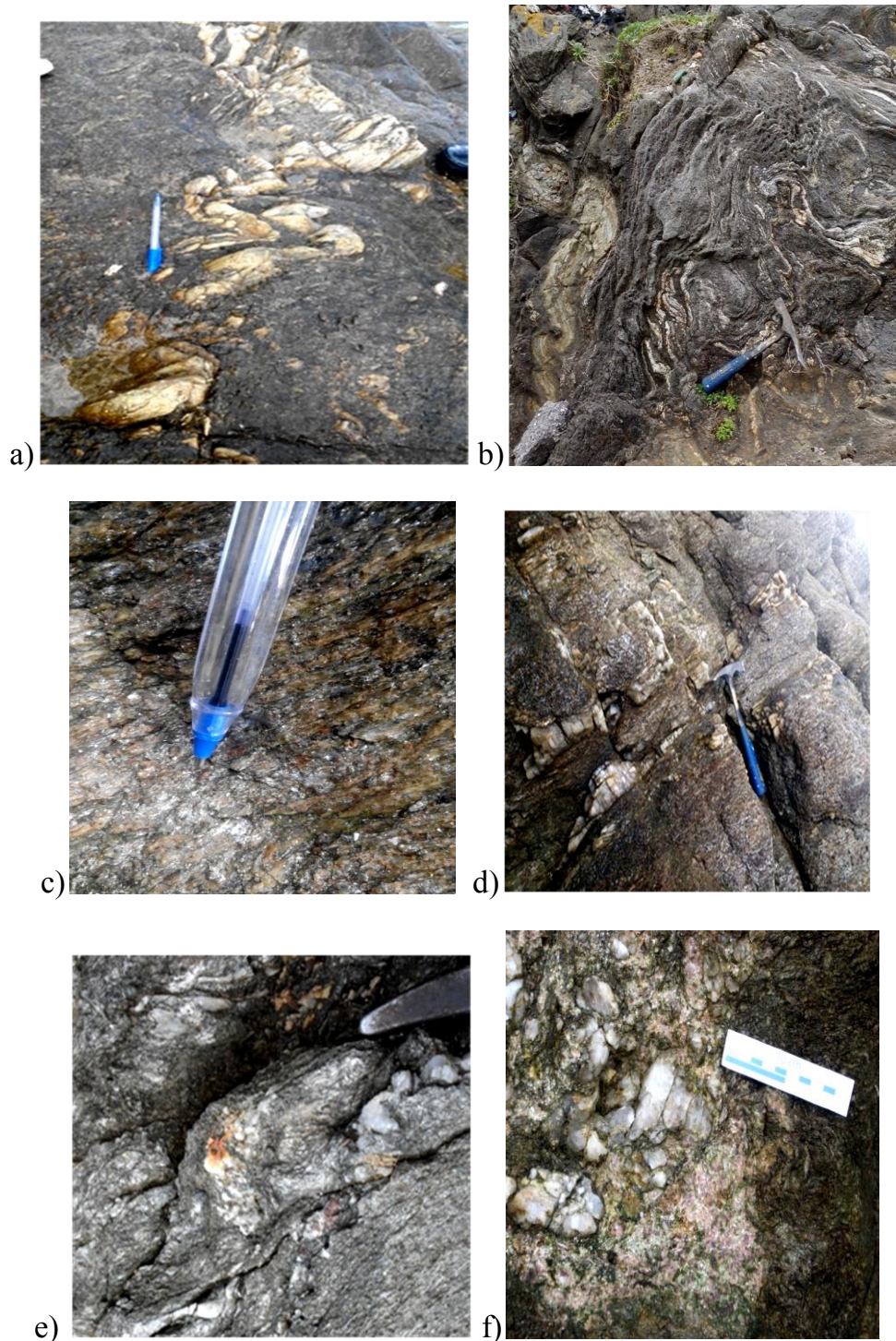


Fig.III. 22 : Les différents types de micaschistes : a) et b) à intercalations de niveaux quartzo-feldspathiques déformés, c) à staurotide, d) à grenats bien visibles à l'œil nu, e) et f) à andalousite.

E.1.2-Les cipolins :

Ils sont très représentés dans la partie Sud de la plage d'Ain Achir. Ils affleurent sous forme de bancs volumineux. Ce sont des roches dures, à structure rubanée, avec souvent des alternances de niveaux clairs (blanches sans traces d'impuretés) et des niveaux grisâtres (Fig.III.23a et 23b). Certains bancs sont intensément plissés (Fig.III.23c)

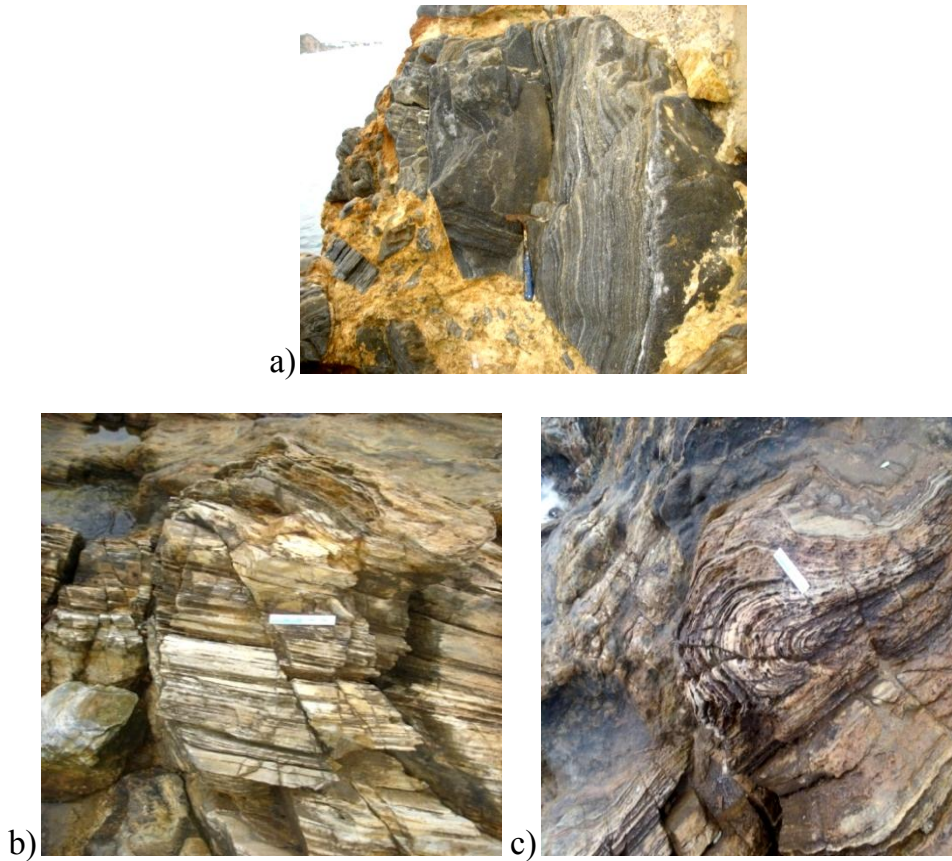


Fig.III. 23 : Affleurement de cipolin : a, b) massif grisâtre et massif très fracturé, c) cipolin en plis en fourreux.

E.1.3-Les skarns :

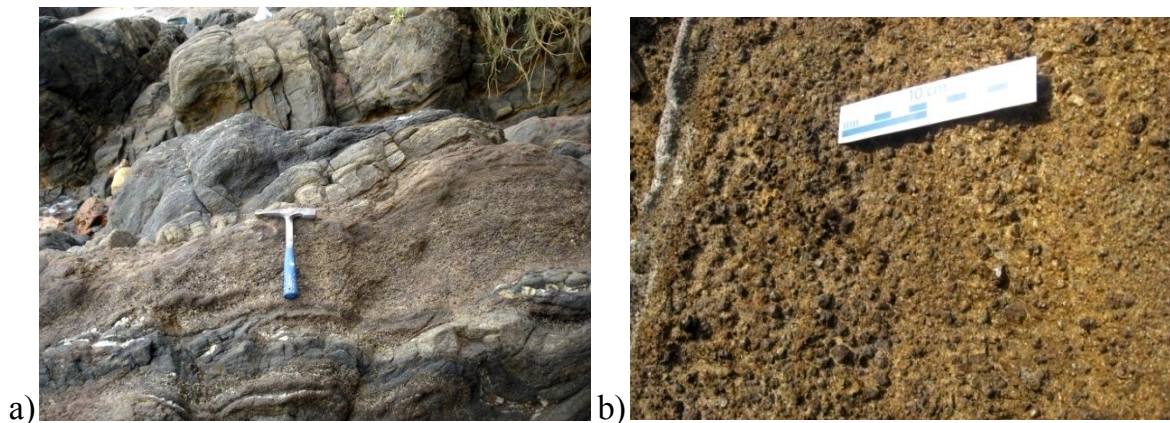
Ces roches se développent dans les zones de contact entre les cipolins et les micaschistes. Ces skarns sont durs, de texture clairement grenue et de couleur verdâtre. Ils forment parfois des affleurements de grande taille.



Fig.III. 24 : Photos des skarns fortement altérés

E.1.4-Les grenatites :

On les rencontre sous forme d'un petit banc en lentille dans la partie Nord de la plage (Fig.III.25a). L'affleurement se caractérise par une couleur rouge foncée, une texture grenue et est constitué par environ 80% de grenats de différentes tailles, allant du millimètre à plus d'un cm de diamètre (Fig.III.25b). Entre les grenatites et les micaschistes s'intercale une couche centimétrique de quartzite à grenat (Fig.III.25c et 25d.)



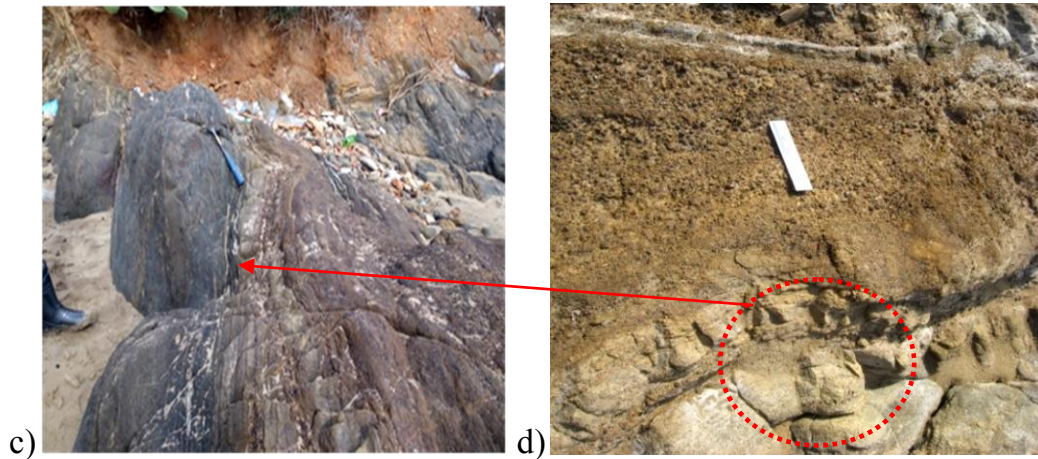


Fig.III. 25 : Photos de terrain montrant : a) un affleurement de grenatites dans la partie Nord de la plage, b) détail des grenats de différentes tailles, allant du millimètre à plus d'un cm de diamètre, c) intercalation de quartzite à grenat entre les grenatites et les micaschistes, d) détail de la couche de quartzite à grenat.

E.1.5-Les formations récentes :

Au niveau de la plage d'Ain Achir les formations récentes sont représentées par le sable des plages. On y distingue du sable clair localisé dans la partie basse de la plage (près de la rive) (Fig.III.26a) et du sable rougeâtre à brunâtre, temporaire, généralement localisé dans la partie haute de la plage (Fig.III.26b). Le sable proche des affleurements rocheux est franchement rougeâtre et est permanent (Fig.III.26c).



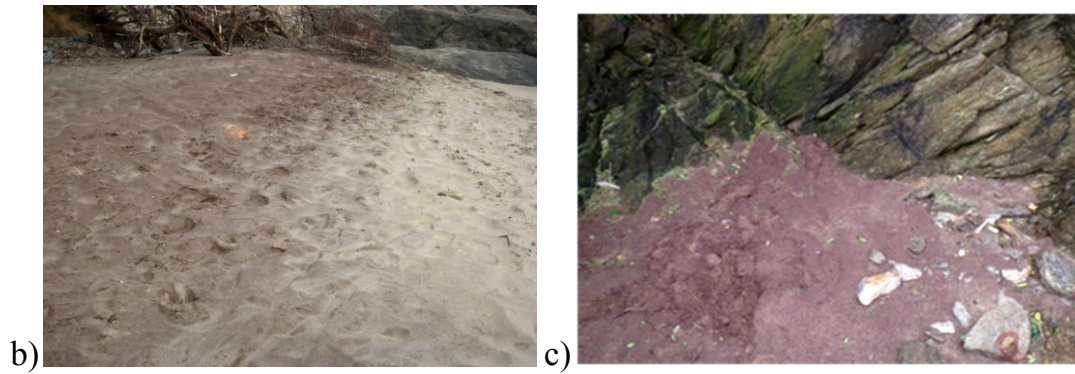


Fig.III. 26 : a) Photos du sable de la plage d'Ain Achir: b) sable clair localisé dans la partie basse de la plage (près de la rive) et sable rougeâtre à brunâtre localisé dans la partie haute de la plage (près de la berge), c) sable rougeâtre près des affleurements rocheux.

E. 2-. Plage-Militaire

Les formations métamorphiques qui apparaissent au niveau de la plage Plage-Militaire sont similaires à celles qui affleurent à la plage d'Ain Achir. On y distingue:

- ✓ Les cipolins
- ✓ Les skarns
- ✓ Les micaschistes
- ✓ Le sable de plage

E.2.1-Les cipolins :

Les affleurements se localisent au Nord et au Sud de la plage. Ce sont des roches massives bien cristallisées. Elles apparaissent sous forme de bancs métriques, sub-verticaux et sont souvent très fortement altérées (Fig.III.27a et 27b)

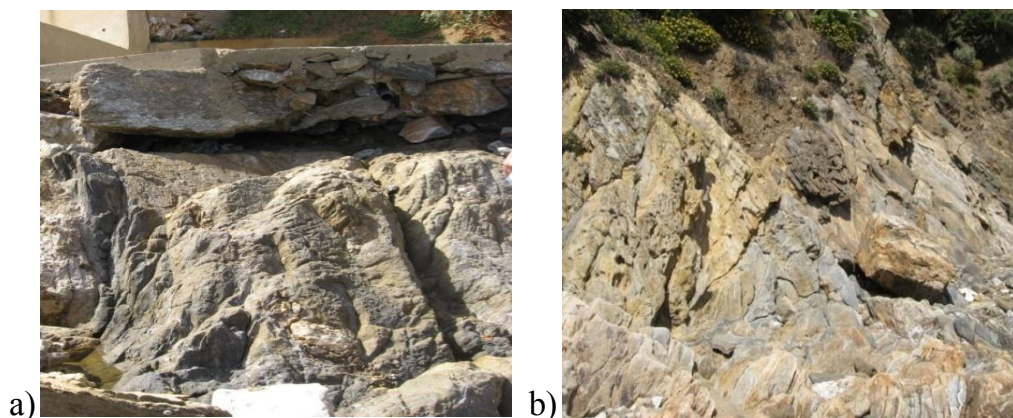


Fig.III. 27 : Photos de terrain des cipolins de la Plage-Militaire: a) Cipolin sub-vertical de la partie Sud de la plage, b) Cipolin sub-vertical de la partie Nord de la plage.

E.2.2-Les Skarns :

Comme à Ain Achir, les skarns apparaissent au niveau du contact des micaschistes et des cipolins (Fig.III.28). Il s'agit également de skarns de réaction. L'ensemble de l'affleurement est intensément altéré.



Fig.III. 28 : Skarns localisés dans la zone de contact entre les micaschistes et les cipolins, l'ensemble est fortement altéré.

E.2.3-Les micaschistes :

Ces affleurements constituent les formations principales. Ils affleurent tout le long de la plage. La roche est massive, souvent sub-v verticale, déformée et à intercalations de niveaux centimétriques quartzo-feldspathiques (Fig.III.29a). Les formations quartzo-feldspathiques forment parfois des nodules alignées selon la schistosité (Fig.III.29b). Selon la composition minéralogique dominante et visible à l'œil nu, on distingue différent types de micaschistes : à grenat et à staurotide.

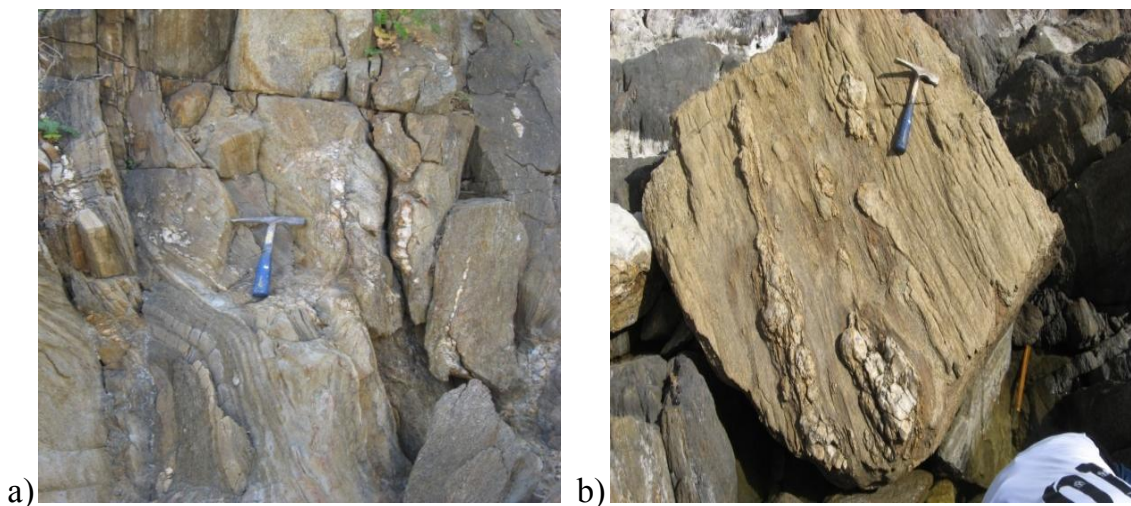


Fig.III. 29 : a) Micaschiste en position sub-v verticale, à intercalations quartzo-feldspathiques, b) formations quartzo-feldspathiques en nodules.

E.2.4-Les formations récentes :

Au niveau de la plage militaire les formations récentes sont représentées par le sable des plages. Le sable de la Plage-Militaire est un sable foncé à caractère permanent. Le sable proche des affleurements rocheux est plus sombre que celui proche de la rive.



Fig.III. 30 : Vue panoramique de la plage Plage-Militaire

F. La zone de contact entre les plages Ain Achir et Plage-Militaire

La plage Ain Achir (dans sa partie Sud) et celle Plage-Militaire (dans sa partie Nord) sont séparées par un affleurement constitué par des micaschistes en alternance avec des cipolins (Fig.III.31). Dans la zone de contact entre ces deux formations apparaissent les skarns de réaction.



Fig.III. 31 : A affleurement de la zone de contact entre les plages Ain Achir et Plage-Militaire (Vue du côté de la Plage-Militaire).

III.2.2. Secteur du Port :

A. - plage El Nasr

Les principales formations métamorphiques de ce secteur sont:

- ✓ les micaschistes,
- ✓ Les formations récentes représentées par des sables sombres.

A.1. - Les micaschistes :

Ces roches sont très peu représentées à la plage El Nasr. La berge de cette plage étant entièrement recouverte d'un mur en béton (Fig.III.32a). Il ne subsiste qu'un petit affleurement d'une vingtaine de mètre localisé dans la partie nord de la plage (Fig.III.32b). La roche est un micaschiste à staurotide comme minéral principal, quelques grenats visibles à l'œil nu y sont également présents. L'affleurement est fortement altéré.



Fig.III. 32 : a) Vue du mur de béton recouvrant les formations géologiques, b) affleurement de micaschiste à staurotide dans la partie nord de la plage El Nasr.

A.2. - Les formations récentes :

Elles sont représentées par des sables sombres (Fig.III.33). Le sable proche de la zone en béton est plus sombre que celui proche de la rive. A El Nasr la couleur du sable (rougeâtre) est permanente durant toute l'année.



Fig.III. 33 : Vue du sable sombre de la plage El Nasr.

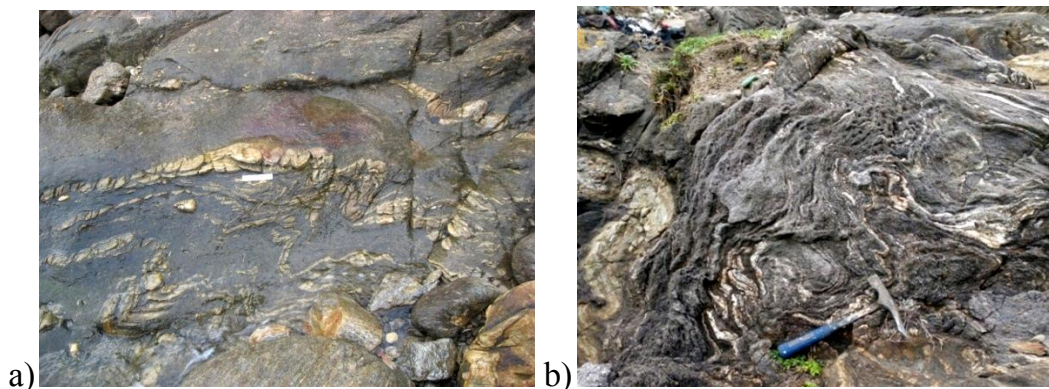
III.3. APERÇU TECTONIQUE DES SECTEURS ETUDIES

Les secteurs étudiés (Cap de Garde et Port) ont été fortement affectés par la tectonique. La tectonique souple et cassante y est omniprésente. Elle affecte principalement les micaschistes et les cipolins.

III.3.1. Tectonique souple:

La tectonique souple est bien représentée sous forme de plis multiples et de microplis (Fig.III.34).

Les plis affectent tous les types de roches présentes. Les plis et les microplis sont bien visibles dans les intercalations quartzo-feldspathiques des micaschistes (Fig.III.34a), dans les micaschistes altérés (Fig.III.34b), dans les gneiss migmatitiques du Cap de Garde (Fig.III. 34c) et dans les cipolins (Fig.III.34d). Dans la plupart des affleurements on distingue la formation de microplis (plissement secondaire) qui affectent les déformations principales (Fig.III.34e).



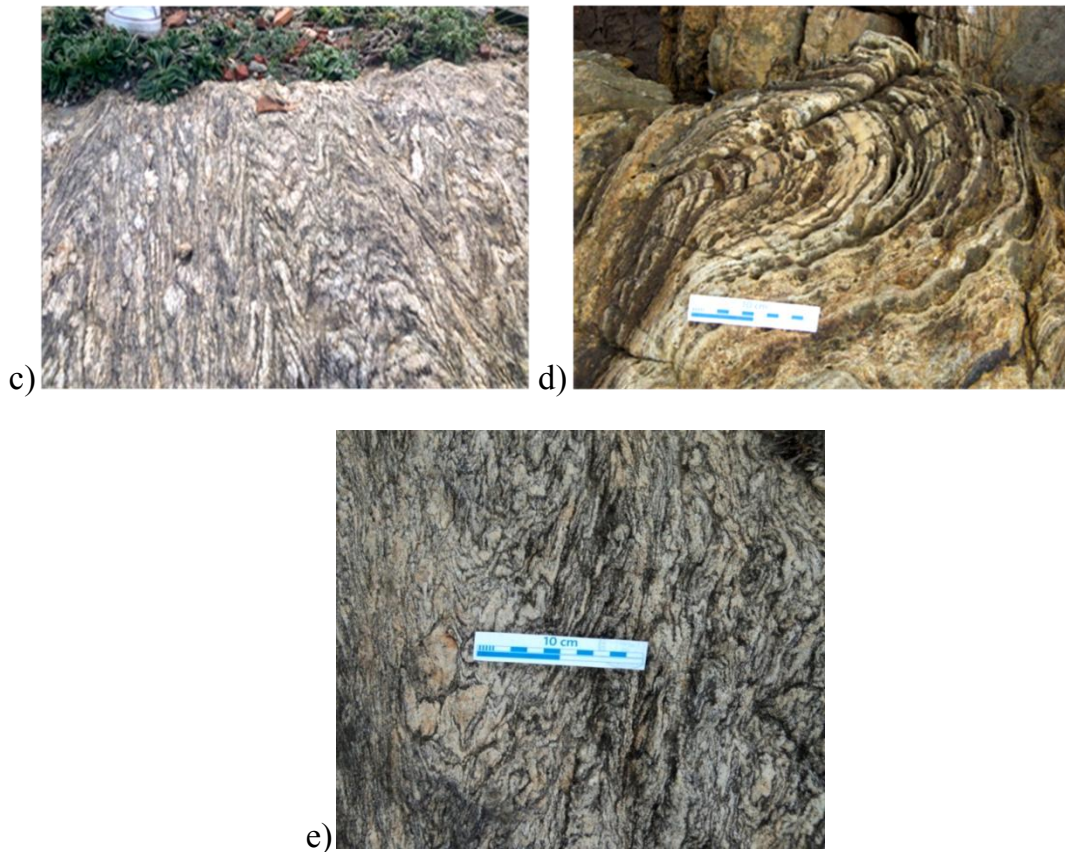


Fig.III. 34 : Photos de différents affleurements affectés par des déformations souples: a) plis et microplis bien visibles dans les intercalations quartzo-feldspathiques des micaschistes, b) micaschiste fortement déformé, c) gneiss montrant des plis en chevrons, d) plis en fer à cheval dans les cipolins, e) plis et microplis (déformations secondaires) dans les gneiss.

III.3.2. Tectonique cassante

La tectonique cassante est représentée par des failles qui affectent principalement le socle métamorphique. Ce type de déformation est représenté par les miroirs de failles que l'on rencontre principalement dans les cipolins de la zone du Phare du Cap de Garde (Fig.III.35a). De nombreuses failles recoupent les micaschistes. Les plus visibles recoupent les micaschistes du Vivier (Fig.III.35b).

Les diaclases affectent tous les types de roches et forment parfois des réseaux denses dans les micaschistes (Fig.III.35c) et dans les cipolins sous forme de cassures linéaires simples (Fig.III.35d) ou en formant un système de réseaux (Fig.III. 35e).

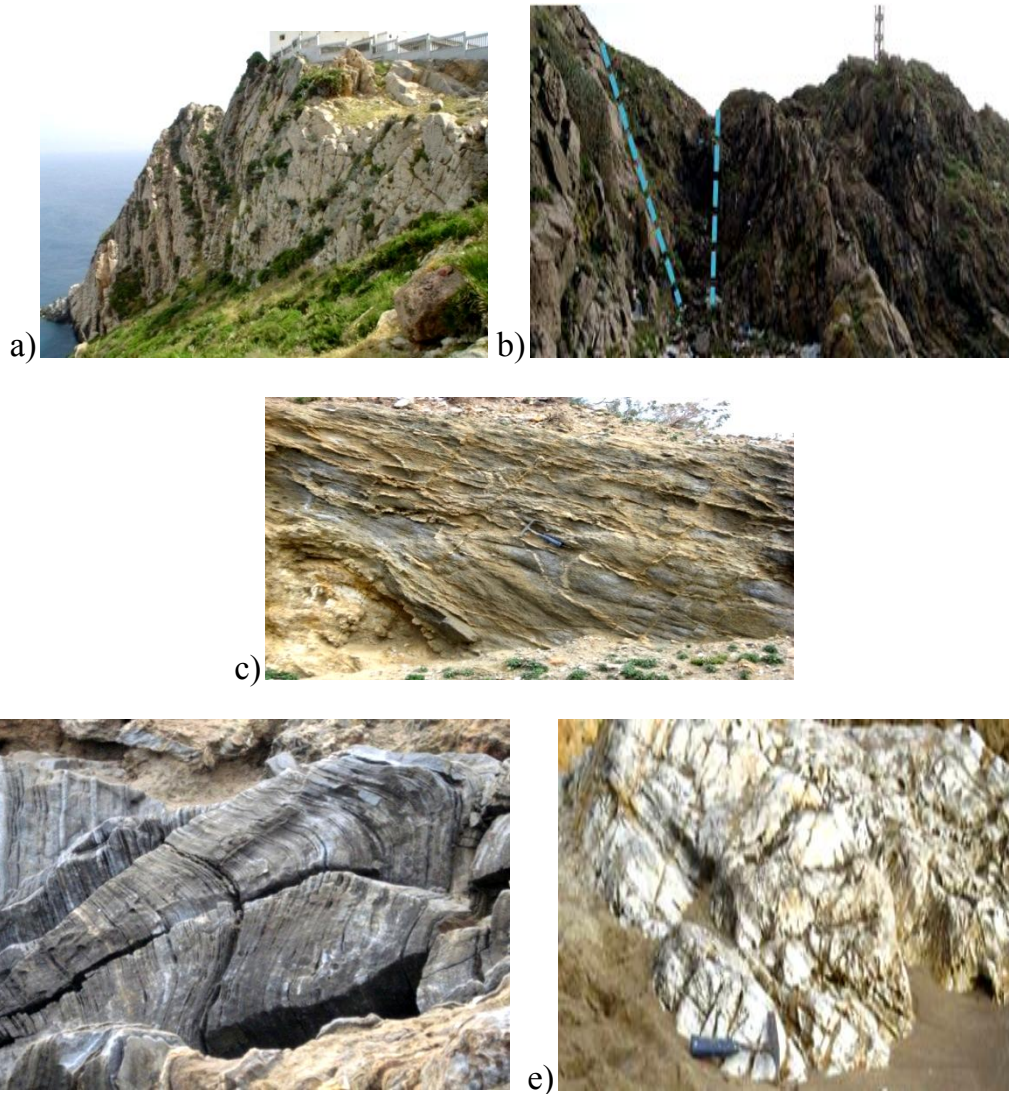


Fig.III. 35 :Photos de terrain montrant: a) un panorama du miroir de faille dans les cipolins affleurants dans la zone du Phare, b) des failles recoupants les micaschistes de la zone du Vivier du Cap de Garde, c) des micaschistes affectés par de nombreuses diaclases à remplissage secondaire, d) des cipolins traversés par des diaclases linéaires, e) des cipolins à diaclases en réseaux.

CHAPITRE IV : CARACTERISTIQUES PHYSICO-PETROGRAPHIQUES ET MINERALOGIQUES

IV. 1. INTRODUCTION

L'étude des différents paramètres (physiques, pétrographiques et minéralogiques) a été faite sur toutes les formations consolidées (micaschistes, cipolin et skarns) et meubles (sable) de la zone d'étude : le Cap de Garde (Plage d'Ain Achir et Plage-Militaire) et la plage El Nasr.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour la caractérisation des formations consolidées (affleurements rocheux) et meubles (sable) :

- ✓ Les affleurements rocheux consolidés cristallophylliens :
 - *Identification minéralogique : étude au microscope polarisant des lames minces.*
- ✓ Les affleurements meubles (sable) :
 - *Classification granulométrique : classification des roches meubles en fonction de la taille des grains (analyse granulométrique)*
 - *Identification minéralogique :*
 - ✚ *DRX : pour l'identification minéralogique des échantillons*
 - ✚ *Loupe binoculaire (étude des minéraux en grains non argileux). Cette étude a permis de déterminer deux groupes de minéraux :*
 - Des minéraux clairs composés principalement de quartz, de calcite et de minéraux argileux (non identifiés). Ces minéraux sont considérés comme minéraux légers.
 - Des minéraux sombres tels que le grenat, le disthène, la staurotide, l'épidote et la tourmaline. Ces minéraux à densité élevée sont considérés comme étant des minéraux lourds. Rothwell, (1989) a établi une classification des minéraux lourds basée sur le degré de transparence et sur la résistance à l'altération. Il distingue 2 groupes :
 - Les minéraux ultrastables : tels que les tourmalines,
 - Les minéraux métastables : les grenats, épidotes, staurotide, disthène ...
 - ✚ *Essai au Bleu de Méthylène : cette méthode a été développée par TranNgoc Lan (1977), elle permet de détecter la présence de minéraux*

argileux non identifiables à l'œil nu ou à la loupe binoculaire et permet également d'évaluer le degré argileux d'une roche ou d'un sédiment (exemple le sable).

+ La calcimétrie : détermination du taux de carbonates (tout type confondu) dans les échantillons de sable.

+ Exoscopie au microscope électronique à balayage (MEB)

+ Microsonde : pour l'identification précise du minéral

IV. 2. CARACTERISATION DES AFFLEUREMENTS

IV.2.1. La zone du Cap De Garde (Ain Achir et Plage-Militaire)

A. Plage d'Ain Achir

A.1- Les affleurements rocheux proximaux

A.1.1. Pétrographie-Minéralogie

L'étude des lames minces des échantillons prélevés dans les formations cristallophylliennes montre une grande diversité pétrographique et minéralogique. Des échantillons représentant les affleurements proximaux (micaschiste, cipolins et skarns) de la plage d'Ain Achir ont été étudiés sous microscope.

a. Les Micaschistes :

L'étude pétrographique des différents échantillons des micaschistes de la plage d'Ain Achir montre une composition minéralogique relativement homogène (Fig.IV.1). Les échantillons des micaschistes sont principalement composés de staurotides, de biotites altérées, de quartz et de grenats avec des inclusions.

L'observation au microscopique en lumière polarisée analysée montre également que ces échantillons sont généralement de texture lépidoblastique présentant une alternance des couches de muscovite et biotite avec des niveaux granoblastique contenant surtout du quartz et du feldspath auxquels s'ajoutent des grenats, des staurotides et du disthène (Fig.IV.1).

La biotite (Fig.IV.1a, 1b) est brunâtre et apparaît sous forme de lamelles. Certains cristaux sont altérés. La muscovite (Fig.IV.1a, 1b) est typiquement lamellaire. Les cristaux se rencontrent parfois en agrégats à grains fins. Elle est moins présente que la biotite. En lumière polarisée analysée elle est généralement rouge-rose à vert clair. Le quartz (Fig.IV.1a, 1b) est de petite taille de forme sub-automorphe. Il se présente sous forme d'intercalations ou d'amas entre les niveaux à biotite-muscovite et la staurotide. Le grenat (Fig.IV.1c, 1d) est globuleux, sub-automorphe, craquelé, de

petite taille (jusqu'à 2mm) de couleur marron foncée et bordé de biotite (Fig.IV.1c, 1d). La staurotide est omniprésente (Fig.IV.1a, 1b) et se présente sous forme de cristaux allongés et losangiques de couleur jaune à jaune pâle.

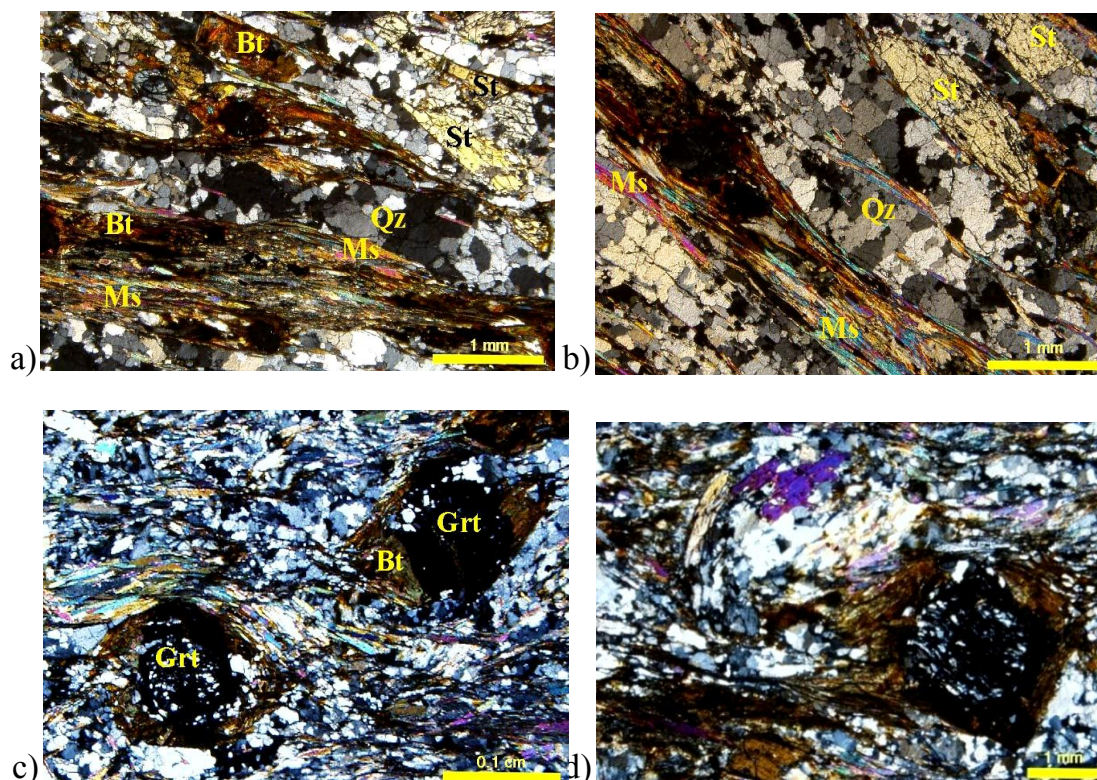


Fig.IV. 1: Microphotographies en lumière polarisée analysée des micaschistes d'Ain Achir ; Bt : biotite, Grt : grenat, Ms : muscovite, St : staurotide, Qz : quartz (Abréviations selon Whitney et Evans, 2010).

b. Les cipolins :

La lame mince de l'échantillon de cipolin montre qu'elle a une texture grenue (Fig.IV.2). La calcite est automorphe, souvent de grande taille (jusqu'à 1cm) et contient parfois avec des inclusions brunes, probablement des altérations d'oxydes de fer. Les plans de clivages sont également visibles.

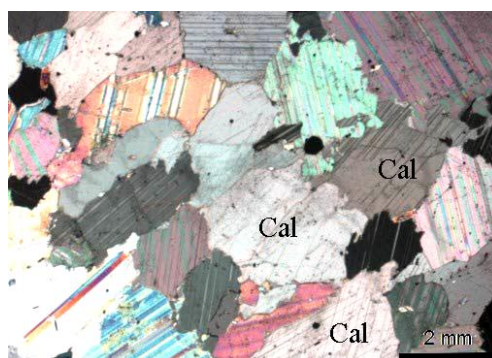


Fig.IV. 2 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des cipolins d'Ain Achir ; Cal : Calcite.

c. Les Skarns :

Ces roches affleurent au contact entre les micaschistes et les cipolins. Il s'agit de skarns de réaction. La composition minéralogique de l'échantillon du skarn est la calcite, les plagioclases et l'épidote.

La calcite est sub-automorphe à automorphe, souvent de grande taille, à plans de clivages parfaits (Fig.3a, 3b). Les plagioclases sont souvent altérés (Fig.IV.3a, 3b). L'épidote est xénomorphe et à bords corrodés (Fig.IV.3c, 3d), elle prend parfois un aspect de manteau d'arlequin caractéristique (Fig.IV.3c). L'épidote est souvent associée aux plagioclases dont elle pourrait être le produit d'altération (Fig.IV.3c, 3d).

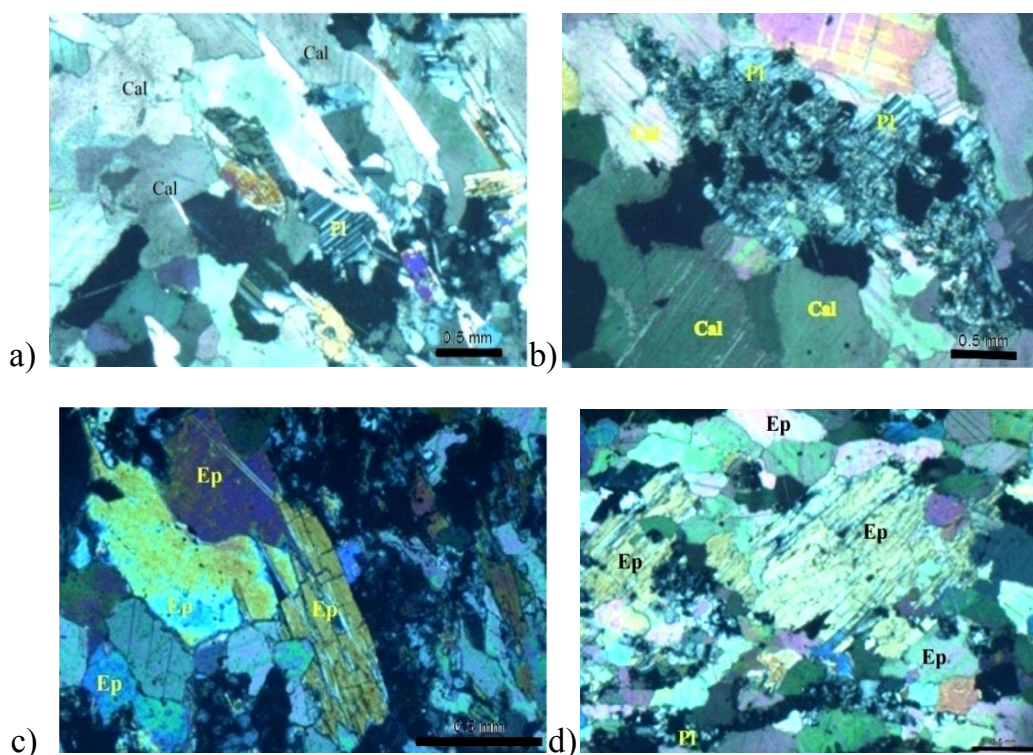


Fig.IV. 3 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des skarns de la plage d'Ain Achir : a , b) calcite sub-automorphe à automorphe et présence de cristaux de plagioclases altérée, c, d) épidote à teintes de polarisation en manteau d'arlequin.

A.2- Les roches meubles (sable)

A.2.1. Paramètres granulométriques des sables

Les résultats de l'analyse granulométrique sont résumés dans le tableau1.

Tableau.IV.1 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique du sable de la plage d'Ain Achir.

	AACa	AACb	AA1a	AA1b	AA2a	AA2b	AA2C	AAMa	AAMb	AA3a	AA3b	AA3c	AA4a	AA4b	AA5a	AA5b	AA5c	AAGa	AAGb
MEAN	1,78	1,75	1,44	1,72	1,99	1,72	1,77	1,78	1,98	1,43	1,75	1,44	2,05	1,75	1,98	2,01	1,77	2,08	2,06
SORTING	0,29	0,25	0,51	0,44	0,46	0,41	0,40	0,31	0,54	0,52	0,43	0,73	0,50	0,41	0,45	0,56	0,40	0,50	0,49
SKEWNESS	0,29	-0,25	-0,55	-0,05	0,56	-0,05	0,04	0,29	0,34	-0,54	-0,01	-0,39	0,53	0,01	0,56	0,33	0,04	0,51	0,54
KURTOSIS	1,77	1,50	0,66	2,63	1,68	2,53	2,50	1,74	2,29	0,64	2,63	1,17	0,64	2,59	1,73	2,23	2,50	0,61	0,64
% GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% SAND:	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
% MUD:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% COARSE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% MEDIUM GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% FINE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V FINE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE SAND:	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,06	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
% COARSE SAND:	0,02	0,05	0,25	0,12	0,03	0,13	0,06	0,04	0,05	0,28	0,09	0,24	0,04	0,08	0,02	0,04	0,06	0,01	0,01
% MEDIUM SAND:	0,85	0,90	0,68	0,76	0,76	0,78	0,79	0,80	0,75	0,65	0,77	0,61	0,67	0,81	0,79	0,71	0,79	0,63	0,69
% FINE SAND:	0,13	0,05	0,03	0,09	0,21	0,07	0,14	0,16	0,20	0,05	0,12	0,09	0,29	0,11	0,19	0,23	0,14	0,35	0,30
% V FINE SAND:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% COARSE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% MEDIUM SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% FINE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V FINE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% CLAY:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

- ✓ Dans le triangle de classification de Folk et Ward, 1957, les échantillons de sable de la plage d'Ain Achir sont des sables véritables sans fraction argileuse ou limoneuse significative (Fig.IV.4a).
- ✓ D'après la classification de Folk et Ward (1957), les valeurs de la Moyenne (Mean, Mz) sont comprises entre 1,78 et 2,06 (Tab.1) indiquant que le sable est à dominance à grains moyens.
- ✓ Les valeurs de l'indice de tri (Sorting) sont toutes < 2.5. Elles sont comprises entre 0,25 et 0,56 (Tab.1), ce qui caractérise les sables bien triés.
- ✓ Les valeurs de l'indice d'asymétrie (Skewness) sont <1 et majoritairement négatives ou proches de zéro (Tab.1), ce qui indique que le classement est meilleur du côté des éléments grossiers que du côté des fins et que le dépôt s'est fait dans un milieu marin dynamique.
- ✓ La courbe de distribution granulométrique (Fig.IV.4b) se caractérise par la présence d'un seul pic, ce qui indique que le sable de la plage d'Ain Achir est unimodal témoignant d'un dépôt sableux à caractéristiques granulométriques identiques.

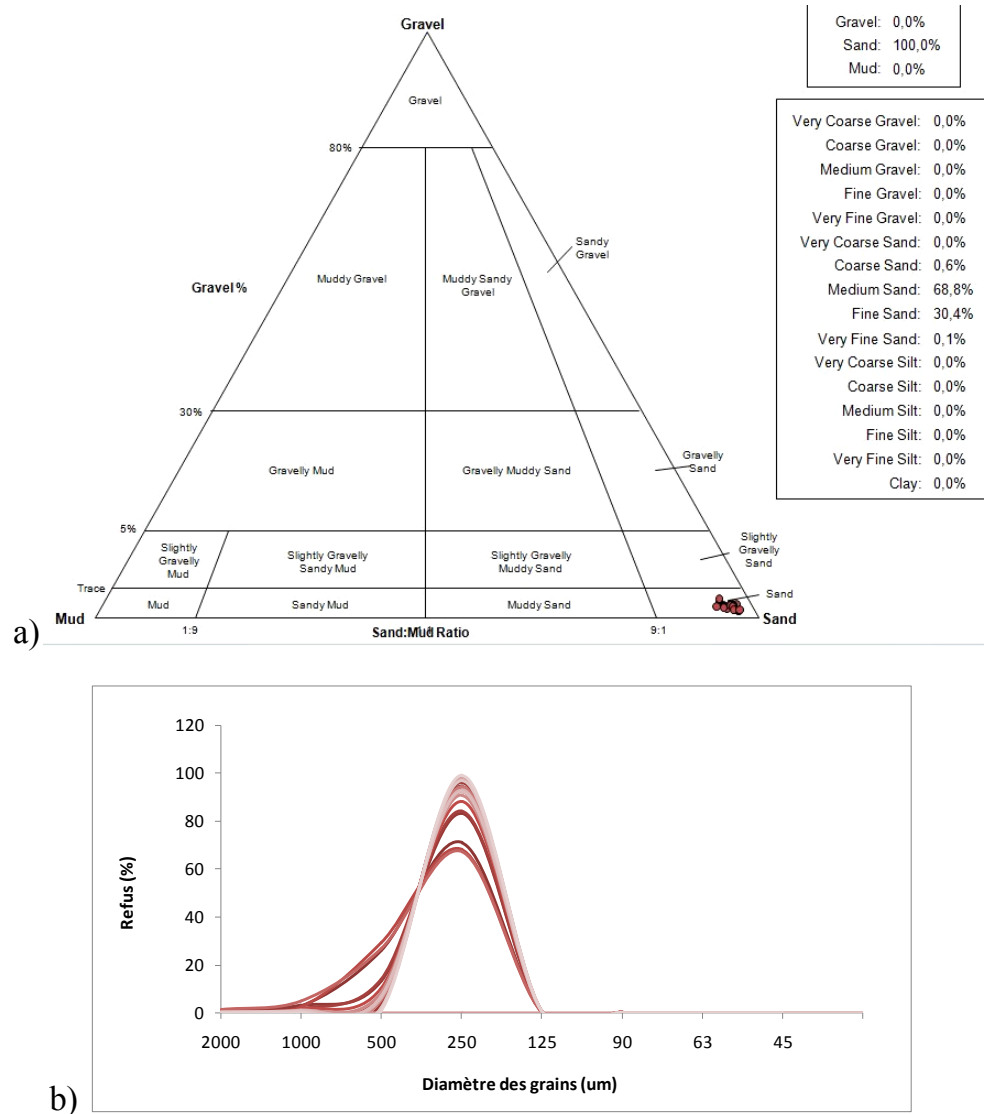


Fig.IV. 4 : Caractéristiques granulométriques du sable d'Ain Achir: a) dans le triangle de classification de Folk et Ward, (1957), b) Courbes de distribution granulométrique du sable.

- ✓ Les valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage d'Ain Achir sont < 2 . Cu_{AA} varie de 1.46 à 1.65 ce qui indique que le sable est à granulométrie très serrée et uniforme.

Tableau.IV.2 : Valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage d'Ain Achir

	AACa	AACb	AA1a	AA1b	AA2a	AA2b	AA2C	AAMa	AAMb	AA3a	AA3b	AA3c	AA4a	AA4b	AA4c	AA5a	AA5b	AA5c	Moyenne
D60	403,33	408,86	461,66	430,12	406,04	428,01	412,19	407,31	410,43	470,02	420,03	473,00	408,21	415,25	405,73	403,21	410,99	411,81	421,46
D10	275,44	276,48	285,28	279,95	275,89	279,46	276,74	276,03	276,64	286,44	278,01	287,02	275,83	277,40	275,26	275,02	276,43	276,31	278,31
$Cu=D60/D10$	1,46	1,48	1,62	1,54	1,47	1,53	1,49	1,48	1,48	1,64	1,51	1,65	1,48	1,50	1,47	1,47	1,49	1,49	1,51

A.2.2. Identification minéralogique

Les formations meubles correspondent à du sable de couleur clair et en à du sable de couleur sombre. La composition minéralogique de ces deux types de sable est similaire, la différence se situe dans les proportions des différents minéraux. Différentes méthodes (bleu de méthylène, calcimétrie, DRX et loupe binoculaire) ont permis de déterminer la composition minéralogique de ces sables.

a. Les minéraux argileux :

La méthode au bleu de méthylène a permis de déterminer la présence ou l'absence de minéraux argileux dans le sable de la plage d'Ain Achir. Le Tableau.IV.3 montre que le taux d'argilosité du sable est faible. La présence d'argile indique une altération poussée des affleurements de micaschistes proximaux.

Tableau.IV.3 : Récapitulatif des essais au bleu de méthylène du sable de la plage d'Ain Achir

Plage Ain Achir			
Echantillon	Valeur de bleu méthylène (Vb) (ml/g)	Quantité (mg/l)	Présence d'argile
AA2a	1,4	0,28	present
AA2b	1,4	1,60	present
AA2C	1,4	1,12	present
AAMa	1,4	0,64	present
AAMb	1,4	0,25	present
AA3a	1,4	2,25	present
AA3b	1,4	1,38	present
AA3c	1,4	0,71	present
AACa	1,4	0,53	present
AACb	1,4	0,00	absent
AA1a	2,8	0,00	absent
AA1b	1,4	0,39	present
AA4a	1,4	0,83	present
AA4b	1,4	0,74	present
AA4c	1,4	0,77	present
AA5a	2,8	2,90	present
AA5b	1,4	0,82	present
AA5c	1,4	2,23	present
AAGa	1,4	0,61	present
AAGb	1,4	0,58	present

b. Les carbonates :

La calcimétrie a permis de déterminer la présence de carbonate. Au niveau de plage d'Ain Achir on constate que le taux de carbonate (CaCO_3) est élevé (Tab. 4) à cause de la présence d'affleurements de cipolin et la présence de débris (coquilles et autres) d'origine marine.

Tableau.IV.4 : Récapitulatif des essais calcimétriques du sable de la plage d'Ain Achir, V1I : volume Initial, V2 : volume CO2 dégagé par l'échantillon, CaCO3 %Ech : taux de carbonate dans l'échantillon.

Ain Achir					
Echs	V1 I	V2 Ech	V CO2%t	V CO2%t	CaCO3 %Ech
AA1a	65	95	30	196	15,31
AA1b	65	112,5	47,5	196	24,23
AA2a	65	77	12	196	6,12
AA2b	65	99	34	196	17,35
AA4a	65	90	25	196	12,76
AA4b	65	102	37	196	18,88
AA5a	65	91	26	196	13,27
AA5b	65	95	30	196	15,31
AA5c	65	86	21	196	10,71
AACa	65	87	22	196	11,22
AA2c	65	89	24	196	12,24
AAMa	65	89	24	196	12,24
AAMb	65	65	0	196	0,00
AA3a	65	95	30	196	15,31
AA3b	65	80	15	196	7,65
AA3c	65	95	30	196	15,31
AAGa	65	99	34	196	17,35
AAGb	65	75	10	196	5,10

c. Les minéraux non argileux :

L'analyse diffractométrique du sable clair ainsi que celui sombre de la plage d'Ain Achir a montré que ces deux types de sables sont principalement composés de grenat, staurotide, calcite et quartz et de rares épidotes (Fig.IV.5). Comme attendu la proportion en minéraux sombres est plus faible dans le sable clair (42%) (Fig.IV.5a) que dans celui sombre (74%) (Fig.IV.5b).

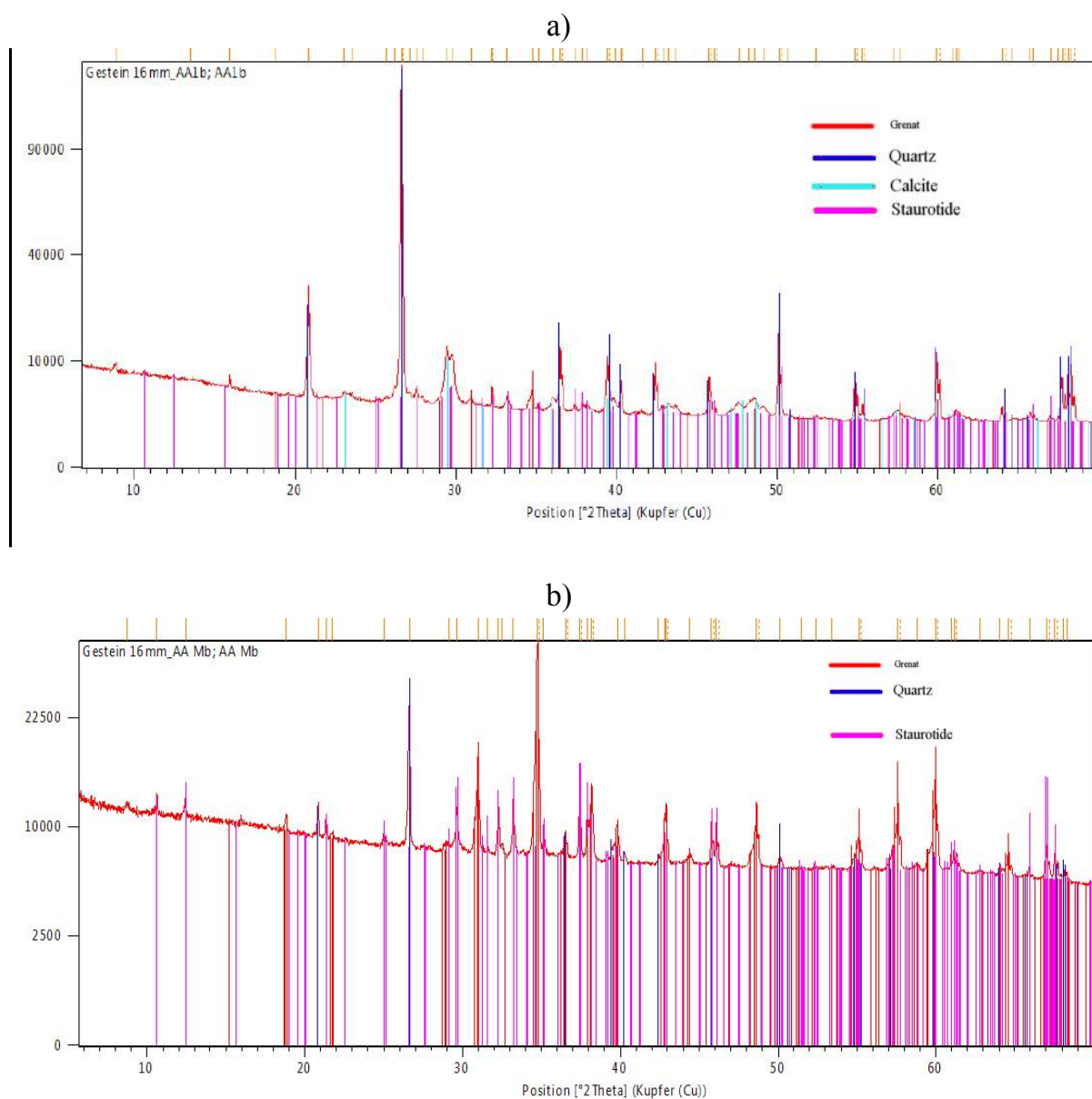


Fig.IV. 5 : Diffractogrammes du sable d'Ain Achir : a) sable clair, b) sable sombre

L'observation à la loupe binoculaire des sables de plage d'Ain Achir a révélé que le sable se compose de minéraux clairs (quartz et calcite) et de minéraux sombres (tourmaline, grenat, disthène, épidote et staurotide) (Fig.IV.6).

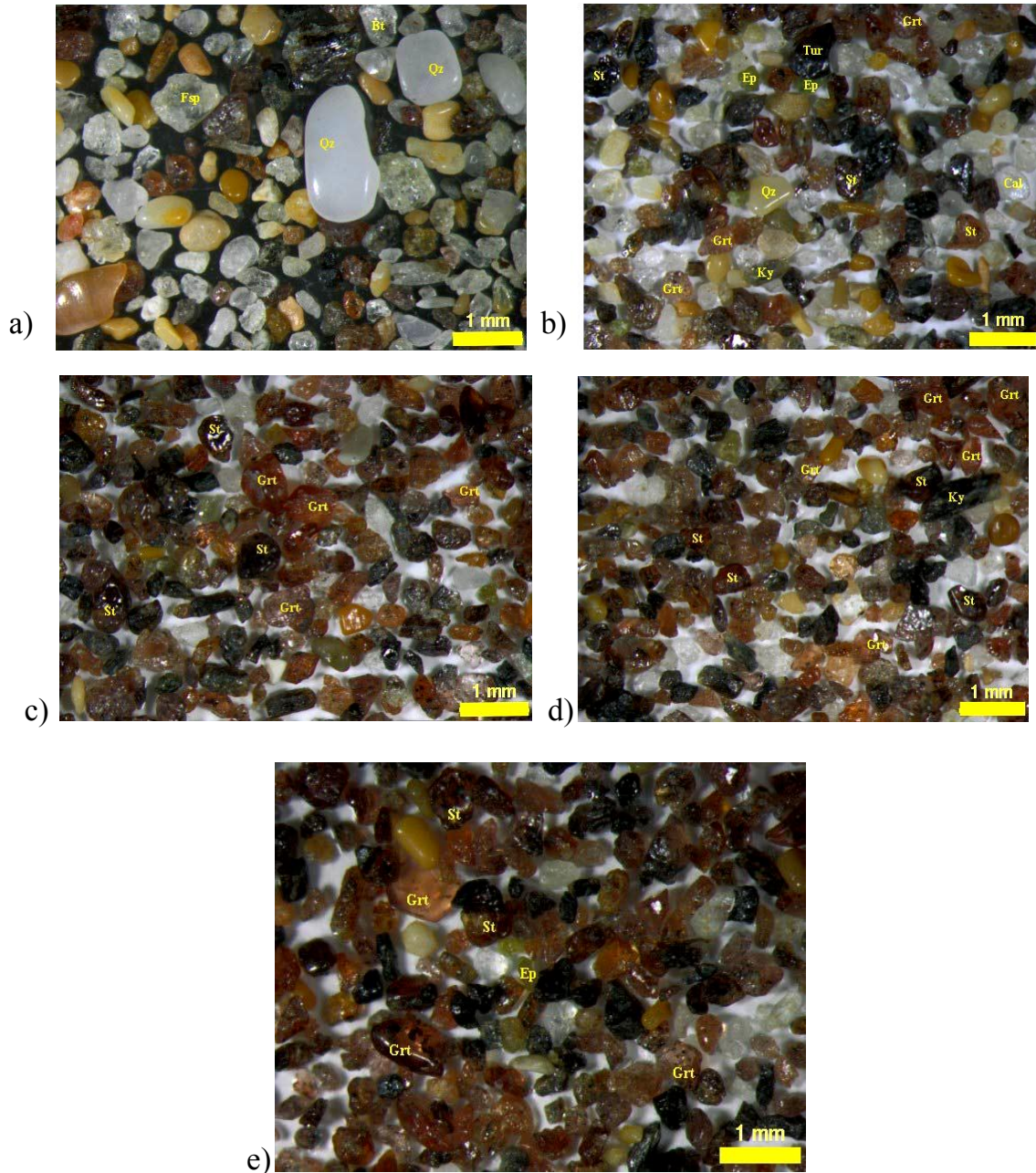


Fig.IV. 6 : Photographies au microscope binoculaire du sable d'Ain Achir : a, b) sable clair ; c, d et e) sable sombre. Qz : quartz, Grt: Grenat, Ep: Epidote, St: Staurotide, Tur: tourmaline, Cal: calcite,

c.1. Les minéraux clairs :

Le quartz :

Les grains de quartz se présentent sous forme de cristaux sub-arrondis, de taille variable pouvant atteindre 1 mm. Les grains sont parfois jaune-brunâtre s'ils sont couverts d'une fine pellicule d'oxydes (Fig.IV.7a). Cependant la majorité des grains sont blanc laiteux (Fig.IV.7b, c). La calcite est rare malgré la présence d'affleurements

de cipolins, elle est dissoute car moins dure que le quartz. On la rencontre sous forme de débris automorphes et rhomboédriques, certains débris sont usés et sub-arrondis.

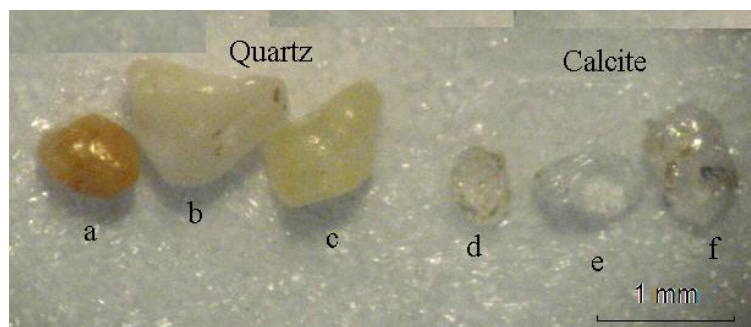


Fig.IV. 7 : Photo au microscope binoculaire : a) grain de quartz jaune-brunâtre ; b et c) de quartz laiteux, d, e, f) de cristaux de calcite

L'exoscopie des grains de quartz montre de nombreuses traces de chocs en V avec des contours souvent lisses (Fig.IV.8a).

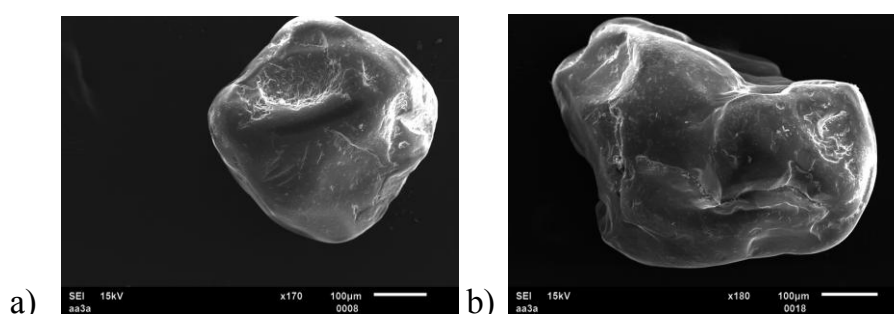


Fig.IV. 8 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de quartz : a) sub-arrondis et lisse, b) très usé avec de nombreuses traces de choc

c.2. Les minéraux sombres :

Les grenats :

Ils sont très fréquents. Les grains sont rarement globuleux. Les cristaux sont sub-automorphes à xénomorphes, de couleur rose à rougeâtre (Fig.IV.9a-e). Les inclusions sont omniprésentes (Fig.IV.9b).

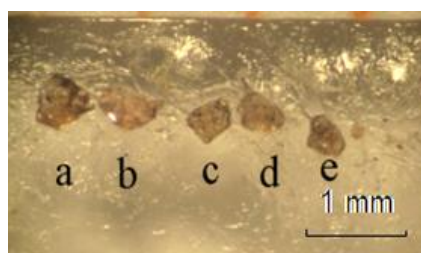


Fig.IV. 9 : Photo au microscope binoculaire de grenats : a-e) subautomorphes à xénomorphes de couleur rose à rougeâtre, e) grenats à inclusions.

L'exoscopie (au MEB) montre que les grains de grenats sont sub-arrondis et montrent des traces de chocs en V avec des contours souvent lisses (Fig.IV.10a). Certaines traces de choc en V ont préservé leurs contours anguleux (Fig.IV.10b).

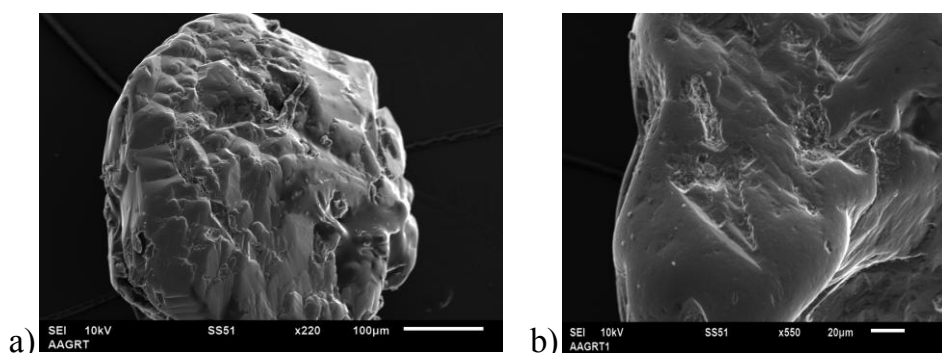


Fig.IV. 10 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de grenat : a) Vue d'ensemble d'un grain avec des traces de choc, b) détails des traces de chocs en V à contours anguleux.

Les résultats de l'analyse à la microsonde sont résumés dans le Tableau.IV.5. Le calcul de la formule structurale des phases minérales composant les grenats a été fait par la méthode de Locock 2008

Le Tableau.IV.5 montre que les grenats ont une composition relativement homogène et sont extrêmement riche en fer : (Pyrope 4-12%, Almandin 80-90%, Grossulaire 2 à 13%). Tous les grenats sont de type almandin. Le diagramme ternaire (Alm-Prp-Grs) de la classification des grenats (Locock 2008) confirme bien leur nature riche en fer (Fig.IV.11).

Tableau.IV.5 : Composition chimique et formule structurale des grenats du sable d'Ain Achir. Alm : almandin, Sps : spessartite, Prp : Pyrope, Grs : grossulaire, Adr : andradite, Uv : ouvarovite .

Ain Achir beach	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Total	Alm	Sps	Prp	Grs	Adr	Uv
AAS1	37,0	0,1	21,4	38,7	0,2	2,0	0,5	100,0	90	0	8	2	0	0
AAS2	36,9	0,1	21,3	39,0	0,1	1,9	0,5	99,9	90	0	8	2	0	0
AAS3	36,9	0,1	21,3	39,0	0,2	2,0	0,6	100,0	90	0	8	2	0	0
AAS4	37,0	0,1	21,3	39,0	0,1	2,0	0,6	100,1	90	0	8	2	0	0
AAS5	37,8	0,1	21,4	35,0	1,2	2,4	2,1	99,9	82	3	10	6	0	0
AAS6	37,7	0,1	21,3	35,1	1,2	2,4	2,3	100,0	81	3	9	7	0	0
AAS7	37,7	0,1	21,4	34,9	1,2	2,3	2,2	99,9	82	3	9	7	0	0
AAS8	37,6	0,1	21,4	35,1	1,3	2,2	2,2	99,9	82	3	9	7	0	0
AAS9	37,6	0,1	21,5	34,9	1,3	2,2	2,1	99,8	82	3	9	6	0	0
AAS10	37,9	0,1	21,1	36,5	0,2	3,2	1,0	100,0	84	0	12	3	0	0
AAS11	37,7	0,0	21,3	36,7	0,2	3,1	1,0	99,9	85	0	12	3	0	0
AAS12	37,7	0,1	21,3	36,5	0,2	2,9	1,2	99,9	85	0	12	3	0	0
AAS13	37,7	0,1	21,2	36,7	0,2	2,9	1,2	99,9	85	0	11	4	0	0
AAS14	37,7	0,1	21,2	36,6	0,1	2,9	1,2	99,8	85	0	11	3	0	0
AAS15	37,7	0,1	21,2	36,8	0,2	2,7	1,1	99,9	86	0	11	3	0	0
AAS16	37,5	0,1	21,2	37,3	0,2	2,6	1,1	100,1	86	0	10	3	0	0
AAS17	37,8	0,1	21,2	37,2	0,2	2,5	1,1	100,0	87	0	10	3	0	0
AAS18	37,6	0,1	21,1	35,4	1,3	1,1	3,5	100,1	83	3	4	10	0	0
AAS19	37,4	0,1	21,1	34,7	1,3	1,1	4,1	99,9	81	3	4	12	0	0
AAS20	37,4	0,1	21,3	34,3	1,5	1,0	4,6	100,1	80	3	4	13	0	0

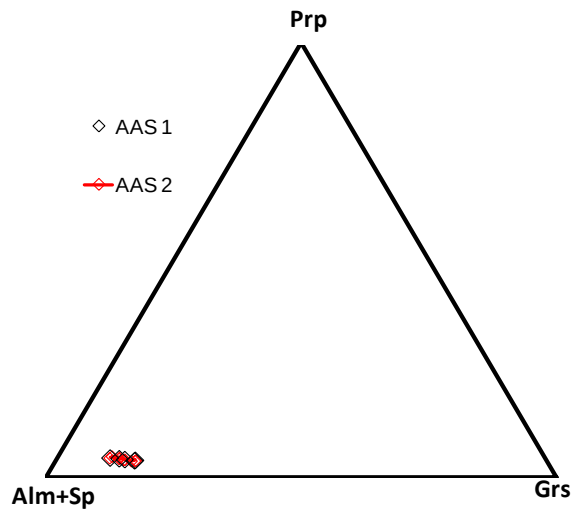
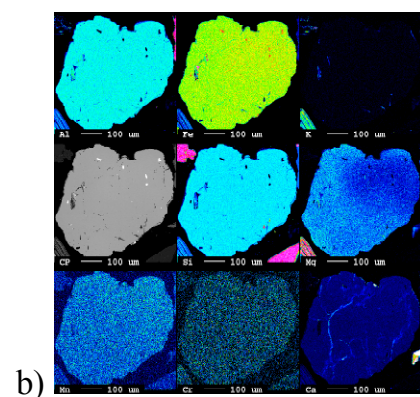
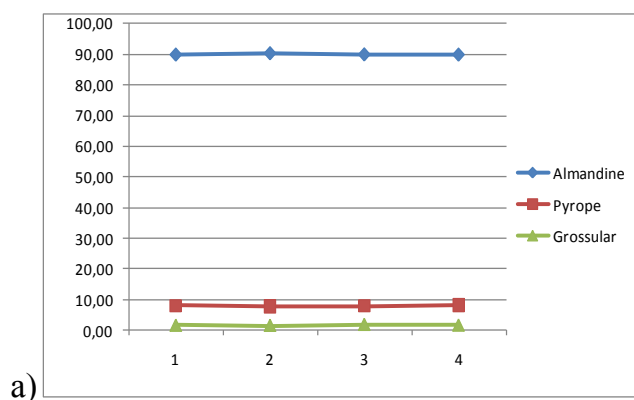


Fig.IV. 11 : Classification des grenats du sable d'Ain Achir dans le diagramme ternaire de Locock, 2008. AA S1: sable clair, AAS 2 : sable sombre, Prp : pyrope, Alm : almandin, Sp : spessartine, Grs : grossulair.

Les profils transverses, ainsi que la cartographie multiéléments sur les grenats ont montrés que le sable d'Ain Achir se compose de deux types de grenats:

- ✓ un grenat homogène chimiquement et non zoné (Fig.IV.12a, b),
- ✓ un grenat avec une composition chimique du cœur différente de celle du bord, suggérant une variation des conditions thermo-barométriques au cours de la croissance du cristal (Fig.IV.12c, d, e,f). Les grenats zonés contiennent souvent des inclusions de quartz (Fig.IV.12f).



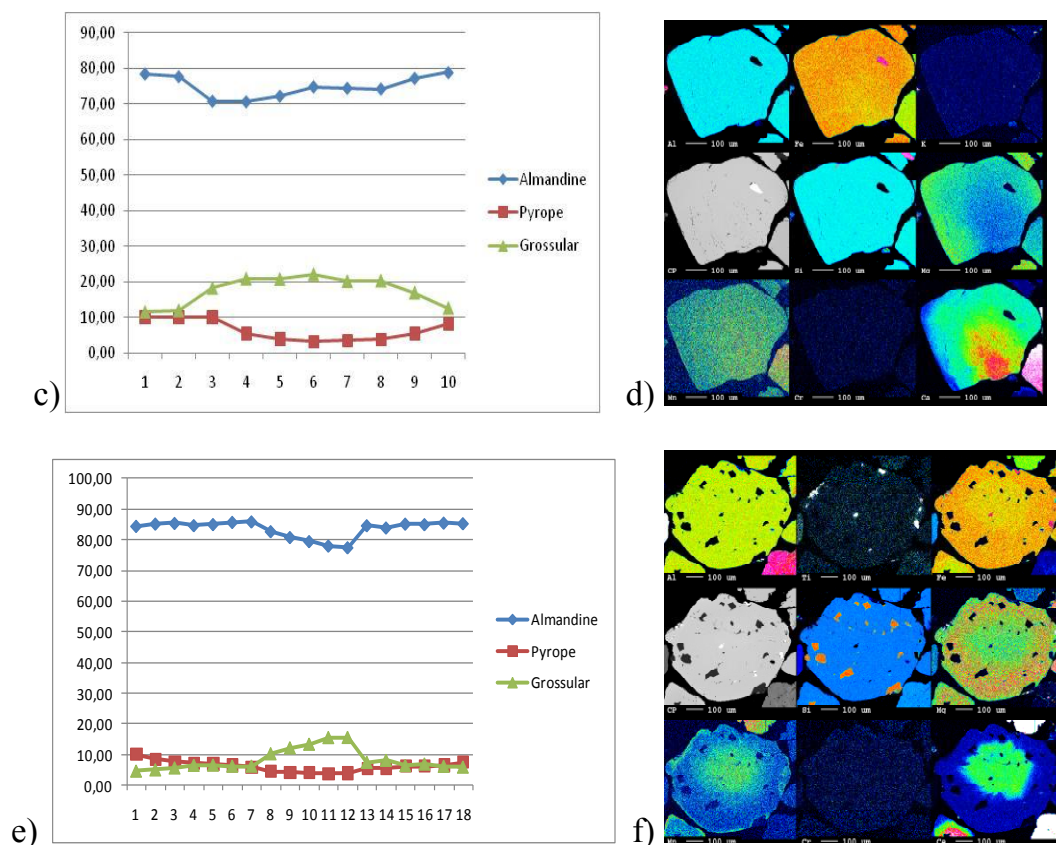


Fig.IV. 12 : Profils transverses et cartographie multiéléments sur grenats : a) grenat homogène non zoné, b) grenat zoné sans inclusions, c) grenat zoné avec des inclusions.

La staurotide:

Elle se présente parfois sous forme de macles (macle en croix) (Fig.IV.13a), en grains (débris) xénomorphes (Fig.IV.13b, c) ou sous forme de cristaux aciculaires ou prismatiques automorphes (Fig.IV.13d) de couleur miel. Certains grains portent des traces d'usure (Fig.IV.13e, f).



Fig.IV. 13 : Photo au microscope binoculaire : a) d'une macle partielle en croix de la staurotide, b et c) de débris de staurotide xénomorphe de staurotide prismatique et automorphe ; e) grain de staurotide à traces d'usure.

Au MEB, l'ensemble de la surface des grains est arrondis et lisse avec parfois des microcavités dues aux chocs des grains au cours de leur transport (Fig.IV.14). Sur la photo 14a on peut reconnaître plusieurs générations de corrosion représentées par des traces de chocs en V et des stries d'arrachement.

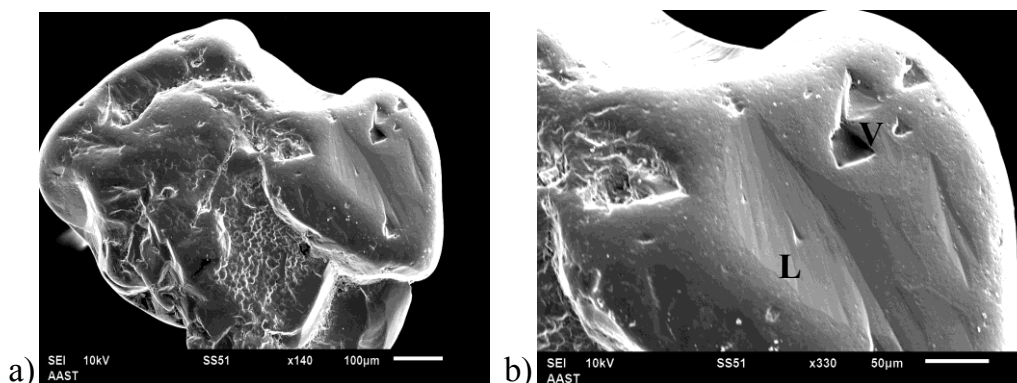


Fig.IV. 14 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de staurotide : a) Vue d'ensemble des figures de corrosion, b) détails des traces de chocs en V et des stries d'arrachement. V : traces de chocs en V, L : lignes d'arrachement.

Les staurotides du sable du Cap de Garde se caractérisent par leur homogénéité chimique (Tab.6). La formule structurale des staurotides a été calculée sur la base de 44(O) + 4(OH) selon la méthode de Droop (1987).

Tableau.IV.6 : Composition chimique et formule structurale des staurotides du sable d'Ain Achir.

	AA st1	AA st2	AA st3	AA st4	AA st5
SiO ₂	26,41	27,27	26,32	28,29	28,07
TiO ₂	0,56	0,56	0,57	0,58	0,58
Al ₂ O ₃	53,52	52,61	53,26	54,09	54,07
Fe ₂ O ₃	12,94	13,03	12,92	14,03	14,22
MnO	0,16	0,15	0,19	0,00	0,09
MgO	1,33	1,62	1,44	1,06	1,02
CaO	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01
Na ₂ O	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00
K ₂ O	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01
ZnO	0,12	0,11	0,23	0,22	0,14
Total	95,07	95,36	94,92	98,32	98,22
Formula					
Si	3,77	3,88	3,77	3,91	3,89
Ti	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Al	9,00	8,81	8,98	8,81	8,82
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ⁺⁺	1,54	1,55	1,55	1,62	1,65
Mn	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01
Mg	0,28	0,34	0,31	0,22	0,21
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn	0,16	0,18	0,33	0,23	0,15
A	0,71	0,70	0,71	0,71	0,70
F	0,24	0,25	0,24	0,26	0,26
M	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03
XFe	0,84	0,81	0,82	0,88	0,88
XMg	0,15	0,18	0,16	0,12	0,11
XZn	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00

La projection des échantillons dans le diagramme AFM ($A = (Al/2)/(Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe/(Al+Mg+Fe)/2$, $M = Mg/(Al+Mg+Fe)/2$) de Droop (1987) (Fig.IV.15a) et dans le diagramme XFe-XMg-XZn ($XFe = Fe/(Fe+Mg)/2$, $XMg = Mg/(Mg+Fe)/2$, $XZn = Zn/(Zn+Fe+Mg)$) (Fig.IV.15b) montre que les staurotides sont très alumineuses et qu'elles sont également riches en fer.

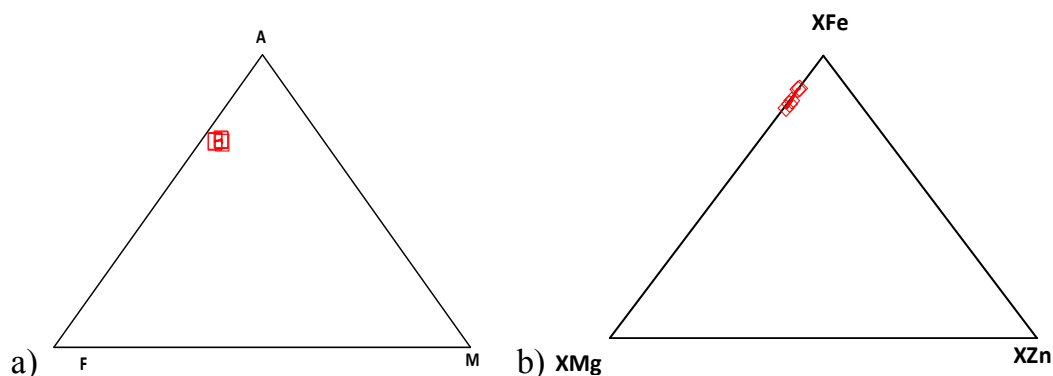


Fig.IV. 15 : des staurotides du sable d'Ain Achir dans le diagramme de Droop (1987)

a) AFM, b) XFe-XMg-XZn. $A = (Al/2)/(Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe/(Al+Mg+Fe)/2$,
 $M = Mg/(Al+Mg+Fe)/2$, $XFe = Fe/(Fe+Mg)/2$, $XMg = Mg/(Mg+Fe)/2$,
 $XZn = Zn/(Zn+Fe+Mg)$.

L'épidote :

Le minéral est parfois sous forme de cristaux arrondis de couleur verte. Quasiment tous les grains sont xénomorphes (Fig.IV.16).

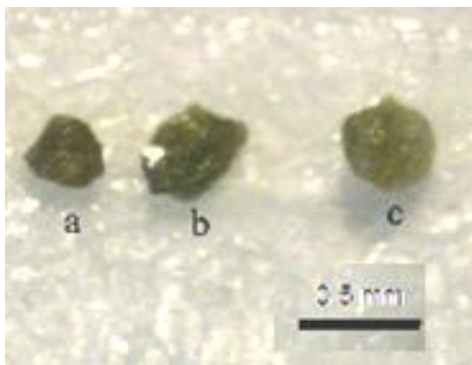


Fig.IV. 16 : Photo au microscope binoculaire de grains d'épidote

Le disthène :

Ce minéral se présente toujours en cristaux prismatiques ne dépassant pas les 4mm. En fonction de la quantité des inclusions, les cristaux sont d'un gris-bleuté plus ou moins sombre (Fig.IV.17).



Fig.IV. 17 : Photo au microscope binoculaire de cristaux prismatiques de disthène.

Au MEB, les grains sont sub-arrondis à sub-anguleux. Ils montrent des figures de corrosions naissantes (Fig.IV.18a) ainsi que des traces de dissolutions et de denticulations (Fig.IV.18b).

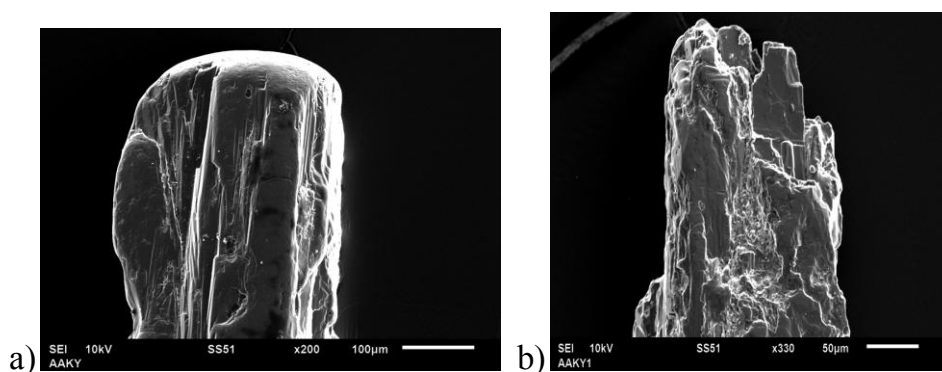


Fig.IV. 18 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de disthène : a) à traces de dissolution, b) à traces de dissolutions et de denticulations.

Les tourmalines :

Dans le sable d'Ain Achir les tourmalines sont souvent sous forme de débris luisants et plus ou moins arrondis par l'usure (Fig.IV.19a – f). Les grains en forme triangulaire (cassure basale) ne sont pas rares (Fig.IV.19a, d, e). Des tourmalines prismatiques sont également présentes (Fig.IV.19g, h).



Fig.IV. 19 : Photo au microscope binoculaire de tourmalines : a-f) en débris plus ou moins arrondis par l'usure ; a, d et e) en grains en forme triangulaire (cassure basale) ; g et h) prismatiques.

L'étude exoscopique montre que ces minéraux sont plus stables et plus résistants à la corrosion que les minéraux précédant. Les grains présentent souvent des traces de dissolution (Fig.IV.20a). Les contours sont légèrement arrondis et lisses (Fig.IV.20b).

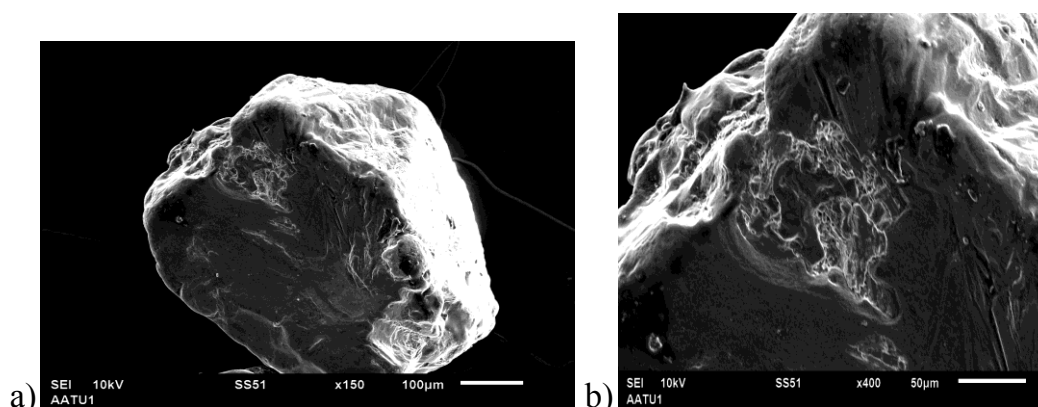


Fig.IV. 20 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de tourmaline : a) Vue d'ensemble des figures de dissolution, b) détails des figures de dissolutions.

Le programme WinTcac (Yavuz et al. 2014) a été utilisé pour la classification de la tourmaline (Tab.7). L'approche de la normalisation basée sur Si=15 (apfu) convient aux tourmalines des roches métamorphiques (Henry et al. 2011). Le diagramme ternaire Ca-Xvac-(Na+K) (Fig.IV.21a) de Jiang et al (1995, 1996) montre que tous les échantillons de tourmaline du sable d'Ain Achir se projettent dans le champ des tourmalines alcalines. Les tourmalines sont également très riches en fer ($Fe = (Fe / Fe + Mg) = 0.80$ à 0.94) (Henry et Guidotti, 1985), ce qui les classent dans le groupe des schorls (Fig.IV.21b).

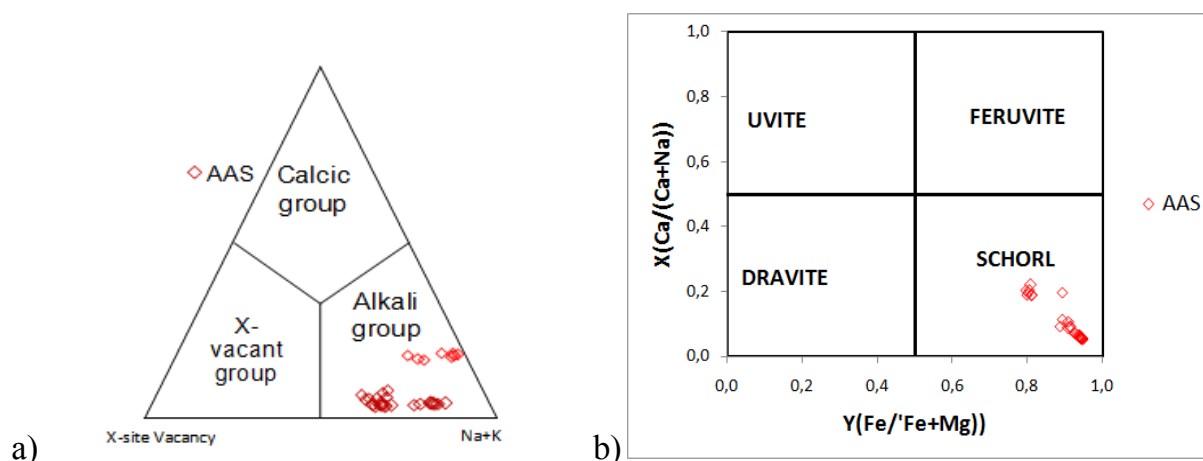


Fig.IV. 21 : Classification des tourmalines du sable d'Ain Achir dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en : a) Ca et les alcalins (Jiang et al. 1995, 1996), b) en fer de Henry et Guidotti, 1985.

Tableau.IV.7 : Composition chimique et formule structurale des tourmalines du sable de la plage d'Ain Achir.

Ain Achir beach	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	B2O3	Total	Fe2+(Y)	Mg(Y)	Ca(X)	Na(X)	K(X)	X-vacancy	Y(Fe/(Fe+Mg))	Mg/(Mg+Fe)	X(ca/Ca+Na)	Na+K
AAS1	34,93	0,44	36,30	11,54	0,07	2,50	0,21	1,89	0,03	9,99	97,89	1,66	0,64	0,04	0,63	0,01	0,33	0,94	0,28	0,06	0,64
AAS2	35,14	0,46	36,41	11,76	0,10	2,53	0,23	1,87	0,04	10,05	98,58	1,68	0,64	0,04	0,62	0,01	0,33	0,94	0,28	0,06	0,63
AAS3	35,06	0,50	35,99	11,75	0,09	2,58	0,24	1,87	0,03	10,03	98,13	1,68	0,66	0,04	0,62	0,01	0,33	0,93	0,28	0,07	0,63
AAS4	35,01	0,51	36,01	11,68	0,08	2,61	0,23	1,95	0,03	10,02	98,13	1,67	0,67	0,04	0,65	0,01	0,31	0,94	0,28	0,06	0,65
AAS5	34,99	0,51	35,87	11,77	0,09	2,64	0,21	1,98	0,04	10,01	98,12	1,69	0,68	0,04	0,66	0,01	0,30	0,95	0,29	0,05	0,67
AAS6	34,84	0,49	35,90	11,88	0,08	2,59	0,23	1,92	0,04	9,97	97,95	1,71	0,67	0,04	0,64	0,01	0,31	0,94	0,28	0,06	0,65
AAS7	35,15	0,50	35,73	11,66	0,09	2,67	0,22	1,96	0,04	10,06	98,10	1,67	0,68	0,04	0,65	0,01	0,30	0,94	0,29	0,06	0,66
AAS8	35,15	0,48	35,63	11,88	0,04	2,69	0,23	1,93	0,04	10,06	98,15	1,70	0,69	0,04	0,64	0,01	0,31	0,94	0,29	0,06	0,65
AAS9	35,00	0,51	35,80	11,79	0,08	2,64	0,22	2,02	0,04	10,01	98,13	1,69	0,68	0,04	0,67	0,01	0,28	0,94	0,29	0,06	0,68
AAS10	34,83	0,55	36,14	11,90	0,06	2,60	0,23	2,20	0,04	9,97	98,53	1,71	0,67	0,04	0,73	0,01	0,22	0,95	0,28	0,05	0,74
AAS11	34,46	0,52	36,15	11,66	0,04	2,49	0,25	2,31	0,04	9,86	97,78	1,70	0,65	0,05	0,78	0,01	0,17	0,95	0,28	0,06	0,79
AAS12	34,62	0,45	36,31	11,68	0,09	2,46	0,27	1,90	0,04	9,90	97,72	1,69	0,64	0,05	0,64	0,01	0,31	0,93	0,27	0,07	0,65
AAS13	34,64	0,49	36,17	11,81	0,04	2,52	0,25	2,36	0,05	9,91	98,25	1,71	0,65	0,05	0,79	0,01	0,15	0,95	0,28	0,05	0,80
AAS14	34,85	0,50	36,18	11,73	0,07	2,52	0,25	2,25	0,05	9,97	98,36	1,69	0,65	0,05	0,75	0,01	0,19	0,94	0,28	0,06	0,76
AAS15	34,80	0,50	36,26	11,76	0,07	2,53	0,24	2,40	0,04	9,96	98,56	1,70	0,65	0,05	0,80	0,01	0,15	0,95	0,28	0,05	0,81
AAS16	34,62	0,53	36,11	11,66	0,06	2,56	0,25	2,44	0,05	9,91	98,18	1,69	0,66	0,05	0,82	0,01	0,12	0,95	0,28	0,05	0,83
AAS17	34,54	0,45	36,15	11,96	0,08	2,57	0,25	2,33	0,04	9,88	98,28	1,74	0,66	0,05	0,79	0,01	0,16	0,95	0,28	0,06	0,80
AAS18	34,62	0,49	36,23	11,99	0,05	2,36	0,25	2,32	0,04	9,91	98,28	1,74	0,61	0,05	0,78	0,01	0,17	0,94	0,26	0,06	0,79
AAS19	34,84	0,48	36,24	12,05	0,10	2,45	0,26	2,34	0,05	9,97	98,79	1,74	0,63	0,05	0,78	0,01	0,16	0,94	0,27	0,06	0,79
AAS20	36,01	0,70	34,56	8,31	0,00	4,61	1,05	2,28	0,06	10,30	97,91	1,16	1,15	0,19	0,74	0,01	0,06	0,80	0,50	0,20	0,75
AAS21	36,00	0,74	34,74	8,44	0,04	4,60	1,06	2,38	0,05	10,30	98,37	1,18	1,14	0,19	0,77	0,01	0,03	0,80	0,49	0,20	0,78
AAS22	35,77	0,73	34,78	8,27	0,02	4,66	0,99	2,37	0,06	10,24	97,88	1,16	1,17	0,18	0,77	0,01	0,04	0,81	0,50	0,19	0,78
AAS23	36,00	0,70	34,95	8,31	0,03	4,68	1,03	2,42	0,06	10,30	98,52	1,16	1,16	0,18	0,78	0,01	0,02	0,81	0,50	0,19	0,80
AAS24	35,57	0,77	34,75	8,39	0,00	4,60	1,01	2,36	0,07	10,18	97,73	1,18	1,16	0,18	0,77	0,02	0,03	0,81	0,49	0,19	0,79
AAS25	35,97	0,71	34,80	8,34	0,03	4,61	0,96	2,10	0,05	10,30	97,88	1,16	1,15	0,17	0,68	0,01	0,14	0,80	0,50	0,20	0,69
AAS26	36,00	0,67	34,78	8,44	0,02	4,62	0,95	2,15	0,06	10,30	98,04	1,18	1,15	0,17	0,70	0,01	0,12	0,80	0,49	0,20	0,71
AAS27	35,70	0,45	36,20	10,52	0,09	2,33	0,38	1,76	0,03	10,22	97,68	1,48	0,59	0,07	0,57	0,01	0,35	0,89	0,28	0,11	0,58
AAS28	35,72	0,52	34,85	10,70	0,01	2,67	0,33	1,84	0,03	10,22	96,91	1,50	0,67	0,06	0,60	0,01	0,33	0,91	0,31	0,09	0,61
AAS29	36,11	0,44	35,52	10,50	0,05	2,68	0,31	1,82	0,04	10,33	97,85	1,46	0,67	0,06	0,59	0,01	0,35	0,91	0,31	0,09	0,60
AAS30	35,96	0,49	35,07	10,67	0,07	2,74	0,33	1,91	0,05	10,29	97,63	1,49	0,68	0,06	0,62	0,01	0,31	0,91	0,31	0,09	0,63
AAS31	35,87	0,71	34,50	11,11	0,03	2,85	0,36	1,99	0,05	10,26	97,74	1,55	0,71	0,07	0,65	0,01	0,28	0,91	0,31	0,09	0,66
AAS32	35,87	0,65	33,90	10,89	0,05	3,17	0,46	1,98	0,04	10,26	97,27	1,52	0,79	0,08	0,64	0,01	0,27	0,89	0,34	0,11	0,65
AAS33	35,73	0,51	34,51	10,99	0,08	2,94	0,42	1,93	0,05	10,22	97,43	1,54	0,74	0,08	0,63	0,01	0,29	0,89	0,32	0,11	0,64

La cartographie multiéléments et les profils transverses des tourmalines montre que celles-ci sont homogènes et qu'elles ne présentent pas de zonation significative (Fig.IV.22). Certains cristaux de tourmalines contiennent des inclusions de quartz et d'oxydes de fer (Fig.IV.22).

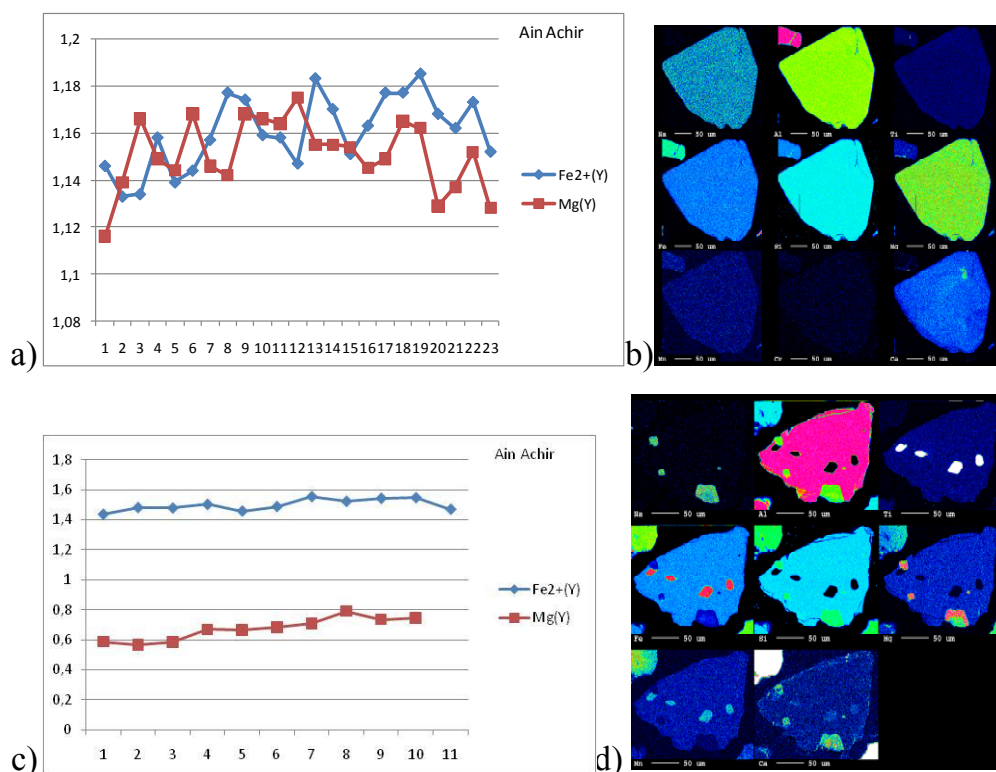


Fig.IV. 22 : a , c) Diagrammes de distribution du Fe et Mg dans les tourmalines, b) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée, d) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée à inclusions.

B. Plage -Militaire

B.1- Les affleurements rocheux proximaux

B.1.1. Pétrographie-Minéralogie

a. Les Micaschistes :

Les échantillons de micaschistes sont essentiellement composés de micas (biotite et muscovite), de quartz, de staurotide et grenats.

L'étude pétrographique montre que tous les échantillons de la Plage-Militaire ont une composition minéralogique similaire. L'étude au microscope polarisant indique que ces échantillons ont une texture lépidoblastique (cristaux lamellaires). On remarque une alternance de lamelles de mica noir (biotite) et de mica blanc (muscovite) ainsi que des niveaux granoblastique à quartz, grenat, staurotide et disthène (Fig.IV.23).

La biotite, de couleur brune, apparaît sous forme des lamelles (Fig.IV.23a, c.) en association avec de la muscovite qui est aussi sous forme de lamelles. En lumière polarisée analysée la muscovite montre des teintes qui varient du rouge-rose au vert clair (Fig.IV.23a, b). Les cristaux de quartz sont de petite taille, de forme sub-automorphe, avec des teintes de polarisation grises ou blanches, parfois jaunâtre lorsque la lame est un peu épaisse (Fig.IV.23a, 23b). Le quartz se trouve souvent en intercalation avec de la biotite (Fig.IV.23b).

Le grenat se présente sous forme de cristaux sub-automorphes craquelés de taille allant jusqu'à 2mm. Il est bordé de biotites (Fig.IV.23c, 23d). Le disthène montre des plans de clivage caractéristiques (Fig.IV.23d). La staurotide (Fig.IV.23e) se présente sous forme de prismes de couleur jaune-pâle.

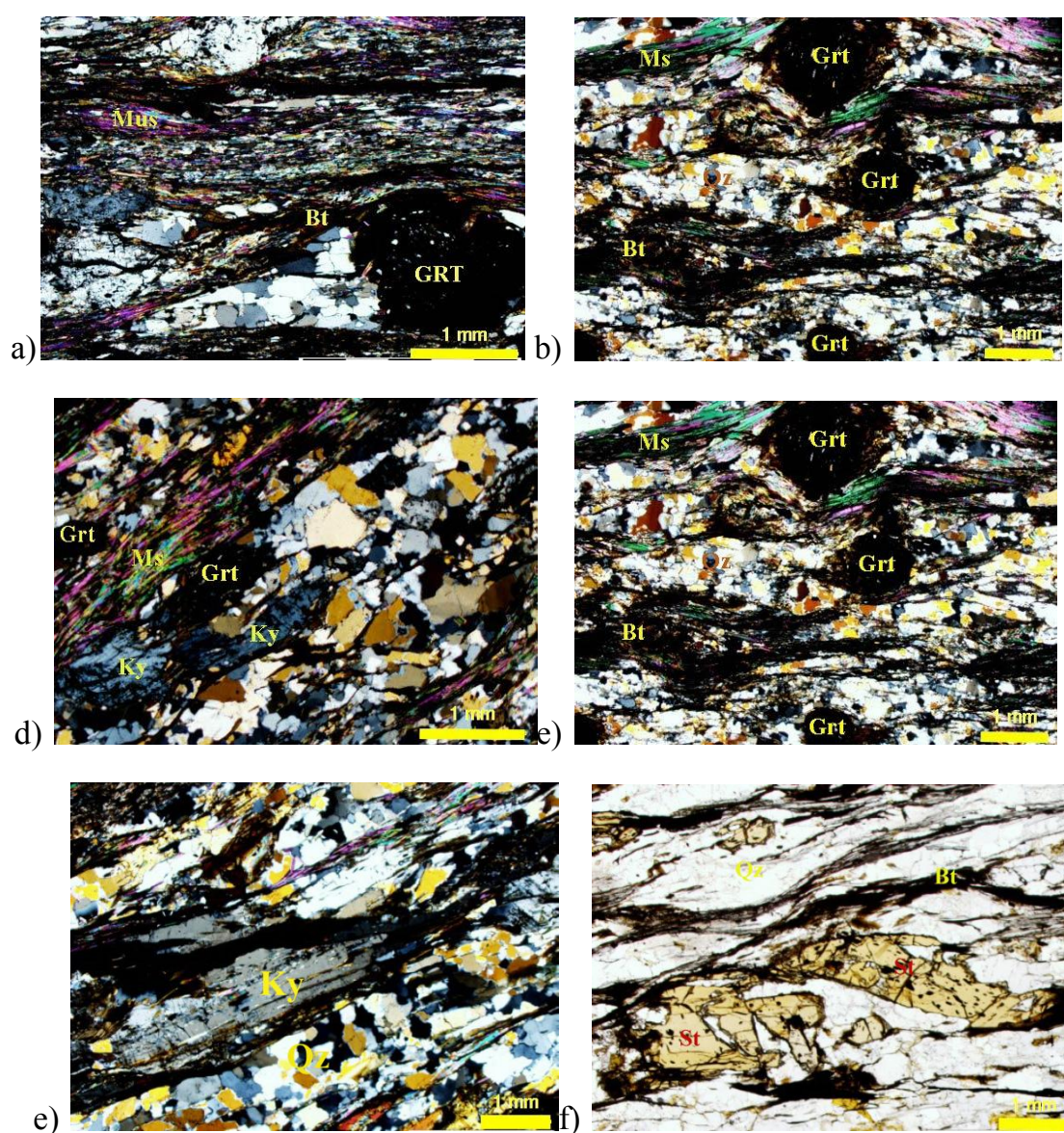


Fig.IV. 23 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des micaschistes de la Plage-Militaire ; Bt : biotite, Grt : grenat, Ms : muscovite, St : staurotide, Qz : quartz, Ky : disthène.

b. Les cipolins :

La lame mince de l'échantillon de cipolin (Fig.IV.24) présente une texture granoblastique. La calcite est automorphe, souvent de grande taille (jusqu'à 1cm) à plans de clivages visibles. Certains cristaux de calcites contiennent de nombreuses inclusions.

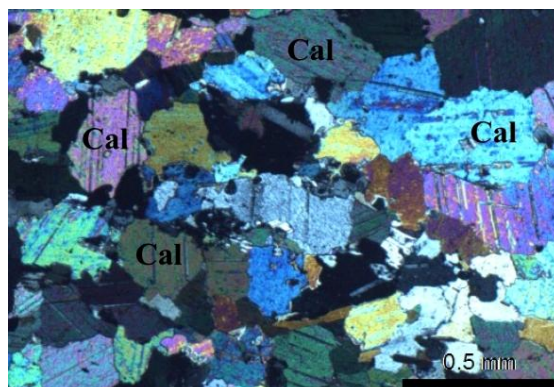


Fig.IV. 24 : Microphotographie en lumière polarisée analysée des cipolins de la Plage-Militaire ; Cal : Calcite, Ep : Epidote

c. Les skarns :

La lame mince montre que la composition minéralogique de l'échantillon de skarn est principalement de la calcite et de l'épidote (Fig.IV.25). La calcite est très altérée et contient de nombreuses inclusions. L'épidote est xénomorphe, à bordure altérée. Elle prend parfois un aspect de manteau d'arlequin caractéristique.

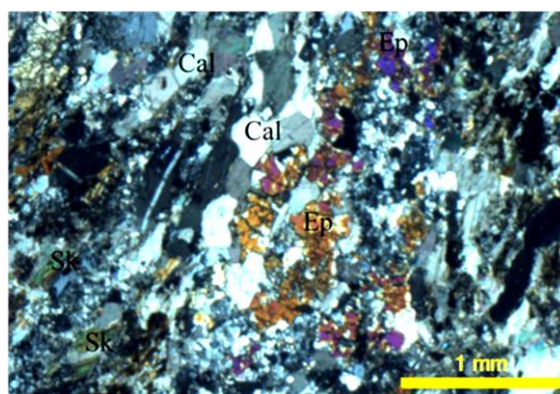


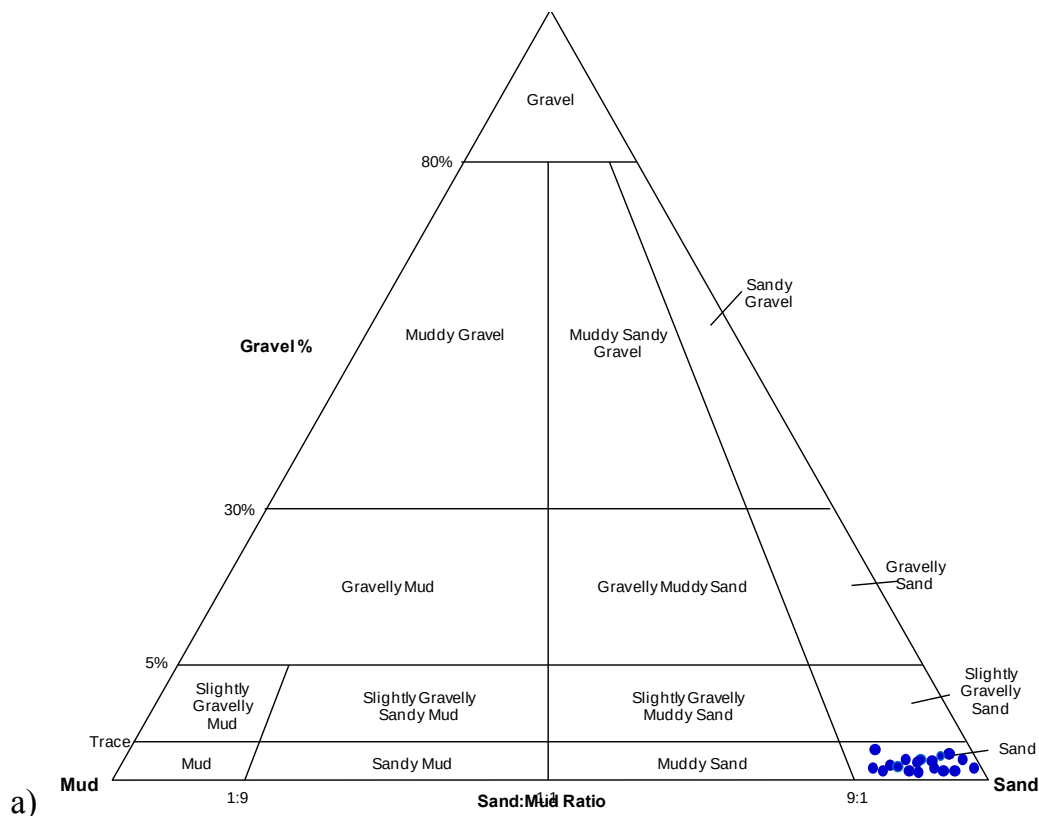
Fig.IV. 25 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des skarns de la Plage-Militaire.

B.2- Les roches meubles (sable)

B.1.1. Classification granulométrique

Les résultats des paramètres granulométriques sont résumés dans le Tableau.IV.8.

- ✓ l'étude granulométrique du sable et la projection dans le triangle de classification de Folk et Ward, (1957) montre que le sable de la Plage-Militaire est un sable véritable (Fig.IV.26a).
- ✓ Le calcul de l'indice de tri (Sorting) (Tab.8) indique que les valeurs sont < 2.5 et qu'elles sont comprises entre 0,44 et 0,65, ce qui indique que le sable est très bien trié.
- ✓ Le paramètre de forme ou d'asymétrie (Skewness) des échantillons de sable de la plage est < 1 et varie de $-0,50$ à $+0,40$ (Tab.8). Ces valeurs indiquent que le classement est meilleur du côté des éléments grossiers
- ✓ La courbe de distribution (Fig.IV.26b) du sable de la Plage-Militaire se caractérise par la présence de courbes de distribution granulométriques différentes. On y distingue clairement deux (02) tendances indiquant que ce sable est globalement bimodal. Cette bimodalité témoigne d'un mélange de dépôts sableux à caractéristiques granulométriques différentes.



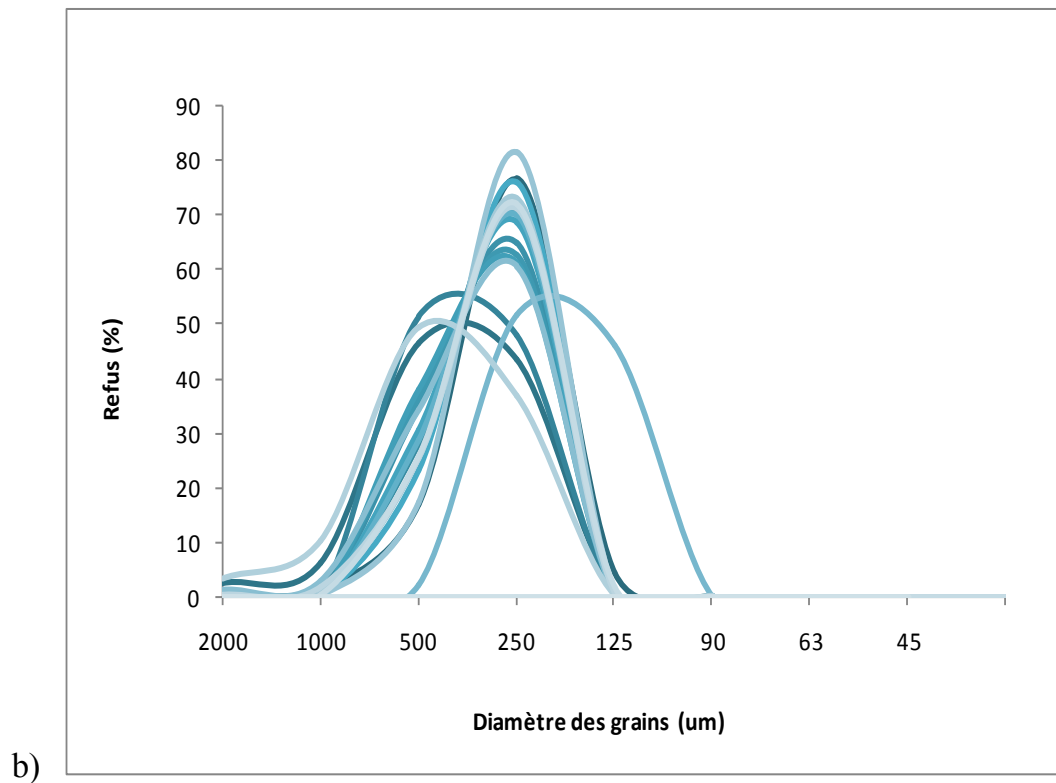


Fig.IV. 26 : Caractéristiques granulométriques : a)sable de la Plage-Militaire dans le Triangle de classification des formations meubles de Folk et Ward (1957), b) Courbes de distribution du sable de la Plage-Militaire.

- ✓ Les valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage d'Ain Achir sont < 2 . Cu_{PM} varie de 1.55 à 2.31 (Tab.9) ce qui indique que le sable est à granulométrie serrée et uniforme.

Tableau.IV.8 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique du sable de la Plage-Militaire

	PMS7	PMS8	PMS1a	PMS1b	PMS1c	PMS2a	PMS2b	PMS2c	PMS3a	PMS3b	PMS3c	PMS4a	PMS4b	PMS5a	PMS5b	PMS5c	PMS6a	PMS6b	PMS6c
MEAN	1,51	1,11	1,43	1,15	1,44	1,41	1,40	1,43	1,39	1,43	1,47	1,44	2,14	1,37	1,52	1,45	1,06	1,44	1,45
SORTING	0,47	0,65	0,49	0,51	0,49	0,50	0,50	0,49	0,51	0,49	0,47	0,49	0,51	0,52	0,44	0,48	0,67	0,50	0,49
SKEWNESS	-0,57	0,16	-0,55	0,40	-0,55	-0,52	-0,51	-0,54	-0,50	-0,54	-0,57	-0,55	0,41	-0,51	-0,57	-0,56	0,18	-0,56	-0,56
% GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% SAND:	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
% MUD:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% COARSE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% MEDIUM GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% FINE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V FINE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE SAND:	0,02	0,09	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,14	0,02	0,00
% COARSE SAND:	0,17	0,47	0,29	0,51	0,28	0,34	0,37	0,30	0,38	0,31	0,23	0,29	0,02	0,34	0,17	0,25	0,49	0,25	0,26
% MEDIUM SAND:	0,77	0,44	0,70	0,48	0,70	0,65	0,63	0,69	0,61	0,69	0,76	0,70	0,52	0,61	0,81	0,73	0,37	0,71	0,72
% FINE SAND:	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,46	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02
% V FINE SAND:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% COARSE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% MEDIUM SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% FINE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V FINE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% CLAY:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tableau.IV.9 : Valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage-Militaire

	PMS7	PMS8	PMS1a	PMS1b	PMS1c	PMS2a	PMS2b	PMS2c	PMS3a	PMS3b	PMS3c	PMS4a	PMS4b	PMS5a	PMS5b	PMS5c	PMS6a	PMS6b	Moyenne
D60	431,26	665,52	462,38	615,23	460,35	479,31	487,00	462,96	493,25	466,70	445,10	460,55	317,46	495,42	430,59	451,87	732,10	457,22	489,68
D10	268,17	301,51	284,78	300,60	282,43	286,89	287,60	281,93	289,49	284,84	280,67	281,86	152,13	289,14	277,08	281,22	316,69	282,04	279,39
Cu=D60/D10	1,61	2,21	1,62	2,05	1,63	1,67	1,69	1,64	1,70	1,64	1,59	1,63	2,09	1,71	1,55	1,61	2,31	1,62	1,75

B.1.2. Identification minéralogique

Les formations meubles consistent en sable de couleur sombre. La composition minéralogique de ce sable est similaire à celle du sable de la plage Ain Achir.

a. Les minéraux argileux :

La méthode au bleu de méthylène a permis d'estimer la présence ou l'absence de minéraux argileux dans le sable de la Plage-Militaire.

Le Tableau.IV.10 montre que le taux d'argilosité du sable est nul sauf pour un (01) échantillon. L'absence d'argile indique que les particules fines ont été lessivées par l'eau. L'échantillon Pms6b a été prélevé près des affleurements de micaschistes, assez loin du bord de l'eau.

Tableau.IV.10 : Récapitulatif des essais au bleu de méthylène du sable de la Plage-Militaire.

Plage-Militaire			
Echantillon	Valeur de bleu méthylène (Vb)	Quantité (mg/l)	Presence d'argile
Pms1a	0,1	0,00	absent
Pms2a	0,1	0,00	absent
Pms3a	0,1	0,00	absent
Pms4a	0,1	0,00	absent
Pms5a	0,1	0,00	absent
Pms6a	0,1	0,00	absent
Pms1b	0,1	0,00	absent
Pms2b	0,1	0,00	absent
Pms3b	0,1	0,00	absent
Pms4b	0,1	0,00	absent
Pms5b	0,1	0,00	absent
Pms6b	2,5	5,16	présent
Pms1C	0,1	0,00	absent
Pms2c	0,1	0,00	absent
Pms3c	0,1	0,00	absent
Pms5c	0,1	0,00	absent
Pms6c	0,1	0,00	absent

b. Les carbonates :

Au niveau de la Plage-Militaire on constate que le taux de carbonate (CaCO_3) est faible (Tab.11). Ce faible taux s'explique par la présence moins importante d'affleurements proximaux de cipolin.

Tableau.IV.11 : Récapitulatif des essais calcimétriques du sable de la Plage-Militaire, V_1 : volume Initial, V_2 : volume CO_2 dégagé par l'échantillon, $\text{CaCO}_3 \text{ \% Ech}$: taux de carbonate dans l'échantillon.

Plage-Militaire					
Echs	V_1 I	V_2 Ech	$V \text{ CO}_2 \text{ \% ech}$	$V \text{ CO}_2 \text{ \% t}$	$\text{CaCO}_3 \text{ \% Ech}$
Pms1a	65	65	0	196	0,00
Pms2a	65	72	7	196	3,57
Pms3a	65	67	2	196	1,02
Pms4a	65	72,5	7,5	196	3,83
Pms5a	65	75	10	196	5,10
Pms6a	65	82,5	17,5	196	8,93
Pms1b	65	97,5	32,5	196	16,58
Pms2b	65	80	15	196	7,65
Pms3b	65	65	0	196	0,00
Pms4b	65	102,5	37,5	196	19,13
Pms5b	65	73	8	196	4,08
Pms6b	65	89,5	24,5	196	12,50
Pms2c	65	74	9	196	4,59
Pms1c	65	87	22	196	11,22
Pms3c	65	70	5	196	2,55
Pms5c	65	66,5	1,5	196	0,77
Pms6c	65	67	2	196	1,02

c. Les minéraux non argileux :

L'analyse diffractométrique du sable sombre de la Plage-Militaire a montré qu'il est principalement composé de grenat, staurotide, tourmaline et rarement de disthène ou d'épidote (Fig.IV.27). La proportion en minéraux colorés est plus élevée que dans le sable de la plage d'Ain Achir et peut atteindre 91% (Fig.IV.27a). Le sable est très pauvre en minéraux clairs tels que le quartz.

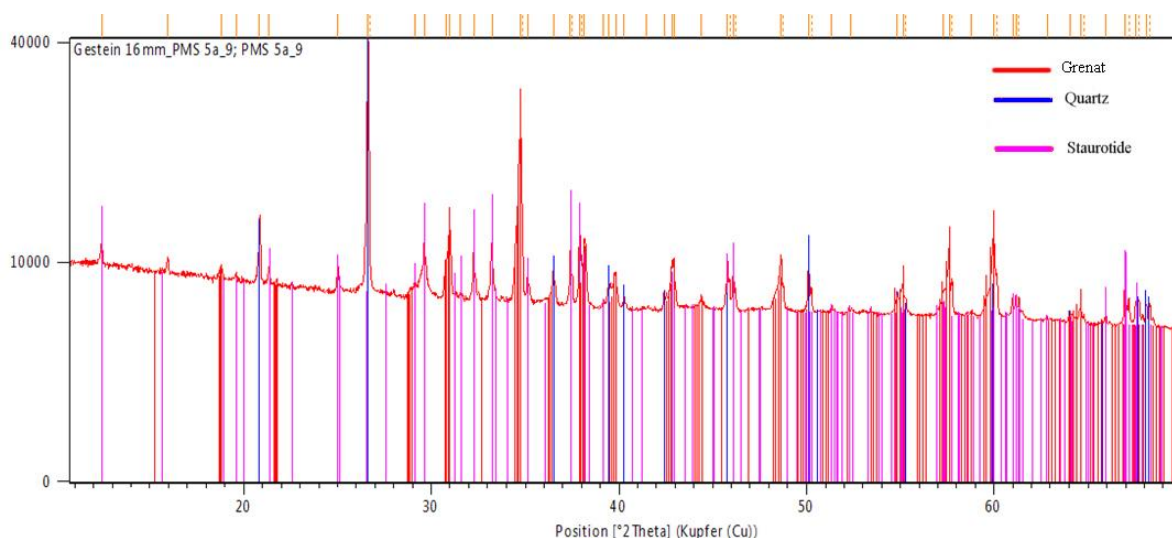


Fig.IV. 27 : Diffractogramme du sable sombre de la Plage-Militaire.

c.1. Les minéraux clairs et légers

Le quartz :

Les grains se présentent sous forme de cristaux sub-arrondis parfois jaunâtre et souvent blanc laiteux (Fig.IV.28).

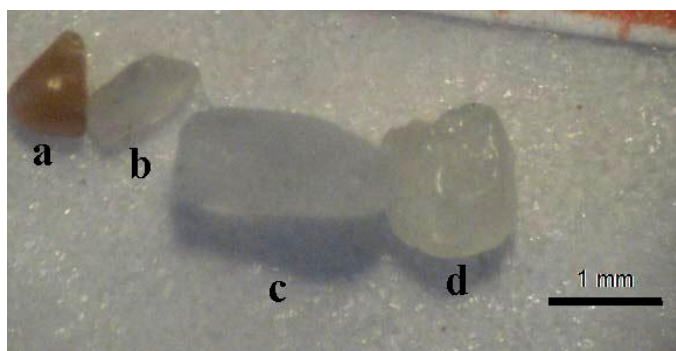


Fig.IV. 28 : Photo au microscope binoculaire de grains de quartz laiteux.

L'étude au MEB des grains de quartz a montré que certains étaient automorphes, lisses et non usés (Fig.IV.29a). L'exoscopie du quartz montre de nombreuses traces de chocs en V avec des contours souvent lisses (Fig.IV.29b).

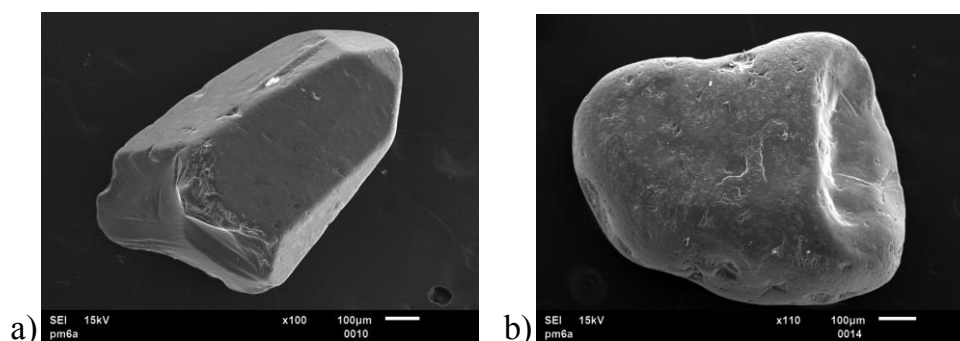


Fig.IV. 29 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de quartz : a) automorphe et quasiment non usé, b) sub-arrondi et à traces de chocs en V.

c.2. Les minéraux lourds sombres

L'analyse à la loupe binoculaire du sable de la Plage-Militaire a montré qu'il est principalement constitué de minéraux sombres (staurotide, grenat, tourmaline, disthène et épidote) (Fig.IV.30).

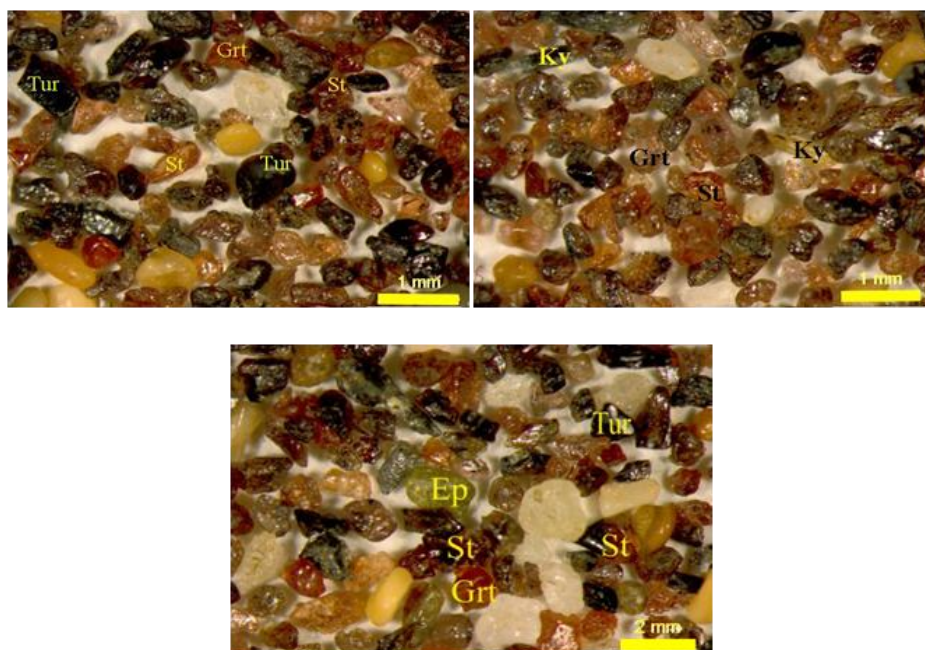


Fig.IV. 30 : Photographies au microscope binoculaire du sable sombre de la Plage-Militaire. Abréviations selon Whitney et Evans, 2010, Grt : Grenat, Ep: Epidote, St: Staurotide, Tur: tourmaline, Ky : disthène

Les grenats :

Ils sont très abondants, de couleur rose à rougeâtre, de forme sub- automorphe à xénomorphe (Fig.IV.31a, b,c, d, e, f); certains grenats présentent des inclusions (Fig.IV.31a,c).

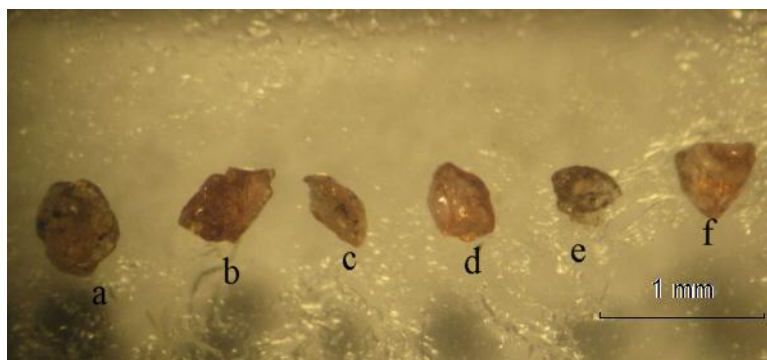


Fig.IV. 31 : Photo au microscope binoculaire de grenats en débris de couleur rose à rougeâtre à inclusions.

L'exoscopie montre que les grains de grenats sont sub-arrondis (Fig.IV.32a) à traces de chocs en cuvette avec des contours parfois rudes (Fig.IV.32b). Certaines traces de choc en V ont préservés leurs contours anguleux lisses (Fig.IV.32c).

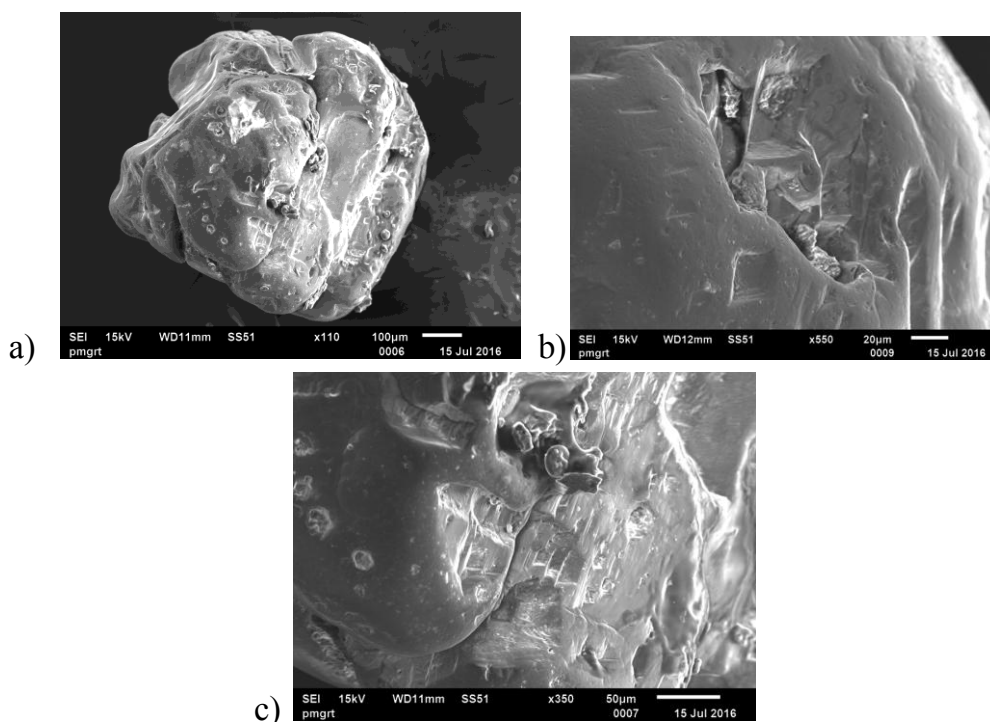


Fig.IV. 32 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de grenat : a)vue d'ensemble d'un grain avec des traces de choc, b) détails des traces de chocs en cuvette à contours rudes, c) détails des traces de chocs en V à contours lisse.

Le Tableau.IV.12 présente les résultats de l'analyse à la microsonde. Le calcul de la formule structurale des phases minérales composant les grenats a été fait par la méthode de Locock 2008. Les grenats ont une composition légèrement similaire et sont riches en fer (Pyrope 3-20%, Almandin 64-85%, Grossulaire 2 à 25%).

Tableau.IV.12 : Composition chimique et formule structurale des grenats du sable de la Plage-Militaire. Alm : almandin, Sps : spessartite, Prp : Pyrope, Grs : grossulaire, Adr : andradite, Uv : ouvarovite

Plage Militaire	SiO2	TiO2	Al2O3	Cr2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Total	Alm	Sps	Prp	Grs	Adr	Uv
PMS1	37,6	0,0	22,3	0,0	34,6	0,0	5,1	0,5	100,1	78	0	20	2	0	0
PMS2	37,3	0,0	22,1	0,0	36,6	0,0	4,0	0,4	100,5	83	0	16	1	0	0
PMS3	37,3	0,0	21,9	0,0	37,3	0,0	3,7	0,4	100,6	84	0	15	1	0	0
PMS4	37,1	0,1	21,9	0,0	37,1	0,1	3,7	0,4	100,3	84	0	15	1	0	0
PMS5	37,7	0,0	22,1	0,0	37,0	0,0	3,7	0,4	100,9	84	0	15	1	0	0
PMS6	37,5	0,0	22,0	0,0	36,9	0,0	3,9	0,4	100,7	84	0	15	1	0	0
PMS7	37,5	0,0	22,2	0,0	36,0	0,0	4,5	0,4	100,6	81	0	18	1	0	0
PMS8	37,8	0,1	22,0	0,0	35,7	0,0	4,5	0,5	100,6	81	0	18	1	0	0
PMS9	36,7	0,1	21,7	0,0	36,4	2,1	1,6	1,3	100,0	85	5	7	4	0	0
PMS10	36,5	0,1	21,7	0,0	36,7	1,6	2,1	1,4	100,1	84	4	9	4	0	0
PMS11	36,6	0,1	21,7	0,0	36,4	1,6	2,2	1,6	100,3	83	4	9	5	0	0
PMS12	36,6	0,1	21,8	0,0	36,2	1,7	2,1	1,6	100,2	83	4	8	5	0	0
PMS13	36,9	0,1	21,7	0,0	36,0	1,7	2,0	1,7	100,1	83	4	8	5	0	0
PMS14	37,1	0,1	21,8	0,0	35,7	1,7	2,0	2,1	100,5	82	4	8	6	0	0
PMS15	37,0	0,1	21,8	0,0	36,0	1,7	2,0	1,8	100,4	83	4	8	5	0	0
PMS16	36,6	0,2	21,8	0,0	36,5	1,6	2,0	1,4	100,1	84	4	8	4	0	0
PMS17	36,4	0,2	21,8	0,0	36,6	2,0	1,8	1,3	100,0	84	5	7	4	0	0
PMS18	37,5	0,1	21,3	0,0	28,4	2,7	1,2	8,7	100,0	64	6	5	25	0	0
PMS19	37,4	0,1	21,3	0,0	28,5	3,1	1,0	8,8	100,2	64	7	4	25	0	0
PMS20	37,5	0,1	21,2	0,0	28,8	3,1	1,0	8,8	100,5	64	7	4	25	0	0
PMS21	37,5	0,1	21,4	0,0	28,9	3,2	0,9	8,4	100,3	65	7	4	24	0	0
PMS22	37,2	0,1	21,3	0,0	28,8	3,1	0,9	8,4	99,8	65	7	4	24	0	0
PMS23	37,3	0,1	21,3	0,0	29,6	2,7	1,0	8,0	100,1	67	6	4	23	0	0
PMS24	37,7	0,1	21,4	0,0	29,7	2,3	1,0	8,1	100,2	68	5	4	24	0	0
PMS25	36,6	0,0	21,5	0,0	35,1	0,5	0,8	5,5	100,1	80	1	3	16	0	0
PMS26	36,5	0,1	21,4	0,0	34,9	0,5	0,7	5,9	100,0	79	1	3	17	0	0
PMS27	36,7	0,1	21,5	0,0	34,5	0,5	0,7	5,8	99,9	79	1	3	17	0	0
PMS28	36,7	0,1	21,5	0,0	35,4	0,5	0,7	5,4	100,5	80	1	3	16	0	0
PMS29	37,0	0,1	21,5	0,0	35,1	0,4	0,7	5,6	100,4	80	1	3	16	0	0
PMS30	36,9	0,1	21,3	0,0	35,6	0,3	0,8	5,0	100,0	81	1	3	15	0	0
PMS31	36,7	0,1	21,2	0,0	36,0	0,3	0,8	4,9	100,1	82	1	3	14	0	0
PMS32	37,0	0,1	21,2	0,0	34,8	0,6	1,2	5,1	100,1	79	1	5	15	0	0
PMS33	37,1	0,1	21,4	0,0	34,6	0,6	1,2	5,2	100,3	79	1	5	15	0	0
PMS34	37,0	0,1	21,6	0,0	34,2	0,6	1,2	5,2	100,0	79	1	5	15	0	0
PMS35	37,0	0,1	21,5	0,0	34,5	0,5	1,3	5,0	99,9	79	1	5	15	0	0
PMS36	37,3	0,1	21,4	0,0	34,6	0,6	1,2	5,3	100,5	79	1	5	16	0	0
PMS37	36,8	0,1	21,5	0,0	36,1	0,5	1,3	4,2	100,4	82	1	5	12	0	0
PMS38	37,0	0,1	21,4	0,0	35,7	0,3	1,5	4,1	100,2	82	1	6	12	0	0

Le diagramme ternaire (Alm-Prp-Grs) de la classification des grenats de Locock (2008) permet de distinguer deux type de grenats : un grenat de types almandin riche en pyrope et pauvre en grossulaire et un grenat de type almandin riche en grossulaire et pauvre en pyrope (Fig.IV.33).

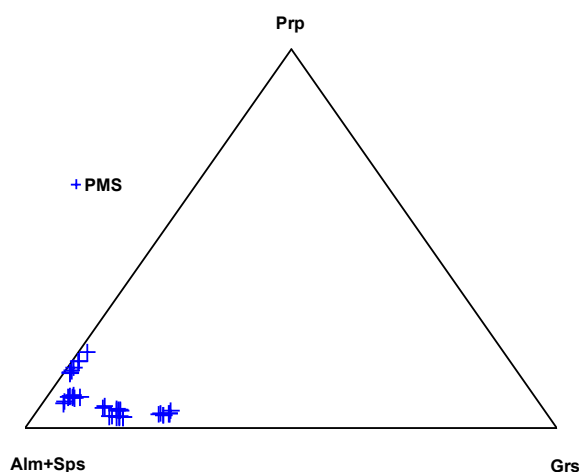


Fig.IV. 33 : Classification des grenats du sable de la plage Plage-Militaire dans le diagramme ternaire de Locock (2008) .PMS : sable sombre, Prp : pyrope, Alm : almandin, Sp : spessartine, Grs : grossulaire.

Les profils transverses, ainsi que la cartographie multiéléments sur les grenats ont montré que le sable de la Plage-Militaire se compose de deux types de grenats:

- ✓ un grenat homogène chimiquement et non zoné avec des inclusions de quartz (Fig.IV. 34a et b).
- ✓ un grenat à zonage de croissance avec une composition chimique du cœur différente de celle du bord indiquant des variations des conditions thermo-barométriques au cours de la croissance du cristal (Fig.IV. 34c, d, e et f).

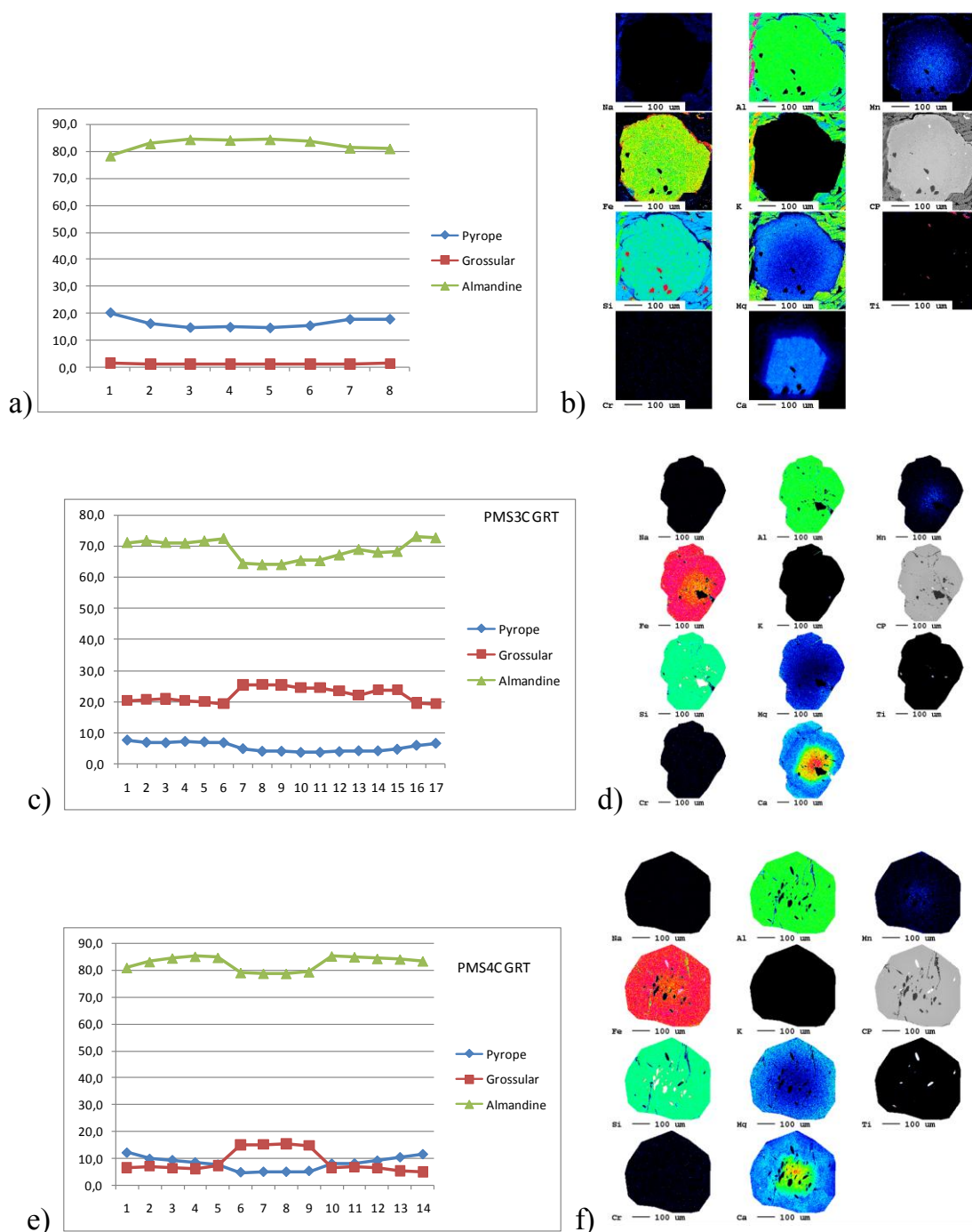


Fig.IV. 34 : Profils transverses et cartographie multiéléments sur grenats : a, b) grenat homogène non zoné avec des inclusions ; d, f) grenat zoné avec des inclusions.

La staurotide :

Les grains sont de couleur miel. Quelques grains sont xénomorphes (Fig.IV. 35a, b). Parfois la staurotide est aciculaire ou prismatique automorphe (Fig.IV. 35 c, d, e). Certains portent des traces d'usure (Fig.IV. 35f)



Fig.IV. 35 : Photo au microscope binoculaire : a, b) de débris de staurotide xénomorphe ; c, d, e) de staurotide prismatique et automorphe ; f) de grains de staurotide à traces d'usure.

L'étude des staurotides au MEB montre que quelques grains sont sub-arrondis et à surface lisse et luisantes (Fig.IV.36a), alors que d'autres sont prismatiques avec une surface rude et à traces de choc et d'arrachements (Fig.IV.36b). La plupart des grains présentent des microcavités liées au choc de ces grains avec d'autres plus durs.

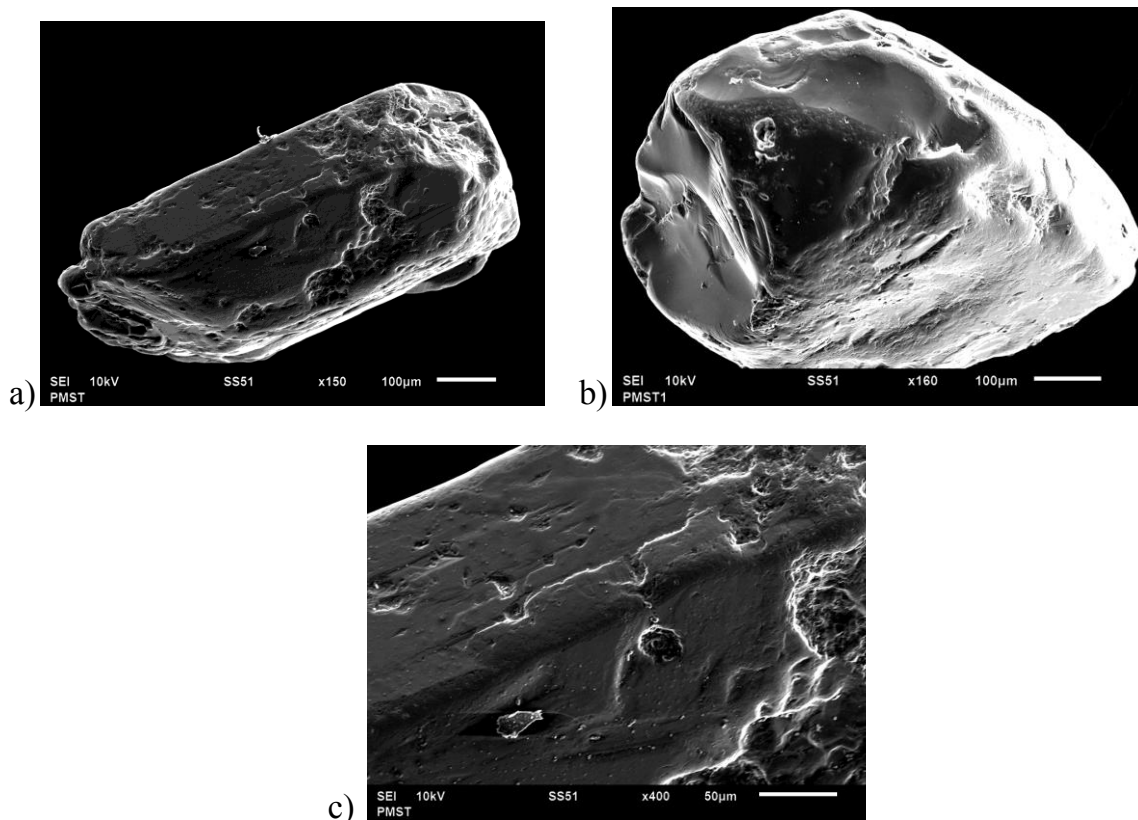


Fig.IV. 36 : Photos rétrodiffusées au MEB d'un grain de staurotide : a) vue d'ensemble des figures de corrosion, b et c) détails des traces de chocs sous forme de cavités et de stries d'arrachements.

Les staurotides du sable de la Plage-Militaire se caractérisent par leur homogénéité chimique (Tab.13). La formule structurale des staurotides a été calculée sur la base de $44(\text{O}) + 4(\text{OH})$ selon la méthode de Droop (1987).

Tableau.IV.13 : Composition chimique et formule structurale des staurotides du sable de la Plage-Militaire.

	PM St1	PM St2	PM St3	PM St4	PM St5	PM St6	PM St7	PM St8	PM St9	PM St10	PM St11	PM St12	PM St13	PM St14	PM St15	PM St16	PM St17	PM St18	PM St19	PM St20	PM St21
SiO₂	28,02	27,58	28,08	28,13	28,066	28,12	28,021	28,134	28,057	27,888	28,135	27,667	27,359	27,863	27,51	29,22	26,978	27,06	27,075	27,446	27,233
TiO₂	0,55	0,59	0,57	0,60	0,657	0,713	0,628	0,613	0,585	0,532	0,57	0,558	0,617	0,571	0,58	0,701	0,664	0,567	0,575	0,564	0,745
Al₂O₃	55,29	55,37	55,14	55,02	55,359	54,905	55,011	54,88	55,169	55,39	55,173	55,558	55,414	55,284	55,198	49,021	56,154	55,955	55,713	55,605	55,358
Cr₂O₃	0,01	0,05	0,04	0,06	0,028	0,027	0,017	0,06	0,011	0,024	0	0,035	0,039	0,013	0,018	0,042	0,051	0,062	0,05	0,061	0,048
Fe₂O₃	14,72	14,90	14,44	14,59	14,794	14,85	14,458	14,535	14,645	14,867	14,599	14,554	14,724	14,819	14,699	13,249	14,971	14,899	15,059	14,998	15,02
MnO	0,30	0,36	0,33	0,28	0,342	0,336	0,273	0,324	0,351	0,277	0,303	0,329	0,388	0,406	0,36	0,267	0,372	0,402	0,4	0,368	0,406
MgO	1,33	1,11	1,36	1,31	1,3	1,376	1,317	1,386	1,335	1,317	1,353	1,281	1,007	1,053	1,112	2,617	1,101	1,077	1,107	1,153	1,071
CaO	0,01	0,01	0,00	0,00	0,012	0,004	0,012	0	0,009	0,016	0,011	0,007	0,015	0,008	0,001	0,132	0,004	0,004	0,003	0,025	0,019
Na₂O	0,00	0,04	0,01	0,02	0	0,023	0,02	0	0,05	0,006	0	0,055	0,018	0,002	0,007	0,522	0,005	0,008	0,038	0,015	0
K₂O	0,01	0,01	0,00	0,00	0	0,005	0	0	0	0	0,007	0	0,008	0,007	0	0	0,002	0,008	0,009	0,002	0
ZnO	0,39	0,14	0,49	0,43	0,508	0,391	0,432	0,392	0,487	0,535	0,408	0,499	0,156	0,192	0,134	0,138	0,224	0,157	0,19	0,167	0,123
Total	100,63	100,15	100,47	100,43	101,066	100,75	100,189	100,324	100,699	100,852	100,559	100,543	99,745	100,218	99,619	95,909	100,526	100,199	100,219	100,404	100,023
Formula																					
Si	3,80	3,76	3,81	3,82	3,80	3,82	3,82	3,83	3,81	3,78	3,82	3,76	3,75	3,80	3,77	4,14	3,67	3,69	3,70	3,74	3,73
Ti	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,08
Al	8,84	8,90	8,83	8,81	8,83	8,78	8,83	8,80	8,82	8,85	8,83	8,90	8,94	8,88	8,91	8,19	9,01	9,00	8,97	8,93	8,93
Cr	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe⁺⁺	1,67	1,70	1,64	1,66	1,67	1,69	1,65	1,65	1,66	1,69	1,66	1,65	1,69	1,69	1,68	1,57	1,70	1,70	1,72	1,71	1,72
Mn	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05
Mg	0,27	0,23	0,28	0,27	0,26	0,28	0,27	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,21	0,21	0,23	0,55	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn	0,04	0,01	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Mg/(Mg+Fe)	0,14	0,12	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,11	0,11	0,12	0,26	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11
A	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69	0,70	0,69	0,70	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,66	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
F	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27
M	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,09	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03
XFe	0,83	0,86	0,82	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,83	0,83	0,83	0,86	0,86	0,86	0,72	0,86	0,86	0,86	0,85	0,86
XMg	0,13	0,11	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13	0,11	0,11	0,12	0,25	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11
XZn	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

La projection des échantillons dans le diagramme AFM ($A = (Al/2)/(Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe/(Al+Mg+Fe)/2$, $M = Mg/(Al+Mg+Fe)/2$) de Droop (1987) (Fig.IV.37a) et dans le diagramme XFe-XMg-XZn (Fig.IV.37b) montre que les staurotides sont très alumineuses et qu'elles sont également riches en fer.

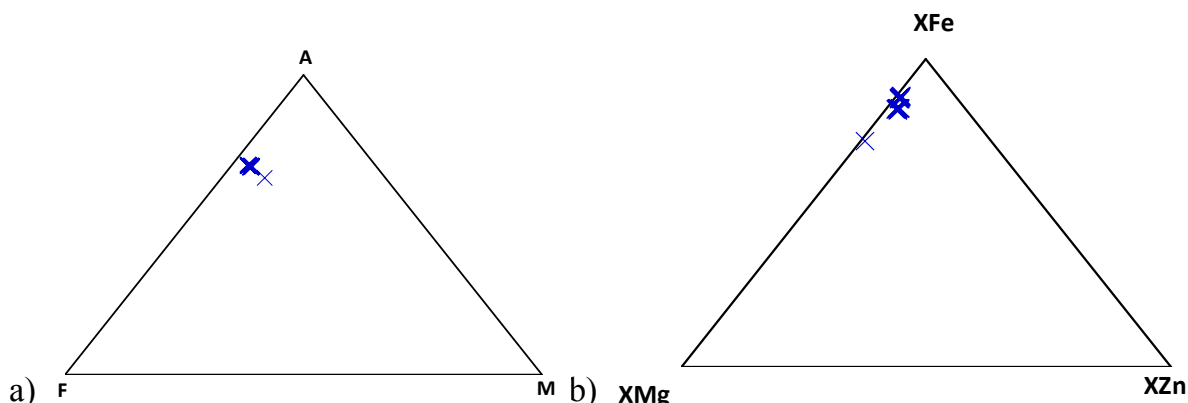


Fig.IV. 37 : Des staurotides du sable de la Plage-Militaire dans le diagramme de Droop (1987): a) AFM, b) XFe-XMg-XZn. $A = (Al/2)/(Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe/(Al+Mg+Fe)/2$, $M = Mg/(Al+Mg+Fe)/2$, $XFe = Fe/(Fe+Mg)/2$, $XMg = Mg/(Mg+Fe)/2$, $XZn = Zn/(Zn+Fe+Mg)$.

L'épidote :

Le minéral est de couleur verte. Les cristaux sont prismatiques (Fig.IV.38a) le plus souvent arrondis par l'usure (Fig.IV.38 a, c).

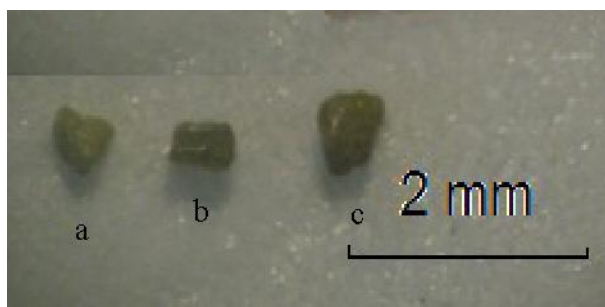


Fig.IV. 38 : Photo au microscope binoculaire de grains d'épidote.

Le disthène :

Il se présente sous forme de grains prismatiques, toujours de couleur gris-bleuté. Parfois les grains sont sombres en fonction de la quantité des inclusions qu'ils contiennent (Fig.IV.39)

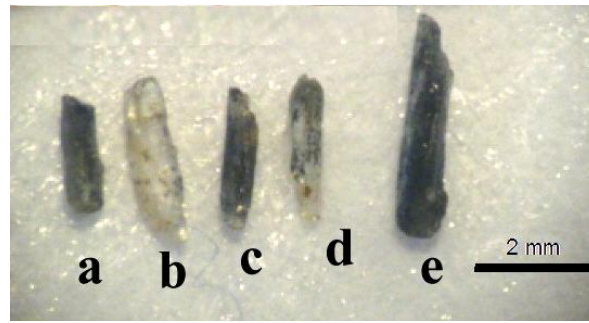


Fig.IV. 39 : Photo au microscope binoculaire de cristaux prismatiques de disthène.

L'analyse au MEB montre que le cristal a une forme prismatique avec une surface rude (Fig.IV.40a) et des traces de dissolutions (Fig.IV. 40b).

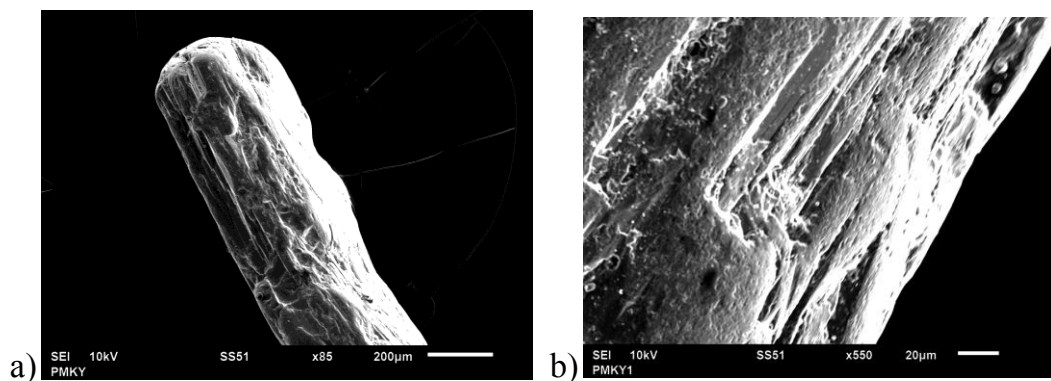


Fig.IV. 40 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de disthène : a) vue d'ensemble des figures de corrosion ; b) traces de dissolution.

Les Tourmalines :

Elles se présentent en grains noirs prismatiques à contours émoussés (Fig.IV. 41a, b et c) ou en grains sub-arrondis (Fig.IV.41d et e).

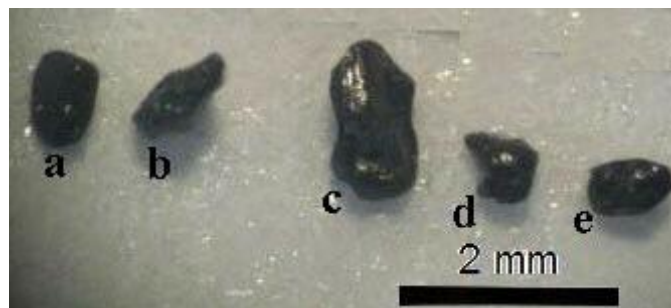


Fig.IV. 41 : Photo au microscope binoculaire de tourmalines : a, b et c) prismatiques à contours émoussés ; d et e) en grains sub-arrondis.

L'étude exoscopique montre que ces minéraux sont plus stables et plus résistants à la corrosion que les minéraux précédents. Ils présentent un contour sub-arrondi et lisse (Fig.IV.42a) avec quelques traces de dissolution (Fig.IV.42b).

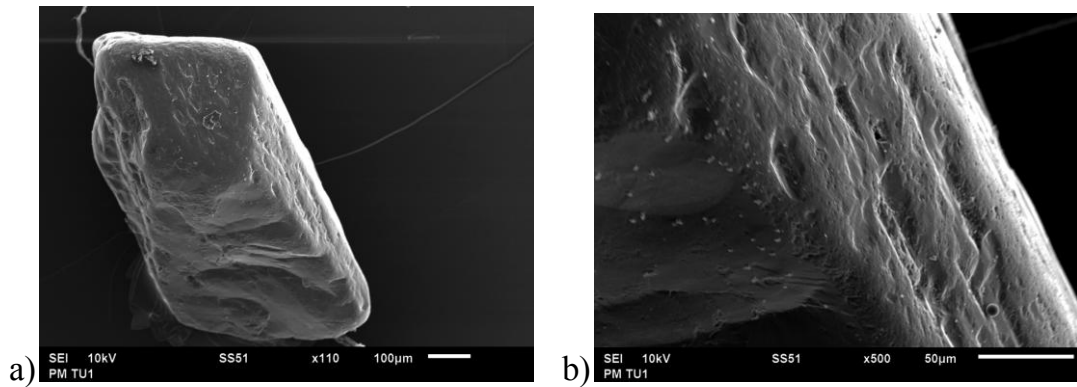


Fig.IV. 42 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de tourmaline : a) vue d'ensemble des figures de dissolution, b) détails des figures de dissolutions.

Les résultats de l'analyse à la microsonde ainsi que le calcul de la formule structurale sont résumés dans le tableau14.

Tableau.IV.14 : Composition chimique et formule structurale des tourmalines du sable de la Plage-Militaire

Plage-Militaire	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	Total	Fe ²⁺ (Y)	Mg(Y)	Ca(X)	Na(X)	K(X)	X-vacancy	Y(Fe/(Fe+Mg))	Mg/(Mg+Fe)	X(ca/Ca+Na)	Na+K
PMS1	34,00	1,00	33,00	9,00	0,00	4,66	0,38	2,01	0,05	10,10	94,19	1,30	1,03	0,07	0,67	0,01	0,33	0,56	0,44	0,09	0,68
PMS2	34,00	0,00	34,00	11,00	0,00	3,26	0,35	2,12	0,07	10,17	94,96	1,57	0,77	0,06	0,66	0,01	0,34	0,67	0,33	0,09	0,68
PMS3	33,00	0,00	34,00	13,00	0,00	1,63	0,31	2,08	0,04	9,90	93,96	1,91	0,26	0,06	0,68	0,01	0,32	0,88	0,12	0,08	0,69
PMS4	33,00	0,00	33,00	13,00	0,00	2,16	0,34	2,14	0,04	9,94	93,62	1,90	0,52	0,06	0,68	0,01	0,32	0,78	0,22	0,08	0,69
PMS5	33,00	0,00	34,00	13,00	0,00	1,65	0,33	2,03	0,06	9,90	93,96	1,91	0,26	0,06	0,68	0,01	0,32	0,88	0,12	0,08	0,69
PMS6	33,00	0,00	34,00	12,00	0,00	2,18	0,33	2,14	0,05	9,98	93,68	1,75	0,52	0,06	0,68	0,01	0,32	0,77	0,23	0,08	0,69

Le programme WinTcac (Yavuz et al. 2014) a été utilisé pour la classification de la tourmaline. Sur le diagramme ternaire Ca-Xvac-(Na+K) (Fig.IV.43a) de Jiang et al. (1995, 1996). Tous les échantillons de tourmaline du sable de la Plage-Militaire se projettent dans le champ des tourmalines alcalines. Les tourmalines sont également très riches en fer ($Fe = (Fe / (Fe + Mg)) : 0.50 \text{ à } 0.95$) ce qui les classent dans le groupe des schorls (Henry et Guidotti, 1985) (Fig.IV.43b).

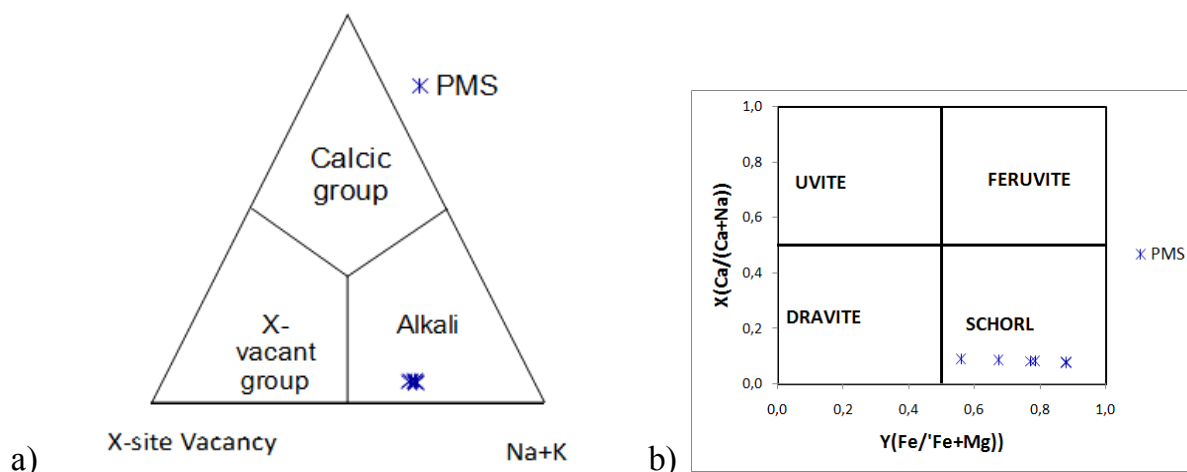


Fig.IV. 43 : Classification des tourmalines du sable de la Plage-Militaire : a) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en Ca et en alcalins de Jiang et al. (1995, 1996), b) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en fer de Henry et Guidotti, 1985.

Les tourmalines de la Plage-Militaire ne présentent aucune zonation significative (Fig.IV.44).



Fig.IV. 44 : Microphotographie d'une lame mince montrant une tourmaline.

Vu la grande taille des tourmalines, il n'a pas été possible de faire la cartographie en éléments chimiques sur tout le minéral. Il a donc été décidé de cartographier le long d'une bande recoupant le minéral de part en part.

Le profil de distribution (bord-bord) en Fe et Mg (Fig.IV.45a) ne montre pas de zonation significative en ces éléments. La cartographie montre également que la tourmaline est homogène et ne présente pas de zonation significative (Fig.IV.45b).

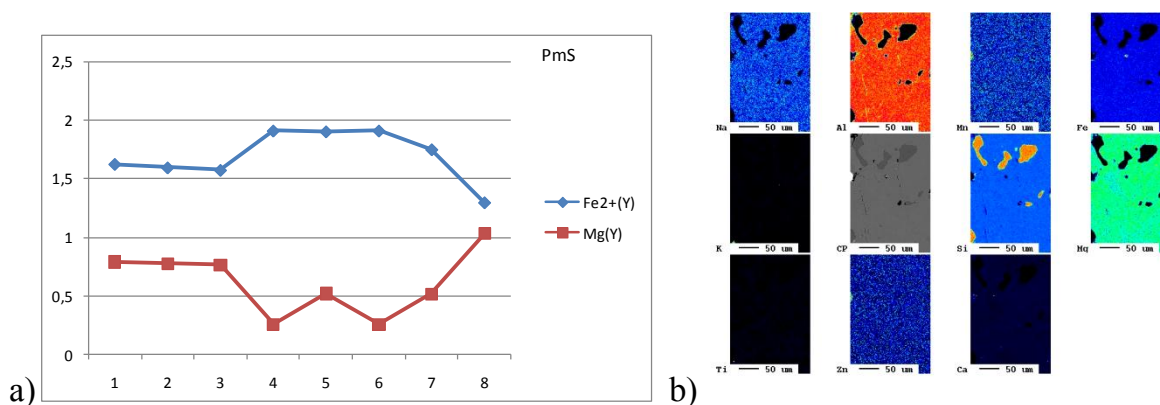


Fig.IV. 45 : a) Diagramme de distribution du Fe et Mg dans les tourmalines, b) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée

IV.2.2. La zone du port

C. Plage El Nasr

C.1- Les affleurements rocheux proximaux

C.1.1 .Pétrographie-Minéralogie

Un problème d'échantillonnage a été rencontré car quasiment toute la partie supérieure de la plage d'El Nasr est couverte d'un mur en béton, seule sa partie sud se caractérise par un petit affleurement (environ 20 m) de micaschistes.

a. Les Micaschistes :

Les échantillons des micaschistes de la plage El Nasr ont une composition minéralogique typique des micaschistes de la région d'Annaba. On y distingue à l'œil nu des grenats, de la staurotide, des micas et un peu de quartz (Fig.IV.46).

L'observation au microscope polarisant, en lumière polarisée analysée, montre que ces échantillons sont généralement de texture lépidoblastique contenant

principalement de la biotite, parfois en alternance avec de la muscovite (Fig.IV.46a), du grenat, de la staurotide et du quartz. La biotite (Fig.IV.46.a, b, c) est de couleur marron de forme lamellaire. Certains cristaux sont altérés.

La muscovite (Fig.IV.46.a, d) est plus abondante que la biotite et est souvent lamellaire. Les teintes de polarisation varient du rose au vert clair. Les grenats (Fig.IV. 46a, b, c, d) sont omniprésents avec de différentes taille, de forme globuleuses parfois craquelés et bordés de biotite (Fig.IV.46 c).

La staurotide est moins abondante que les grenats, elle est de couleur miel à jaune-pâle et est souvent prismatique (Fig.IV.46a). Le quartz (Fig.IV. 46. a, b, c) est sub-automorphe, de taille moyenne et est souvent en amas entre les niveaux à biotite-muscovite.

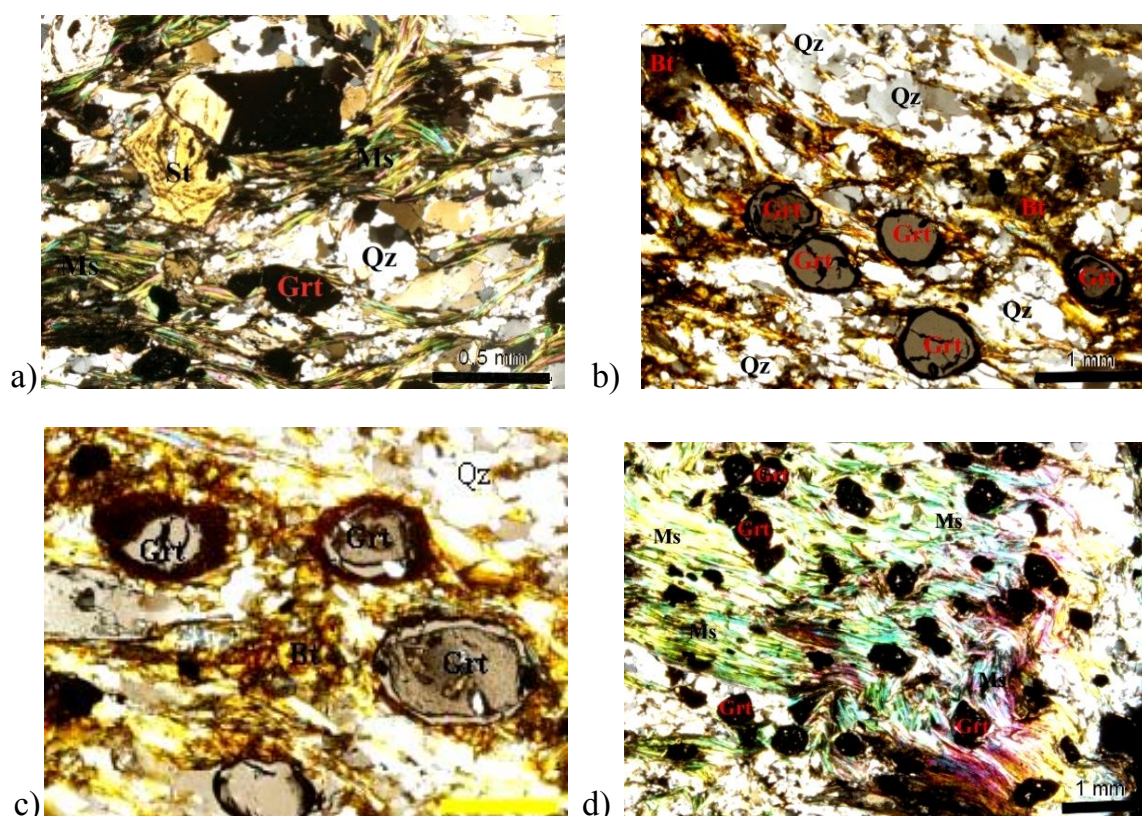


Fig.IV. 46 : Microphotographies en lumière polarisée analysée des micaschistes de plage El Nasr. Bt : biotite, Grt : grenat, Ms : muscovite, St : staurotide, Qz : quartz

C.2 – Les roches meubles (sable)

C.2.1- Paramètres granulométriques des sables

Les résultats de l'analyse granulométrique sont résumés dans le Tableau.IV.15.

Tableau.IV.15 : Récapitulatif des résultats de l'analyse granulométrique du sable de la plage El Nasr.

	EV1a	EV1b	EV1c	EV2a	EV2b	EV2c	EV3A	EV3b	EV3C
MEAN	1,95	2,02	2,35	1,97	2,01	2,39	2,00	2,04	2,07
SORTING	0,43	0,48	0,51	0,58	0,59	0,50	0,55	0,50	0,50
SKEWNESS	0,55	0,55	-0,42	0,28	0,30	-0,49	0,34	0,53	0,51
KURTOSIS	1,74	1,60	0,58	2,43	2,29	0,60	2,24	0,64	0,62
% GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% SAND:	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
% MUD:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE GRAVEL	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% COARSE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% MEDIUM GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% FINE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V FINE GRAVEL:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE SAND:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
% COARSE SAND:	0,03	0,05	0,01	0,09	0,07	0,00	0,04	0,05	0,03
% MEDIUM SAND:	0,80	0,71	0,44	0,71	0,68	0,36	0,73	0,66	0,63
% FINE SAND:	0,17	0,25	0,55	0,20	0,24	0,63	0,22	0,29	0,34
% V FINE SAND:	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V COARSE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% COARSE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% MEDIUM SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% FINE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% V FINE SILT:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
% CLAY:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

- ✓ Dans le triangle de classification de Folk et Ward (1957), les échantillons de sable de la plage El Nasr se projettent dans le champ des sables véritables (Fig.IV.47a).
- ✓ La taille des grains varie de 0,5 à 2,34 (échelle de Folk et Ward (1957) (Tab.13). Ces valeurs traduisent une dominance des sables à grains moyens.
- ✓ La valeur de l'indice de tri (Sorting) des 09 échantillons de sable de la plage El Nasr varie entre 0,42 et 0,58, ce qui indique un sable assez bien classé.
- ✓ Le paramètre de forme ou d'asymétrie (Skewness) est compris entre -0,41 et +0,61 (Tab.15). Ces valeurs sont < 1 , ce qui indique que les sables de la plage El Nasr présentent une asymétrie vers les grandes tailles et que le dépôt s'est fait dans un milieu agité.
- ✓ Le sable de la plage d'El Nasr se caractérise par des courbes de distribution granulométrique (Fig.IV.47b) hétérogènes. On peut distinguer deux groupes de courbes à pic différents, ce qui indique un sable de nature bimodale. Cette bimodalité témoigne d'un mélange des dépôts sableux à caractéristiques granulométriques différentes.

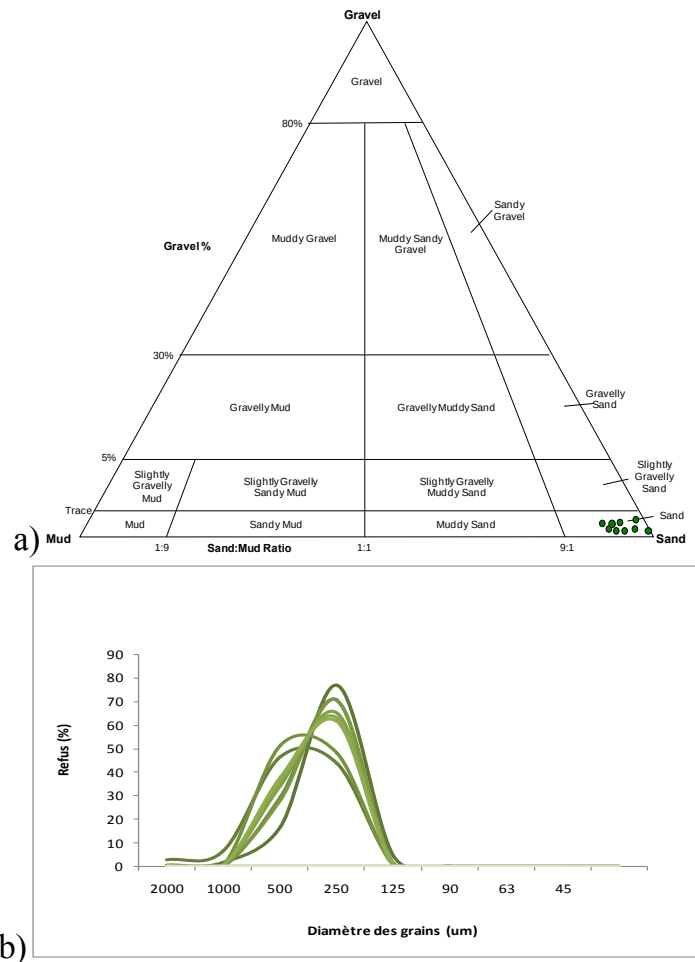


Fig.IV. 47 : Caractéristiques granulométriques du sable de la plage El Nasr : a) Triangle de classification des formations meubles de Folk et Ward (1957), b) Courbes de distribution.

- ✓ Les valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage El Nasr sont < 2 . Cu_{EN} varie de 1.63 à 2.21 (Tab.16), ce qui indique que le sable est à granulométrie serrée et uniforme.

Tableau.IV.16 : Valeurs du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la Plage Militaire

	EV1a	EV1b	EV1c	EV2a	EV2b	EV2c	EV3A	EV3b	EV3C	Moyenne
D60	431,26	665,52	462,38	615,23	460,35	479,31	487,00	462,96	493,25	506,36
D10	268,17	301,51	284,78	300,60	282,43	286,89	287,60	281,93	289,49	287,04
Cu=D60/D10	1,61	2,21	1,62	2,05	1,63	1,67	1,69	1,64	1,70	1,76

C.2.2- Identification minéralogique

Comme pour le sable de la Plage-Militaire, le sable de la plage El Nasr se caractérise par sa couleur sombre.

a. Les minéraux argileux :

Le Tableau.IV.17 montre que les échantillons ont un taux d'argilosité faible à nul. Une argilosité nulle indique un bon lessivage et conduisant ainsi à un dépôt de sable " propre ".

Tableau.IV.17 : Récapitulatif des essais au bleu de méthylène du sable de la plage d'El Nasr

Plage El Nasr			
Echantillon	Valeur de bleu méthylène (Vb) (ml/g)	Quantité (mg/l)	Présence d'argile
EN1a	0	0,00	absent
EN1b	1,4	0,43	present
EN1c	1,4	1,81	present
EN2a	0	0,00	absent
EN2b	0	0,00	absent
EN2c	0	0,00	absent
EN3A	0	0,00	absent
EN3b	1,4	0,27	present
EN3C	0	0,00	absent

b. Les carbonates :

Au niveau de plage d'El Nasr, on constate que le taux de carbonate (CaCO_3) est très élevé (Tab.18) et ce malgré l'absence d'affleurements visibles de cipolins à proximité. La présence du mur de béton sur la berge de la plage suggère une origine mixte (anthropique et naturelle) du carbonate.

Tableau.IV.18 : Récapitulatif des essais calcimétriques du sable de la plage d'El Nasr, VII : volume Initial, V2 : volume CO_2 dégagé par l'échantillon, CaCO_3 %Ech : taux de carbonate dans l'échantillon.

El Nasr					
Echs	V1 I	V2 Ech	V CO_2 %ech	V CO_2 %t	CaCo3%Ech
ENs1a	65	70	5	196	2,55
ENs2a	65	85	20	196	10,20
ENs3a	65	77	12	196	6,12
ENs1b	65	68	3	196	1,53
ENs2b	65	80	15	196	7,65
ENs3b	65	74	9	196	4,59
ENs1c	65	70	5	196	2,55
ENs1b	65	74	9	196	4,59
ENs1c	65	74	9	196	4,59

c.. Les minéraux non argileux :

Le sable sombre de la plage El Nasr est principalement composé de grenat, staurotide et de tourmaline (Fig.IV.48). La proportion en minéraux sombre est élevée

et peut atteindre 84%. Les minéraux clairs et légers sont principalement représentés par de très rares quartzs et calcite.

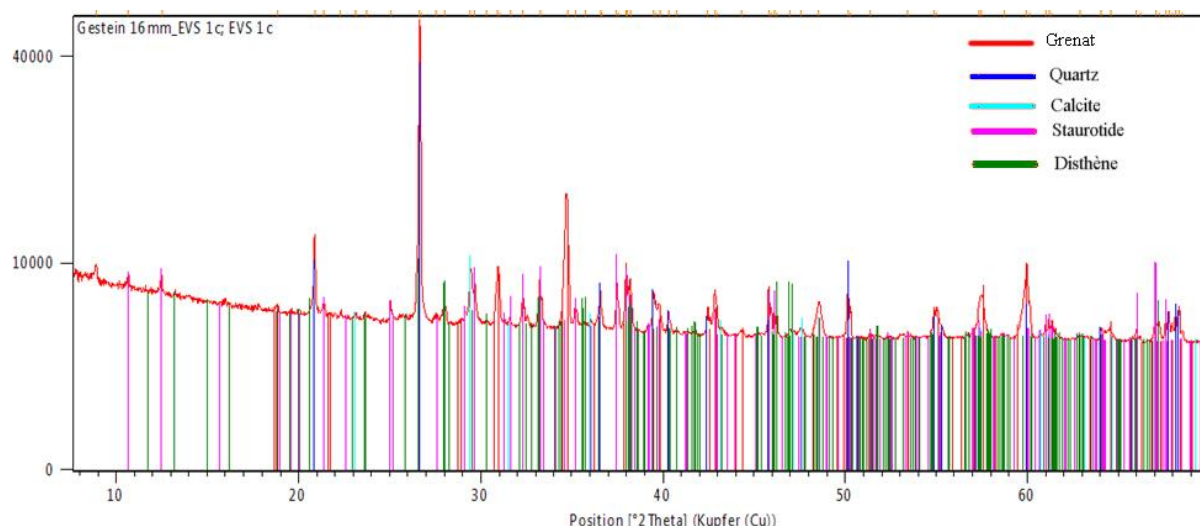


Fig.IV. 48 : Diffractogramme du sable sombre de plage El Nasr.

c.1.Les minéraux clairs et légers

Les minéraux clairs sont représentés par du quartz. Les grains de quartz se présentent sous forme de cristaux sub-arrondis ou anguleux jaunâtre, blanc laiteux. (Fig.IV.49).

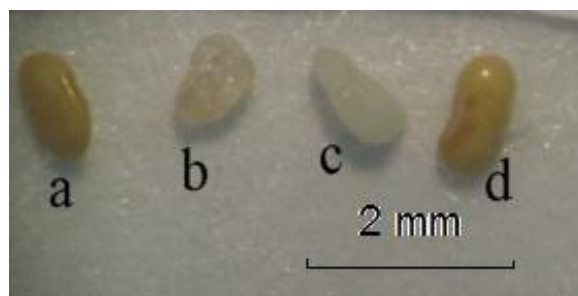


Fig.IV. 49 : Photo au microscope binoculaire de grains de quartz laiteux.

Les grains de quartz se caractérisent par de nombreuses traces de chocs sous forme de cassure conchoïdale (Fig.IV.50a) et des traces de chocs en V à contours lisses (Fig.IV.50b). Certains grains portent des traces d'arrachement en écailles (Fig.IV.50c).

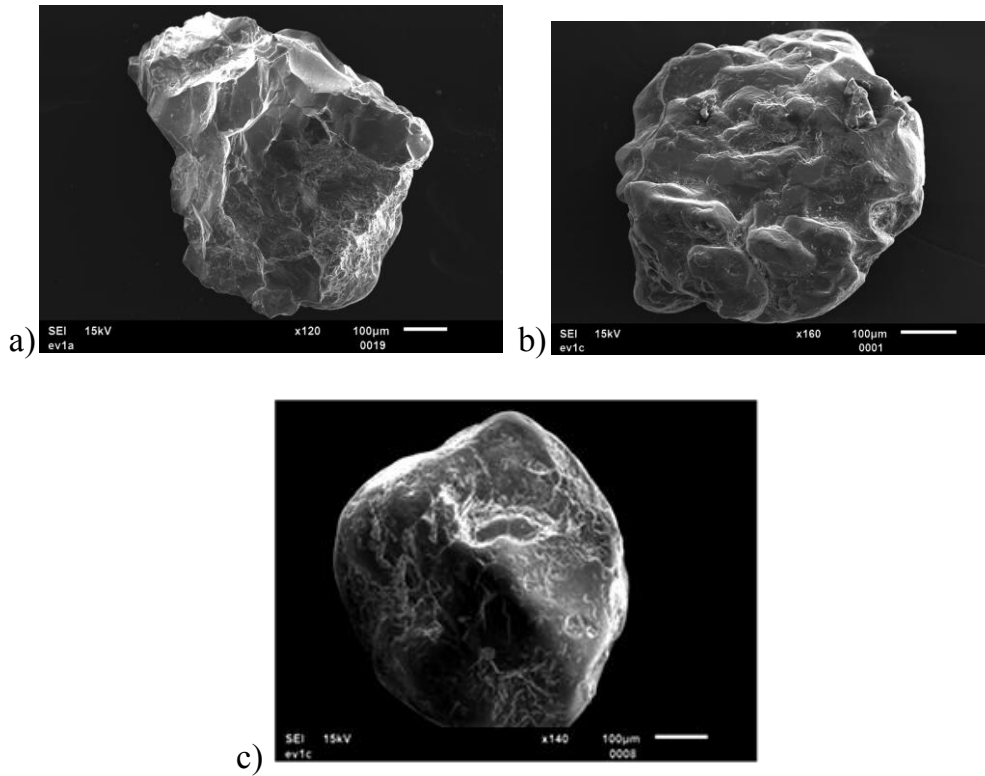
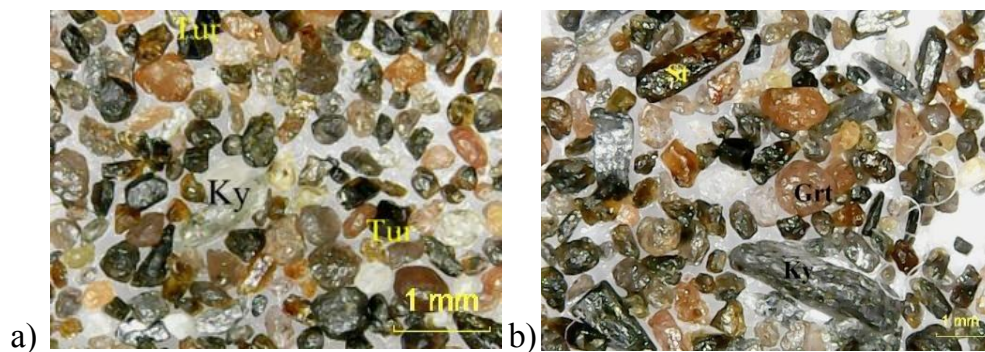


Fig.IV. 50 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain quartz : a) contours anguleux, b) contours sub-arrondis et à traces de chocs à contours lisses, c) à traces d'arrachement en écailles

c.2.Les minéraux sombres

L'analyse à la loupe binoculaire et au microscope polarisant des sables de la plage El Nasr a montré que le sable se compose de minéraux sombres tels que le disthène, la staurotide, le grenat et la tourmaline (Fig.IV.51).



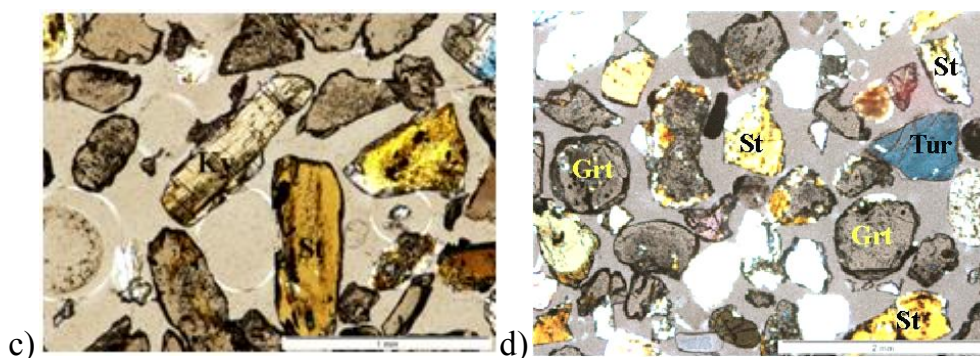


Fig.IV.51 : Microphotographies du sable sombre de la plage El Nasr : a et b) au microscope binoculaire, c et d) en lames minces. Abréviations selon Whitney et Evans, 2010, Grt : Grenat, St: Staurotide, Tur: tourmaline, Ky : disthène.

Le grenat :

Il est très abondant dans le sable et sont souvent sous forme de débris transparents et de couleur rose (Fig.IV. 52a-d). De nombreux débris contiennent des inclusions (Fig.IV.52d).

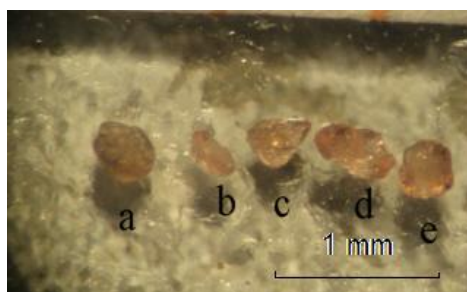


Fig.IV. 52 : Photo au microscope binoculaire de débris de grenats transparents et à inclusions solides.

Certains grenats sont de forme arrondie et automorphe. La surface montre peu de trace d'érosion (Fig.IV.53a). La photo de détail au MEB montre quelques rares traces de chocs en V avec des contours souvent lisses (Fig.IV.53b).

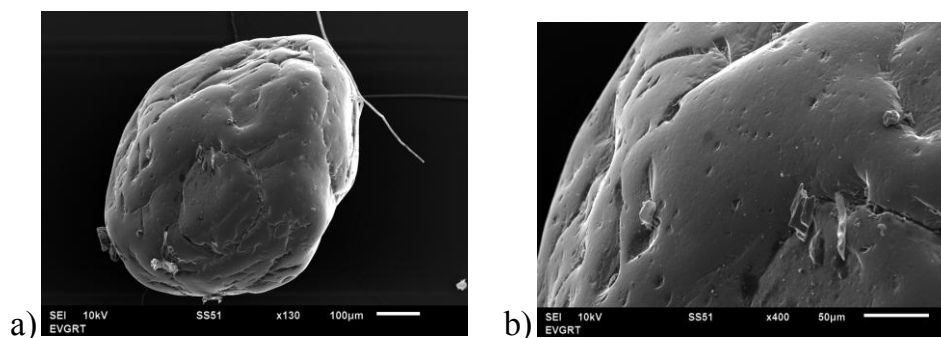


Fig.IV. 53 :.Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de grenat : a) Vue d'ensemble d'un grain avec des traces de choc, b) détails des traces de chocs en V à contours lisses.

Les résultats de l'analyse à la microsonde sont résumés dans le tableau19. La formule structurale de phases minérales composant les grenats a été déterminée par la méthode de Locock (2008).

Tableau.IV.19 : Composition chimique et formule structurale des grenats du sable de la plage El Nasr.

El Nasr	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Total	Alm	Sps	Prp	Grs	Adr	Uv
EN1	37,7	0,0	21,7	34,9	0,2	4,8	0,8	100,1	79	0	19	2	0	0
EN2	37,8	0,0	21,6	33,8	0,5	3,8	2,4	99,9	77	1	15	7	0	0
EN3	38,2	0,1	21,9	33,1	0,3	4,3	2,3	100,1	75	1	18	6	0	0
EN4	38,3	0,0	21,5	33,1	0,7	4,0	2,5	100,1	76	2	16	7	0	0

Le Tableau.IV.19 montre que les grenats ont une composition homogène et qu'ils sont de type almandin (Pyrope 15-19%, Almandin 75-79%, Grossulaire 2 à 7%).

On remarque qu'ils sont en moyenne plus riches en pyrope et généralement plus pauvres en grossulaire que les grenats de la plage d'Ain Achir et de la Plage-Militaire. Sur le diagramme ternaire (Alm-Prp-Grs) de la classification des grenats (Locock, 2008), tous les grenats sont regroupés près du pôle almandin riche en grossulaire (Fig.IV.53).

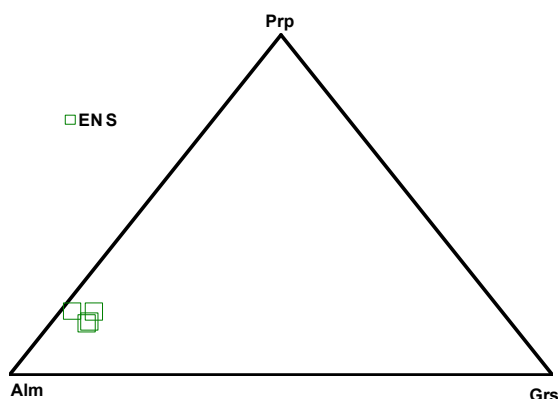


Fig.IV. 54 : Classification des grenats du sable sombre de plage El Nasr dans le diagramme ternaire de Locock (2008). Prp : pyrope, Alm : almandin, Sp : spessartine, Grs : grossulaire

L'étude des profils (transverses) multiéléments (Fig.IV.55a) et la cartographie multiéléments (effectuée le long d'une bande traversant le grain de part en part) a montré que le grenat du sable de la plage El Nasr se compose d'une seule phase

minérale relativement homogène. Les grenats contiennent souvent des inclusions de quartz (Fig.IV.55b).

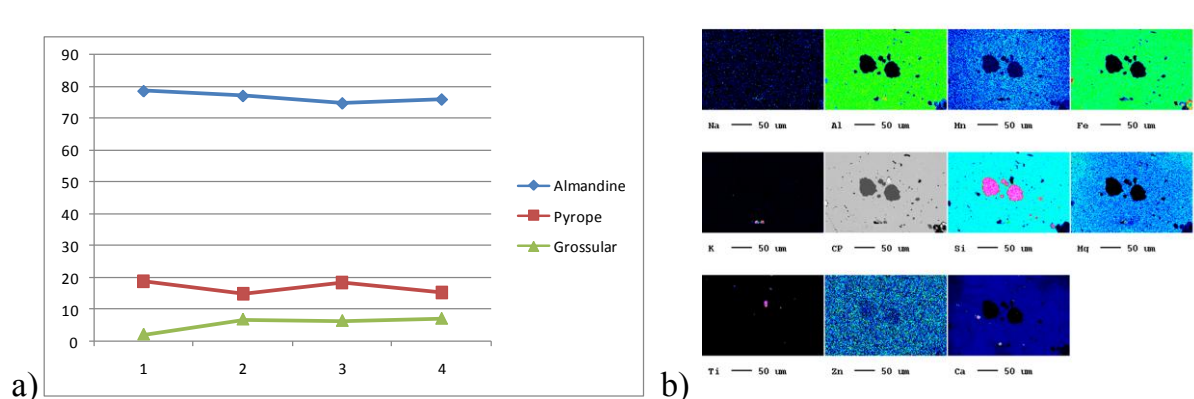


Fig.IV. 55 : a) Profils transverses de l'almandine, du pyrope et du grossulaire, b) cartographie multiéléments effectuée le long d'une bande traversant le grain de part en part.

La staurotide :

Elle est de couleur brunâtre, translucide. Les inclusions y sont nombreuses. Les débris de staurotide peuvent être anguleux (Fig.IV.56a), polis et arrondis (Fig.IV.55b) ou se présenter sous forme de cristaux prismatiques (Fig.IV.56c).



Fig.IV. 56 : Photo au microscope binoculaire de : a) débris de staurotide anguleux ; b) grain poli et arrondi, c) de staurotide prismatique et automorphe.

L'étude des staurotides au MEB a montré que certains échantillons sont sub-arrondis à surface plus ou moins lisse et recouverte d'une fine pellicule argileuse (Fig.IV.57a, b). Le passage de la forme prismatique à une forme arrondi témoigne d'un processus d'usure et de polissage par l'eau. La présence de la pellicule argileuse s'explique par le contact limité du grain avec l'eau.

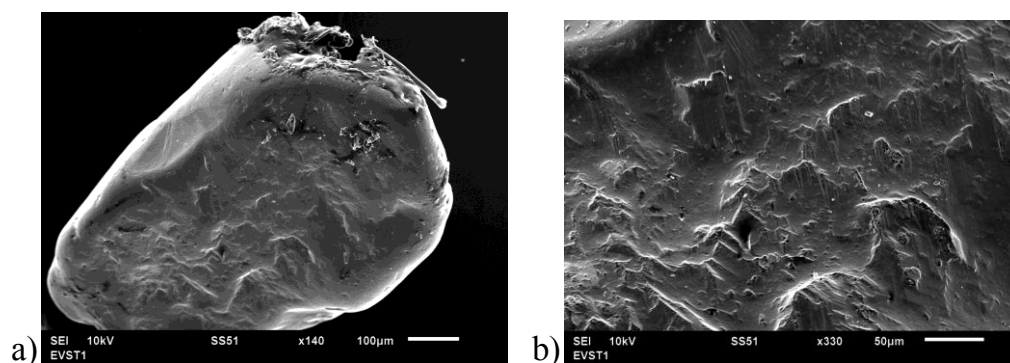


Fig.IV. 57 : Photo rétrodiffusée au MEB: a) vue d'ensemble d'un grain sub-arrondi à surface plus ou moins lisse et recouverte d'une fine pellicule argileuse, b) détails de la figure 57.

Les staurotides du sable de la plage El Nasr se caractérisent par une composition chimique semblable (Tab.20).

Tableau.IV.20 : Composition chimique et formule structurale des staurotides du sable de la plage El Nasr

	EN St1	EN St2	EN St3	EN St4	EN St5	EN St6	EN St7	EN St8
SiO₂	27,23	27,76	27,52	27,61	27,48	27,28	27,37	27,51
TiO₂	0,54	0,59	0,53	0,64	0,60	0,55	0,66	0,61
Al₂O₃	55,00	54,30	54,52	54,31	54,41	54,74	54,51	54,73
Cr₂O₃	0,05	0,04	0,02	0,06	0,06	0,04	0,06	0,06
Fe₂O₃	14,63	14,72	14,61	14,69	14,70	14,56	14,65	14,76
MnO	0,20	0,22	0,16	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19
MgO	1,35	1,44	1,48	1,45	1,45	1,41	1,46	1,44
CaO	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00
Na₂O	0,02	0,02	0,04	0,00	0,02	0,00	0,03	0,01
K₂O	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00
ZnO	0,20	0,17	0,16	0,14	0,18	0,13	0,10	0,19
Total	99,23	99,27	99,05	99,09	99,10	98,93	99,07	99,52
Formula								
Si	3,75	3,82	3,79	3,80	3,79	3,76	3,77	3,78
Ti	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06
Al	8,92	8,80	8,85	8,82	8,84	8,90	8,85	8,85
Cr	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
Fe⁺⁺	1,68	1,69	1,68	1,69	1,69	1,68	1,69	1,69
Mn	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Mg	0,28	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,30	0,29
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Zn	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02
Mg/(Mg+Fe)	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
A	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
F	0,26	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
M	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
XFe	0,84	0,83	0,83	0,84	0,83	0,84	0,84	0,83
XMg	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15
XZn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

La projection des échantillons dans le diagramme AFM ($A = (Al/2) / (Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe / (Al+Mg+Fe)/2$, $M = Mg / (Al+Mg+Fe)/2$) (Fig.IV.58a) et dans le diagramme XFe-XMg-XZn (Fig.IV.58b) de Droop (1987) montre que les staurotides ont une composition chimique riche en aluminium et en fer.

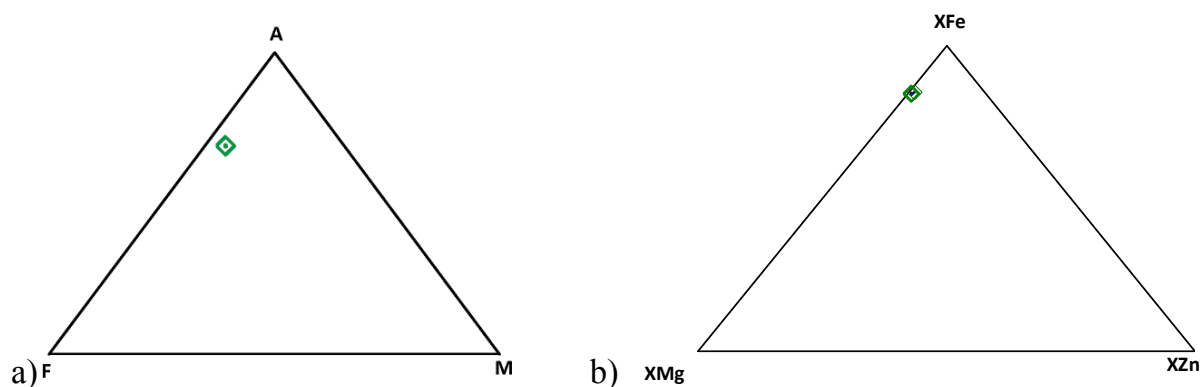


Fig.IV. 58 : des staurotides du sable de plage El Nasr dans le diagramme de Droop (1987): a) AFM, b) XFe-XMg-XZn. $AA = (Al/2) / (Al+Mg+Fe)/2$, $F = Fe / (Al+Mg+Fe)/2$, $M = Mg / (Al+Mg+Fe)/2$.

Le disthène :

Ce minéral est systématiquement prismatique, de couleur grisâtre à bleutée, de taille ne dépassant pas 3mm. Quasiment tous les grains contiennent des inclusions (Fig.IV.59)

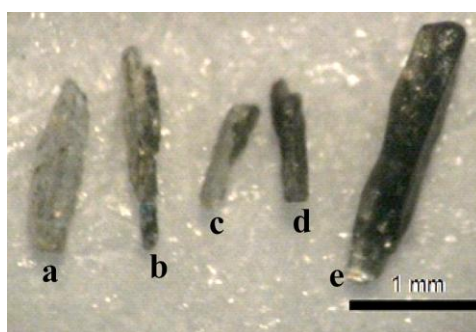


Fig.IV. 59 : Photo au microscope binoculaire de cristaux prismatiques de disthènes.

Au MEB le minéral apparaît sous forme de grains prismatiques à bord très érodés et sub-arrondis. Les contours des cassures sont lisses (Fig.IV.60a, b). Les traces d'arrachements ne sont pas rares (Fig.IV.60c).

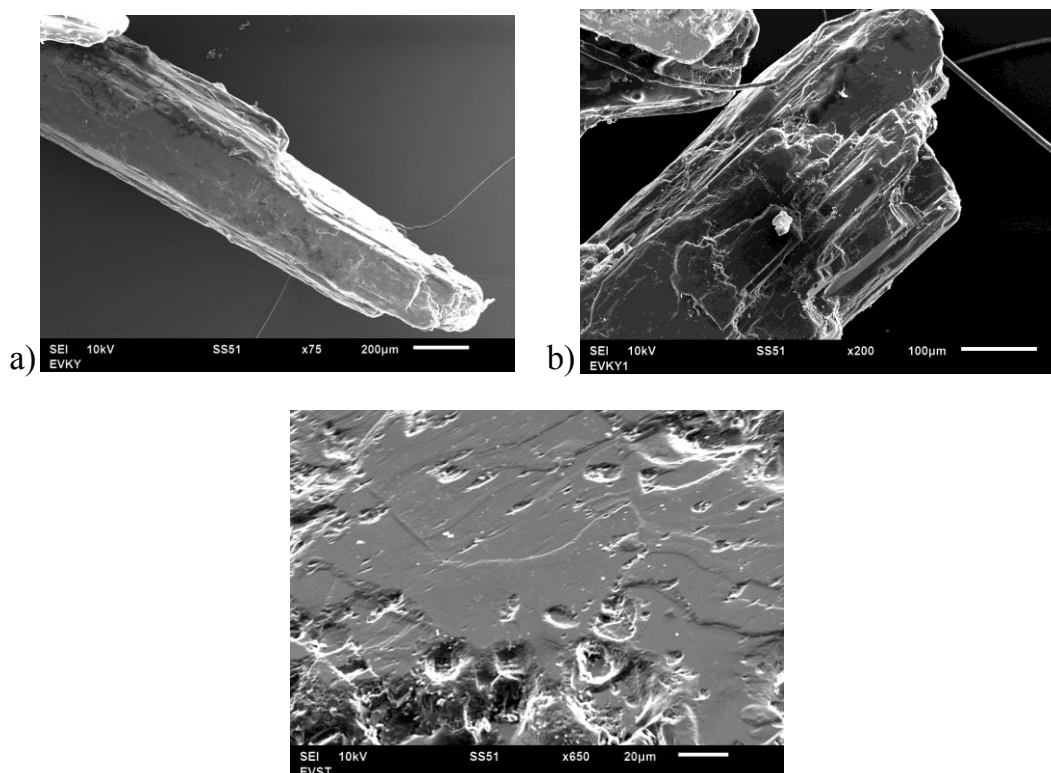


Fig.IV. 60 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de disthène : a, b) prismatique à contours sub-arrondis, c) détails de la photo précédente montrant les traces d'arrachement.

Les tourmalines :

Se présentent en grains noirs plus ou moins prismatiques à contours émoussés (Fig.IV. 61a, b) ou en grains sub-arrondis (Fig.IV.61c). Les grains en section basale ont une forme triangulaire caractéristique (Fig.IV.61 d).

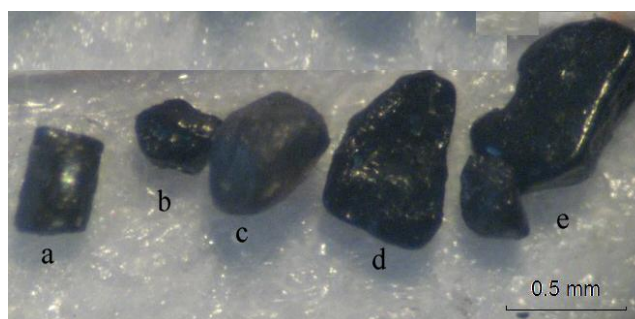


Fig.IV. 61 : Photo au microscope binoculaire de tourmalines : a, b) en grains prismatiques, (c, d, f) en débris plus ou moins arrondis par l'usure ou en grains de forme triangulaire (cassure basale).

L'observation au MEB montre des cassures conchoïdales (Fig.IV.62a) ainsi que des figures de chocs (en forme de V) et des traces d'arrachements (Fig.IV.62b).

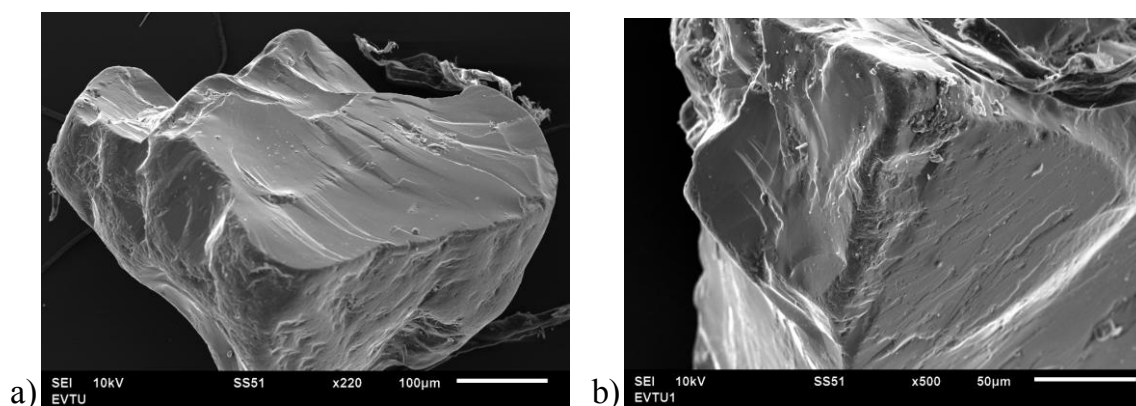


Fig.IV. 62 : Photo rétrodiffusée au MEB d'un grain de tourmaline : a) vue des cassures conchoïdales du minéral, b) détails des figures de choc et des stries d'arrachement.

Les résultats des analyses à la microsonde et du calcul de la formule structurale des grains de tourmalines sont résumés dans le Tableau.IV.21.

Tableau.IV.21 : Composition chimique et formule structurale des tourmalines du sable de la plage El Nasr.

El Nasr	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	B2O3	Total	Fe2+(Y)	Mg(Y)	Ca(X)	Na(X)	K(X)	X-vacancy	Y/(Fe+Mg)	Mg/(Mg+Fe)	X(Ca/Ca+Na)	Na+K
EN S1	36,00	0,00	33,00	5,00	0,00	7,65	0,89	2,14	0,02	10,57	84,57	0,69	1,88	0,16	0,68	0,00	0,16	0,56	0,73	0,19	0,69
EN S2	36,00	0,00	33,00	5,00	0,00	7,31	1,16	2,09	0,02	10,43	84,43	0,70	1,82	0,21	0,68	0,00	0,11	0,28	0,72	0,23	0,68
EN S3	36,00	0,00	32,00	5,00	0,00	7,66	0,85	2,07	0,03	10,35	83,35	0,70	1,92	0,15	0,68	0,01	0,17	0,27	0,73	0,18	0,68
EN S4	36,00	0,00	30,00	6,00	0,00	8,94	0,98	2,31	0,06	10,39	82,39	0,84	2,14	0,18	0,75	0,01	0,06	0,28	0,72	0,19	0,76
EN S5	36,00	0,00	31,00	5,00	0,00	9,32	0,72	2,31	0,01	10,50	82,50	0,69	2,30	0,13	0,74	0,00	0,13	0,23	0,77	0,15	0,74
EN S6	35,00	0,00	31,00	6,00	0,00	8,68	1,62	1,78	0,07	10,37	82,37	0,84	2,16	0,29	0,58	0,01	0,12	0,28	0,72	0,33	0,59

La classification des tourmalines du sable de la plage El Nasr dans le diagramme ternaire Ca-Xvac-(Na+K) de Jiang et al. (1995, 1996) (Fig.IV.63a) montre que tous les échantillons se projettent dans le champ des tourmalines alcalines.

Dans le diagramme de Henry et Guidotti, (1985) (Fig.IV.63b) on remarque que ces tourmalines sont très pauvres en fer mais qu'elles sont riches en magnésium ($Mg = (Mg / (Fe + Mg)) = 0.70$ à 0.80) ce qui les classent dans le groupe des dravites.

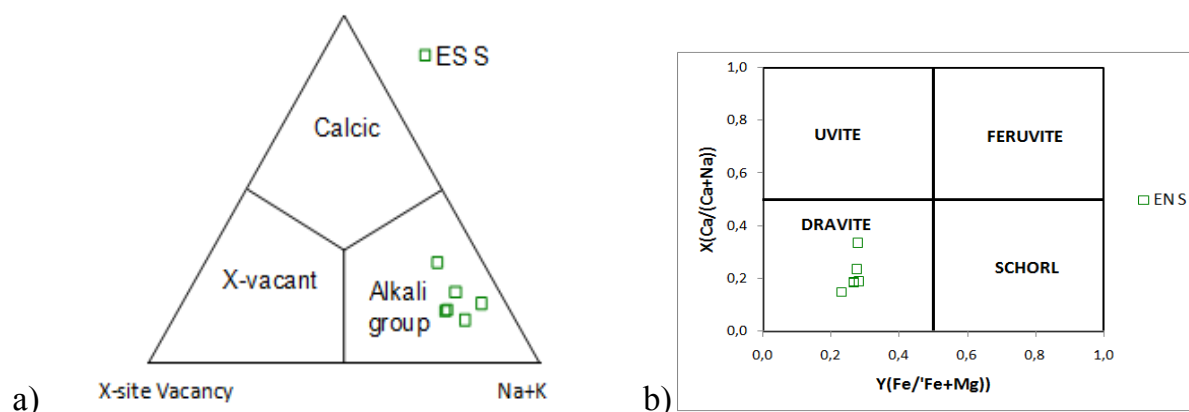


Fig.IV. 63 : Classification des tourmalines du sable de la plage El Nasr : a) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en Ca et les alcalins (Jiang et al. 1995, 1996), b) dans les diagrammes discriminants les groupes de tourmalines en fonction de la teneur en fer de Henry et Guidotti, (1985).

La cartographie multiéléments et les profils transverses en Fe et Mg des tourmalines montre que celles-ci sont homogènes et qu'elles ne présentent pas de zonation significative (Fig.IV.63a). Certains cristaux de tourmalines contiennent des inclusions de quartz et d'oxydes de fer (Fig.64b).

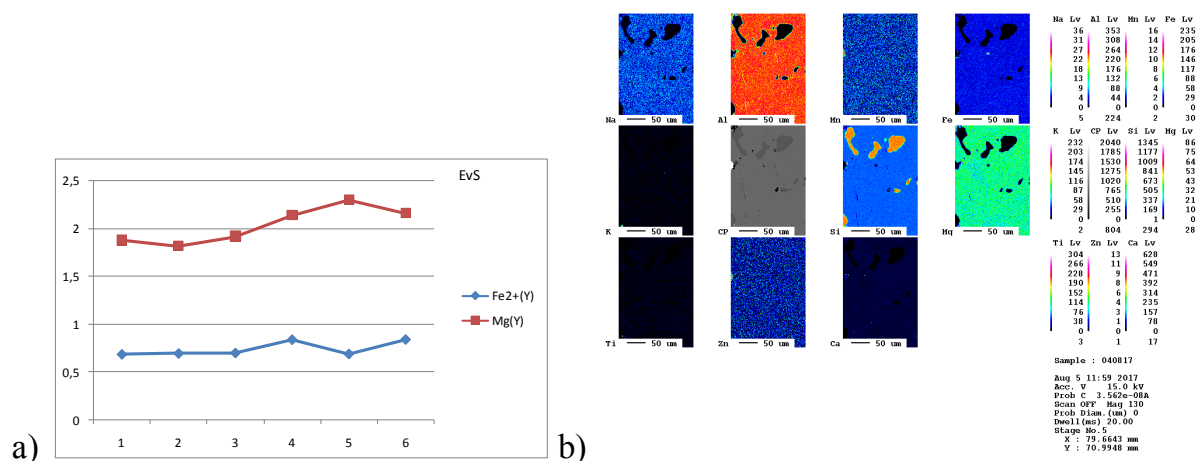


Fig.IV. 64 : a, Diagrammes de distribution du Fe et Mg dans les tourmalines, b) cartographie multiéléments d'une tourmaline non zonée.

IV.3. LES MINÉRAUX EN INCLUSION

L'observation des lames minces et à la microsonde montre que la plupart des minéraux lourds (grenat, disthène et staurotide) des trois plages contiennent des inclusions solides. Les grains de grenat, de staurotide et de disthène contenant des inclusions ont été récoltés manuellement et ont été analysés par diffractométrie (DRX).

IV.3.1. Le grenat :

Les grains détritiques montrent des inclusions de quartz (Fig.IV.64a), ce qui est confirmé par la diffractométrie (Fig.IV.65b).

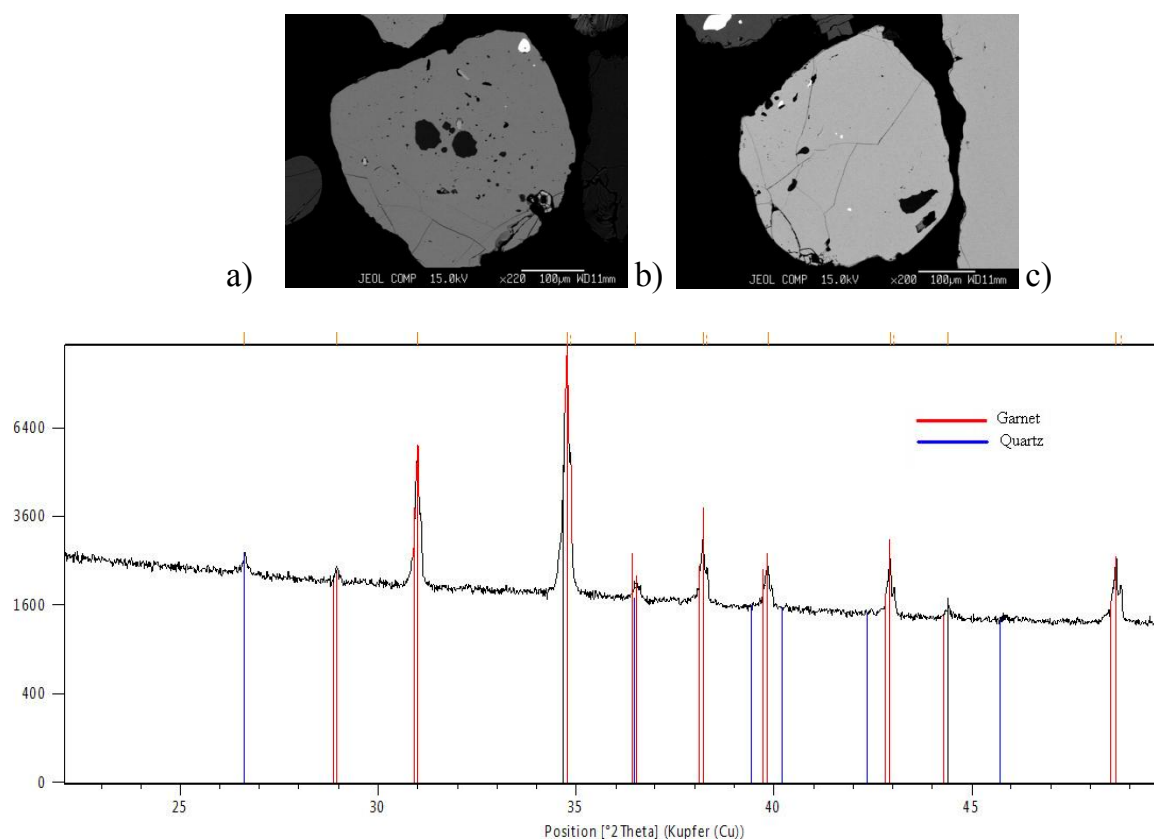


Fig.IV. 65 : a, b) Microphotographies rétrodiffusées de grenats (microsonde) avec des inclusions solides, c) diffractogrammes de grenats détritiques à inclusions de quartz.

IV.3.2. La staurotide :

Les grains contiennent différents types d'inclusions solides (Fig.IV.66 a, b). Les inclusions peuvent être de l'ilménite (Fig.IV.66c), du grenat almandin seul (Fig.IV.66d) ou du grenat almandin, du zircon et de la tourmaline (Fig.IV.66e).

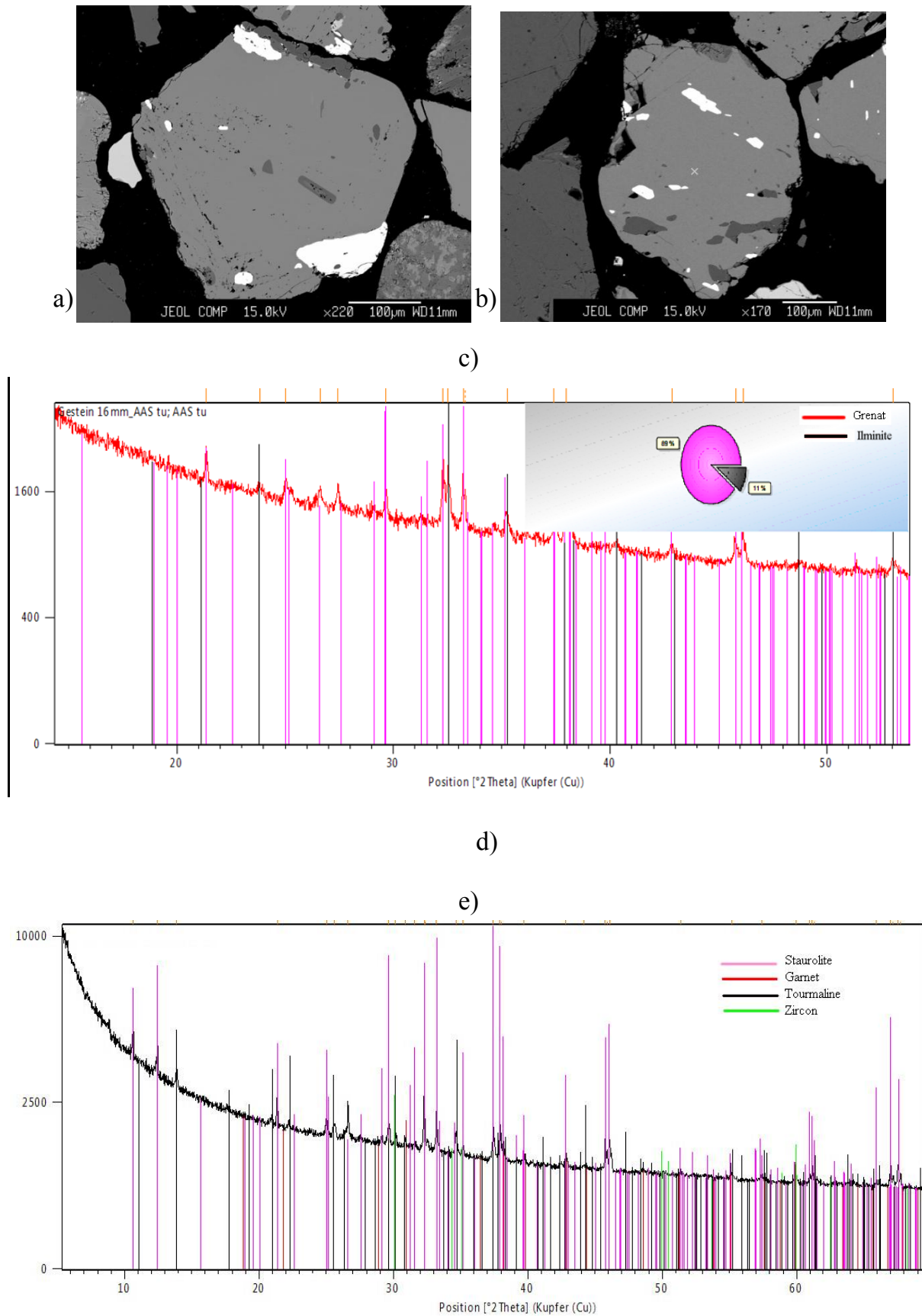


Fig.IV. 66 : a, b) Microphotographies rétrodiffusées de staurotides avec des inclusions solides, c) diffractogramme destaurotides détritiques à inclusions d'ilménite, d)

*diffractogramme destaurotides détritiques à inclusions de grenat de type almandin, e)
diffractogramme destaurotides détritiques à inclusions d'almandin, de zircon et
ilménite.*

IV.3.3. Le disthène :

Les inclusions solides dans les grains de disthène sont des grenats de type almandin (Fig.IV.67).

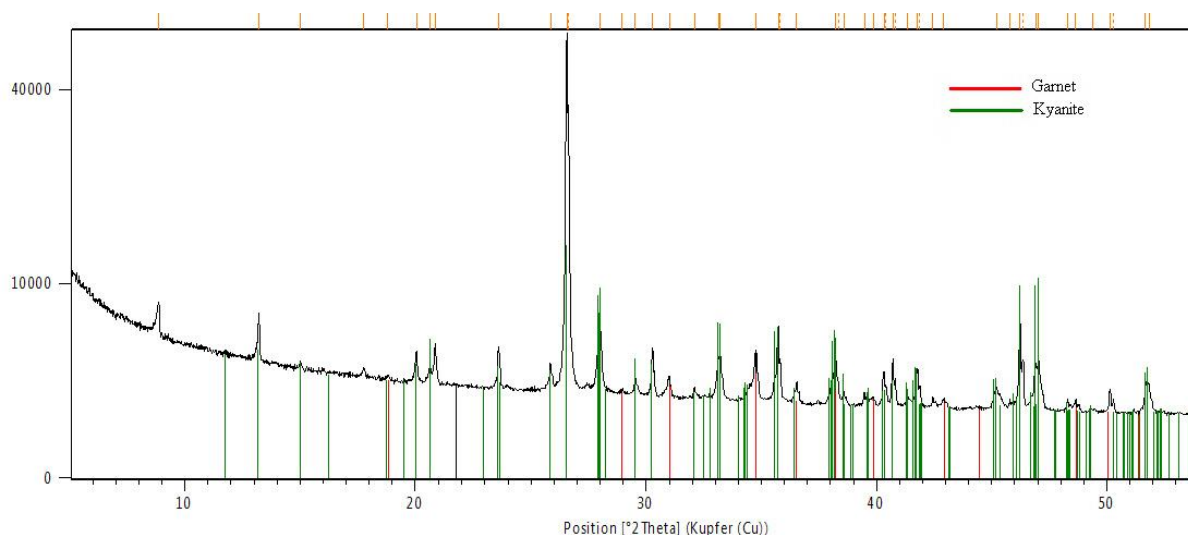


Fig.IV. 67 : diffractogramme de staurotides détritiques à inclusions de grenats.

IV.4. CONCLUSION

Les affleurements rocheux consolidés des zones étudiées sont principalement des micaschistes (micaschistes à grenat, staurotide, disthène ...) on y rencontre également des skarns riches en épidote ainsi que des marbres.

Le sable sombre des trois plages est un sable à caractéristiques granulométriques variées, il est généralement à grain fin, bien classé et homogène.

Le sable sombre est riche en minéraux lourds transparents et sombres tels que : le grenat (de type almandin), la staurotide (riche en Zn et Fe, les tourmalines (schorl et dravite), l'épidote et le disthène. Certains minéraux contiennent des inclusions solides telles que l'ilménite ou le zircon.

La plupart des grains minéraux sont sub-arrondis à arrondis, sont polis et luisants suggérant une abrasion superficielle dans un environnement marin à énergie moyenne à élevée.

CHAPITRE V : SIGNIFICATION DES VARIATIONS CHIMIQUES DES SABLES

V.1. INTRODUCTION

L'étude a pour but de préciser :

la distribution des différents éléments chimiques dans les sables clairs et dans ceux sombres,

les fortes concentrations du sable en certains éléments chimiques.

le lien entre la composition minéralogique et la composition chimique du sable:

Composition minéralogique - Eléments majeurs: Etude simple (graphique) de la distribution des éléments majeurs et de la composition minéralogique modale.

Composition minéralogique - Eléments traces et terres rares

Les calculs statistiques ont été effectués à l'aide du logiciel XLSTAT-PRO 7.5. Deux méthodes ont été utilisées:

Méthodes statistiques simples

Analyses en Composantes Principales (ACP)

Un total de quarante quatre (44) échantillons de sable (zone du Cap de Garde: 18 à Ain Achir et 17 à la Plage-Militaire, zone du Port: 09 à la plage El Nasr) a été prélevé pour analyses chimiques. Les analyses pour les éléments majeurs, traces et les terres rares ont été effectuées sur roche totale.

Les résultats des analyses chimiques (éléments Traces et terres rares) ont été interprétés par l'utilisation de méthodes statistiques: analyses statistiques simples et analyses factorielles (Analyse en Composantes Principales "ACP").

V.2 LA ZONE DU CAP DE GARDE (AIN ACHIR ET PLAGE-MILITAIRE)

V.2.1. Plage d'Ain Achir

La plage d'Ain Achir se caractérise par la présence de sable clair et de sable sombre. Les résultats des analyses sont présentés dans le tableau 1. Ces résultats ont été comparés aux concentrations dans la Croûte Continentale Supérieure (UCC) (Rudnick et Fountain, 1995; Rudnick et Gao, 2005; Samson et Wood, 2005; Castor et Hedrick, 2006) (Tableau 1).

Tableau 1 : Abondance des éléments majeurs (%), traces (ppm) et terres rares (ppm) du sable d'Ain Achir. UCC: Croûte continentale supérieure, Av SC: moyenne chimique du sable Clair; Av SS: moyenne chimique du sable sombre.

	SABLE CLAIR (SC)										SABLE SOMBRE (SS)										UCC
	AA1a	AA1b	AA2b	AA4a	AA4b	AA5a	AA5b	AA5c	AAGa	AVSC	AACa	AA2a	AA2c	AAMa	AAMb	AA3a	AA3b	AA3c	AAGb	AVSS	
SiO ₂	60,5	57,72	59,65	54,15	55,64	53,86	56,19	54,51	50,65	55,87	50,08	59,97	58,36	52,15	35,88	49,42	48,32	46,1	36,77	48,56	66,6
TiO ₂	0,163	0,234	0,122	0,288	0,239	0,272	0,211	0,269	0,361	0,24	0,377	0,125	0,168	0,304	0,977	0,42	0,478	0,497	1,077	0,49	0,64
Al ₂ O ₃	5,44	7,53	4,11	8,99	7,42	8,38	6,77	8,53	10,45	7,51	12,66	3,85	5,62	10,48	27,72	13,48	14,73	16,4	24,38	14,37	15,4
Fe ₂ O ₃	3,1	4,81	1,62	5,62	5,25	4,55	3,83	5,05	7,52	4,59	8,77	1,86	3,02	6,57	28,73	11,44	11,38	13,2	26,29	12,36	5,04
MnO	0,039	0,058	0,026	0,068	0,062	0,06	0,05	0,062	0,087	0,06	0,103	0,028	0,044	0,083	0,286	0,119	0,128	0,138	0,263	0,13	0,1
MgO	1	1,12	1,04	1,3	1,23	1,37	1,23	1,29	1,46	1,23	1,35	1,03	1,16	1,39	1,92	1,27	1,42	1,44	1,86	1,43	2,48
CaO	15,23	14,58	17,13	15,15	15,43	16,19	16,3	15,92	15,06	15,67	13,7	16,94	16,16	14,7	3,44	12,04	12,11	11,44	5,07	11,73	3,59
Na ₂ O	0,07	0,05	0,07	0,14	0,14	0,21	0,07	0,05	0,2	0,11	0,1	0,14	0,02	0,26	0,01	0,06	0,05	0,01	0,05	0,08	3,27
K ₂ O	0,51	0,48	0,55	0,46	0,53	0,49	0,5	0,47	0,37	0,48	0,28	0,63	0,38	0,4	0,07	0,33	0,34	0,25	0,11	0,31	2,8
P ₂ O ₅	0,048	0,059	0,044	0,071	0,058	0,078	0,06	0,071	0,084	0,06	0,072	0,044	0,054	0,07	0,13	0,078	0,082	0,09	0,134	0,08	0,15
LOI	13,69	13,16	15,47	13,5	13,72	14,21	14,58	13,6	13,46	13,93	12,21	15,13	14,86	13,22	0,53	11,04	10,67	10,27	3,73	10,18	
Ba	57	70	66	43	64	52	53	50	61	57,33	60	62	56	60	36	45	49	51	79	55,33	628
Cr	22	33	15	38	32	32	28	34	58	32,44	68	13	25	56	132	58	68	76	132	69,78	92
Ga	10	11	10	14	11	12	10	14	17	12,11	21	10	10	18	43	19	23	24	34	22,44	17,5
Nb	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10,00	10	10	10	10	15	10	10	10	18	11,44	12
Ni	13	10	10	10	10	17	10	13	10	11,44	10	10	10	10	21	12	14	20	11	13,11	47
Sr	458	413	487	451	460	494	477	461	579	475,56	477	489	449	564	57	313	333	332	145	351,00	320
V	23	26	22	38	33	36	26	37	37	30,89	45	16	21	48	101	59	56	58	86	54,44	97
Y	19	23	12	24	25	22	20	24	36	22,78	44	12	17	34	107	46	49	57	120	54,00	21
Zn	68	94	39	121	91	114	86	116	142	96,78	177	35	80	151	394	178	216	236	349	201,78	67
Zr	64	77	47	86	71	84	69	86	151	81,67	157	47	55	133	240	119	129	153	325	150,89	193
La	10,21	12,4	8,8	21,9	13,2	15,2	12,9	15,1	41,1	16,74	21,2	8,5	10,7	17,0	44,0	27,2	23,1	23,8	18,1	21,51	31
Ce	20,379	27,2	17,0	31,2	26,7	29,5	24,6	29,1	83,9	32,17	40,0	16,2	21,2	33,5	89,5	45,8	48,6	55,4	34,5	42,74	63
Pr	1,94095	2,6	1,6	3,0	2,7	2,7	2,6	2,8	9,1	3,22	4,1	1,6	1,9	3,3	9,8	4,6	5,2	5,3	3,1	4,33	7,1
Nd	9,603	12,3	8,3	14,2	12,5	14,3	11,9	13,7	36,4	14,81	17,9	8,1	9,9	15,3	38,6	20,1	21,6	23,4	15,5	18,92	27
Sm	1,902	2,4	1,7	2,9	2,5	2,9	2,5	3,0	7,6	3,03	3,7	1,6	2,0	3,2	8,1	4,1	4,4	4,8	3,3	3,90	4,7
Eu	0,447	0,5	0,4	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	1,1	0,57	0,6	0,4	0,4	0,6	1,2	0,7	0,7	0,8	0,6	0,69	1
Gd	2,085	2,7	1,7	3,1	2,9	3,0	2,6	3,1	9,2	3,38	4,1	1,7	2,1	3,4	10,1	4,8	5,1	5,5	3,6	4,48	4
Tb	0,378	0,5	0,3	0,6	0,5	0,6	0,5	0,9	2,1	0,73	0,9	0,3	0,4	0,8	2,3	1,0	1,1	1,2	0,8	0,97	0,7
Dy	2,49	3,6	1,6	4,0	3,9	3,4	3,0	3,8	15,1	4,54	5,6	1,7	2,4	4,3	17,3	7,6	7,6	8,4	4,7	6,62	3,9
Ho	0,532	0,8	0,3	0,8	0,9	0,7	0,6	0,8	3,4	0,99	1,2	0,4	0,5	0,9	4,0	1,7	1,7	1,9	1,0	1,48	0,83
Er	1,618	2,4	0,9	2,6	2,5	2,2	1,9	2,4	10,6	3,02	3,9	1,0	1,5	2,9	12,5	5,3	5,2	5,9	3,3	4,61	2,3
Tm	0,255	0,4	0,2	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	1,6	0,48	0,6	0,2	0,3	0,5	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,75	0,3
Yb	1,6	2,4	0,9	2,5	2,5	2,1	1,8	2,4	10,3	2,94	3,9	1,0	1,5	2,8	12,1	5,2	5,1	5,8	3,1	4,52	2
Lu	0,23	0,3	0,1	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	1,5	0,42	0,6	0,2	0,2	0,5	1,7	0,7	0,7	0,8	0,5	0,66	0,31
ΣTraces	744	767	718	835	807	873	789	845	1101	831,00	1069	704	733	1084	1146	859	947	1017	1299	984	1495
Σ LREE	44	57	37	73	58	65	54	64	178	70	87	36	46	72	190	102	103	113	74	91	133
Σ HREE	10	14	6	15	15	13	12	14	55	17	21	7	9	17	63	28	28	31	18	25	15
Σ REE	54	71	44	88	72	78	66	78	233	87	108	43	55	89	253	130	131	144	93	116	148

A. Distribution des éléments chimiques

A.1. Les éléments majeurs

L'étude du tableau 1 montre que les concentrations moyennes du sable clair d'Ain Achir en certains éléments majeurs tels que $\text{TiO}_2=0,24\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3=7,51\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=4,59\%$; $\text{MnO}=0,06\%$; $\text{MgO}=1,23\%$ et $\text{P}_2\text{O}_5=0,06\%$ sont inférieures à celles du sable sombre : $\text{TiO}_2=0,49\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3=14,37\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3=12,36\%$; $\text{MnO}=0,13\%$; $\text{MgO}=1,43\%$ et $\text{P}_2\text{O}_5=0,08\%$, alors que les teneurs en $\text{CaO}=15,67\%$; $\text{Na}_2\text{O}=0,11\%$; $\text{K}_2\text{O}=0,48\%$ sont plus élevées que celles rencontrées dans le sable sombre $\text{CaO}=11,73\%$; $\text{Na}_2\text{O}=0,08\%$ et $\text{K}_2\text{O}=0,31\%$ (Fig.V.1).

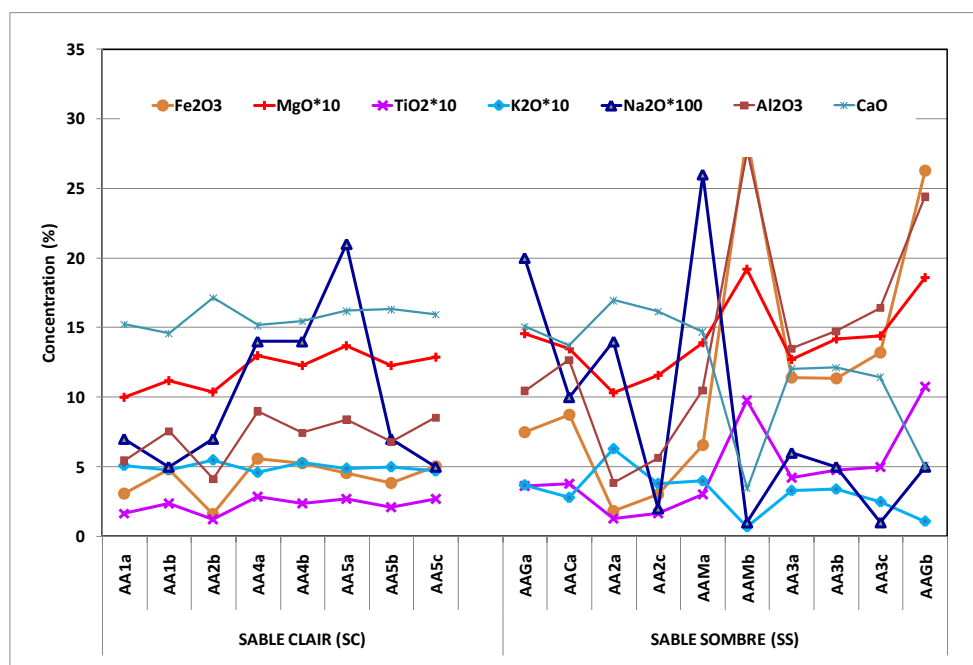


Fig.V. 1 : Abondance et distribution des éléments chimiques majeurs (en %) dans le sable clair et sable sombre de la plage d'Ain Achir.

A. 2. Les éléments traces

Les deux types de sable (clair et sombre) d'Ain Achir se caractérisent par une distribution différente des éléments traces (Fig.V.2). Le sable sombre est en moyenne plus riche en éléments traces (984ppm) que le sable clair (831ppm), cependant ces concentrations sont inférieures à celles de la Croûte Continentale Supérieure (UCC: 1495ppm) (Tab.1).

Dans cette étude les éléments les plus importants ont été retenus: (Cr, Y, Zn, Zr et Sr). La concentration moyenne des sables clairs en Cr (32,44ppm), Y (22,78ppm), Zn (96,78ppm) et Zr (81,67ppm) est inférieure à celle du sable sombre Cr (69,78ppm), Y (54ppm), Zn (201,78ppm), et Zr (150,89ppm).

Le sable clair se caractérise par des valeurs plus élevées en Sr (475,56ppm) que le sable sombre Sr (351ppm).

Comparée à la Croûte Continentale Supérieure (UCC) la teneur en Cr et en Zr des sables clairs (Cr=32,44 ppm, Zr=81,67 ppm) est faible.

Le sable sombre d'Ain Achir se caractérise par des concentrations plus élevées en Cr (69,78ppm), Y (54ppm), Zn (201,78ppm) et Sr (351ppm) que la Croûte Continentale Supérieure (Cr =92ppm), Y =21ppm), Zn =67ppm et Sr =320ppm)

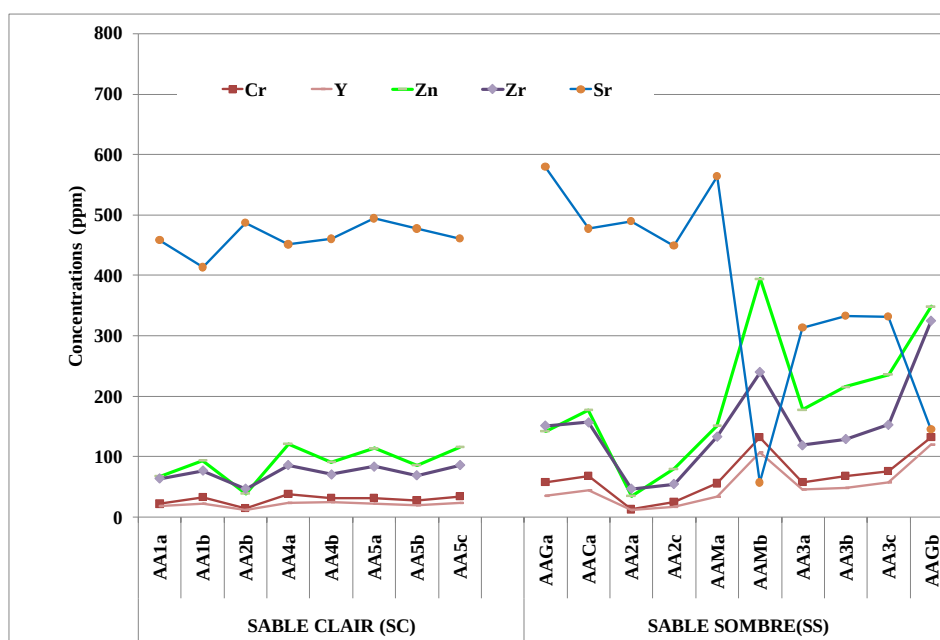


Fig.V. 2 : Abondance et distribution de quelques éléments chimiques traces (ppm) dans le sable clair et celui sombre de la plage d'Ain Achir.

A.3. Les Terres rares

Le sable d'Ain Achir montre des différences significatives dans les concentrations en terres rares (REE) (Fig.V.3). Le total en REE du sable clair est de 87ppm alors que celui du sable sombre est de 116ppm.

Les variations dans la distribution et la teneur en terres rares Légères (LREE) et lourdes (HREE) dans le sable total est également significative. La teneur en LREE (Σ LREE=70-91ppm) est plus élevée que celle des HREE (Σ HREE=17-25ppm).

Le sable sombre est plus riche en LREE et HREE (Σ LREE=91ppm et Σ HREE=25ppm) que le sable clair (Σ LREE=70ppm et Σ HREE=17ppm).

Comparé à la concentration totale en HREE (Σ HREE_{UCC}=15ppm) de la Croûte Continentale Supérieure (UCC) (Rudnick et Fountain, 1995; Rudnick et Gao, 2005; Samson et Wood, 2005; Castor et Hedrick, 2006), la valeur totale en HREE (Σ HREE=25ppm) du sable noir est remarquablement élevée.

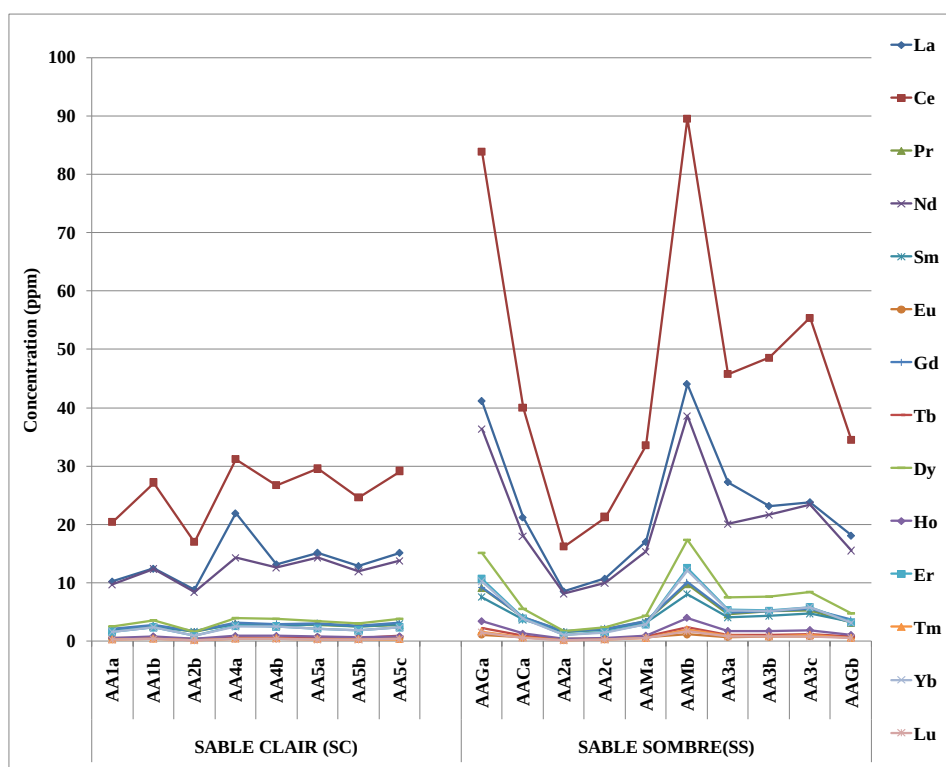


Fig.V. 3 : Abondance et distribution des terres rares (ppm) dans le sable clair et celui sombre de la plage d'Ain Achir.

B. Relation entre composition minéralogique et chimique

B.1. Relation entre composition minéralogique - éléments majeurs:

Le sable d'Ain Achir se caractérise par sa variété minéralogique. On y distingue des minéraux clairs légers et des minéraux sombres lourds.

La composition modale moyenne du sable clair est différente de celle du sable sombre (Tab.2). La distribution des minéraux lourds dans le sable d'Ain Achir est montrée dans la figure 4.

Le sable clair se compose en moyenne de 40% de minéraux sombres lourds: grenat (8%), staurotide (20%), tourmaline (5%), disthène (4%) et épidote (2%).

Le sable sombre est plus riche en minéraux lourds, en moyenne 77%. La composition modale du cortège minéral du sable sombre est comme suit: grenat (20%), staurotide (45%), tourmaline (9%), disthène (2%) et épidote (2%).

Tableau 2. Composition minéralogique moyenne (%) du sable clair et sable sombre de la plage d'Ain Achir. Grt :grenat, St :staurotide, Ky :disthène, Tur, tourmaline, Ep : épidote, Qz : quartz, Cal : calcite, HM : minéraux sombres, LM : minéraux clairs

		Echantillon	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal	ΣHM%	ΣLM%
AIN ACHIR	SABLE CLAIR (LS)	AA1a	4	10	4	8	9	7	57	36	64
		AA1b	7	36	5	4	0	10	38	52	48
		AA2b	5	10	4	4	3	14	59	27	73
		AA4a	10	31	4	5	1	10	37	52	48
		AA4b	6	26	3	1	2	18	43	39	61
		AA5a	11	25	6	7	0	11	41	48	52
		AA5b	7	10	10	7	0	11	54	35	65
		AA5c	11	9	2	4	0	20	54	26	74
		AAGa	13	24	2	8	2	16	35	49	51
	SABLE SOMBRE (DS)	AACa	25	43	0	16	5	2	9	89	11
		AA2a	17	48	1	6	3	2	23	75	25
		AA2c	15	33	5	15	3	8	21	70	30
		AAMa	15	44	1	6	0	10	24	66	34
		AAMb	23	67	0	3	2	1	3	96	4
		AA3a	11	43	0	8	3	8	28	64	36
		AA3b	18	40	1	6	0	9	26	65	35
		AA3c	13	44	6	9	0	6	22	72	28
		AAGb	39	40	0	15	1	0	5	95	5
	Moyenne %HM LS		8	20	4	5	2	13	47	40	60
	Moyenne %HM DS		20	45	2	9	2	5	18	77	23

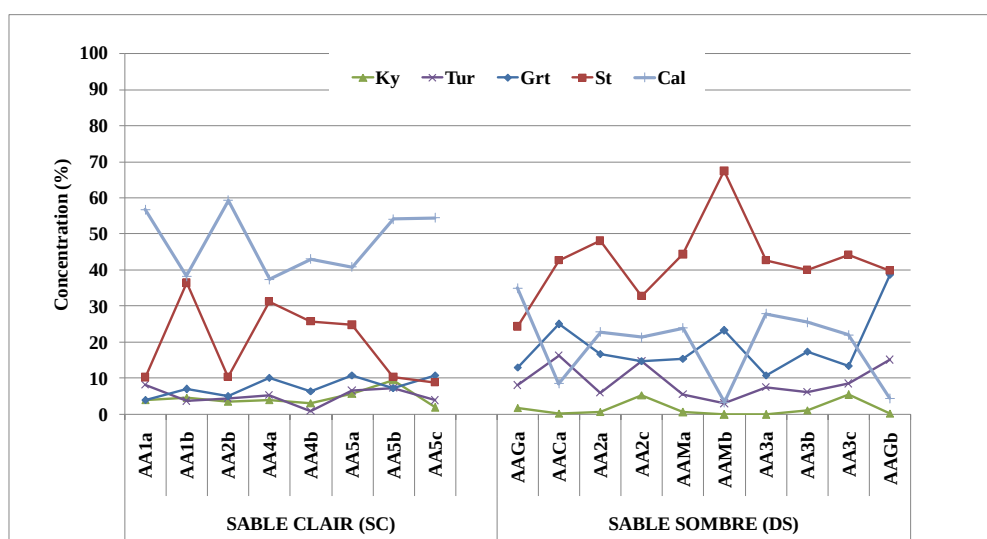


Fig.V. 4 : Distribution des minéraux lourds (%) dans le sable clair et sable sombre de la plage d'Ain Achir.

La figure 5 montre que la distribution des éléments majeurs est analogue à la distribution des minéraux lourds.

Le sable clair: se caractérise par des concentrations élevées en carbonates et en minéraux argileux.

Les fortes concentrations en CaO sont attribuables à la présence d'une forte concentration modale en carbonates.

les valeurs élevées en K₂O et Na₂O reflètent la présence de minéraux argileux.

Le sable sombre: se caractérise par des concentrations modales élevées en ferromagnésiens.

Les valeurs élevées en Fe_2O_3 et MgO reflètent les fortes concentrations modales du sable en grenat, staurotide et en tourmaline

Les teneurs élevées en TiO_2 traduisent la présence de l'ilménite sous forme d'inclusions dans les grenats.

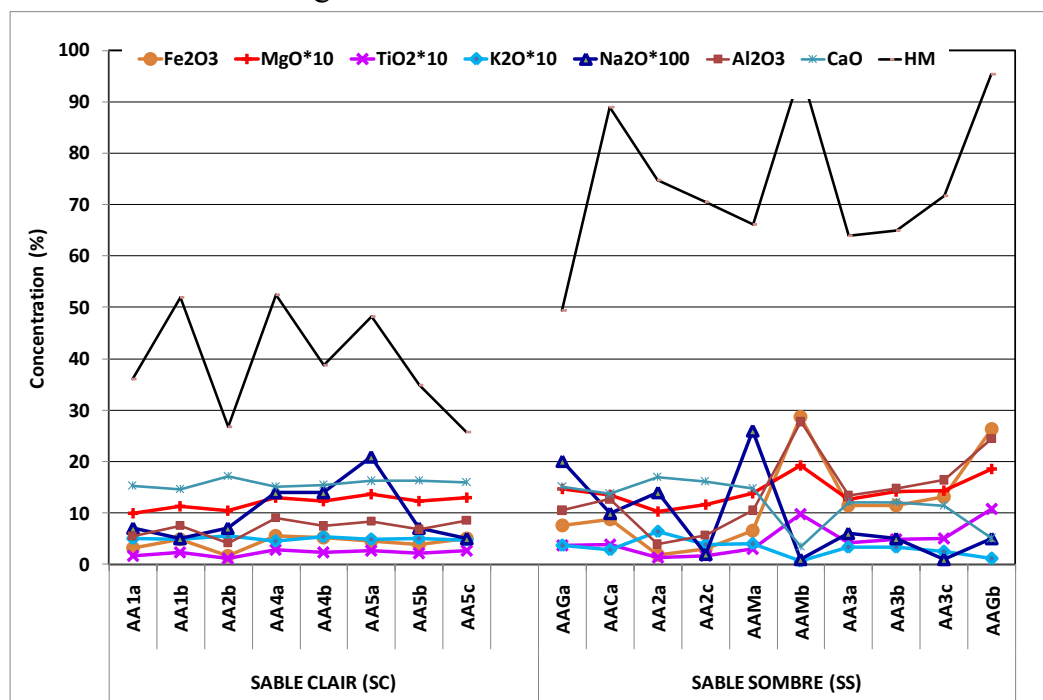


Fig.V. 5 : Variations des minéraux lourds (HM) et les éléments majeurs dans le sable d'Ain Achir.

B.2. Relation entre composition minéralogique - Eléments traces et Terres rares :

B.2.1. Méthodes statistiques simples

Dans notre étude nous nous sommes limités à la détermination de l'existence ou l'absence de relation entre la concentration modale en minéraux lourds et les éléments chimiques (Traces et REE). Cette relation a été déterminée par le calcul du coefficient de corrélation (Tab.3).

Tableau 3. Matrice de corrélation simple entre la composition minéralogique, les éléments traces et les terres rares, Ep: épidote, Grt: grenat, Ky: disthène, St: staurotide, Tur: tourmaline, Qz: quartz, Cal: Calcite

Variables	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal
Grt	1,00						
St	0,60	1,00					
Ky	-0,56	-0,56	1,00				
Tur	0,59	0,11	-0,07	1,00			
Ep	-0,10	-0,16	-0,16	0,27	1,00		
Qz	-0,69	-0,70	0,31	-0,53	-0,26	1,00	
Cal	-0,85	-0,90	0,57	-0,48	0,10	0,76	1,00
Ba	0,23	-0,23	0,04	0,32	0,04	-0,15	0,06
Cr	0,68	0,54	-0,45	0,18	0,06	-0,57	-0,61
Ga	0,62	0,59	-0,45	0,09	0,07	-0,58	-0,61
Nb	0,79	0,40	-0,37	0,26	-0,03	-0,56	-0,57
Ni	0,19	0,46	0,13	-0,06	-0,25	-0,40	-0,36
Sr	-0,64	-0,63	0,39	-0,11	0,04	0,64	0,64
V	0,64	0,61	-0,45	0,11	-0,02	-0,57	-0,64
Y	0,73	0,53	-0,43	0,21	0,01	-0,60	-0,63
Zn	0,66	0,58	-0,42	0,16	0,02	-0,58	-0,64
Zr	0,72	0,42	-0,43	0,27	0,08	-0,54	-0,57
La	0,22	0,40	-0,38	-0,12	0,08	-0,14	-0,35
Ce	0,26	0,44	-0,34	-0,08	0,03	-0,20	-0,39
Pr	0,23	0,42	-0,35	-0,11	0,03	-0,17	-0,36
Nd	0,25	0,42	-0,34	-0,08	0,02	-0,19	-0,38
Sm	0,27	0,42	-0,35	-0,06	0,04	-0,20	-0,39
Eu	0,29	0,45	-0,31	-0,06	0,00	-0,23	-0,41
Gd	0,26	0,44	-0,35	-0,08	0,02	-0,20	-0,39
Tb	0,31	0,45	-0,39	-0,02	0,06	-0,24	-0,43
Dy	0,26	0,46	-0,36	-0,10	0,02	-0,21	-0,40
Ho	0,25	0,47	-0,36	-0,11	0,02	-0,21	-0,40
Er	0,26	0,47	-0,37	-0,10	0,03	-0,22	-0,40
Tm	0,25	0,48	-0,35	-0,11	0,01	-0,22	-0,40
Yb	0,25	0,47	-0,37	-0,11	0,03	-0,22	-0,40
Lu	0,28	0,48	-0,39	-0,09	0,02	-0,23	-0,42

L'analyse du tableau 3 montre que les éléments traces tels que le Cr, Ni, V, Y, Zn et Zr sont positivement corrélés au grenat ($r_{Cr}=0,68$, $r_{Ni}=0,19$, $r_V=0,64$, $r_Y=0,73$, $r_{Zn}=0,66$, and $r_{Zr}=0,72$) et à la staurotide ($r_{Cr}=0,54$, $r_{Ni}=0,46$, $r_V=0,61$, $r_Y=0,53$, $r_{Zn}=0,58$ et $r_{Zr}=0,42$).

Les fortes corrélations du chrome et du vanadium avec le grenat et la staurotide (grenat: $r_{Cr}=0,68$, $r_V=0,64$ (Fig.V.6a, 6b); staurotide: $r_{Cr}=0,54$, $r_V=0,61$ (Fig.V.6c, 6d)) suggèrent la présence de minéraux mafiques en inclusions dans ces minéraux.

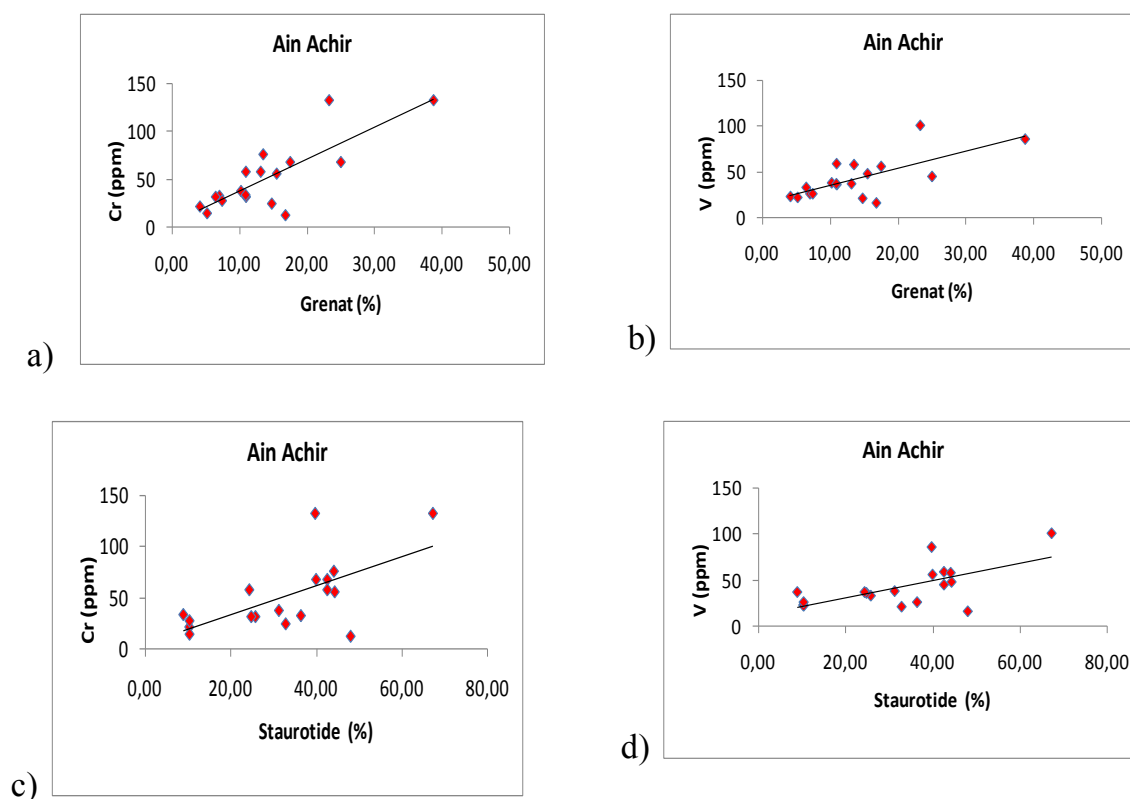


Fig.V. 6 : Diagrammes de corrélations du : a) grenat avec le chrome; b) du grenat avec le vanadium; c) de la staurotide avec le chrome; d) de la staurotide avec le vanadium.

La staurotide et le grenat sont souvent porteuses de quantités significatives de zinc (Droop, 1987). La corrélation significative entre Zn et le grenat ($r=0,66$) (Fig.V.7a) et entre Zn et la staurotide ($r=0,58$) (Fig.V.7b) suggère l'influence de ces minéraux sur la teneur en Zn du sable.

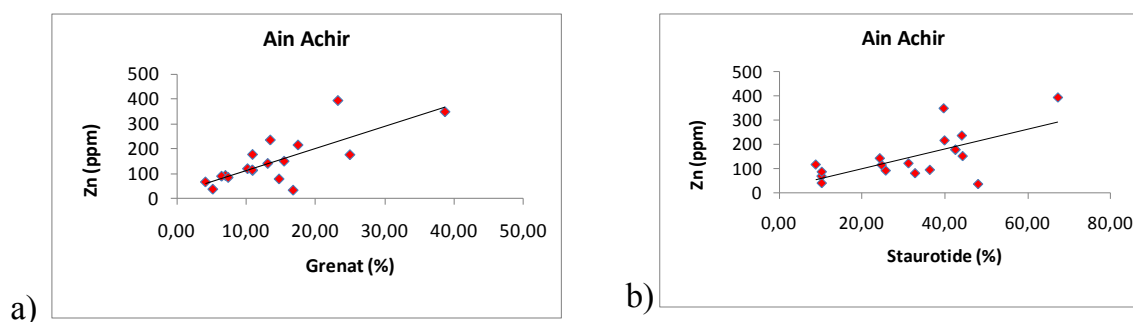


Fig.V. 7 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le zinc et le grenat; b) le zinc et la staurotide

Il existe une forte corrélation entre Zr et le grenat ($r=0,72$) (Fig.V.8a) et entre Zr et la staurotide (Fig.V.8b) ce qui confirme la présence d'inclusions de zircon dans ces minéraux.

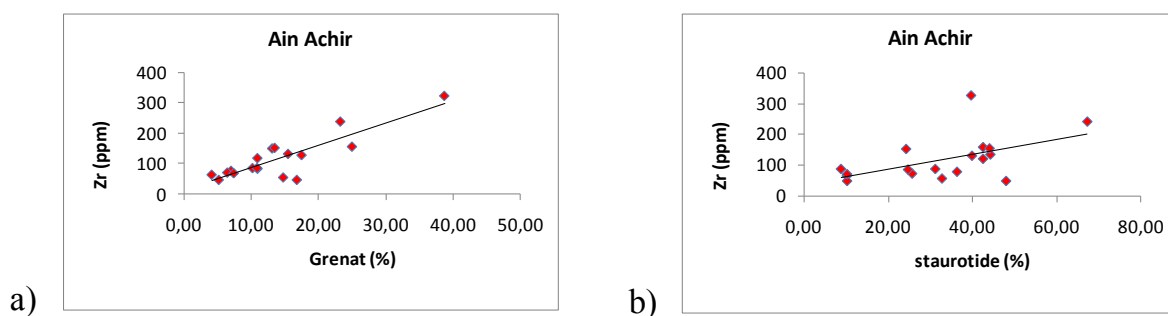


Fig.V. 8 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le zirconium et le grenat; b) le zirconium et la staurotide

Le strontium est fortement corrélé à la calcite et au quartz. La corrélation du strontium avec la calcite ($r=0,64$) (Fig.V.9a) s'explique par la similitude des caractéristique chimiques du Sr et du Ca. Ces deux éléments chimiques peuvent se substituer l'un par rapport à l'autre dans le réseau cristallin.

La corrélation positive de Sr avec le quartz ($r=0,64$) (Fig.V.9b) reflète la nature du quartz. Monecke et al, 2002 montrent que certains éléments traces du quartz hydrothermal et métamorphique sont plus élevés que ceux du quartz magmatique.

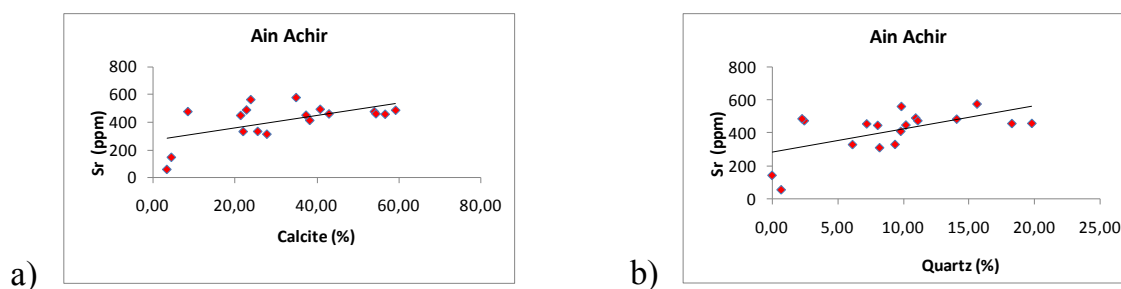


Fig.V. 9 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le strontium et la calcite; b) le strontium et le quartz.

La forte corrélation positive de l'yttrium avec le grenat: $r=0,73$ (Fig.V.10a) et la staurotide: $r=0,53$ (Fig.V.10b) indique l'influence de ces minéraux sur la teneur totale du sable en cet élément chimique.

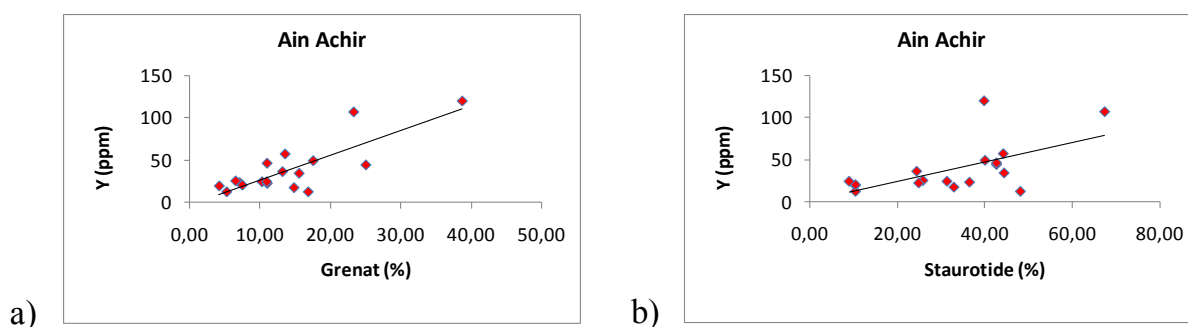


Fig.V. 10 : Diagramme montrant la corrélation positive entre l'yttrium et: a) le grenat; b) la staurotide

Il existe une forte corrélation entre le grenat et les terres rares (Fig.V.11a) et la staurotide et les terres rares (Fig.V.11b), ce qui suggère que les REE sont principalement hébergées dans les minéraux lourds tels que le grenat et la staurotide.

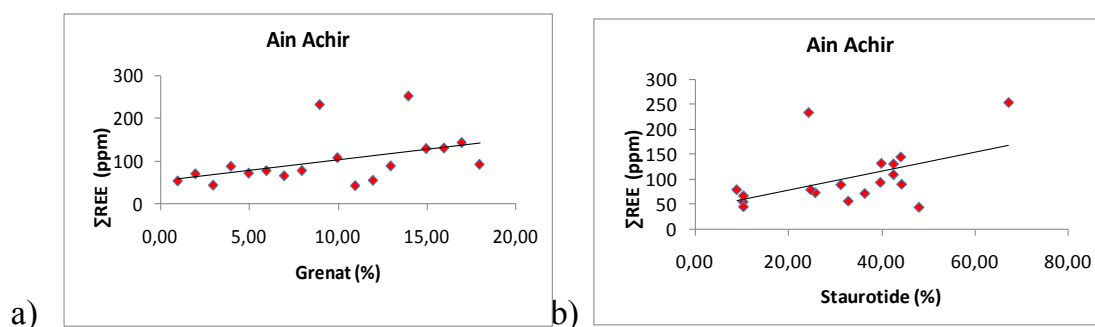


Fig.V. 11 : Diagrammes montrant une forte corrélation entre les terres rares et: a) les grenats, b) les staurotides

La figure 12 montre une distribution dispersée du nuage de points, suggérant que la corrélation entre la tourmaline (Fig.V.12a), le disthène (Fig.V.12b), l'épidote (Fig.V.12c) et le quartz d'une part (Fig.V.12e) et les terres rares d'autre part, n'est pas significative.

Par contre on constate une corrélation négative des terres rares avec la calcite (Fig.V.12e).

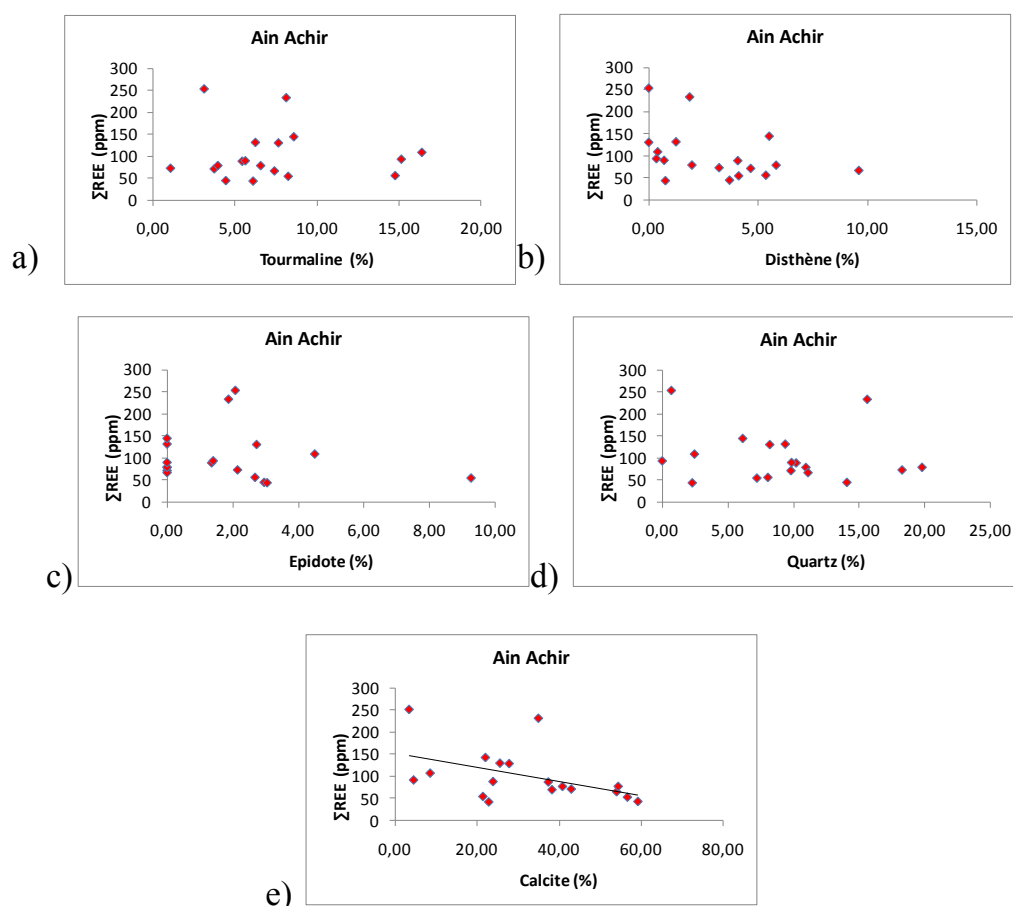


Fig.V. 12 : Diagrammes montrant l'absence de corrélation significative entre les terres rares et : a) la tourmaline; b) le disthène; c) l'épidote et le quartz et une corrélation négative avec : e) la calcite.

B.2.2. Analyses en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique qui aide à identifier les paramètres contrôlant le comportement des éléments chimiques et à interpréter la relation entre les données minérales et chimiques (Pirkle et al. 1985, Svendsen 2002).

La matrice de variabilité (minéraux lourds sombres: grenat, staurotide, disthène, tourmaline et épidote, des minéraux clairs légers :calcite, quartz, éléments traces et REE pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3 et F4) du sable de la plage d'Ain Achir est présentée dans le tableau 4.Ce tableau montre que les deux premiers facteurs (F1 + F2) représentent à eux seuls 79,56% de la variance totale, par conséquent, dans cette étude, seuls ces deux premiers facteurs ont été décrits. Le tableau 4 montre également que le facteur 1 (F1) représente 62,70% et F2 16,86% de la variance totale.

Tableau 4. Matrice de variabilité des minéraux, traces et terres rares pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3 et F4).

	F1	F2	F3	F4
Variabilité (%)	62.70	16.86	5.44	4.75
Grt	0.11	0.33	-0.10	0.14
St	0.14	0.16	0.18	0.49
Ky	-0.10	-0.12	0.27	-0.27
Tur	0.01	0.25	-0.32	0.20
Ep	0.00	0.01	-0.48	-0.05
Qz	-0.10	-0.30	0.02	-0.25
Cal	-0.13	-0.25	-0.02	-0.43
Ba	-0.08	0.20	-0.38	-0.20
Cr	0.20	0.17	0.00	-0.21
Ga	0.20	0.15	0.08	-0.16
Nb	0.13	0.30	0.01	-0.28
Ni	0.14	-0.01	0.50	0.06
Sr	-0.15	-0.23	-0.25	0.07
V	0.20	0.16	0.13	-0.14
Y	0.18	0.22	0.04	-0.23
Zn	0.20	0.17	0.09	-0.16
Zr	0.18	0.21	-0.10	-0.28
La	0.21	-0.14	-0.07	-0.02
Ce	0.21	-0.14	-0.06	0.01
Pr	0.21	-0.15	-0.07	0.01
Nd	0.21	-0.14	-0.06	0.01
Sm	0.21	-0.13	-0.07	0.01
Eu	0.22	-0.12	-0.02	-0.01
Gd	0.21	-0.14	-0.06	0.01
Tb	0.21	-0.12	-0.10	0.05
Dy	0.21	-0.14	-0.05	0.03
Ho	0.21	-0.14	-0.05	0.03
Er	0.21	-0.13	-0.05	0.03
Tm	0.21	-0.13	-0.03	0.02
Yb	0.21	-0.13	-0.05	0.03
Lu	0.22	-0.12	-0.06	0.03

La figure 13 du cercle de corrélation nous permet de distinguer deux groupes: (i) un groupe composé de minéraux lourds (grenat, staurotide et tourmaline) et les éléments traces (sauf Sr et les REE) sur le côté positif des axes F1 et F2 et (ii) un deuxième groupe (disthène, calcite, quartz et Sr) qui se projette dans le champ négatif.

Le cercle de corrélation (Fig.V.13) montre que le facteur (F1) se caractérise par une charge élevée en staurotide et en grenat. Tous les éléments traces (à l'exception de Ba et Sr) et les terres rares (REE) se projettent dans le champ positif du cercle de corrélation alors que le disthène, la calcite, le quartz, Sr et Ba dans celui négatif (Fig.V.13).

Les éléments traces et les minéraux lourds (grenat, staurotide) sont fortement associés à F1. Le facteur F1 peut être interprété comme représentant les minéraux riches Fe et Mg (minéraux ferromagnésiens).

Le facteur 2 explique environ 16,86% de la variance et se caractérise par le chargement élevé en tourmaline et en Ba dans le champ positif et en disthène, calcite, quartz, Sr, Ni et REE dans le champ négatif du cercle de corrélation. Cette disposition nous permet d'interpréter le facteur 2 (F2) comme représentant les minéraux non ferromagnésien.

Le cercle de corrélation confirme la forte relation entre le grenat, la staurotide, les éléments traces (sans Sr) et les terres rares. Il confirme également la forte relation entre le strontium (Sr) et les minéraux légers clairs tels que la calcite et le quartz.

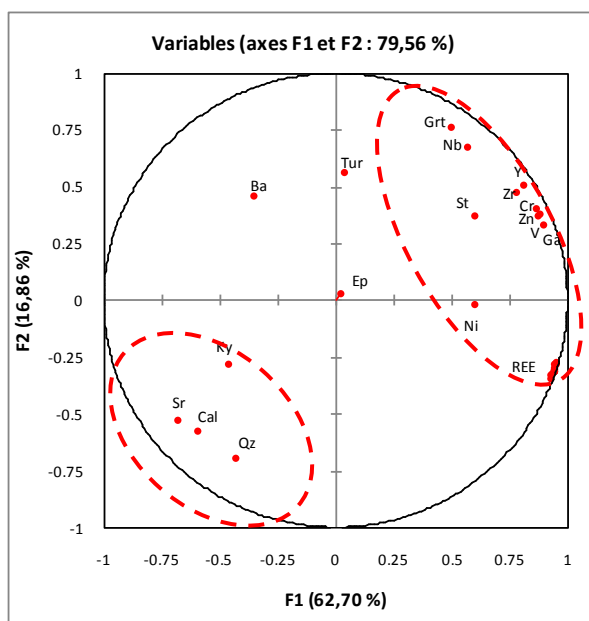


Fig.V. 13 : Cercle de corrélation (ACP) des minéraux lourds, des éléments traces et des Terres Rare du sable de la plage d'Ain Achir

V.2.2. Plage-Militaire

A la différence de la plage voisine d'Ain Achir, la Plage-Militaire est composée presque exclusivement de sable sombre. Les résultats des analyses chimiques effectuées sur ce sable ainsi que la composition chimique de la Croûte Continentale Supérieure (UCC) (Rudnick et Fountain, 1995; Rudnick et Gao, 2005; Samson et Wood, 2005; Castor et Hedrick, 2006) sont représentés dans le tableau 5.

Tableau 5. Abondance des éléments majeurs, traces et terres rares du sable de la Plage-Militaire. UCC: Croûte Continentale supérieure, Av SS: moyenne chimique du sable sombre.

	Pms6a	Pms1a	Pms2a	Pms3a	Pms4a	Pms5a	Pms1b	Pms2b	Pms3b	Pms4b	Pms5b	Pms6b	Pms1C	Pms2c	Pms3c	Pms5c	Pms6c	UCC
SiO ₂	34,3	33,4	34,3	32,62	36,54	47,08	41,53	34,95	34,5	40,68	38,87	37,31	34,62	33,71	34,69	35,41	35,31	66,6
TiO ₂	0,887	0,792	0,878	0,84	0,796	0,457	0,715	0,841	0,871	0,673	0,758	0,806	0,881	0,795	0,872	0,879	0,91	0,64
Al ₂ O ₃	28,85	25,77	28,41	24,71	25,42	15,27	23,39	26,88	28,11	22,33	24,02	25,05	28,6	25,44	27,83	26,53	26,27	15,4
Fe ₂ O ₃	26,83	30,73	30,2	34,81	26,13	11,4	19,16	27,63	29,26	19,23	21,96	22,94	28,18	30,01	29,69	27,65	27,5	5,04
MnO	0,29	0,281	0,324	0,295	0,282	0,135	0,21	0,278	0,314	0,225	0,24	0,248	0,301	0,271	0,317	0,29	0,285	0,1
MgO	1,77	1,68	1,87	1,76	1,69	1,3	1,62	1,71	1,86	1,51	1,64	1,68	1,82	1,68	1,86	1,81	1,84	2,48
CaO	3,73	4,01	2,4	2,91	4,99	12,65	10,48	4,22	2,83	8,08	6,74	6,48	3,13	4,47	2,74	4,22	4,34	3,59
Na ₂ O	0,05	0,1	0,01	0,01	0,03	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	3,27
K ₂ O	0,07	0,07	0,05	0,05	0,1	0,3	0,17	0,08	0,05	0,17	0,13	0,11	0,06	0,08	0,06	0,08	0,08	2,8
P ₂ O ₅	0,104	0,099	0,111	0,103	0,1	0,063	0,091	0,103	0,111	0,083	0,094	0,093	0,106	0,097	0,108	0,107	0,107	0,15
LOI	11,3	2,85	2,96	1,26	1,61	3,72	2,43	3,16	1,84	6,79	5,21	5,05	1,98	3,28	1,64	2,88	3,13	
Ba	51	42	32	13	30	44	39	34	50	34	52	22	33	40	33	23	46	628
Cr	125	113	125	111	112	67	104	116	123	95	104	109	122	112	121	114	55	92
Ga	44	39	44	36	38	22	35	43	39	33	38	38	42	42	39	36	117	17,5
Nb	12	11	10	10	9	9	10	10	9	10	10	11	9	10	9	10	38	12
Ni	16	15	17	18	17	12	15	18	19	16	18	14	17	15	22	13	13	47
Sr	60	71	19	41	92	307	235	78	30	174	145	133	41	85	28	69	24	320
V	96	91	97	86	88	53	77	94	95	76	79	93	98	88	94	96	74	97
Y	110	117	135	134	115	53	75	113	128	90	96	96	119	116	129	119	101	21
Zn	437	410	410	367	377	234	359	418	402	331	358	379	435	399	397	377	115	67
Zr	235	226	230	229	209	132	196	227	232	183	199	201	232	228	225	217	382	193
La	42,0	41,1	42,9	46,0	40,9	24,1	33,0	40,3	44,3	34,6	36,3	36,8	41,7	42,4	42,2	41,0	41,1	31
Ce	84,0	84,1	87,2	93,3	82,6	47,4	65,8	80,9	90,1	69,7	72,1	74,4	84,4	85,5	85,1	83,4	82,3	63
Pr	9,2	9,1	9,6	10,2	8,9	5,1	7,2	8,8	9,9	7,5	8,0	8,0	9,2	9,4	9,4	9,1	9,1	7,1
Nd	36,5	36,5	37,8	40,3	36,0	21,2	29,1	35,3	39,4	30,6	31,6	32,8	36,5	37,4	37,0	36,1	36,1	27
Sm	7,6	7,7	8,1	8,5	7,6	4,3	6,0	7,4	8,4	6,4	6,6	6,8	7,7	7,9	7,8	7,7	7,6	4,7
Eu	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	0,7	0,9	1,2	1,3	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2	1
Gd	9,5	9,8	10,9	11,1	9,7	4,9	6,9	9,5	11,0	7,8	8,2	8,6	9,9	9,8	10,4	9,9	9,8	4
Tb	2,0	2,2	2,6	2,6	2,3	1,0	1,5	2,1	2,6	1,8	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4	2,3	2,2	0,7
Dy	16,4	17,9	21,0	21,1	18,2	7,5	11,2	16,9	21,0	13,9	14,2	15,5	17,7	17,8	19,5	18,4	17,7	3,9
Ho	3,7	4,1	4,9	4,9	4,2	1,7	2,6	3,9	4,9	3,2	3,3	3,6	4,1	4,1	4,5	4,3	4,0	0,83
Er	11,8	13,2	15,4	15,4	13,4	5,4	8,0	12,2	15,5	10,3	10,3	11,3	13,0	12,9	14,2	13,5	12,7	2,3
Tm	1,9	2,0	2,4	2,3	2,0	0,8	1,2	1,9	2,4	1,6	1,6	1,7	2,0	2,0	2,2	2,1	2,0	0,3
Yb	11,6	12,8	15,0	14,6	13,0	5,3	7,8	12,0	14,9	9,9	10,0	10,9	12,7	12,4	13,9	12,9	12,3	2
Lu	1,6	1,8	2,1	2,0	1,8	0,7	1,1	1,7	2,1	1,4	1,4	1,5	1,8	1,7	2,0	1,8	1,7	0,31
ΣTraces	1186	1135	1119	1045	1087	933	1145	1151	1127	1042	1099	1096	1148	1135	1097	1074	965	1495
Σ LREE	179	178	186	198	176	102	141	173	192	149	154	159	179	183	181	177	176	133
Σ HREE	60	65	75	75	66	28	41	61	76	51	52	56	65	64	70	66	64	15
Σ REE	239	244	261	274	242	130	182	234	268	200	206	215	244	247	252	243	240	148

A. Distribution des éléments chimiques

A.1. Les éléments majeurs

Le tableau 5 montre que les concentrations moyennes du sable sombre en TiO_2 (0,80%), Al_2O_3 (25,46%), Fe_2O_3 (26,08%), MnO (0,27%), MgO (1,71%) et en P_2O_5 (0,10 %) sont plus élevées que celle de la Croûte continentale Supérieure (UCC) (Rudnick et Fountain, 1995; Rudnick et Gao, 2005; Samson et Wood, 2005; Castor et Hedrick, 2006).

Les teneurs en CaO (5,20 %), Na_2O (0,03%) et K_2O (0,10%) sont inférieures aux teneurs en ces éléments dans l'UCC CaO (11,73%), Na_2O (0,08%) et K_2O (0,31%) (Fig.V.14).

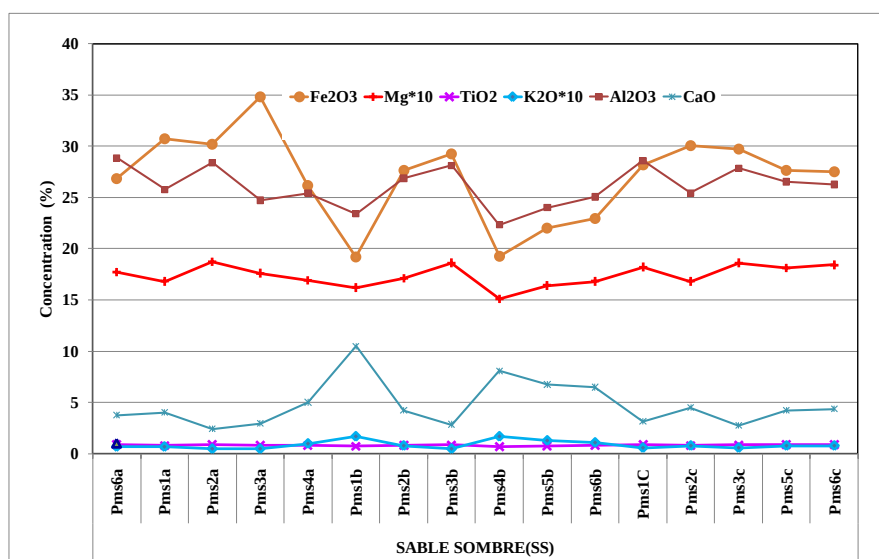


Fig.V. 14 : Abondance et distribution des éléments chimiques majeurs dans le sable sombre de la Plage-Militaire.

A.2. Les éléments traces

La distribution des éléments traces dans le sable sombre de la Plage-militaire est relativement homogène (Fig.V.15). Le sable sombre de la Plage-Militaire est en moyenne plus pauvre en éléments traces (1093 ppm) que Croûte Continentale Supérieure (UCC: 1495ppm) (Tab.5).

Comparée à la Croûte Continentale Supérieure (UCC, Cr =92ppm, Y =21ppm, Zn =67ppm et Zr =193ppm), la concentration moyenne du sable sombre en ces éléments traces est plus élevée. Le sable de la Plage-Militaire est aussi plus riche en strontium (Sr =96 ppm) que la Croûte Continentale Supérieure (32 ppm).

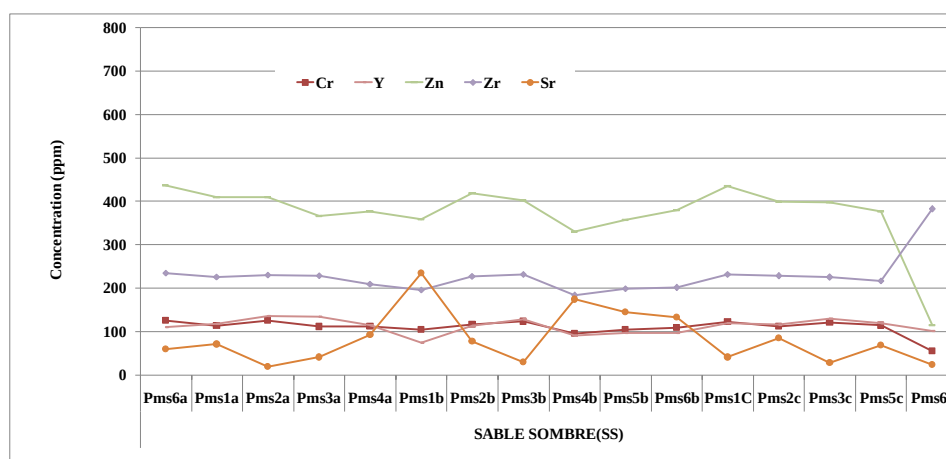


Fig.V. 15 : Abondance et distribution de quelques éléments chimiques en traces dans le sable sombre de la Plage-Militaire.

A.3. Les terres rares

Le sable sombre de la Plage-Militaire se caractérise par une distribution assez homogène dans les concentrations en terres rares (REE) (Fig.V.16). Le total en REE du sable sombre est de 240ppm.

Les échantillons les plus riches en minéraux lourds sont les plus riches en REE. Le sable sombre est plus riche en LREE et HREE ($\Sigma\text{LREE}=169,69\text{ppm}$ et $\Sigma\text{HREE}=64\text{ppm}$) que la concentration totale en HREE ($\Sigma\text{LREE}_{\text{UCC}}=133\text{ ppm}$, $\Sigma\text{HREE}_{\text{UCC}}=15\text{ppm}$) de la Croûte Continentale Supérieure (UCC) (Rudnick et Fountain, 1995; Rudnick et Gao, 2005; Samson et Wood, 2005; Castor et Hedrick, 2006).

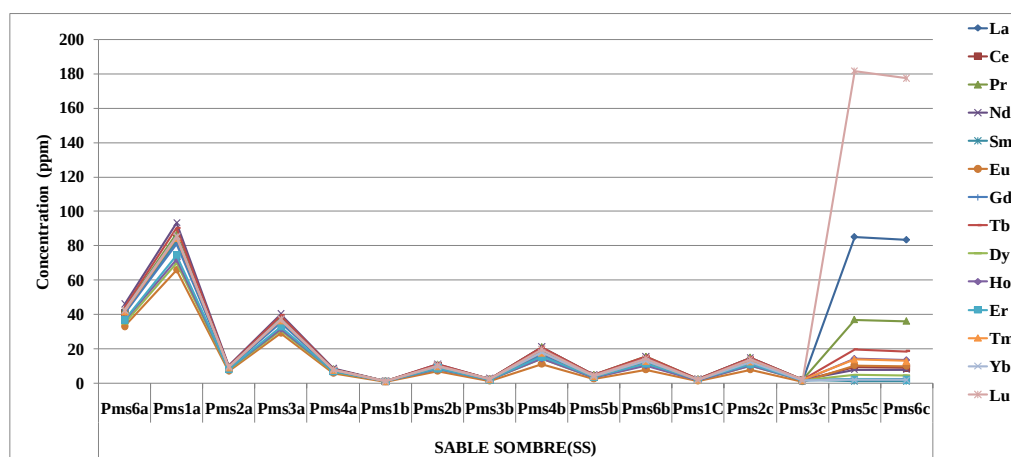


Fig.V. 16 : Abondance et distribution des terres rares dans le sable sombre de la Plage-Militaire.

B. Relation entre composition minéralogique et chimique

B.1. Relation entre composition minéralogique - éléments majeurs:

Le sable de la Plage-Militaire montre une variété dans la proportion en minéraux lourds sombres.

La composition modale moyenne du sable sombre est présentée dans le tableau 6. La distribution des minéraux lourds dans le sable sombre est montrée dans la figure 17.

Le sable de la plage Militaire se compose à 93% de minéraux lourds sombres. La composition modale moyenne des différents minéraux lourds est comme suit: grenat (30%), staurotide (47%), tourmaline (13%), disthène (2%) et épidote (1%).

Tableau 6. Composition minéralogique moyenne du sable sombre de la Plage-Militaire Grt : grenat, St : staurotide, Ky : disthène, Tur, tourmaline, Ep : épidote, Qz : quartz, cal : calcite, HM : minéraux sombres, LM : minéraux clairs

		Samples	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal	ΣHM%	ΣLM%
		Pms6a	9	25	5	15	5	6	34	60	40
PLAGE MILITAIRE	SABLE SOMBRE(SS)	Pms1a	28	38	3	19	4	3	5	92	8
		Pms2a	32	46	1	11	2	1	8	91	9
		Pms3a	38	50	2	2	1	1	5	94	6
		Pms4a	39	45	2	6	1	2	4	94	6
		Pms1b	9	44	1	24	4	1	15	83	17
		Pms2b	37	41	2	15	1	0	3	96	4
		Pms3b	29	50	1	15	1	2	3	95	5
		Pms4b	14	53	2	16	1	1	13	86	14
		Pms5b	35	48	0	10	0	4	4	92	8
		Pms6b	19	46	0	21	2	1	12	88	13
		Pms1C	32	55	1	7	1	0	3	97	3
		Pms2c	35	41	1	17	0	1	5	94	6
		Pms3c	33	52	4	6	0	1	3	95	5
		Pms5c	29	52	2	11	0	1	5	93	7
		Pms6c	46	39	1	10	2	0	2	98	2
	MOYENNE %HM DS		30	47	2	13	1	1	6	93	7

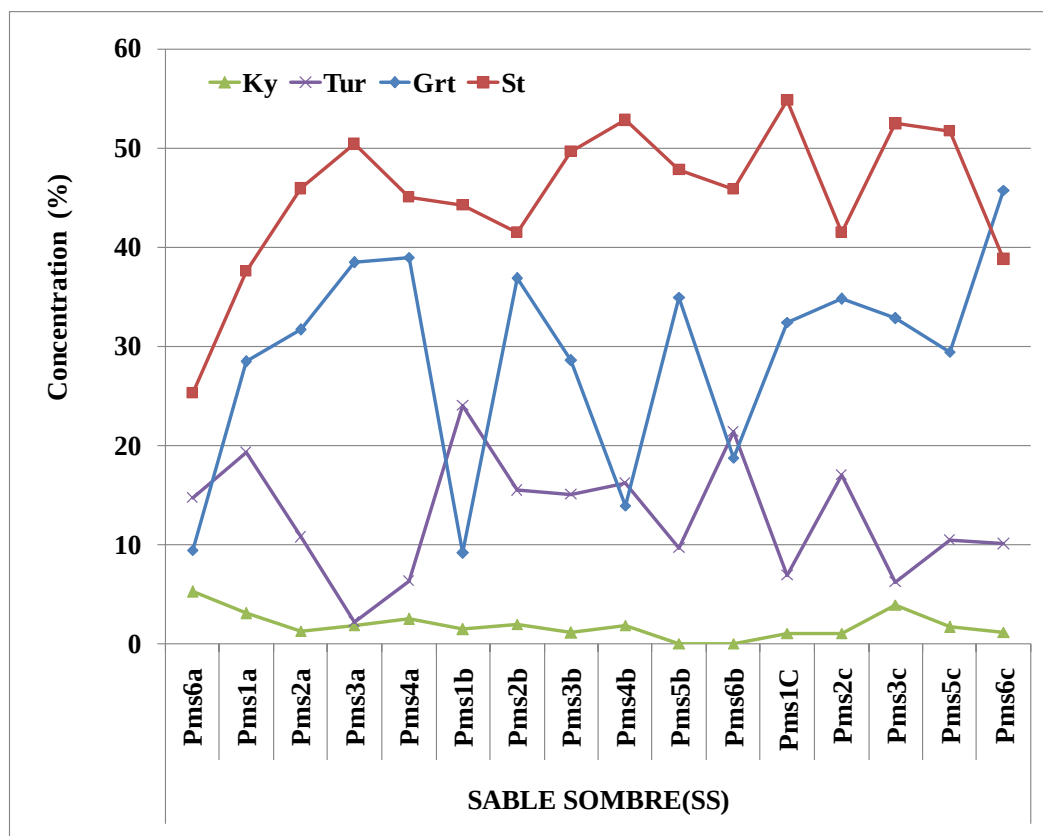


Fig.V. 17 : Distribution des minéraux lourds dans le sable sombre de la Plage-Militaire.

La figure 18 montre que la distribution des éléments majeurs suit celle des minéraux lourds. Le sable sombre de la Plage Militaire se caractérise par une forte concentration en minéraux ferromagnésiens.

Les valeurs élevées en Fe_2O_3 et MgO traduisent les fortes concentrations du sable en grenat, staurolite, tourmaline et épidote.

Les teneurs élevées en TiO_2 traduisent la présence de l'ilménite sous forme d'inclusions dans les grenats.

La faible teneur en CaO exprime la faible concentration du sable en minéraux carbonatés.

La faible concentration en K_2O indique une présence négligeable des minéraux argileux.

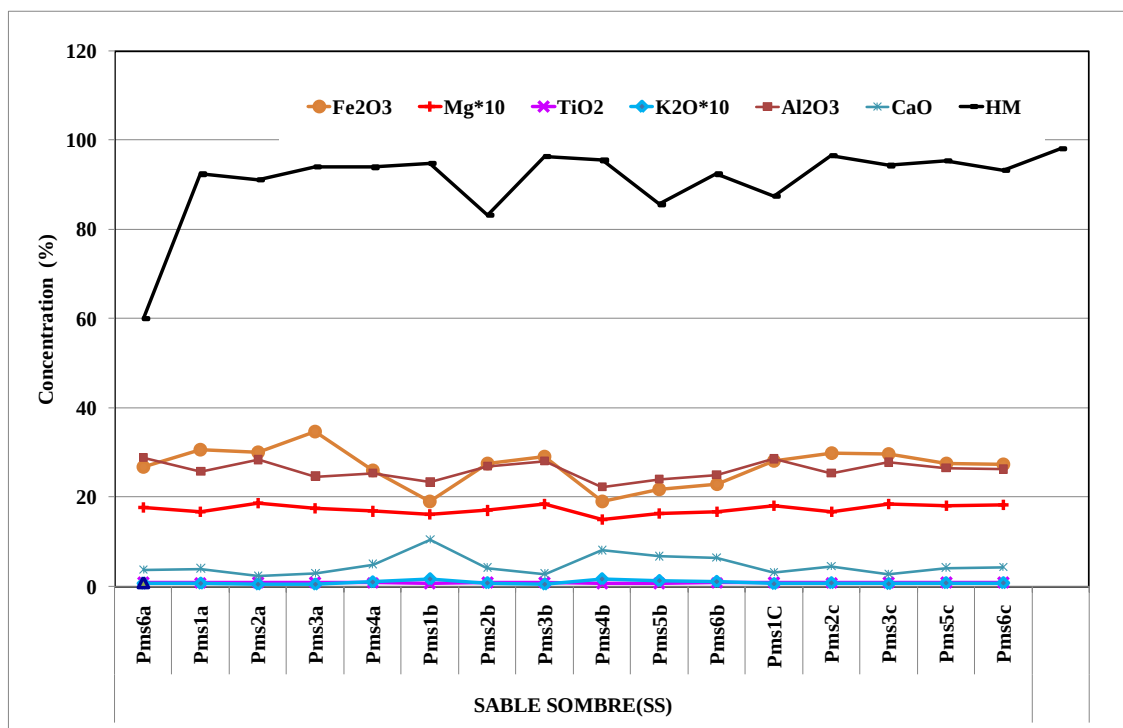


Fig.V. 18 : Variations des minéraux lourds (HM) et des éléments majeurs dans le sable de la Plage -Militaire.

B.2. Relation entre composition minéralogique - Eléments traces et Terres rares :

B.2.1. Méthodes statistiques simples

L'exploration de la relation possible existant entre les différents éléments chimiques (Traces et terres rares) et la composition minéralogique du sable de la Plage-Militaire se base sur l'étude du coefficient et des diagrammes de corrélation.

Tableau 7. Matrice de corrélation simple entre la composition minéralogique, les éléments traces et les terres rares, Ep: épidote, Grt: grenat, Ky: disthène, St: staurotide, Tur: tourmaline, Qz: quartz, Cal: Calcite

Variables	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal
Grt	1						
St	0.18	1.00					
Ky	-0.25	-0.49	1.00				
Tur	-0.62	-0.38	-0.11	1.00			
Ep	-0.58	-0.64	0.44	0.41	1.00		
Qz	-0.44	-0.59	0.58	0.09	0.47	1.00	
Cal	-0.82	-0.57	0.50	0.36	0.69	0.70	1.00
Ba	-0.06	-0.31	0.00	0.20	0.34	0.33	0.08
Cr	0.17	0.57	-0.18	-0.11	-0.42	-0.32	-0.50
Ga	0.55	-0.10	-0.25	-0.17	0.01	-0.44	-0.40
Nb	0.39	-0.23	-0.16	-0.09	0.16	-0.28	-0.20
Ni	0.34	0.50	0.04	-0.36	-0.49	-0.19	-0.54
Sr	-0.84	-0.50	0.27	0.55	0.57	0.67	0.89
V	0.47	0.64	-0.38	-0.22	-0.54	-0.66	-0.76
Y	0.74	0.58	-0.21	-0.57	-0.67	-0.58	-0.84
Zn	0.03	0.48	-0.16	0.00	-0.35	-0.22	-0.35
Zr	0.71	0.09	-0.32	-0.27	-0.15	-0.61	-0.63
La	0.78	0.50	-0.33	-0.42	-0.59	-0.67	-0.91
Ce	0.77	0.52	-0.33	-0.42	-0.60	-0.67	-0.90
Pr	0.78	0.51	-0.32	-0.43	-0.59	-0.66	-0.90
Nd	0.77	0.51	-0.34	-0.41	-0.60	-0.68	-0.90
Sm	0.76	0.54	-0.35	-0.44	-0.62	-0.68	-0.89
Eu	0.77	0.49	-0.30	-0.40	-0.59	-0.68	-0.90
Gd	0.79	0.54	-0.29	-0.51	-0.63	-0.65	-0.88
Tb	0.76	0.54	-0.29	-0.52	-0.65	-0.64	-0.84
Dy	0.77	0.55	-0.27	-0.54	-0.65	-0.62	-0.84
Ho	0.76	0.56	-0.27	-0.54	-0.66	-0.62	-0.84
Er	0.75	0.56	-0.27	-0.54	-0.66	-0.61	-0.83
Tm	0.76	0.55	-0.26	-0.54	-0.65	-0.62	-0.84
Yb	0.76	0.56	-0.26	-0.54	-0.66	-0.62	-0.84
Lu	0.77	0.56	-0.265	-0.55	-0.65	-0.63	-0.85

Certains éléments traces (Ni, Cr, V, Y et Zr sont positivement corrélés au grenat ($r_{Ni}=0,34$, $r_V=0,47$, $r_Y=0,74$ et $r_{Zr}=0,71$) et à la staurotide ($r_{Cr}=0,57$, $r_{Ni}=0,5$, $r_V=0,64$, $r_Y=0,58$ et $r_{Zn}=0,48$).

L'étude de la figure 19 indique que l'élément chrome (Cr) est significativement corrélé à la staurotide (Fig.V.19a) et quasiment pas au grenat. Le vanadium (V) est corrélé au grenat (Fig.V.19b) et à la staurotide (Fig.V.19c), suggérant la présence, à l'état de traces, de ces éléments chimiques compatibles dans ces minéraux.

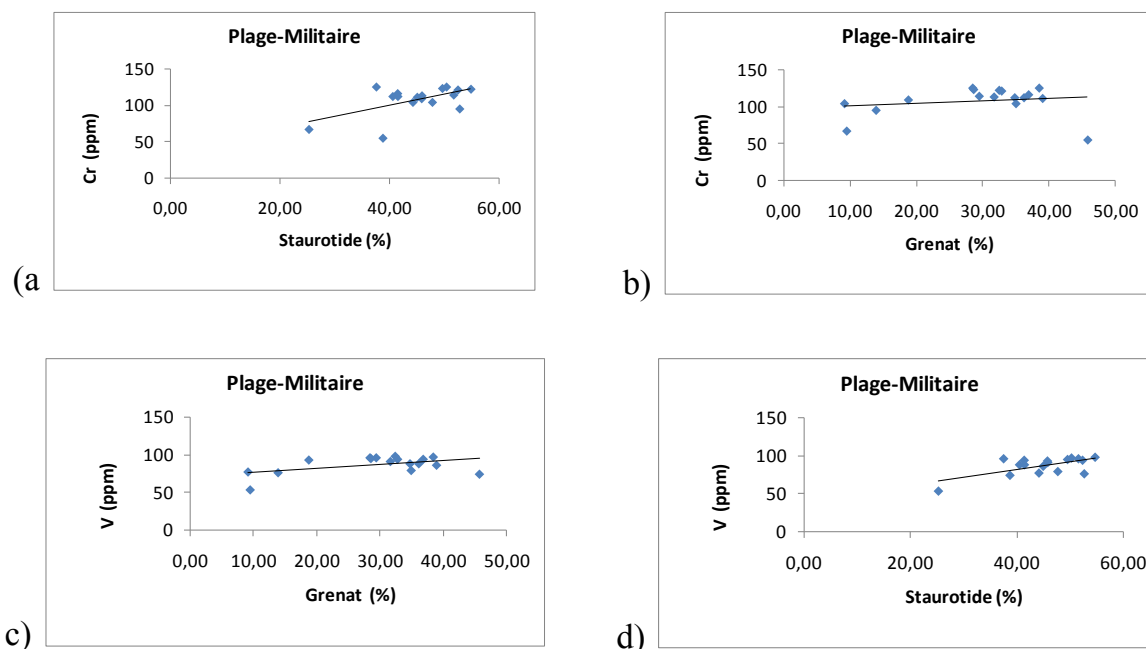


Fig.V. 19 : Diagrammes de corrélations : a) de la staurotide avec le chrome ; b) du grenat avec le chrome, c) du grenat avec le vanadium ; c) de la staurotide avec le vanadium.

La staurotide est souvent porteuse de l'élément zinc (Zn) (Droop, 1987). La figure 20a confirme la relation entre la teneur en Zn et la présence de la staurotide. Le zinc est très faiblement corrélé au grenat (20b).

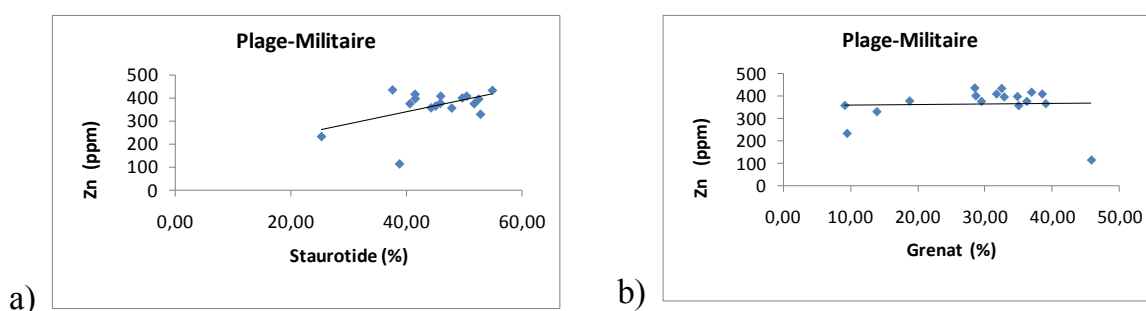


Fig.V. 20 : Diagrammes montrant la corrélation : a) significative entre le zinc et la staurotide, b) négligeable entre le Zn et le grenat.

Il existe une forte corrélation entre le zirconium (Zr) et le grenat (Fig.V.21a) ce qui est confirmé par la présence d'inclusions de zircon dans ce minéral (voir étude pétrographique ou MEB).

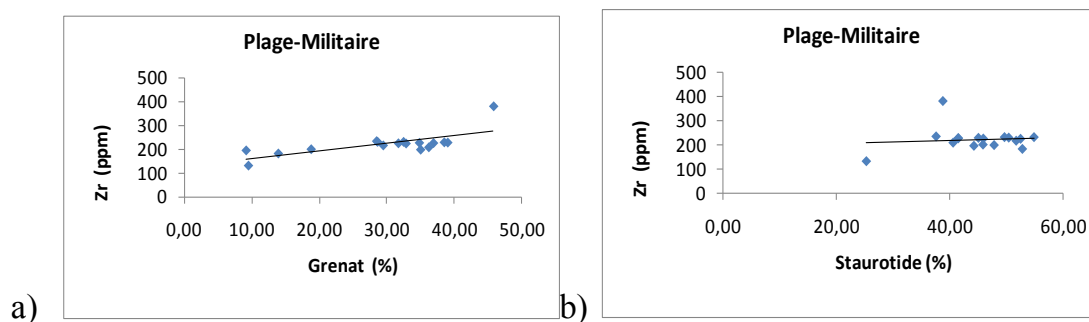


Fig.V. 21 : Diagrammes montrant la corrélation : a) positive entre le zirconium et le grenat, b) négligeable du zirconium avec la staurotide.

Le strontium est positivement corrélé à la calcite et au quartz. La bonne corrélation du strontium avec la calcite ($r=0,89$) (Fig.V.22a) s'explique par la présence de formation carbonates tels que le cipolin et la calcarénite.

La corrélation positive de Sr avec le quartz ($r=0,64$) (Fig.V.22b) reflète la nature hydrothermal et/ou métamorphique du quartz (Monecke et al, 2002).

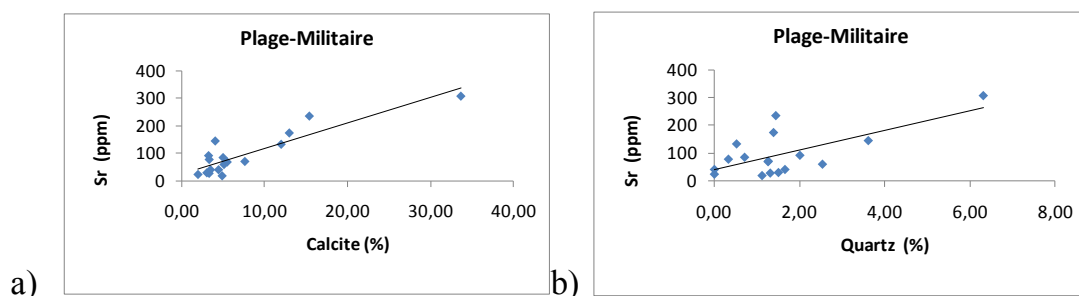


Fig.V. 22 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) le strontium et la calcite ; b) le strontium et le quartz.

La corrélation significative de l'yttrium avec le grenat ($r=0,74$) (Fig.V.23a) s'explique par la forte concentration modale en grenat qui est souvent porteur de l'yttrium. La corrélation de Y avec la staurotide ($r=0,58$) (Fig.V.23b) s'explique par la présence de cet élément chimique dans le réseau cristallin de la staurotide.

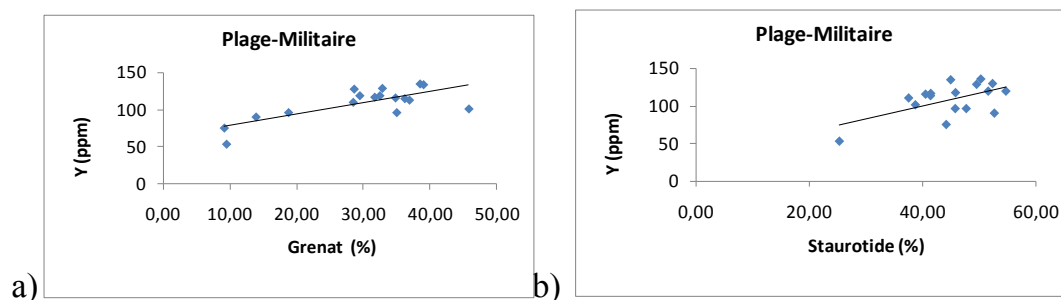


Fig.V. 23 : Diagramme montrant la corrélation positive entre l'Yttrium et : a) le grenat ; b) la staurotide

A la différence des éléments traces, on constate qu'il existe une forte corrélation entre le grenat et les terres rares (Fig.V. 24a). La corrélation de la staurotide avec les terres rares est moins significative que celle du grenat (Fig.V.24b). Ce qui suggère que le grenat est le principal minéral, et dans une moindre mesure la staurotide, porteur des terres rares.

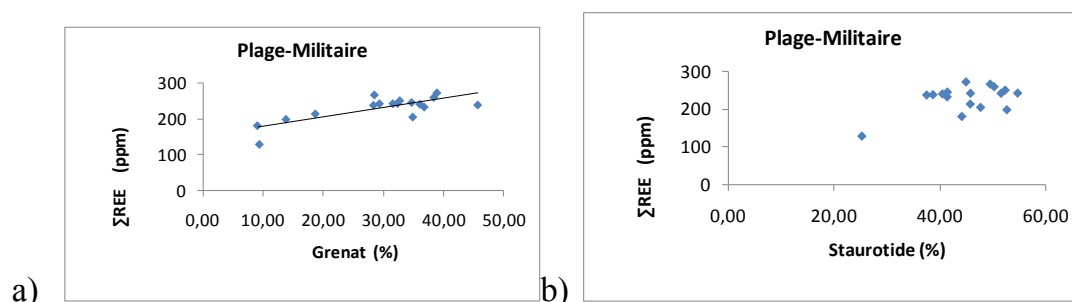


Fig.V. 24 : Diagrammes montrant la présence de corrélation entre les terres rares et : a) le grenat ; b) la staurotide.

Les terres rares sont généralement négativement corrélées à la tourmaline (Fig.V.25a), au disthène (Fig.V.25b), à l'épidote (Fig.V.25c), à la calcite (Fig.V.25d) et au quartz (Fig.V.25e).

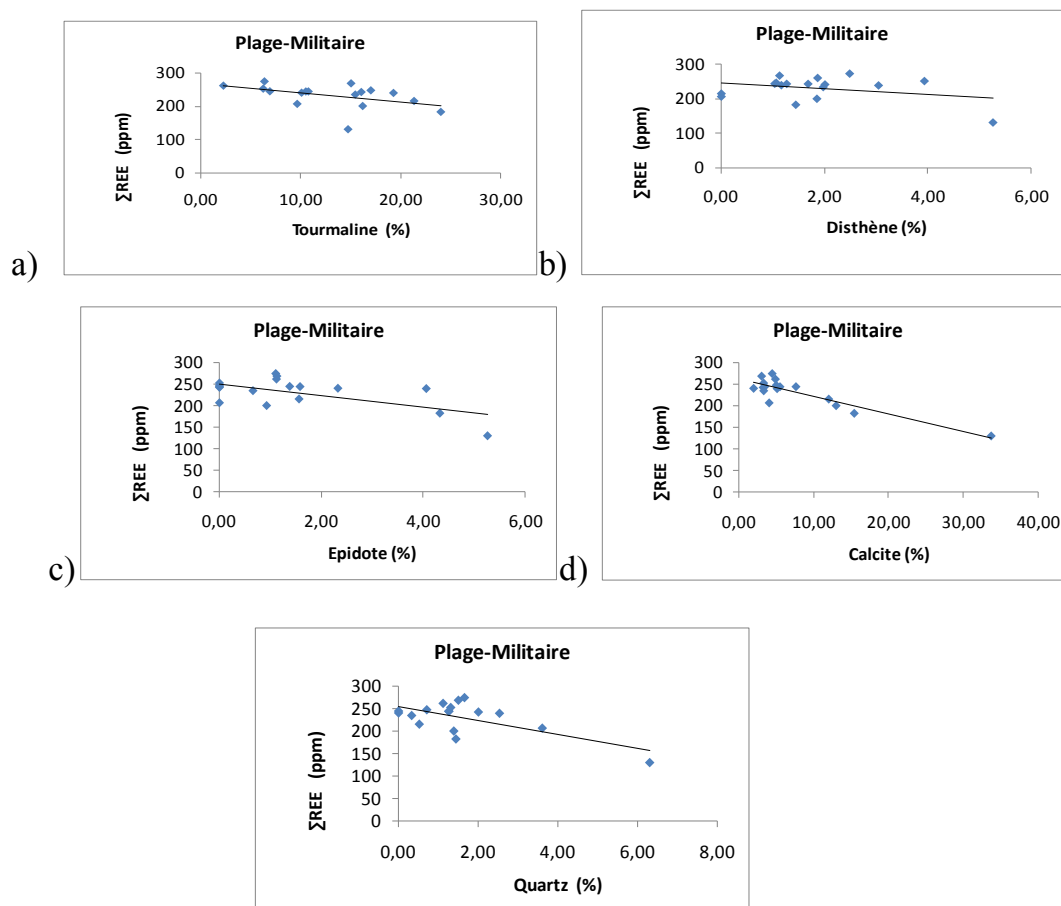


Fig.V. 25 : Diagrammes montrant une corrélation négative entre les terres rares et : a) la tourmaline ; b) le disthène ; c) l'épidote ; d) la calcite et e) le quartz.

B.2.2. Analyses en Composantes Principales (ACP)

Les analyses factorielles (ACP) à permis d'interpréter la relation entre les données minérales et chimiques.

La matrice de variabilité (minéraux lourds sombre : grenat, staurotide, disthène, tourmaline et épidote, ainsi que des minéraux clairs tel que calcite, quartz) avec les éléments chimiques (traces et REE) pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3, F4) du sable de la Page-Militaire sont présentés dans le tableau 8.

Ce tableau indique que les deux premiers facteurs (F1 + F2) représentent à eux seuls 81% de la variance totale, par conséquent, dans cette étude, seuls ces deux premiers facteurs sont décrits.

Tableau 8. Matrice de variabilité des minéraux, traces et terres rares pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3 et F4).

	F1	F2	F3	F4
Variabilité (%)	66.34	14.67	5.68	4.04
Grt	0.17	0.19	0.16	0.01
St	0.13	-0.15	-0.25	-0.33
Ky	-0.08	-0.05	0.60	0.12
Tur	-0.11	-0.05	-0.43	0.34
Ep	-0.15	0.09	0.08	0.36
Qz	-0.15	-0.09	0.41	0.15
Cal	-0.20	-0.06	0.15	-0.09
Ba	-0.06	0.13	-0.03	0.63
Cr	0.13	-0.34	-0.10	0.21
Ga	0.06	0.44	-0.08	0.03
Nb	0.01	0.46	-0.05	-0.01
Ni	0.12	-0.19	0.17	0.13
Sr	-0.21	-0.08	-0.05	-0.07
V	0.18	-0.16	-0.19	0.12
Y	0.22	-0.06	0.11	-0.01
Zn	0.10	-0.39	-0.13	0.21
Zr	0.12	0.38	-0.08	0.08
La	0.22	0.02	0.00	0.10
Ce	0.22	0.01	-0.01	0.08
Pr	0.22	0.02	0.01	0.09
Nd	0.22	0.02	-0.02	0.08
Sm	0.22	0.01	-0.01	0.05
Eu	0.21	0.03	0.00	0.14
Gd	0.22	0.01	0.05	0.03
Tb	0.22	0.00	0.06	-0.04
Dy	0.22	0.01	0.09	-0.03
Ho	0.22	0.00	0.08	-0.04
Er	0.22	0.00	0.08	-0.04
Tm	0.22	0.00	0.09	-0.02
Yb	0.22	-0.01	0.08	-0.03
Lu	0.22	0.00	0.08	-0.01

On distingue sur le cercle de corrélation (Fig.V.26) trois (03) groupes : (i) un groupe composé du grenat, des terres rares (REE) et des éléments traces (Zr, Ga, Nb), (ii) un deuxième composé de la staurotide et de quelques élément trace (Zn, Cr, Ni, V, Y) et (iii) un troisième groupe constitué du disthène, de la calcite, du quartz, de la tourmaline et du strontium.

Le cercle de corrélation (Fig.V.26) montre que l'association formée par les grenats, tous les terres rares et quelque éléments traces (Nb, Zr, Nb) et que celle constituée par la staurotide et les éléments trace (Zn, Cr, Y, V, Ni) sont fortement liées au Facteur F1. Le facteur F1 qui explique 66% de la variance totale, peut être interprété comme représentant les minéraux riches en Fe et en Mg (minéraux ferromagnésiens).

Le facteur 2 explique environ 14,67% de la variance et se caractérise par le chargement élevé en tourmaline et en Ba dans le champ positif et en disthène, calcite, quartz et en Sr dans le champ négatif du cercle de corrélation. Cette disposition nous permet d'interpréter le facteur 2 (F2) comme représentant les minéraux non ferromagnésien.

Les différents types d'associations par rapport aux facteurs F1 et F2, nous permettent de relier les fortes teneurs en terres rares et en éléments traces (Zr, Ga, Y, V), au grenat et le Zn, Cr, Ni et V à la staurotide.

Les fortes teneurs en strontium (Sr) du sable sont clairement dues à la présence de la calcite. Le cercle de corrélation confirme également la faible relation entre les minéraux tels que la tourmaline, le disthène et l'épidote avec les terres rares et les éléments Traces.

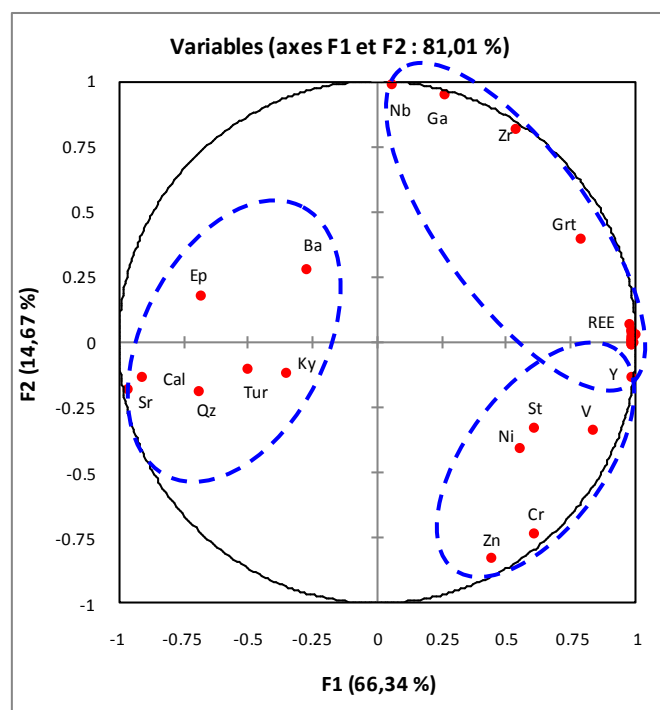


Fig.V. 26 : Cercle de corrélation (ACP) des minéraux lourds, des éléments traces et des Terres Rare du sable de la Plage-Militaire

V. 3. La zone du port

V.3.1. La plage El Nasr

La composition chimique en majeurs et traces du sable et de la Croûte Continentale Supérieure (UCC) (Rudnick et Fountain, 1995 ; Rudnick et Gao, 2005 ; Samson et Wood, 2005 ; Castor et Hedrick, 2006) est résumée dans le tableau 9.

Tableau 9. Composition chimique du sable et de la Croûte Continentale Supérieure (UCC). UCC : Croûte Continentale supérieure, Av SC : moyenne chimique du sable Clair ; Av SS : moyenne chimique du sable sombre.

PIAGE EL NASR											
	EN S 1a	EN S 2a	EN S 3a	EN S 1b	EN S 1c	EN S 2b	EN S 2c	EN S 3c	EN S 3b	AVSS	UCC
SiO ₂	38,4	68,3	67,0	36,6	42,3	40,0	33,2	34,9	36,8	44,2	66,6
TiO ₂	0,740	0,180	0,215	0,958	1,432	0,906	2,534	1,170	1,137	1,0	0,64
Al ₂ O ₃	28,8	6,6	7,7	29,1	23,6	26,9	26,9	29,4	28,0	23,0	15,4
Fe ₂ O ₃	20,49	1,68	2,38	22,50	18,84	18,83	28,77	25,44	23,56	18,1	5,04
MnO	0,363	0,028	0,038	0,408	0,338	0,329	0,541	0,471	0,431	0,3	0,1
MgO	1,99	0,53	0,61	2,15	1,83	1,80	2,52	2,37	2,23	1,8	2,48
CaO	4,75	10,95	10,47	4,35	6,03	5,79	3,21	3,44	4,22	5,9	3,59
Na ₂ O	0,06	0,54	0,78	0,01	0,09	0,02	0,01	0,01	0,01	0,2	3,27
K ₂ O	0,20	1,37	1,31	0,16	0,30	0,24	0,08	0,10	0,15	0,4	2,8
P ₂ O ₅	0,124	0,051	0,056	0,126	0,159	0,118	0,117	0,118	0,121	0,1	0,15
LOI	3,82	9,67	9,08	3,30	4,74	4,77	1,79	2,25	3,03	4,7	
Ba	33	177	179	34	84	75	76	33	59	83	628
Cr	133	23	28	131	115	123	134	134	127	105	92
Ga	42	10	10	42	33	38	35	40	40	32	17,5
Nb	10	10	10	15	27	15	51	18	18	19	12
Ni	25	10	10	27	22	24	25	23	25	21	47
Sr	96	373	352	75	144	130	24	40	70	145	320
V	99	26	36	103	81	89	90	98	101	80	97
Y	118	11	13	135	111	106	175	158	146	108	21
Zn	543	45	75	558	448	501	488	550	515	414	67
Zr	213	74	77	222	229	217	342	232	231	204	193
La	48,8	9,2	10,4	50,7	36,7	31,2	57,9	35,0	34,7	35,0	31
Ce	97,8	16,4	18,5	98,8	72,9	60,4	117,7	68,3	67,5	68,7	63
Pr	11,2	1,6	2,0	11,5	8,5	7,0	13,4	7,9	7,8	7,9	7,1
Nd	43,1	8,1	9,3	43,6	32,8	28,3	51,8	31,7	31,3	31,1	27
Sm	8,3	1,5	1,8	8,4	6,3	6,0	10,7	7,1	6,9	6,3	4,7
Eu	1,5	0,5	0,4	1,4	1,1	1,1	1,5	1,4	1,3	1,1	1
Gd	6,9	1,5	1,8	7,2	5,5	8,5	15,2	12,0	11,2	7,8	4
Tb	1,2	0,5	0,3	1,3	1,0	2,1	3,8	3,2	2,9	1,8	0,7
Dy	6,0	1,4	2,0	7,2	5,0	15,9	29,1	25,6	22,8	12,8	3,9
Ho	1,2	0,5	0,4	1,5	1,0	3,7	6,7	5,9	5,3	2,9	0,83
Er	3,4	0,9	1,3	4,5	2,9	11,8	20,8	19,0	17,0	9,1	2,3
Tm	0,5	0,5	0,2	0,7	0,5	1,8	3,2	2,9	2,6	1,4	0,3
Yb	3,4	0,9	1,3	4,5	2,9	11,9	20,4	18,8	16,7	9,0	2
Lu	0,5	0,1	0,2	0,7	0,4	1,7	2,9	2,7	2,4	1,3	0,31
STraces	1312	759	790	1342	1294	1318	1440	1326	1332	1213	1495
S LREE	209,3	36,8	42,0	213,0	157,2	132,9	251,6	150,0	148,2	149,0	132,8
S HREE	24,5	6,8	7,8	28,9	20,4	58,5	103,5	91,5	82,2	47,1	15,3
S REE	233,8	43,6	49,8	241,9	177,6	191,5	355,2	241,6	230,4	196,1	148,1

A. Distribution des éléments chimiques

A.1. Les éléments majeurs

Les concentrations moyennes du sable sombre en TiO₂=1%, Al₂O₃=23 %, Fe₂O₃=18,1 %, MnO=0,3 %, MgO=1,8% et P₂O₅ =0,1 % sont supérieures à celle de la Croûte Continentale (UCC). Les teneurs en CaO=5,9 %, Na₂O=0,2% et K₂O=0,4% sont inférieures aux teneurs en ces éléments dans la Croûte Continentale (UCC) (Fig.V.27).

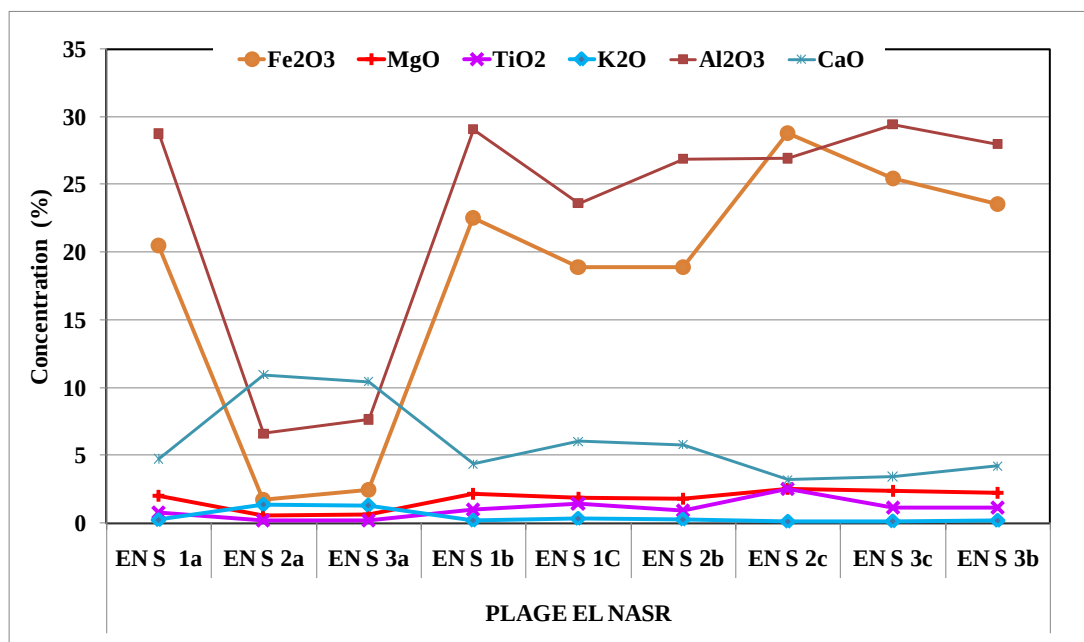


Fig.V. 27 : Teneurs et distribution des éléments chimiques majeurs dans le sable sombre de la plage El Nasr.

A.2. Les éléments traces

Le sable sombre de la plage El Nasr se caractérise par une distribution hétérogène des éléments traces (Fig.V.28). Le sable est en moyenne plus pauvre en éléments traces (1213ppm) que la Croûte Continentale Supérieure (UCC : 1495ppm) (Tableau 9).

La concentration moyenne des sables sombres en Cr (105ppm), Y (108 ppm), Zn (414ppm) et Zr (204ppm) est plus élevée que dans la Croûte Continentale Supérieure (Cr =92ppm), (Y =21ppm), Zn =67ppm Zr=193ppm et plus faible en Sr (96 ppm).

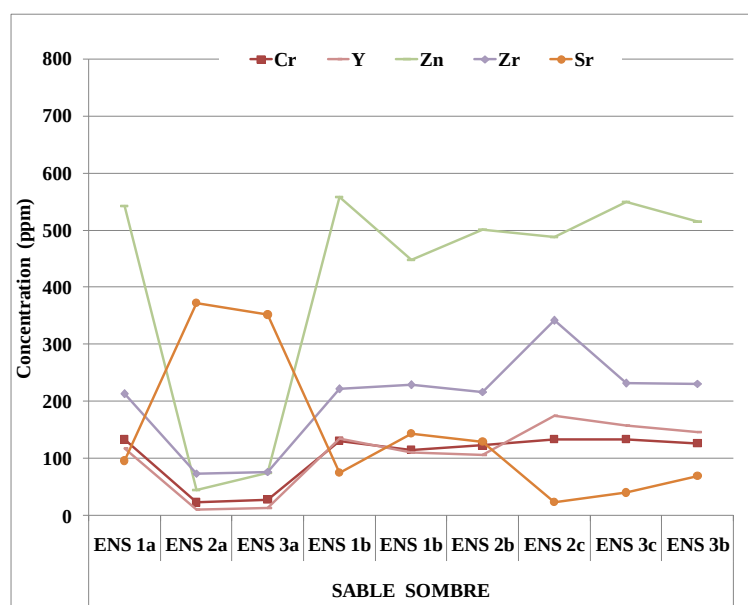


Fig.V. 28 : Abondance et distribution de quelques éléments chimiques en traces dans le sable sombre de la plage El Nasr.

A.3. Les Terres rares

La teneur totale en terres rares de la plage El Nasr est de 196 ppm. Le sable sombre présente une concentration élevée en terres rares légères (LREE) ($\Sigma\text{LREE}=149\text{ppm}$) et en terres rares lourdes (HREE) ($\Sigma\text{HREE}=47\text{ppm}$) (Fig.V.29).

Comparé à la Coûte Continentale Supérieure ($\Sigma\text{HREE}_{\text{UCC}}=15\text{ppm}$) (Rudnick et Fountain, 1995 ; Rudnick et Gao, 2005 ; Samson et Wood, 2005 ; Castor et Hedrick, 2006), le sable sombre de la plage El Nasr est enrichi en HREE ($\Sigma\text{LREE}_{\text{EN}}= 47\text{ppm}$).

Le sable présente des variations dans la distribution de la teneur en terres rares légères (LREE) et lourdes (HREE) (Fig.V.29). Deux (02) échantillons (ENS 1a et ENS 2a) sont plus pauvres en terres rares que le reste des échantillons de sable, ce qui s'explique par leur faible concentration modale en minéraux porteurs de ces éléments chimiques.

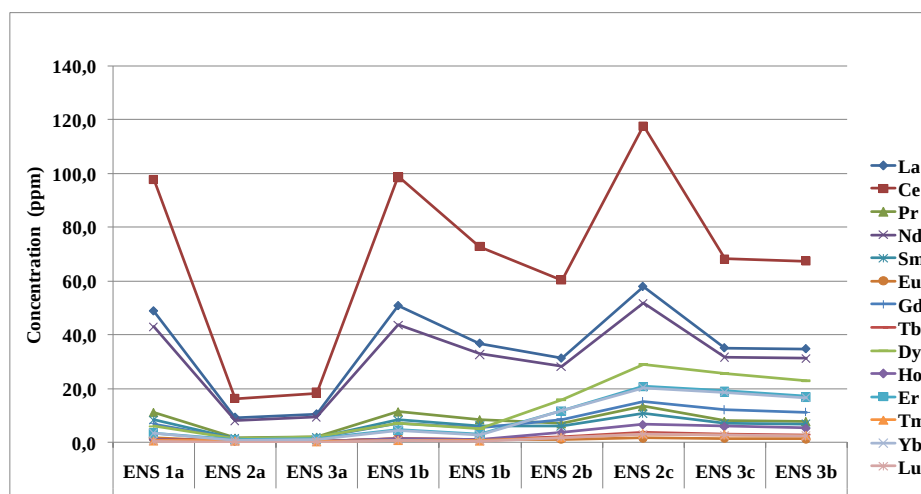


Fig.V. 29 : Abondance et distribution des terres rares dans le sable sombre de la plage El Nasr.

B. Relation entre composition minéralogique et chimique

B.1. Relation entre composition minéralogique – Eléments majeurs :

Hormis l'absence de l'épidote, le sable de la plage El Nasr a une composition minéralogique similaire à celle des plages Ain Achir et Plage-Militaire. Il est composé essentiellement de minéraux lourds sombres tels que le grenat, la staurotide, le disthène et la tourmaline (Tab.10).

Le sable sombre est très riche en minéraux lourds, en moyenne 84%. Il se compose essentiellement des staurotides (60%), de grenat (14%), de tourmaline (4%) et de disthène (5%) (Fig.V.30). Les minéraux clairs sont représentés par le quartz et la calcite.

Tableau 10 : Composition minéralogique moyenne du sable sombre de la plage El Nasr. Grt : grenat, St : staurotide, Ky : disthène, Tur, tourmaline, Ep : épidote, Qz : quartz, cal : calcite, HM : minéraux sombres, LM : minéraux clairs

	Samples	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal	ΣHM	ΣLM
PLAGE EL NASR	Ens1a	19	66	0	8	0	1	6	92	8
	Ens2a	6	32	19	0	0	21	21	57	43
	En S3a	4	58	2	0	0	7	29	64	36
	Ens1b	9	66	7	7	0	3	9	88	12
	Ens1c	15	63	0	7	0	2	13	85	15
	Ens2b	18	72	5	0	0	0	5	95	5
	Ens2c	24	61	7	2	0	2	5	93	7
	Ens3c	17	59	4	10	0	3	7	90	10
	Ens3b	16	63	2	7	0	2	9	89	11
	Average % HM DS	14	60	5	4	0	5	12	84	16

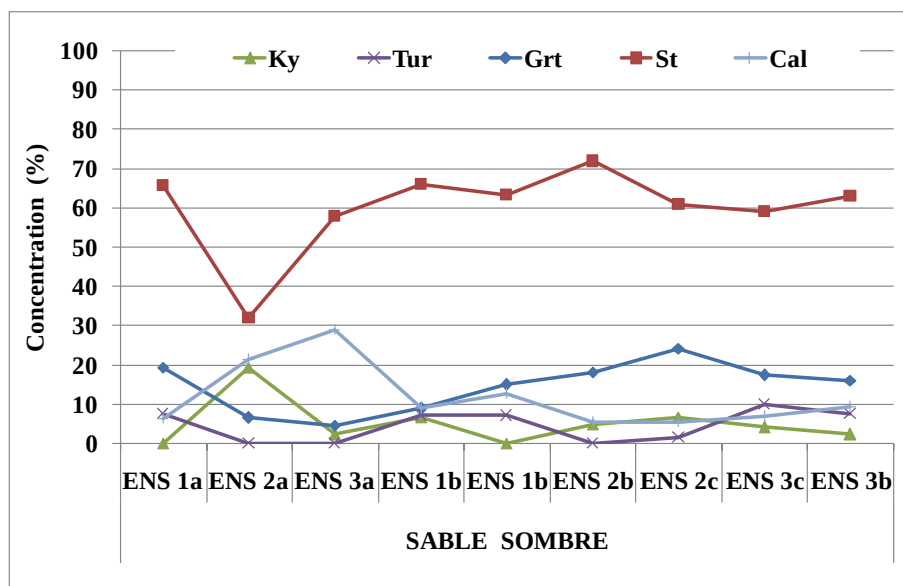


Fig.V. 30 : Distribution des minéraux dans le sable sombre de la plage El Nasr.

La figure 31 montre que la distribution des éléments majeurs suit celle des minéraux lourds. Le sable sombre de la Plage El Nasr se caractérise par une forte concentration modale en ferromagnésiens.

Les teneurs élevées en Fe_2O_3 et MgO reflètent les concentrations modales du sable en staurotide et grenat.

les teneurs élevées en TiO_2 expliquent la présence de l'ilménite sous forme d'inclusions dans les grenats et la staurotide.

La faible teneur en CaO exprime la faible présence de carbonates.

La faible concentration en K_2O s'explique par la teneur négligeable du sable en minéraux argileux.

B.2. Relation entre composition minéralogique – Eléments traces et Terres rares :

B.2.1. Méthodes statistiques simples

Une étude statistique simple a été réalisée dans le but de déterminer les relations possibles entre les différents éléments chimiques (traces et terres rares) et la composition minéralogique de sable de la plage El Nasr (Voir Tableau 11).

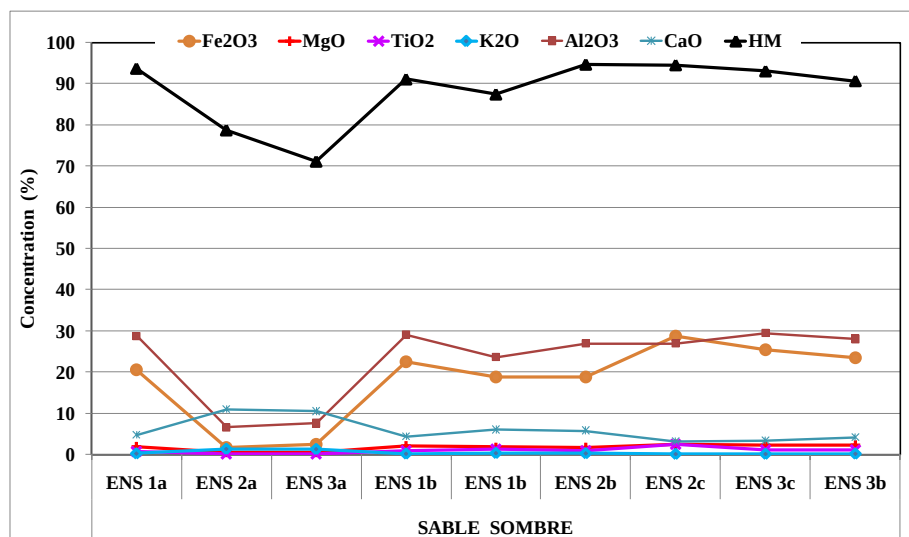


Fig.V. 31 : Variations des minéraux lourds (HM) et les éléments majeurs dans le sable de Plage El Nasr.

Tableau 11. Matrice de corrélation simple entre la composition minéralogique, les éléments traces et les terres rares, Ep: épidote, Grt: grenat, Ky: disthène, St: staurotide, Tur: tourmaline, Qz: quartz, Cal: Calcite.

Variables	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal
Grt	1,00						
St	0,51	1,00					
Ky	-0,38	-0,82	1,00				
Tur	0,28	0,34	-0,50	1,00			
Ep	0,09	0,10	-0,18	0,28	1,00		
Qz	-0,64	-0,97	0,85	-0,44	-0,15	1,00	
Cal	-0,85	-0,59	0,29	-0,48	-0,11	0,65	1,00
Ba	-0,66	-0,69	0,50	-0,77	-0,16	0,74	0,90
Cr	0,80	0,75	-0,54	0,64	0,18	-0,82	-0,94
Ga	0,71	0,75	-0,52	0,69	0,23	-0,79	-0,93
Nb	0,64	0,17	-0,08	-0,05	-0,04	-0,33	-0,40
Ni	0,73	0,75	-0,49	0,60	0,22	-0,80	-0,93
Sr	-0,80	-0,68	0,48	-0,64	-0,22	0,79	0,92
V	0,70	0,77	-0,57	0,70	0,27	-0,83	-0,90
Y	0,81	0,61	-0,43	0,61	0,24	-0,74	-0,89
Zn	0,74	0,76	-0,55	0,68	0,19	-0,82	-0,93
Zr	0,88	0,60	-0,39	0,40	0,12	-0,73	-0,86
La	0,74	0,61	-0,40	0,49	-0,01	-0,70	-0,83
Ce	0,75	0,60	-0,40	0,47	-0,01	-0,69	-0,82
Pr	0,75	0,62	-0,41	0,49	0,00	-0,70	-0,83
Nd	0,76	0,62	-0,41	0,48	0,00	-0,71	-0,84
Sm	0,81	0,62	-0,41	0,49	0,07	-0,73	-0,87
Eu	0,81	0,62	-0,43	0,63	0,17	-0,72	-0,92
Gd	0,84	0,47	-0,28	0,36	0,28	-0,63	-0,80
Tb	0,78	0,34	-0,16	0,27	0,33	-0,50	-0,70
Dy	0,75	0,32	-0,16	0,23	0,35	-0,49	-0,65
Ho	0,73	0,29	-0,13	0,21	0,36	-0,45	-0,63
Er	0,72	0,31	-0,15	0,22	0,36	-0,47	-0,63
Tm	0,70	0,23	-0,07	0,18	0,37	-0,39	-0,61
Yb	0,72	0,31	-0,15	0,22	0,36	-0,47	-0,63
Lu	0,72	0,32	-0,15	0,22	0,37	-0,48	-0,63

L'analyse de la corrélation des éléments traces avec les minéraux lourds montre que le Cr, Ni, V, Y, Zn et Zr sont principalement corrélés aux minéraux lourds sombres.

Le chrome et le vanadium sont significativement corrélés au grenat ($r_{Cr}=0,79$, et $r_V=0,70$), à la staurotide ($r_{Cr}=0,74$ et $r_V=0,77$) et à la tourmaline ($r_{Cr}=0,64$; $r_V=0,64$) reflétant l'importance de ces minéraux sur la composition chimique du sable (Fig.V.32).

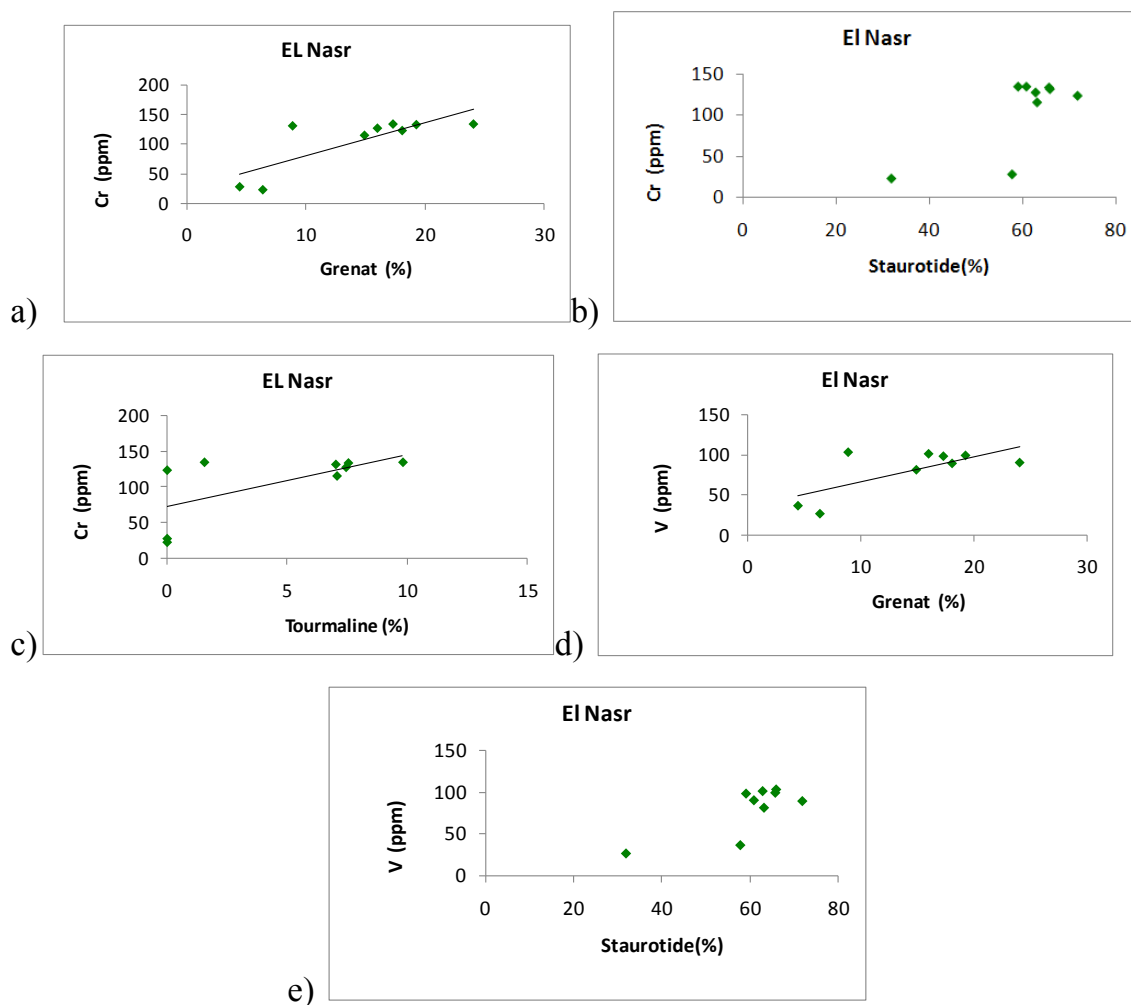


Fig.V. 32 : Diagrammes de corrélations : a) du grenat avec le chrome ; b) de la staurotide avec le chrome; c) de la tourmaline avec le chrome ; d) du grenat avec le vanadium; e) de la staurotide avec le vanadium

La corrélation significative entre Zn et le grenat ($r=0,73$) et entre Zn et la staurotide ($r= 0,76$) (Fig.V.33) suggère la présence de cet élément chimique dans ces minéraux et principalement dans la staurotide qui est parfois porteuse de cet élément (Droop, 1987).

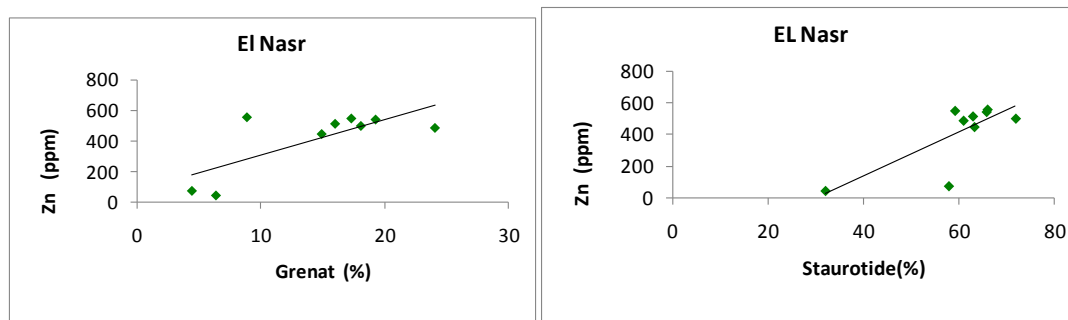


Fig.V. 33 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) le zinc et le grenat
b) le zinc et la staurotide.

La forte corrélation positive de l'yttrium avec le grenat ($r=0,81$) (Fig.V.34a), et avec la staurotide ($r=0,76$) (Fig.V.34b) est dû à la présence de cet élément dans la staurotide et principalement au grenat qui contient souvent de l'yttrium.

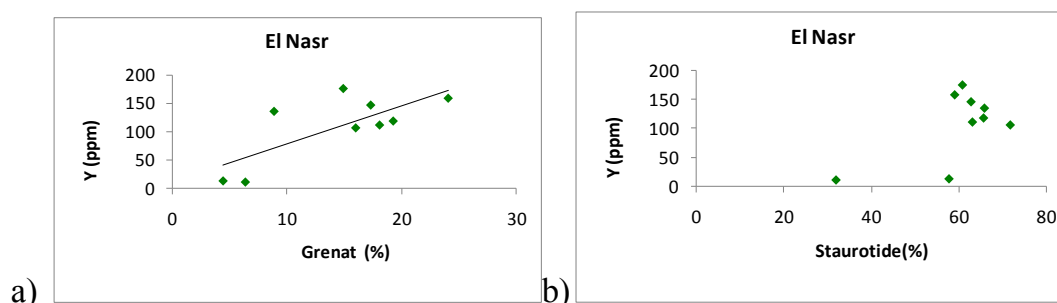


Fig.V. 34 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) l'yttrium et le grenat; b) l'yttrium et la staurotide.

Il existe également une forte interrelation entre le Zr et le grenat ($r=0,87$) (Fig.V.35a) confirmant la présence d'inclusions de zircon dans le grenat. Le Zirconium est également corrélé à la staurotide mais dans une moindre mesure ($r=0,6$) (Fig.V.35b).

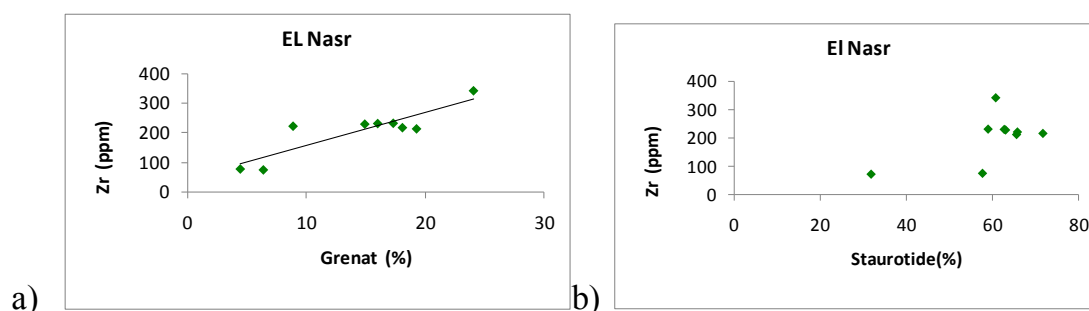


Fig.V. 35 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre : a) le zirconium et le grenat ; b) le zirconium et la staurotide.

Le strontium est fortement corrélé à la calcite et au quartz. La corrélation avec la calcite ($r=0,91$) s'explique par la présence de cristaux de calcite provenant des cipolins et probablement aussi par l'influence des activités anthropique (Fig.V.36a). La corrélation positive du strontium avec le quartz ($r=0,79$) (Fig.V.36b) reflète la nature du hydrothermale /métamorphique du quartz (Monecke, et al; 2002)

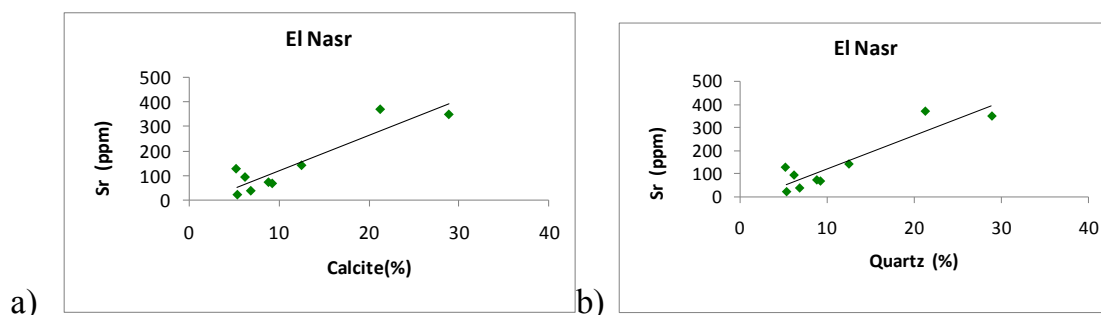


Fig.V. 36 : Diagrammes montrant la corrélation positive entre: a) le strontium et la calcite; b) le strontium et le quartz.

Les terres rares (REE) du sable de la plage El Nasr sont fortement corrélées au grenat (Fig.V. 37a) et à la staurotide (Fig.V. 37b), cela suggère que la source des REEs pourrait être ces deux minéraux.

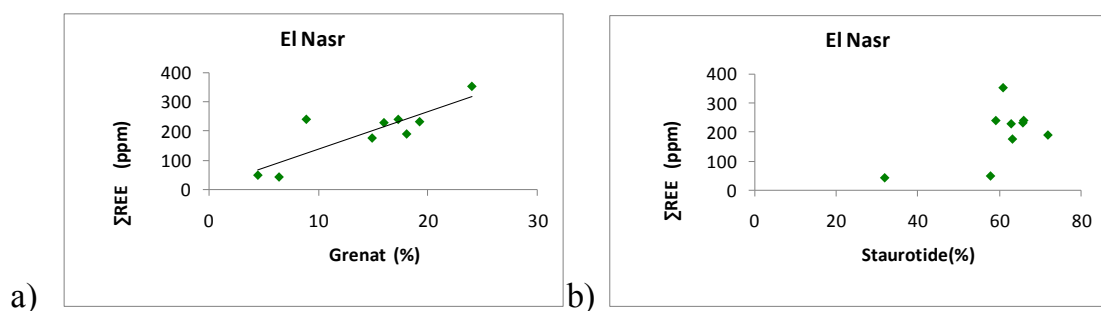


Fig.V. 37 : Diagrammes montrant la présence d'une corrélation entre les terres rares et: a) le grenat ; b) la staurotide.

La figure 38 montre une distribution dispersée du nuage des points. La corrélation entre les terres rares (REE) et les autres minéraux tels que la tourmaline, le disthène, la calcite et le quartz n'est pas statistiquement significative. (Fig.V.37 a, b, c, d).

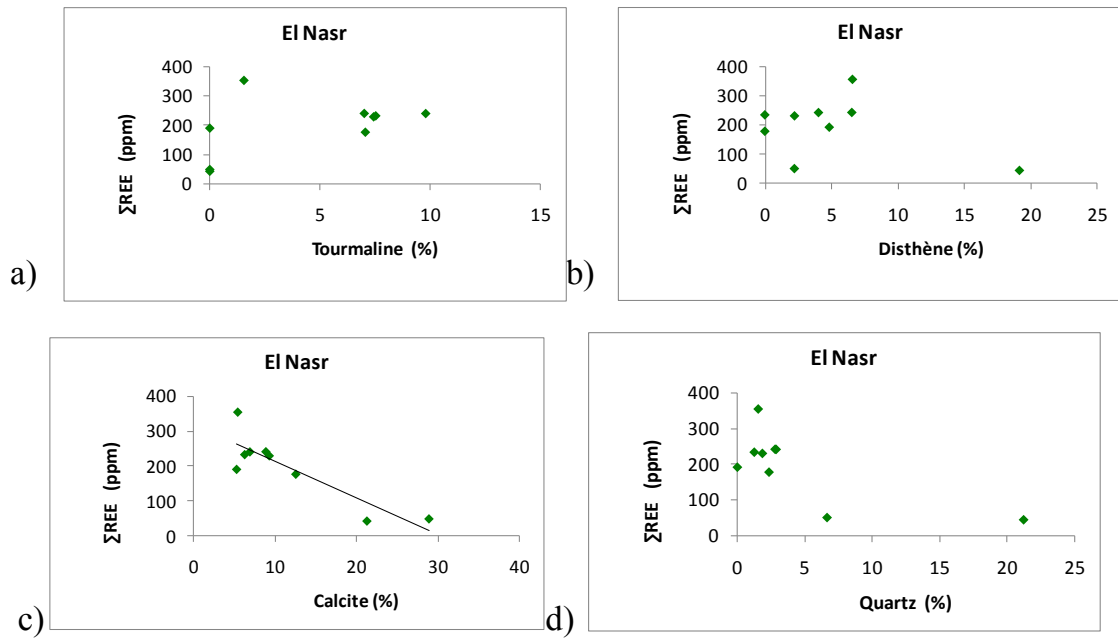


Fig.V. 38 : Diagrammes montrant l'absence de corrélation ou une corrélation négative entre les terres rares et: a) la tourmaline; b) le disthène; c) la calcite et d) le quartz.

B.2.2. Analyses en Composantes Principales (ACP)

Les matrices de corrélations ACP des éléments traces de la plage El Nasr sont présentées dans le tableau 12.

Tableau 12. Matrice de variabilité des minéraux, traces et terres rares pour les quatre premiers facteurs (F1, F2, F3 et F4).

	F1	F2	F3	F4
Variabilités %	72,15	14,95	5,47	4,07
Grt	-0,86	0,15	0,11	-0,14
St	-0,67	-0,43	-0,33	-0,45
Ky	0,46	0,46	0,46	0,51
Tur	-0,54	-0,41	-0,31	0,44
Qz	0,79	0,31	0,30	0,43
Cal	0,92	0,10	-0,05	-0,20
Ba	0,89	0,35	0,14	-0,25
Cr	-0,96	-0,23	-0,07	0,07
Ga	-0,91	-0,33	-0,15	0,17
Nb	-0,58	0,40	0,52	-0,36
Ni	-0,93	-0,30	-0,01	0,08
Sr	0,99	0,09	0,04	-0,08
V	-0,93	-0,29	-0,17	0,11
Y	-0,99	0,01	0,01	0,08
Zn	-0,93	-0,29	-0,13	0,11
Zr	-0,96	0,05	0,22	-0,13
La	-0,89	-0,28	0,35	-0,03
Ce	-0,89	-0,27	0,36	-0,04
Pr	-0,89	-0,28	0,34	-0,04
Nd	-0,90	-0,25	0,33	-0,04
Sm	-0,95	-0,14	0,26	-0,03
Eu	-0,97	-0,17	0,09	0,14
Gd	-0,93	0,36	0,01	-0,01
Tb	-0,84	0,54	-0,06	0,02
Dy	-0,79	0,59	-0,13	0,00
Ho	-0,77	0,62	-0,14	0,01
Er	-0,77	0,62	-0,16	0,00
Tm	-0,73	0,67	-0,13	0,05
Yb	-0,77	0,61	-0,17	0,00
Lu	-0,77	0,61	-0,17	0,00

Le tableau 12, montre que les deux premiers facteurs (F1 + F2) représentent 87,10% de la variance totale, par conséquent, dans cette étude, seuls ces deux premiers facteurs ont été décrits.

On remarque que le facteur 1 (F1) explique 72,15% de la variance totale. Ce facteur se caractérise par la charge élevée en grenat, staurotide, tous les éléments traces (à l'exclusion de Ba et Sr) et les REEs.

Les variables des éléments en traces et les minéraux lourds (grenat, staurotide) sont fortement associés au facteur 1. Ce dernier peut donc être interprété comme représentant les minéraux ferromagnésien (exemple la staurotide et le grenat).

Le facteur 2 se caractérise par une charge élevée en disthène, calcite, quartz, Sr, Ni et REE, cela nous permet d'interpréter le facteur 2 (F2) comme représentant les minéraux non ferromagnésien.

On peut distinguer trois groupes: deux groupe du côté négatif de F1 et 01 groupe du coté positif :

Le premier groupe, situé du coté négatif du facteur 1 (F1), est constitué du grenat, les éléments traces (Y, Zr) et des REEs. Cette association confirme la relation du grenat avec les terres rares et l'yttrium.

Le second groupe englobe la staurotide, la tourmaline et les éléments traces (Cr, Zn, V, Ni). On remarque une forte association, confirmant ainsi le lien entre la teneur, par exemple, en Zn et la présence de la staurotide.

Le troisième groupe (disthène, calcite, quartz et Sr), situé du coté positif de l'axe du facteur 1 (F1), confirme également la relation entre Sr et les minéraux légers tels que la calcite et le quartz. La calcite et dans une moindre mesure le quartz métamorphique sont porteuses de cet élément chimique.

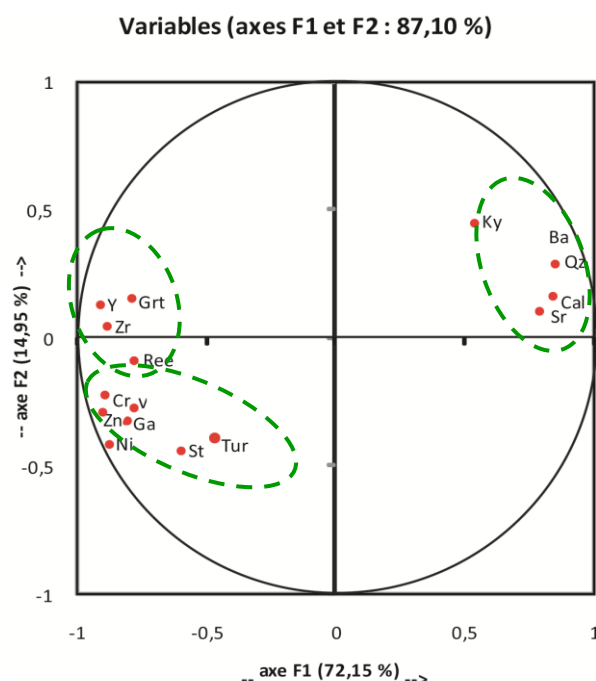


Fig.V. 39 : Cercle de corrélation (ACP) des minéraux lourds, des éléments traces et des Terres Rare du sable de la Plage El Nasr.

CHAPITRE VI : CARACTERISATION DE LA SOURCE DU SABLE SOMBRE

VI.1. INTRODUCTION

La composition chimique et la nature de la distribution des éléments chimiques dans les minéraux reflètent la nature géochimique de la roche source. Les assemblages minéraux des formations meubles reflètent la minéralogie des roches cohérentes sources.

La détermination de la source des sables sombres passe par une analyse minéralogique et géochimique.

- ✓ L'étude détaillée de minéraux tels que le grenat et la tourmaline qui sont souvent les témoins des différents événements géologiques subits par la roche source. La composition chimique, la nature de la distribution des éléments chimiques dans ces minéraux, comme par exemple la présence des zonations chimiques dans le grenat (Mange et Wright, 2007) et la tourmaline (Henry et Guidotti, 1985), reflète la nature géochimique de la roche source. La composition chimique de ces deux minéraux apporte des informations sur les conditions géologiques dans lesquelles les différentes formations lithologiques sources contenant ces minéraux ont évolués. En général, le grenat détritique est principalement issu de roches métamorphiques (Blatt et al. 2006).
- ✓ L'étude géochimique comparée en utilisant les terres rares: (i) des affleurements rocheux à proximité des plages et (ii) de ces affleurements rocheux avec le sable des différentes plages. Les caractéristiques géochimiques des roches meubles sont héritées des roches mères.

VI.2. CARACTERISTIQUES GENERALES DES AFFLEUREMENTS ROCHEUX COHERENTS

Les terres rares (REE) sont considérées comme étant des éléments chimiques stables, à faible mobilité et ne réagissant que très faiblement à l'altération et à l'érosion. Cette propriété nous permet de les utiliser comme marqueur du degré de parenté entre les différentes formations géologiques.

Les résultats des analyses en terres rares des différentes roches cohérentes proximales des plages étudiées (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) sont portés dans le Tableau.VI. 1

Tableau.VI. 1. Composition en terres rares (REE) des affleurements rocheux proximaux de chaque plage étudiée (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr).

	Echantillons	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	ΣLREE	ΣHREE
AIN ACHIR	VIV1	52,2	103,0	12,1	45,9	9,0	1,9	8,9	1,5	9,4	1,9	5,5	0,8	5,1	0,8	257,9	222,3	35,7
	VIV2	63,8	130,1	14,9	55,2	10,3	1,8	8,0	1,2	7,0	1,4	3,9	0,6	3,7	0,5	302,3	274,3	28,0
	VIV3	44,9	84,9	11,1	42,8	8,6	1,9	8,6	1,4	9,0	1,9	5,6	0,8	5,2	0,8	227,4	192,3	35,1
	VIV4	47,2	95,8	11,2	42,3	8,2	1,6	6,9	1,1	7,0	1,4	4,0	0,6	3,7	0,6	231,8	204,8	27,0
	Dviv	46,0	93,6	10,6	41,5	8,1	1,4	7,1	1,3	6,2	1,2	3,4	0,5	3,4	0,5	224,8	199,8	25,1
	E60	46,1	82,5	10,7	41,7	8,0	1,2	7,2	1,3	7,1	1,5	4,3	0,7	4,5	0,6	217,32	189,0	28,3
	E62	53,6	95,1	12,1	47,8	9,1	1,5	7,8	0,9	7,0	1,4	3,9	0,6	3,8	0,4	244,82	217,7	27,1
	E74	34,8	61,8	8,1	31,4	6,0	0,6	5,3	0,9	4,5	0,9	2,4	0,4	2,3	0,6	159,89	142,1	17,8
PLAGE MILITAIRE	PMR 3N3	40,7	68,4	9,2	35,2	6,5	1,2	5,6	1,1	5,2	1,0	3,0	0,5	3,0	0,5	181,3	160,0	21,2
	PMR 1A	41,0	75,5	9,3	35,6	6,9	1,3	6,3	1,1	6,4	1,3	3,9	0,6	4,2	0,7	194,2	168,3	25,8
	PMR 3C AA3	35,4	67,8	8,1	30,9	6,0	0,9	5,4	1,0	5,0	0,9	2,9	0,5	2,9	0,5	168,1	148,1	20,0
	PMR 3C AA1	24,2	44,5	5,4	20,5	3,9	0,5	3,5	0,7	3,3	0,7	1,9	0,5	2,1	0,3	112,1	98,4	13,6
	PM 3C AA2	12,4	30,8	3,3	13,3	2,8	0,5	2,7	0,5	2,0	0,5	1,2	0,5	1,6	0,3	72,4	62,6	9,8
	PMR 3C AA4	40,3	78,9	9,4	37,3	7,0	0,5	6,0	1,0	5,6	1,2	3,5	0,6	3,5	0,5	195,3	172,9	22,4
	PMR 2N1	44,9	88,2	10,4	40,3	7,9	1,3	7,2	1,4	6,6	1,3	3,8	0,6	3,8	0,6	148,4	130,1	18,3
	PMR 1A	53,1	102,8	12,1	47,1	9,1	1,5	7,7	1,3	6,9	1,4	3,9	0,6	3,9	0,6	139,3	122,4	16,8
	PMR 2N2	48,8	98,5	11,2	43,0	8,4	1,5	7,7	1,4	7,5	1,4	4,1	0,6	3,9	0,6	133,5	117,3	16,2
	PMR 1A SC1	49,1	83,2	10,7	41,7	8,0	1,8	7,0	1,2	6,3	1,2	3,6	0,6	3,5	0,5	137,8	121,0	16,7
	PMR 1A SC2	50,0	86,6	11,0	43,2	8,3	1,9	7,1	1,2	6,4	1,3	3,7	0,6	3,7	0,6	150,8	132,7	18,1
	PM 1A SC3	48,2	94,1	10,8	41,8	7,9	1,4	6,8	1,2	5,9	1,1	3,4	0,6	3,6	0,5	141,9	124,7	17,2
EL Nasr	EN R 1A	48,8	97,8	11,2	43,1	8,3	1,5	6,9	1,2	6,0	1,2	3,4	0,5	3,4	0,5	233,7	209,2	24,5
	EN R 1B	50,7	98,8	11,5	43,6	8,4	1,4	7,2	1,3	7,2	1,5	4,5	0,7	4,5	0,7	241,9	213,0	28,9
	EN R 1C	36,7	72,9	8,5	32,8	6,3	1,1	5,5	1,0	5,0	1,0	2,9	0,5	2,9	0,4	177,6	157,2	20,4
WSA		41,0	83,0	10,0	38,0	7,5	1,6	6,4	1,2	5,5	1,3	3,8	0,6	3,5	0,6	204,1	179,5	24,6

La normalisation des terres rares (REE) au Word Shale Average (WSA) (Piper, 1974; Piper et Bau, 2013) (Fig.VI.1) montre que toutes les roches costales des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) se caractérisent par des profils similaires, suggérant ainsi que ces roches ont les mêmes caractéristiques géologiques et géochimiques.

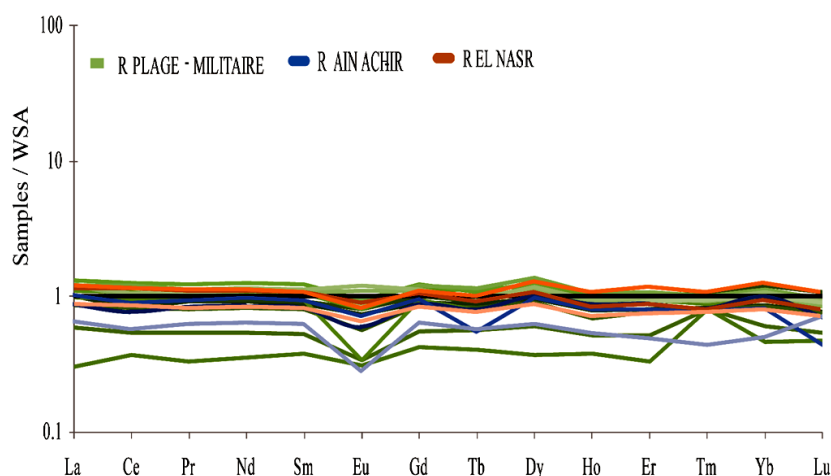


Fig.VI. 1: Profils des terres rares normalisés au Word Shale Average (WSA) des formations géologiques des trois plages étudiées, R: roche

VI.3. DISCRIMINATION DES ROCHES-SOURCES POTENTIELLES

VI.3.1. La zone du Cap de Garde (Ain Achir et Plage-Militaire)

A. Plage d'ain achir

A.1.Roches-sources potentielles des grenats et des tourmalines

A.1 1.Les Grenats

Les grenats du sable d'Ain Achir sont extrêmement riches en fer : (Pyrope 4-12%, Almandin 80-90%, Grossulaire 2 à 13%). D'après la classification des grenats de Locock 2008, ces grenats sont du type almandin (Voir chapitre IV).

La projection des grenats dans le diagramme discriminant l'environnement géologique potentiel de formation des grenats de Mange et Morton (2007) (Fig.VI.2) montre que tous les échantillons sont regroupés dans le champ (Bi) qui est le champ des roches magmatiques intermédiaires et felsiques. Ce qui suggère une source unique pour les grenats du sable d'Ain Achir.

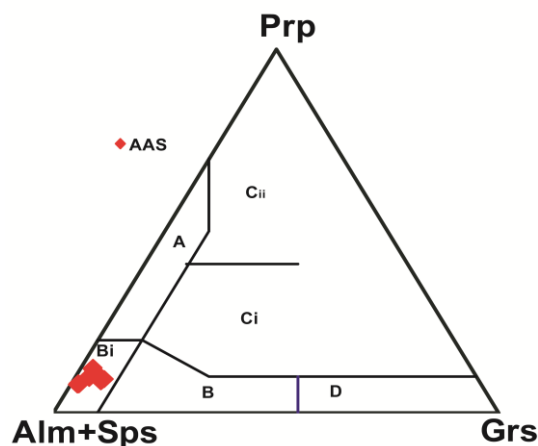


Fig.VI. 2: Composition des grenats dans le diagramme discriminant de Mange et Morton (2007). A: grenats de métasédiments et de roches magmatiques intermédiaires felsiques du faciès granulitique; B: métasédiments du faciès amphibolitique; Bi: roches magmatiques intermédiaires felsiques; Ci: roches mafiques de haut grade; Cii: roches ultramafiques riches en Mg (pyroxénites and péridotites); D: formations métasomatiques.

A.1.2. Les tourmalines

Les tourmalines du sable d'Ain Achir sont alcalines et très riches en fer ($Fe = (Fe / (Fe + Mg)) = 0.80 \text{ à } 0.94$) (Henry and Guidotti, 1985), ce qui les classent dans le groupe des schorls (Voir chapitre IV).

Les diagrammes discriminants les tourmalines d'origines connues de Henry et Guidotti (1985) permettent d'identifier les formations géologiques potentielles sources des tourmalines du sable d'Ain Achir

Les tourmalines de la plage d'Ain Achir se projettent principalement dans le domaine "2", domaine des granitoïdes pauvres en Li et leurs pegmatites associées et en partie dans le domaine "4" celui des métapelites pauvre en Ca (Fig.VI.3). Ce qui suggère soit une source mixte à savoir les veines quartzo-feldspathiques à tourmaline et les micaschistes à grenat riches en niveaux feldspathiques à tourmaline proximaux, soit une source unique à deux types de tourmalines plus ou moins riches en Fe.

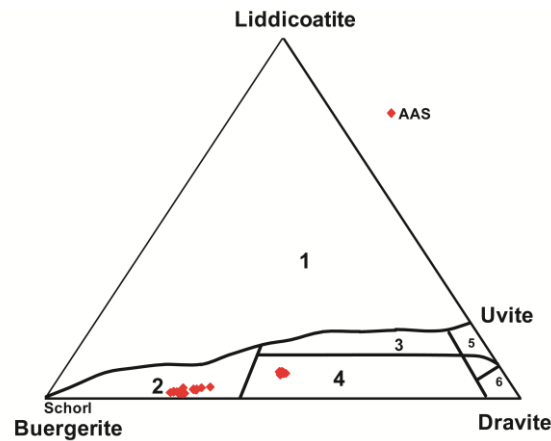


Fig.VI. 3: Position des échantillons de tourmalines dans le diagramme de Henry et Guidotti (1985), 1: Granitoïde riche en Li, pegmatites et aplites; 2: Granitoïdes pauvres en Li et leurs pegmatites associées; 3: métapelites riches en Ca, métapsammites et roches calco-silicatées; 4: métapelites pauvres en Ca, métapsammites et roches à quartz-tourmaline; 5: méta-carbonates; 6: méta-ultramafiques

A.2. Discrimination des roches-sources potentielles du sable à partir des terres rares

A.2.1. Les facteurs de fractionnement

Afin d'identifier la provenance du sable, les données des terres rares (REE) des échantillons de sable (Tableau.VI. 1) sont comparées aux affleurements rocheux situés à proximité des plages étudiés (Tableau.VI. 2). Tous les échantillons ont été normalisés au World Shale Average (Piper, 1974; Piper et Bau, 2013).

Tableau.VI. 2. Récapitulatif des analyses en terres rares du sable d'Ain Achir et du WSA (World Shale Average), LS: sable clair, DS: sable sombre

Echantillons			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
AIN ACHIR	LS	AA1a	10,2	20,4	1,9	9,6	1,9	0,4	2,1	0,4	2,5	0,5	1,6	0,3	1,6	0,2
		AA1b	12,4	27,2	2,6	12,3	2,4	0,5	2,7	0,5	3,6	0,8	2,4	0,4	2,4	0,3
		AA2b	8,8	17,0	1,6	8,3	1,7	0,4	1,7	0,3	1,6	0,3	0,9	0,2	0,9	0,1
		AA4a	21,9	31,2	3,0	14,2	2,9	0,6	3,1	0,6	4,0	0,8	2,6	0,4	2,5	0,4
		AA4b	13,2	26,7	2,7	12,5	2,5	0,5	2,9	0,5	3,9	0,9	2,5	0,5	2,5	0,4
		AA5a	15,2	29,5	2,7	14,3	2,9	0,6	3,0	0,6	3,4	0,7	2,2	0,3	2,1	0,3
		AA5b	12,9	24,6	2,6	11,9	2,5	0,5	2,6	0,5	3,0	0,6	1,9	0,3	1,8	0,3
		AA5c	15,1	29,1	2,8	13,7	3,0	0,6	3,1	0,9	3,8	0,8	2,4	0,3	2,4	0,3
		AAGa	41,1	83,9	9,1	36,4	7,6	1,1	9,2	2,1	15,1	3,4	10,6	1,6	10,3	1,5
	DS	AACa	21,2	40,0	4,1	17,9	3,7	0,6	4,1	0,9	5,6	1,2	3,9	0,6	3,9	0,6
		AA2a	8,5	16,2	1,6	8,1	1,6	0,4	1,7	0,3	1,7	0,4	1,0	0,2	1,0	0,2
		AA2c	10,7	21,2	1,9	9,9	2,0	0,4	2,1	0,4	2,4	0,5	1,5	0,3	1,5	0,2
		AAMa	17,0	33,5	3,3	15,3	3,2	0,6	3,4	0,8	4,3	0,9	2,9	0,5	2,8	0,5
		AAMb	44,0	89,5	9,8	38,6	8,1	1,2	10,1	2,3	17,3	4,0	12,5	2,0	12,1	1,7
		AA3a	27,2	45,8	4,6	20,1	4,1	0,7	4,8	1,0	7,6	1,7	5,3	0,9	5,2	0,7
		AA3b	23,1	48,6	5,2	21,6	4,4	0,7	5,1	1,1	7,6	1,7	5,2	0,8	5,1	0,7
		AA3c	23,8	55,4	5,3	23,4	4,8	0,8	5,5	1,2	8,4	1,9	5,9	1,0	5,8	0,8
		AAGb	18,1	34,5	3,1	15,5	3,3	0,6	3,6	0,8	4,7	1,0	3,3	0,5	3,1	0,5
Word Shale Average		WSA	41,0	83,0	10,0	38,0	7,5	1,6	6,4	1,2	5,5	1,3	3,8	0,6	3,5	0,6

De nombreux auteurs comme par exemple Jung et al. 2006, Leybourne et Johannesson, 2008 montrent que les facteurs de fractionnement $LREE_N / HREE_N$ et $MREE_N / HREE_N$ ($LREE_N$: $La_N + Pr_N + Nd_N$; $MREE_N$: $Sm_N + Eu_N + Tb_N$; $HREE_N$: $Ho_N + Yb_N + Lu_N$) permettent la discrimination des roches sources potentielles.

La Figure 4 montre la projection des facteurs de fractionnement ($LREE_N / HREE_N$ et $MREE_N / HREE_N$) des échantillons de sable et des formations géologiques proximales et distales à la plage d'Ain Achir. On remarque que les échantillons de sable sombre chevauchent la plupart des affleurements rocheux de la Plage-Militaire (Fig.VI.4), et que les échantillons de sable clair se projettent également près de ces roches.

La proximité graphique des projections des échantillons indique des similitudes dans les valeurs des facteurs de fractionnement suggérant ainsi que les différents types de micaschistes de la Plage-Militaire pourraient être la source du sable de la plage d'Ain Achir.

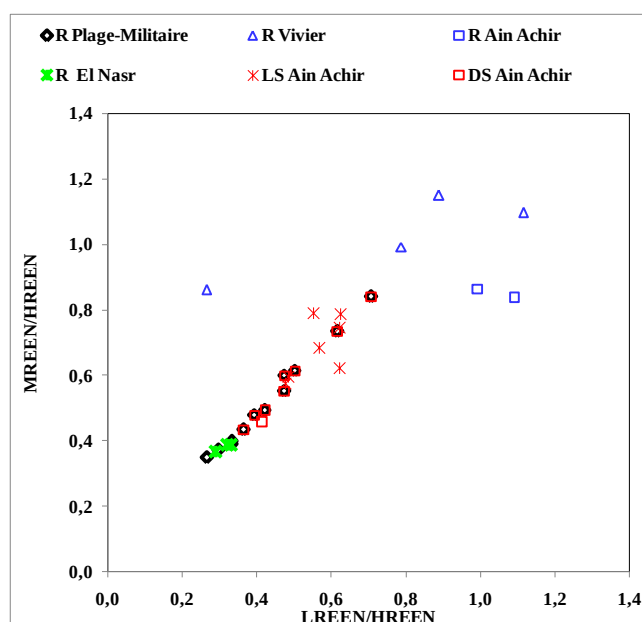


Fig.VI. 4: Diagramme binaire comparant les facteurs de fractionnement ($LREE_N/HREE_N$) et ($MREE_N/HREE_N$) du sable d'Ain Achir avec les affleurements rocheux des trois plages, R: roche, LS: sable clair, DS: sable sombre.

A.2.2. Les Profils REE normalisés du sable et des affleurements rocheux

Les profils des terres rares (REE) normalisés du sable clair et sombre de la plage d'Ain Achir ont été comparés aux profils des terres rares normalisées des roches proximales à la plage d'Ain Achir et à ceux distales de celles-ci (affleurements rocheux de la Plage-Militaire et de la plage El Nasr) (Fig.VI.5).

La Figure 5, montre qu'il existe de nombreuses similitudes dans l'allure des profils REE du sable de la plage d'Ain Achir et des affleurements rocheux de la plage d'Ain Achir (Fig.VI.5a), de la Plage-Militaire (Fig.VI.5b) et de la plage El Nasr (Fig.VI.5c).

La distribution des terres rares légères (LREE) du sable et des roches est relativement linéaire et homogène. Certains échantillons de sable montrent un enrichissement en terres rares lourdes (HREE) par rapport aux affleurements rocheux.

La présence d'échantillons de sable enrichis en terres rares lourdes (HREE) en plus d'échantillons de sable à teneurs similaires en HREE par rapport aux affleurements rocheux suggère une source mixte du sable.

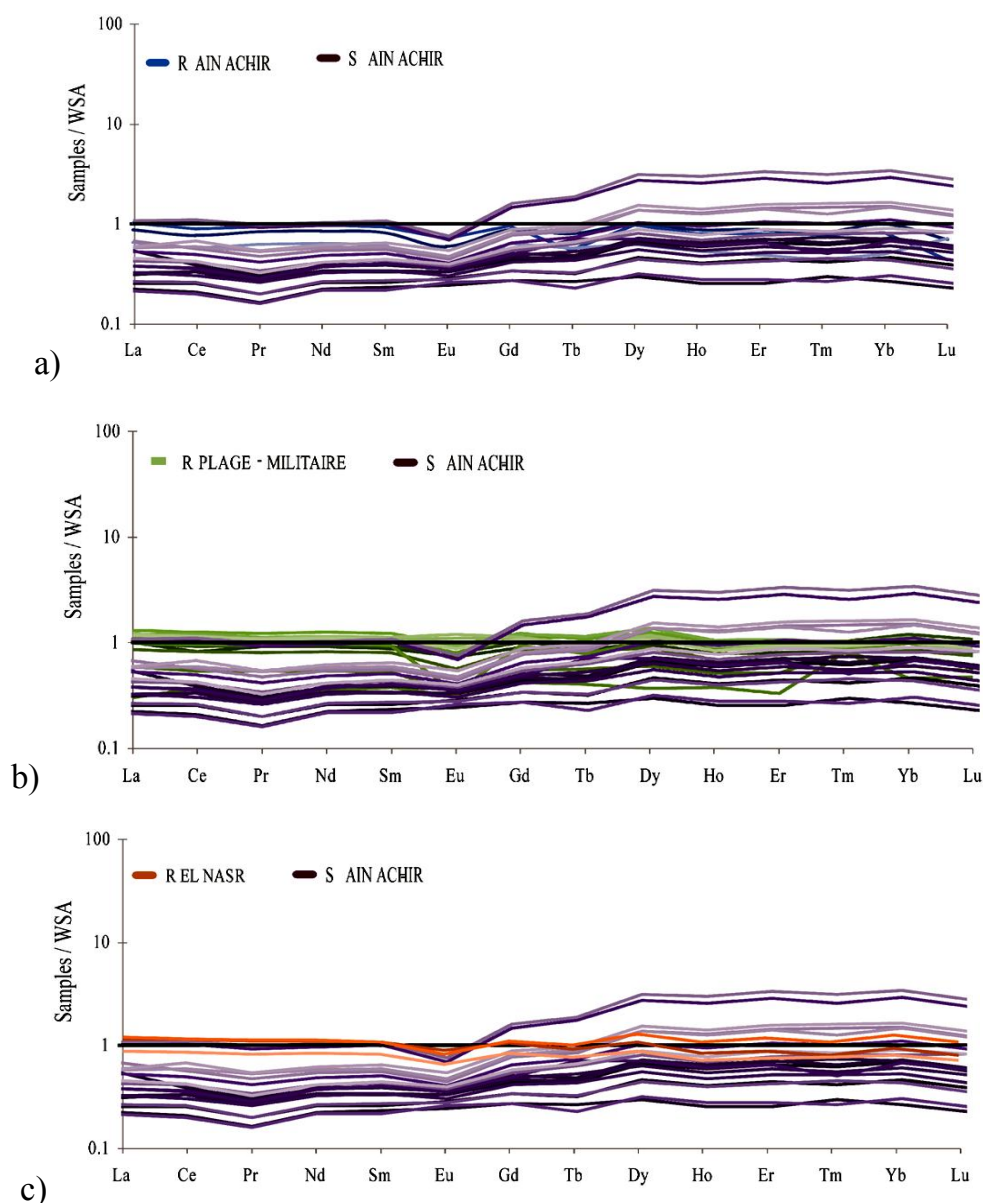


Fig.VI. 5: Profils des terres rares du sable d'Ain Achir comparés aux profils des affleurements rocheux de: a) Ain Achir, b) Plage-Militaire et c) El Nasr

B. Plage-Militaire

B.1 Roches-sources potentielles des grenats et des tourmalines

B.1.1. Les Grenats

Les grenats de la Plage-Militaire se caractérisent par une grande variation dans leur composition chimique (Almandin 64-85%, Pyrope 3-20%, Grossulaire 2 à 32%) (Locock 2008) (Voir chapitre IV).

Les variations chimiques dans les grenats nous permettent de distinguer deux groupes : (i) un premier groupe dominé par un grenat de type almandin-pyrope et à faible teneur de grossulaire et (ii) un second groupe qui se caractérise par une concentration plus importante de grossulaire et une teneur très faible en pyrope. La présence de deux compositions de grenat indique soit des sources mixtes (probablement les micaschistes à grenat-staurotide et/ou les micaschistes à grenat) soit une multitude de variétés de grenats provenant d'une seule source.

Le diagramme de discrimination de l'environnement géologique potentiel de formation de grenat (Fig.VI.6) montre que les échantillons se projettent à la fois dans le domaine (B) qui est le champ de la roche magmatique intermédiaire felsique et dans le champ (B) qui est le domaine des métasédiments du facies amphibolite.

La différence d'abondance des variétés de grenat de sable de la Plage-Militaire peut également refléter des sources mixtes (par exemple les micaschistes à grenat-staurotide proximales et/ou les micaschistes à grenat distaux), ce qui suggère une source mixte du grenat.

B.1.2 Les tourmalines

La classification des tourmalines dans le diagramme de Henry et Guidotti, 1985 montre que les tourmalines du sable de la Plage Militaire sont alcalines et très riches en fer ($Fe = (Fe / (Fe + Mg)) : 0.50 \text{ à } 0.95$) indiquant qu'elles sont schorlitiques(Voir chapitre IV).

Dans le diagramme discriminant de Henry et Guidotti (1985), les tourmalines de la Plage-Militaire sont principalement mises en évidence dans le domaine "2", domaine des granitoïdes pauvres en Li et leurs pegmatites associées (Fig.VI. 6). Ce qui suggère une source unique pour ces tourmalines: les veine quartzo-feldspathiques riches en tourmaline.

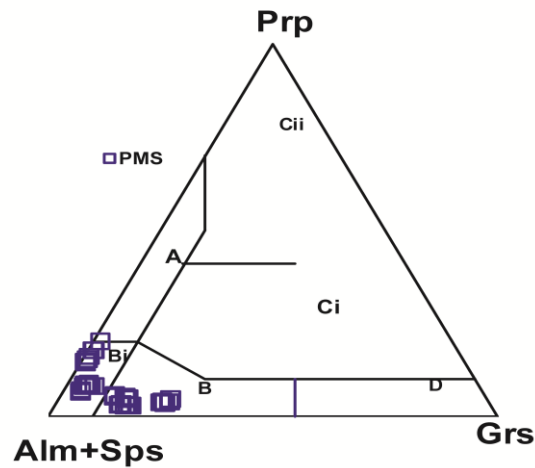


Fig.VI. 6: Composition des grenats dans le diagramme discriminant de Mange et Morton (2007). A: grenats de métasédiments et de roches magmatiques intermédiaires felsiques du faciès granulitique; B: métasédiments du faciès amphibolitique; Bi: roches magmatiques intermédiaires felsiques; Ci: roches mafiques de haut grade; Cii: roches ultramafiques riches en Mg (pyroxénites et péridotites); D: formations métasomatiques.

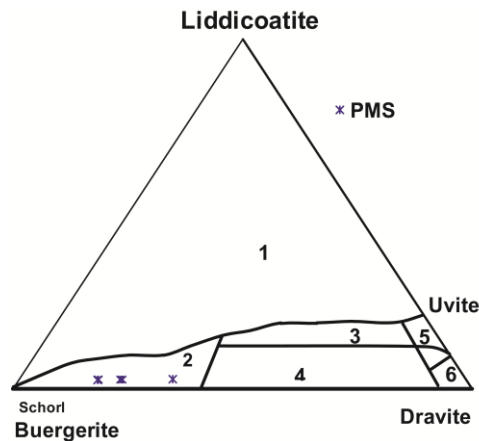


Fig.VI. 7: Position des échantillons de tourmalines dans le diagramme de Henry et Guidotti (1985), 1: Granitoïdes riches en Li, pegmatites et aplites; 2: Granitoïdes pauvres en Li et leurs pegmatites associées; 3: métapelites riches en Ca, métapsammites et roches calco-silicatées; 4: métapelites pauvres en Ca, métapsammites et roches à quartz-tourmaline; 5: méta-carbonates; 6: méta-ultramafiques.

B.2 .Discrimination des roches-sources potentielles du sable a partir des terres rares**B.2.1.Les facteurs de fractionnement**

Les terres rares (REE) (Tab.1) des échantillons de sable de la Plage-Militaire sont comparées aux affleurements rocheux proximaux (Tab.3). Tous les échantillons ont été normalisés au World Shale Average(Piper, 1974; Piper et Bau, 2013).

Tableau.VI. 3 : Récapitulatif des analyses en terres rares du sable de la Plage-Militaire et du WSA (World Shale Average), DS: sable sombre.

Echantillons			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
PLAGE MILITAIRE	DS	Pms6a	42,0	84,0	9,2	36,5	7,6	1,2	9,5	2,0	16,4	3,7	11,8	1,9	11,6	1,6
		Pms1a	41,1	84,1	9,1	36,5	7,7	1,2	9,8	2,2	17,9	4,1	13,2	2,0	12,8	1,8
		Pms2a	42,9	87,2	9,6	37,8	8,1	1,3	10,9	2,6	21,0	4,9	15,4	2,4	15,0	2,1
		Pms3a	46,0	93,3	10,2	40,3	8,5	1,3	11,1	2,6	21,1	4,9	15,4	2,3	14,6	2,0
		Pms4a	40,9	82,6	8,9	36,0	7,6	1,2	9,7	2,3	18,2	4,2	13,4	2,0	13,0	1,8
		Pms4b	34,6	69,7	7,5	30,6	6,4	1,0	7,8	1,8	13,9	3,2	10,3	1,6	9,9	1,4
		Pms5b	36,3	72,1	8,0	31,6	6,6	1,0	8,2	1,8	14,2	3,3	10,3	1,6	10,0	1,4
		Pms6b	36,8	74,4	8,0	32,8	6,8	1,1	8,6	2,0	15,5	3,6	11,3	1,7	10,9	1,5
		Pms2b	40,3	80,9	8,8	35,3	7,4	1,2	9,5	2,1	16,9	3,9	12,2	1,9	12,0	1,7
		Pms3b	44,3	90,1	9,9	39,4	8,4	1,3	11,0	2,6	21,0	4,9	15,5	2,4	14,9	2,1
		Pms1C	41,7	84,4	9,2	36,5	7,7	1,2	9,9	2,2	17,7	4,1	13,0	2,0	12,7	1,8
		Pms2c	42,4	85,5	9,4	37,4	7,9	1,2	9,8	2,3	17,8	4,1	12,9	2,0	12,4	1,7
		Pms3c	42,2	85,1	9,4	37,0	7,8	1,3	10,4	2,4	19,5	4,5	14,2	2,2	13,9	2,0
		Pms5c	41,0	83,4	9,1	36,1	7,7	1,2	9,9	2,3	18,4	4,3	13,5	2,1	12,9	1,8
		Pms1b	33,0	65,8	7,2	29,1	6,0	0,9	6,9	1,5	11,2	2,6	8,0	1,2	7,8	1,1
		Pms6c	41,1	82,3	9,1	36,1	7,6	1,2	9,8	2,2	17,7	4,0	12,7	2,0	12,3	1,7
		Pms5a	24,1	47,4	5,1	21,2	4,3	0,7	4,9	1,0	7,5	1,7	5,4	0,8	5,3	0,7
Word Shale Average		WSA	41,0	83,0	10,0	38,0	7,5	1,6	6,4	1,2	5,5	1,3	3,8	0,6	3,5	0,6

Les facteurs de fractionnement $LREE_N / HREE_N$ et $MREE_N / HREE_N$ ($LREE_N$: $La_N + Pr_N + Nd_N$; $MREE_N$: $Sm_N + Eu_N + Tb_N$; $HREE_N$: $Ho_N + Yb_N + Lu_N$) permettent la discrimination des roches sources potentielles (Jung et al. 2006, Leybourne et Johannesson, 2008).

L'étude comparée des facteurs de fractionnement ($LREE_N / HREE_N$ et $MREE_N / HREE_N$) des échantillons de sable et des formations géologiques proximales et distales montre que les échantillons de sable sombre sont identiques à ceux des affleurements rocheux de la Plage-Militaire et à ceux de la plage El Nasr, suggérant une source mixte (Fig.VI.8).

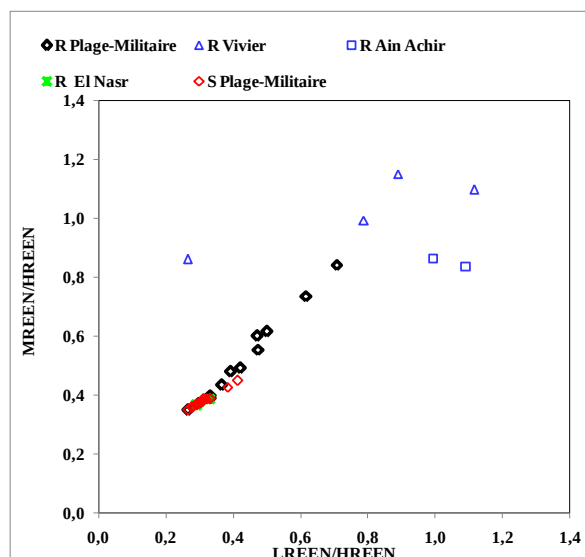


Fig.VI. 8: Diagramme binaire comparant les facteurs de fractionnement ($LREE_N/HREE_N$) et ($MREE_N/HREE_N$) du sable de la Plage-Militaire avec les affleurements rocheux des trois plages, R: roche, S: sable.

B.2.2 Les Profils REE normalisés du sable et des affleurements rocheux

Les profils des terres rares (REE) normalisés au WSA (Piper, 1974; Piper et Bau, 2013) du sable sombre de la Plage-Militaire ont été comparés aux profils des terres rares normalisés des roches proximales de la Plage-Militaire et à celles distales de celle-ci (affleurements rocheux de la plage Ain Achir et de la plage El Nasr) (Fig.VI.9).

On remarque qu'il existe des différences dans l'allure des profils des terres rares du sable de la Plage-Militaire avec celui des affleurements rocheux proximaux et celui d'Ain Achir (Fig.VI. 9a, 9b), mais l'allure des profils des REE est assez similaire à celle des roches d'El Nasr (Fig.VI. 9c).

La présence des échantillons de sable enrichis en terres rares lourdes (HREE) en plus d'échantillons de sable à teneurs similaires en HREE par rapport aux affleurements rocheux suggère une source mixte du sable. Une partie du sable de Plage-Militaire pourrait provenir des affleurements rocheux proximaux : principalement des micaschistes à staurotide et grenat et des formations similaires à celles de la plage d'El Nasr (micaschistes à grenat-staurotide).

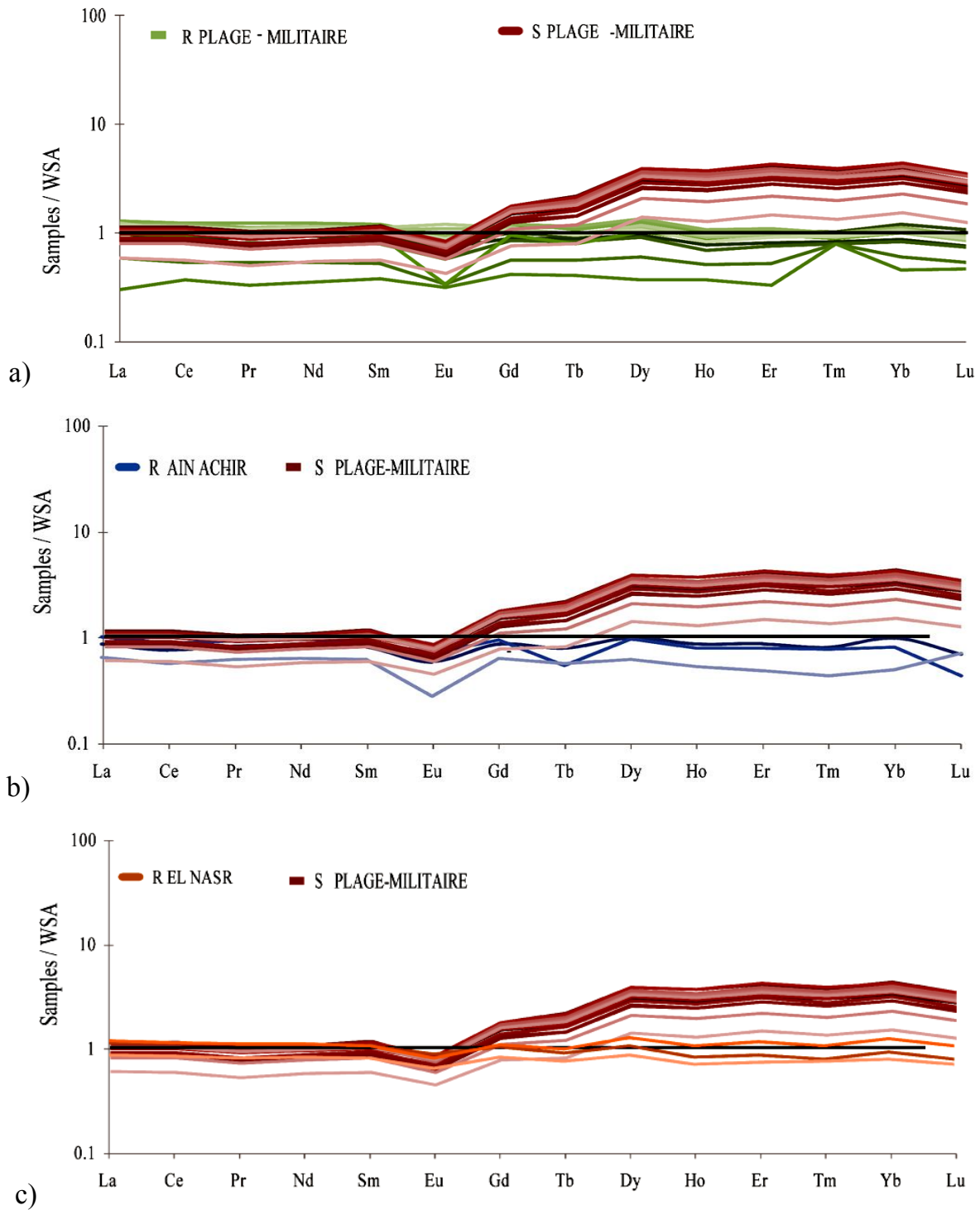


Fig.VI. 9 : Profiles des terres rares du sable de la Plage-Militaire comparés aux profils des affleurements rocheux de: a) Plage-Militaire, Ain Achir et c) El Nasr

VI.3.2. La zone du port

C. Plage El Nasr

C.1. Roches-sources potentielles des grenats et des tourmalines

C.1.1. Les Grenats

Les grenats du sable de la plage El Nasr ont une composition chimique relativement homogène et sont du type almandin : (Almandin 75-79%, Pyrope 15-19%, Grossulaire 2 à 7%) (Locock 2008) (Voir chapitre IV).

La projection des grenats dans le diagramme discriminant l'environnement géologique potentiel de formation des grenats de Mange et Morton (2007) (Fig.VI.10) montre qu'ils se regroupent tous dans le champ (Bi)(champ des roches magmatiques intermédiaires et felsiques). Ce qui suggère que la source de ces grenats pourrait être de source unique.

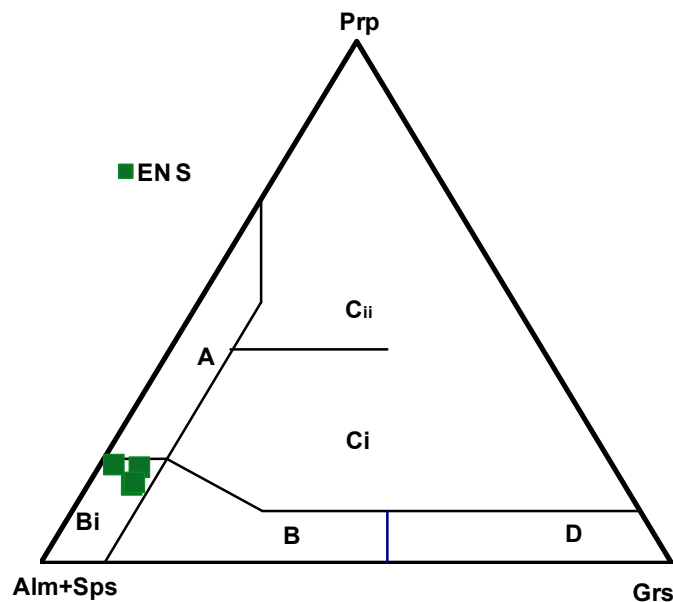


Fig.VI. 10: Composition des grenats dans le diagramme discriminant de Mange et Morton (2007). A: grenats de métasédiments et de roches magmatiques intermédiaires felsiques du faciès granulitique; B: métasédiments du faciès amphibolitique; Bi: roches magmatiques intermédiaires felsiques; Ci: roches mafiques de haut grade; Cii: roches ultramafiques riches en Mg (pyroxénites and péridotites); D: formations métasomatiques.

C.1.2. Les tourmalines

Les tourmalines du sable de la Plage El Nasr sont alcalines, riches en magnésium ($Mg = (Mg / (Fe + Mg)) = 0.70$ à 0.80) (Henry and Guidotti, 1985), ce qui les classent dans le groupe des dravites (Voir chapitre IV).

Le diagramme de discrimination de Henry et Guidotti (1985) montre que les tourmalines de la plage de la plage El Nasr se projettent principalement dans le domaine "4", celui des métapelites pauvres en Ca (Fig.VI. 11), ce qui suggère une source unique pour ces tourmalines.

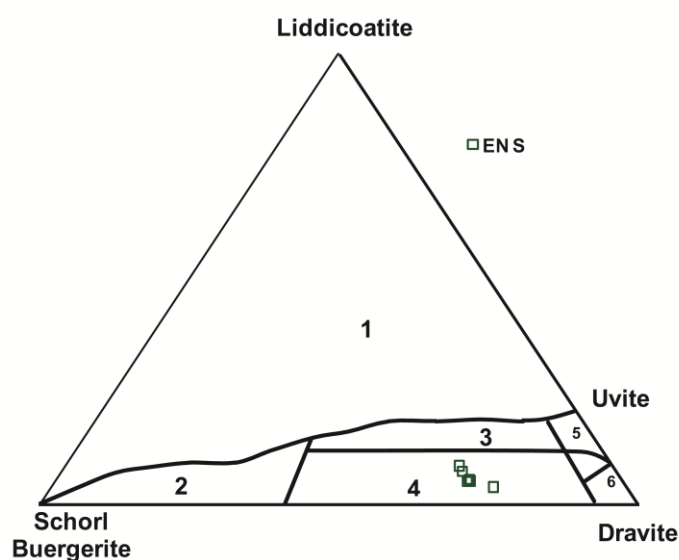


Fig.VI. 11: Position des échantillons de tourmalines dans le diagramme de Henry et Guidotti (1985), 1: Granitoïde riche en Li, pegmatites et aplites; 2: Granitoïdes pauvres en Li et leurs pegmatites associées; 3: métapelites riches en Ca, métapsammites et roches calco-silicatées; 4: métapelites pauvres en Ca, métapsammites et roches à quartz-tourmaline; 5: méta-carbonates; 6: méta-ultramafiques.

C.2. Discrimination des roches-sources potentielles du Sable à partir des terres rares

C.2.1. Les facteurs de fractionnement

L'identification de la provenance a été déterminée après comparaison des données des terres rares des échantillons de sable (Tab.1) avec les affleurements rocheux proximaux des plages étudiées (Tab.4). Tous les échantillons sont normalisés au World Shale Average (Piper, 1974; Piper et Bau, 2013).

Tableau.VI. 4 : Récapitulatif des analyses en terres rares du sable de la plage El Nasr et du WSA (World Shale Average), DS: sable sombre

Echantillons			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
EL NASR	DS	ENS 1A	48,8	97,8	11,2	43,1	8,3	1,5	6,9	1,2	6,0	1,2	3,4	0,5	3,4	0,5
		ENS2A	9,2	16,4	1,6	8,1	1,5	0,5	1,5	0,5	1,4	0,5	0,9	0,5	0,9	0,1
		ENS3A	10,4	18,5	2,0	9,3	1,8	0,4	1,8	0,3	2,0	0,4	1,3	0,2	1,3	0,2
		ENS1B	50,7	98,8	11,5	43,6	8,4	1,4	7,2	1,3	7,2	1,5	4,5	0,7	4,5	0,7
		ENS1C	36,7	72,9	8,5	32,8	6,3	1,1	5,5	1,0	5,0	1,0	2,9	0,5	2,9	0,4
		ENS2B	31,2	60,4	7,0	28,3	6,0	1,1	8,5	2,1	15,9	3,7	11,8	1,8	11,9	1,7
		ENS2C	57,9	117,7	13,4	51,8	10,7	1,5	15,2	3,8	29,1	6,7	20,8	3,2	20,4	2,9
		ENS3C	35,0	68,3	7,9	31,7	7,1	1,4	12,0	3,2	25,6	5,9	19,0	2,9	18,8	2,7
		ENS3B	34,7	67,5	7,8	31,3	6,9	1,3	11,2	2,9	22,8	5,3	17,0	2,6	16,7	2,4
Word Shale Average		WSA	41,0	83,0	10,0	38,0	7,5	1,6	6,4	1,2	5,5	1,3	3,8	0,6	3,5	0,6

La Figure 12 montre qu'une partie du sable sombre de la plage El Nasr a de faibles similitudes avec les formations rocheuses proximales, indiquant que ces dernières pourraient éventuellement en être la source. Par contre une autre partie du sable ne montre aucun lien avec les affleurements rocheux les plus proches.

On remarque une quasi-superposition avec les micaschistes à disthène (R vivier) et à staurotide-grenat (R Ain Achir) du Cap de Garde, suggérant que ce type de roches pourrait être une des sources du sable de la plage El Nasr.

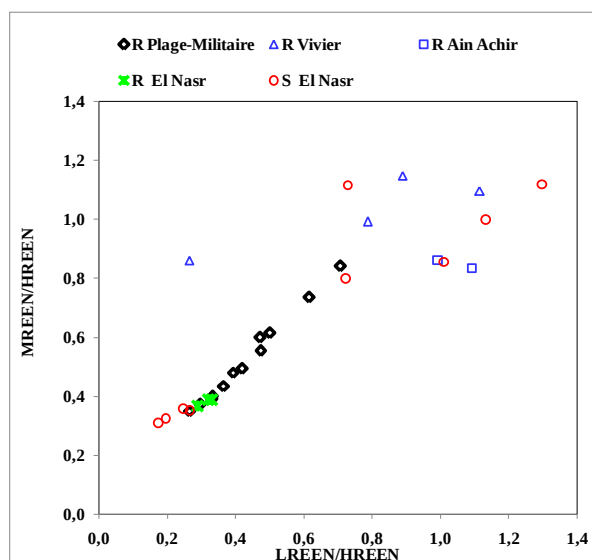


Fig.VI. 12: Diagramme binaire comparant les facteurs de fractionnement ($LREE_N/HREE_N$) et ($MREE_N/HREE_N$) du sable de la plage El Nasr avec les affleurements rocheux des trois plages, R: roche, S: sable.

C.2.2. Les Profils REE normalisés du sable et des affleurements rocheux

Les profils des terres rares (REE) normalisés du sable sombre de la plage El Nasr ont été comparés aux profils des terres rares normalisés des roches proximales à la plage d'El Nasr et à celles distales de celle-ci (affleurements rocheux de la plage Ain Achir et la Plage-Militaire) (Fig.VI.13).

La Figure 13, montre qu'il existe de nombreuses similitudes dans l'allure des profils REE du sable de la plage El Nasr et des affleurements rocheux de la plage d'El Nasr (Fig.VI.13a), de la plage Ain Achir (Fig.VI.13b) et de la Plage-Militaire (Fig.VI.13c).

La distribution des terres rares légères (LREE) du sable et des roches est relativement linéaire et homogène. Certains échantillons de sable montrent un enrichissement en terres rares lourdes (HREE) par rapport aux affleurements rocheux.

La présence d'échantillons de sable enrichis en terres rares lourdes (HREE) en plus d'échantillons de sable à teneurs similaires en HREE par rapport aux affleurements rocheux suggère une source mixte du sable.

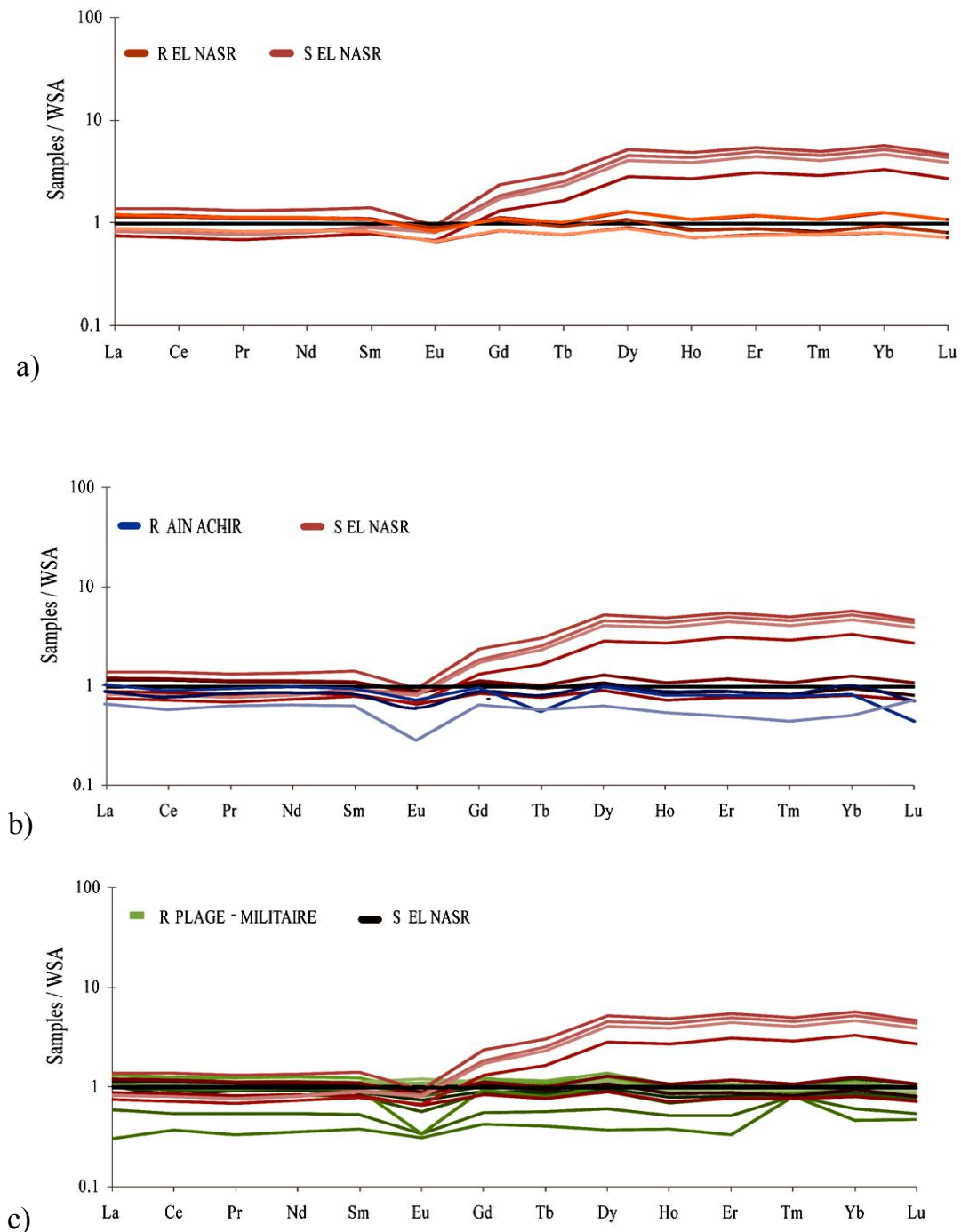


Fig.VI. 13: Profils des terres rares du sable de la plage El Nasr comparés aux profils des affleurements rocheux de: a) El Nasr, b) Ain Achir et c) Plage-Militaire

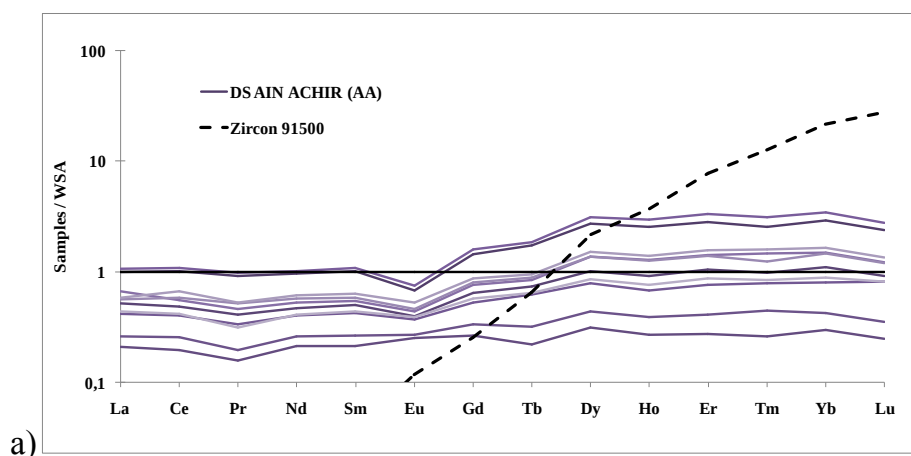
VI.4. SOURCE DES ANOMALIES EN TERRES RARES LOURDES (HREE) DU SABLE DES TROIS PLAGES

Les échantillons de sable d'Ain Achir, de Plage-Militaire et d'El Nasr ont presque les mêmes compositions minéralogiques. Certains échantillons de sable sont plus enrichis en HREE que le reste des échantillons (Fig.VI.14). Ceci est révélateur de l'influence d'une phase minérale riche en terres rares lourdes tel que le zircon.

Les zircons sont des minéraux porteurs des terres rares et particulièrement les terres rares Lourdes (Iizu ka et Hirata, 2004) HREE. Les analyses par diffraction (DRX) des inclusions des minéraux lourds du sable des différentes plages a montré la présence de staurotides à inclusions de zircon.

La comparaison des profils des terres rares des échantillons de sable normalisés au World Shale Average (WSA) (Piper, 1974; Piper et Bau, 2013) des plages d'Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr avec le profil d'un zircon pris de la littérature (Standard 91500, Sano et al. 2002) montre une similitude dans l'allure des terres rares légères (LREE) (Fig.VI.14).

La possibilité de l'influence du zircon sur l'allure des profils des HREE ne peut être exclue. Le zircon pourrait être la source des fortes teneurs du sable en HREE.



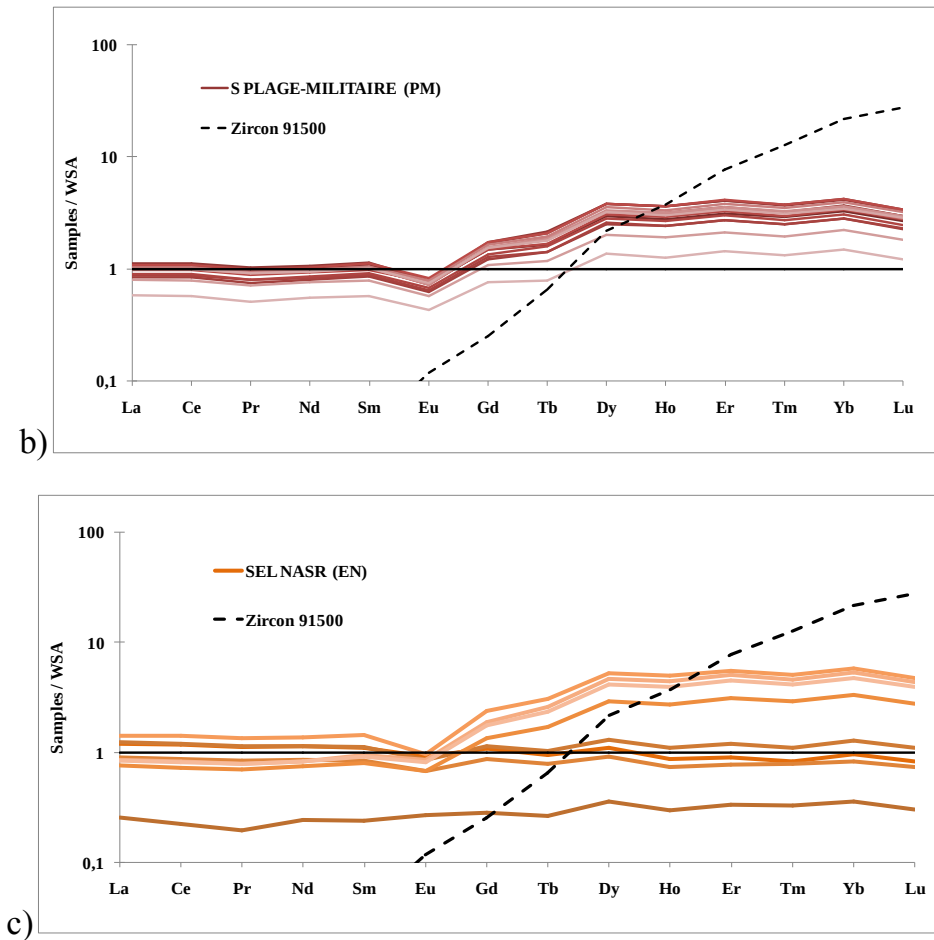


Fig.VI. 14: Profils des terres rares normalisés au WSA du sable sombre et du zircon (Standard 91500, Sano et al.2002): a) Ain Achir, b) Plage-Militaire et c) plage El Nasr.

VI.5. CONCLUSION

- ✓ L'assemblage minéral (staurotide, grenat, tourmaline, disthène et épidote) des trois plages à sable lourd est semblable et suggère l'influence des roches métamorphiques de la zone source proximale et distale.
- ✓ La provenance des sables à minéraux lourds est de source mixte

CHAPITRE VII : POTENTIEL ECONOMIQUE DU SABLE DES PLAGES DE : AIN ACHIR, PLAGE- MILITAIRE ET EL NASR

VII.1. INTRODUCTION

Le sable sombre est composé en grande partie de minéraux lourds sombre dont la densité est habituellement supérieure à 2,9 g/cm³. Certain de ces minéraux lourds sont d'une grande importance sur le plan économique en tant que matières premières minérales métalliques (exemple : l'ilménite et la magnétite). Ils peuvent être des concentrateurs des éléments trace et des terre rares (zircon, rutile, monazite et autres). D'autres minéraux tels que le grenat et la staurotide sont utilisés dans l'industrie pour leurs propriétés physiques (par exemple le grenat pour sa dureté en tant que matériau abrasif).

Le sable des trois plages Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr est essentiellement composé de grenats et de staurotides. C'est pourquoi, dans ce chapitre on s'est concentré sur l'étude de l'intérêt économique de ces deux minéraux.

Les caractéristiques du sable de ces trois plages ont été comparées à celles des producteurs de sable à grenats-staurotides de références mondiales tels que ANTHRACITE Filter Media Company, USA, Kuhmichel (Allemagne) et Lm Minig (Jiangsu , China) et autres.

VII.2. Intérêt économique du grenat

Le grenat est un minéral qui a principalement été utilisé comme pierre semi-précieuse. Le grenat, variété pyrope, est souvent utilisé comme minéral indicateur lors de l'exploration minérale (exemple du diamant). Cependant ces dernières décennies, le grenat (almandin) a vu de nombreuses utilisations supplémentaires en tant que minéral industriel comme matière abrasive, de découpage ou comme filtre. La Figure 1 montre les utilisations industrielles récentes du grenat.

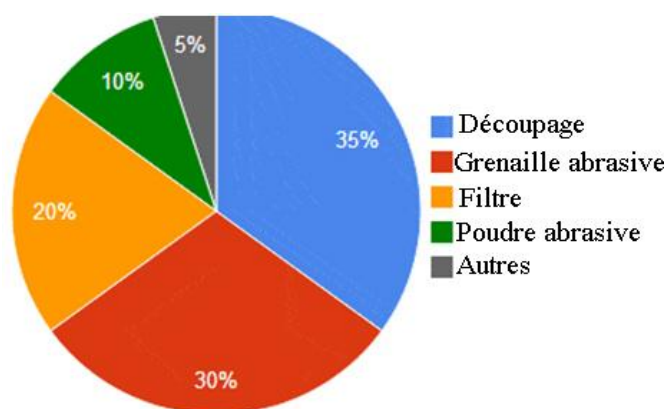


Fig.VII. 1: Utilisation industrielle du grenat (USGS, 2012)

VII.2.1. Le Grenat Comme Matière Filtrante

La densité élevée du grenat (en moyenne 4) est une caractéristique qui permet la constitution de filtre à base de sable à grenat très performant. Le grenat des sables filtrants à grenats est souvent de type almandin. Le sable à grenat se caractérise par des propriétés physiques et chimiques stables.

De part leurs stabilité chimique les sables à grenats peuvent être utilisé comme filtre dans le traitement de l'eau. Le tableau (1) montre la composition chimique moyenne du grenat de la compagnie prise comme référence (ANTHRACITE Filter Media) et celle du grenat des trois plages (Ain Achir ; Plage-Militaire et El Nasr).

Tableau 1 : Composition chimique du grenat de (Anthracite Filter Media Company) et des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr)

	Anthracite Filter Media Company	Ain Achir	Plage-Militaire	El Nasr
SiO ₂	38	37,52	37,07	38,00
Al ₂ O ₃	26	21,27	21,63	21,67
FeO	30	36,47	34,22	33,74
MnO	2	0,62	1,13	0,42
MgO	2	2,27	1,90	4,22
CaO	2	1,71	3,91	1,97

L'étude de la Figure 2 nous permet de remarquer que les teneurs en SiO₂ (37.07-38%) des trois plages sont similaires à celles du grenat de la compagnie (ANTHRACITE Filter Media) (SiO₂=38%) alors que celles en Al₂O₃ (21.27-21.67%) sont nettement inférieures à celles de ANTHRACITE Filter Media Compagny (Al₂O₃=26%). Le grenat de nos plages se caractérise par des teneurs un peu plus élevées en FeO (33.74-36.47%) et en MnO (1.42-1.13%) que celui de ANTHRACITE Filter Media (2%). MgO présente des teneurs similaires sauf pour le grenat de la plage El Nasr qui en est quasiment deux fois plus riche.

Le sable de la plage d'Ain Achir et celui de la plage El Nasr pourrait être utilisé comme matière filtrante.

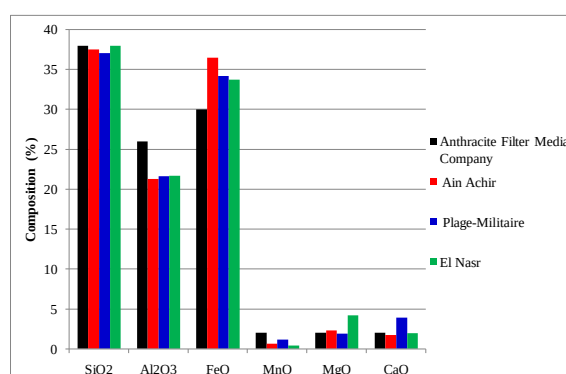


Fig.VII. 2: Composition chimique moyenne des grenats de Anthracite Filter Media Company comparée avec celle des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr).

Les sables à grenats peuvent aussi être utilisés comme matière filtrantes dans les dispositifs d'assainissement non collectifs (habitations avec moins de 20 habitants). D'après la norme DTU641 (2013) le sable filtrant doit être un sable à granulométrie serrée avec un coefficient d'uniformité (Cu) compris entre 3 et 6 ou très serrée avec $Cu < 2$.

Le tableau 2 montre que les valeurs moyennes du coefficient d'uniformité (Cu) du sable des 3 plages sont inférieures à 2, $Cu_{AA}=1.51$, $Cu_{PM}= 1.75$ $Cu_{EN}= 1.76$. Selon la classification des sols, ces sables sont à granulométrie très serrée, donc répondant aux exigences de la norme.

Tableau 2 : Valeurs moyennes du coefficient d'uniformité (Cu) du sable de la plage Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr

	Ain Achir	Plage Militaire	El Nasr
D60	421,46	489,68	506,36
D10	278,31	279,39	287,04
Cu=D60/D10	1,51	1,75	1,76

VII.2.2. Le grenat comme matière abrasive

La dureté du grenat est comprise entre 6,5 et 7,5, celle du grenat almandin est de 7-7.5 sur l'échelle de Mohs. Son broyage produit des arêtes vives pour la coupe et le ponçage, ce qui lui permet d'être utilisé comme abrasif.

Dans le but de connaître la valeur économique de notre sable à grenat, on a comparé la composition chimique moyenne exigée du grenat utilisé comme matière abrasive de deux industriels : Kuhmichel (Allemagne) et Lm Minig (Jiangsu , Chine) avec celle du grenat des trois plages Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr (Tab.3)

Le tableau 3 et la Figure 3 montrent que les teneurs moyennes en silicium (35-38%) des trois plages sont élevées par rapport à celle du grenat des deux compagnies Kuhmichel (Allemande) et Lm Minig (Jiangsu (Chine). Les grenats de la compagnie allemande (Kuhmichel) ont une teneur en aluminium ($\geq 33\%$) à celle de la compagnie Lm minig Jiangsu (Chine) et des trois plages (19-21,67%).

Les grenats des trois plages se caractérisent par un pourcentage du fer très élevée (33.74-36.47%) par rapport aux deux compagnies précédentes 22-23%). La teneur en MnO (0.42-1.13%) dans les grenats des plages étudiées est très inférieure (7%) à celle des grenats de Kuhmichel (Allemande).

Les teneurs en MgO et CaO des grenats de Kuhmichel (Allemande) (MgO = 1%, CaO=1%) celles de Ain Achir, Plage Militaire et El Nasr (MgO =1.9-4.22% et

CaO=1.71-3.91%) sont élevées. Comparées aux teneurs des grenats en ces éléments de Lm Minig (Jiangsu (Chine) (MgO=5%, CaO=7%), celles des plages (MgO=1.9-2.27%, CaO=1.71-3.91%) sont très faibles.

Le sable des trois plages Ain Achir, Plage-Militaire et celui d'El Nasr ne correspondent pas aux caractéristiques chimiques exigées par les compagnies mondiales des sables à grenats. Il en résulte que les sables d'Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr sont inadéquats pour comme matériaux abrasifs.

Tableau 3 : Composition chimique des grenats utilisés comme abrasifs de deux industriels (Kuhmichel Allemagne, Lm Minig (Jiangsu, Chine) et des grenats des plages de Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr.

	Kuhmichel Allemagne	Lm Minig (Jiangsu, China)	Ain Achir	Plage-Militaire	El Nasr
SiO ₂	35,00	35	37,52	37,07	38,00
Al ₂ O ₃	33,00	19	21,27	21,63	21,67
FeO	23,00	22	36,47	34,22	33,74
MnO	7,00	0	0,62	1,13	0,42
MgO	1,00	5	2,27	1,90	4,22
CaO	1,00	7	1,71	3,91	1,97

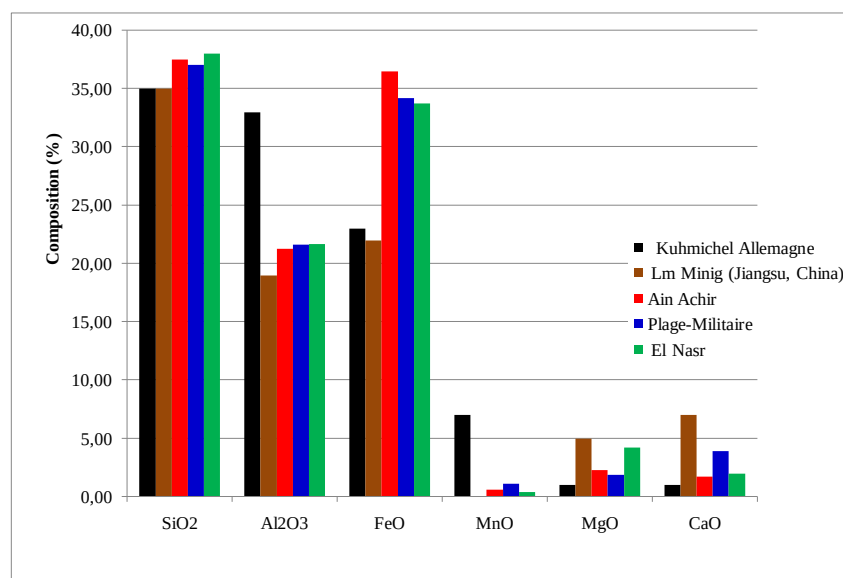


Fig. VII. 3 : Composition chimique des grenats utilisés comme abrasifs par les compagnies Kuhmichel (Allemagne) et Lm Minig (Jiangsu , Chine) comparée avec les grenats des plages d'Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr.

VII.2.3. Le grenat comme matière première pour la coupe au jet d'eau

La plus grande utilisation industrielle du grenat est dans la découpe au jet d'eau (exemple découpe des roches au cours de l'exploitation minière).

La composition chimique (Tab.4a, Fig.VII.4) des grenats des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) montre que le grenat des sables étudiées est plus riche en SiO₂ (37.52-38%) que le grenat de référence des compagnies IOGS/Power GarnetIndia OCEAN Garnet Sands Coet IndiaPvt (31%), SHARPJET Garnet Universal Mineral Inc (33%) et de GMA Garnet GMA GarnetPty Ltd-Port Gregory,(Australia) (36.10%). Les teneurs en Al₂O₃ (21.27-21.67%) sont proches de celles des grenats de référence (Al₂O₃ = 20-21.6%).

Hormis le grenat de la plage de Ain Achir, la teneur en FeO de la Plage-Militaire (34.22%) et de la plage El Nasr (33.74%) est plus faible que celle des industriels de référence IOGS/Power GarnetIndia OCEAN Garnet Sands Coet IndiaPvt (37%), SHARPJET Garnet Universal MineralInc (36%). La teneur en FeO (36.47%) du grenat de la plage Ain Achir est proche de celui de IOGS/Power Garnet India OCEAN Garnet Sands CoetIndia Pvt (37%) et de SHARPJET Garnet Universal Mineral Inc (36%).

La teneur moyenne en MgO (1.9-4.22%) des grenats des trois plages est clairement plus faible (MgO = 4-7.4%) que celle des compagnies prises comme référence.

Les grenats des trois plages sont de type almandin (Tab.4b), mais ils sont plus pauvre en fer: (Ain Achir : Alm=82%, Plage-Militaire : Alm=79% et El Nasr : Alm =79.27%) que le grenat des entreprises de référence (Alm= 97-99%).

La composition chimique et minéralogique des grenats du sable des trois plages ne correspond pas aux critères retenus par les industriels pour la production d'un sable utilisable comme matériau de découpe.

Tableau 4 : Composition chimique (a) et composition minéralogique (b) des grenats des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) et de quelques industriels de référence.

a)

	IOGS/Power Garnet India OCEAN Garnet Sands Coet India Pvt	SHARPJET Garnet Universal Mineral Inc	SHARPJET Garnet Universal Mineral Inc	Ain Achir	Plage-Militaire	EL Nasr
SiO ₂	31,00	33,00	36,10	37,52	37,07	38,00
Al ₂ O ₃	21,60	20,00	20,40	21,27	21,63	21,67
FeO	37,00	36,00	29,80	36,47	34,22	33,74
MnO	0,53	2,00	1,05	0,62	1,13	0,42
CaO	1,84	2,00	1,55	1,71	3,91	1,97
MgO	7,40	4,00	6,00	2,27	1,90	4,22

b)

	IOGS/Power Garnet India OCEAN Garnet Sands Coet India Pvt	SHARPJET Garnet Universal Mineral Inc	GMA Garnet GMA Garnet Pty Ltd-Port	Ain Achir	PLage- Militaire	El Nasr
Type of garnet	Almandin	Almandin	Almandin	Almandin	Almandin	Almandin
Garnet conten	97-99	96	97-98	82,33	79,07	79,27
Free quartz	0	<0,5	<0,5	0	0	0

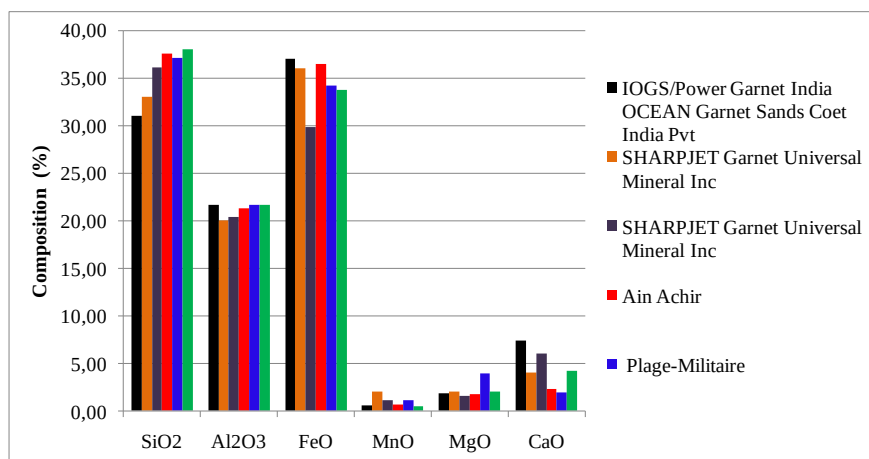


Fig.VII. 4: Composition chimique des grenats utilisés pour la découpe comparée avec des grenats des plages d'Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr.

VII.3. Intérêt économique de la staurotide

VII.3.1.La Staurotide comme matière abrasive

De part sa dureté (7-7.5), la staurotide peut être utilisée comme matériau abrasif. Elle est utilisée pour enlever les revêtements minces tels que la rouille et la calamine.

Dans le but de déterminer l'intérêt économique des staurotides des trois plages on a comparé ces staurotides avec les normes exigées par quelques industriels étrangers tels que Green Cove Springs staurolite Associated Minerals USA Florida, TrailRidge Du Pont Biasill Florida USA et Trail Ridge Du Pont Starblast Florida USA.

La composition chimique (Tab.5a) des staurotide des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr) montre qu'elles sont plus riches en Al_2O_3 (53,51-55,04%) que les staurotides de référence des compagnies Green Cove Springs staurotide Associated Mineral USA Florida(46,08%), Trail Ridge Du Pont Biasill Florida USA (47,26%) et Trail Ridge du Pont Starblast Florida USA (47,05%).

Les teneurs en Fe_2O_3 , P_2O_5 , SiO_2 , ZnO_2 de la staurotides des trois plages et la staurotide de référence des compagnies sont proches (13,43-15,08%), (0-0,07%) (27,24-28,77) et (0,16- 0,54%).

Le sable des trois plages étudiées est plus pauvre en staurotide, Ain Achir (32,48%), Plage-Militaire (45,04%) et El Nasr (59,89%), que le sable pris comme référence (71,6-79%) (Tab.5b).

La teneur modale, la composition chimique et minéralogique du sable des trois plages étudiées ne correspond pas aux exigences des industries de références pour la production d'un sable utilisable comme matériau pour l'abrasif.

Tableau 5 : a) Composition chimique, b) la composition minéralogique du sable à staurotide des compagnies Green Cove Springs staurotide Associated Mineral USA Florida, TrailRidge Du Pont Biasill Florida USA et Trail Ridge du Pont Starblast Florida USA et des trois plages (Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr).

a)

	Green Cove Springs staurolite Associated	Trail Ridge Du Pont Biasill Florida USA	Trail Ridge Du Pont Starblast Florida USA	Staurotide plage Ain Achir	Staurotide Plage- Militaire	Staurotide Plage El Nasr
SiO ₂	27,24	28,77	28,16	27,27	27,77	27,47
TiO ₂	3,19	2,95	4,01	0,57	0,62	0,59
Zr (Hf)O ₂	0,12	1,49	1,52	0,00	0,00	0,00
ZnO ₂	0,42	0,51	0,54	0,16	0,30	0,16
Al ₂ O ₃	46,08	47,26	47,05	53,51	55,04	54,56
Fe ₂ O ₃	15,08	14,07	14,54	13,43	14,70	14,66
MnO	15,22	0,22	0,24	0,12	0,35	0,19
MgO	0,4	2,14	2,68	1,29	1,28	1,44
CaO	1,96	0,16	0,14	0,01	0,02	0,01
P ₂ O ₅	0,07	0,04	0,06	0,00	0,00	0,00
Cr	199	199	219	0,00	0,00	0,00
Cu	195	0	289	0,00	0,00	0,00
Th	83	29	79	0,00	0,00	0,00
U	<5	<5	19	0,00	0,00	0,00
V	189	186	169	0,00	0,00	0,00
Zr	837	10481	10987	0,00	0,00	0,00

b)

	Green Cove Springs staurolite Associated	Trail Ridge Du Pont Biasill Florida USA	Trail Ridge Du Pont Starblast Florida USA	Staurotide plage Ain Achir	Staurotide Plage- Militaire	Staurotide Plage El Nasr
Ilminite	6,7	4,4	6,4	0,00	0,00	0,00
Leucosene	1	2,5	0,3	0,00	0,00	0,00
Kyanite	0	1,8	0,4	2,97	1,84	5,07
Staurolite	71,6	77,3	79	32,48	45,04	59,89
Hornblende	0,4	6,3	0	0,00	0,00	0,00
Tourmaline	1,9	0	8,9	7,37	13,05	4,49
Sillimante	0	1,3	0,1	0,00	0,00	0,00
Topaz	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Corndum	0	0,2	0	0,00	0,00	0,00
Garnet	2,2	0	0	13,96	29,43	14,00
Epidote	15	0,2	0	1,89	1,50	0,00
Quartz	0	0,7	9	9,12	3,00	5,00

VII.5. CONCLUSION

L'étude comparée du sable des 03 plages avec celui de quelques compagnies étrangères prises comme référence, montre une forte différence dans la composition chimique et minéralogique. Ce qui nous permet de dire que les sables étudiés n'ont pas un grand intérêt économique réel pour l'instant.

CONCLUSION GENERALE

Les zones d'études Plage-Militaire, Ain Achir et El Nasr font partie du vaste ensemble cristallophyllien du massif de l'Edough.

Elles sont entourées par des formations rocheuses métamorphiques représentées par différents types de micaschistes (à grenat, staurotide ou à disthène) et des micaschistes avec des niveaux quartzo-feldspathiques riches en tourmaline, des skarns riches en épidote en contact avec les marbre au niveau de la Plage-Militaire et Ain Achir.

L'ensemble de ces roches métamorphiques est partiellement recouvert par des formations récentes représentées par du sable. À Ain Achir le sable est soit clair, soit sombre, souvent rouge et temporaire ; à la Plage-Militaire et El Nasr le sable est sombre et permanent.

La composition minéralogique du sable des plages modernes dépend de la nature de la roche-mère à partir de laquelle la matière détritique a été dérivée. La zone se caractérise par un faible processus d'érosion en raison de la topographie plate et de l'absence d'un système hydrographique actif. La houle saisonnière et les vagues (1-3 m) sont les principaux facteurs d'érosion et contribuent aux nourrissages des plages en sable. L'accumulation des sables lourds se fait par ségrégation hydraulique. La plupart des grains minéraux sont sub-arrondis à arrondis, polis et luisants suggérant une abrasion superficielle dans un environnement marin à énergie moyenne à élevée.

Le sable sombre des trois plages est un sable à caractéristiques granulométriques peu variées, il est généralement à grain fin, bien classé et homogène.

L'étude minéralogique des sables a révélé que ces plages peuvent être considérées comme des plages à sable lourds. Ces sables sont composés principalement de minéraux lourds transparents (grenats, staurotides, disthènes, tourmalines et de rares épidotes) : Ain Achir (77%), Plage Militaire (93%) et El Nasr (jusqu'à 97%). La proportion des minéraux clairs, représentée par le quartz et les carbonates est plus importante à Ain Achir qu'au niveau des deux autres plages. Certains minéraux contiennent des inclusions solides telles que l'ilménite ou le zircon.

L'analyse à la microsonde comparée des grenats et des tourmalines des sables des trois plages avec ceux des affleurements rocheux côtiers proximaux a révélé des similitudes dans leur composition chimique : les grenats sont parfois zonés et de type almandin. Les tourmalines sont alcalines et de type schorl ou dravite. A Ain Achir et à la Plage Militaire on rencontre des schorls suggérant une source unique. Par contre, à El Nasr les dravites sont ubiquistes et les schorls y sont rares indiquant une source multiple des tourmalines.

L'étude statistique (corrélation et Analyse en Composantes Principales, ACP) a fait ressortir qu'il existe une forte relation entre la quantité de minéraux lourds (grenat, staurotide et tourmaline) et les éléments chimiques (majeurs, traces et terres rares) du sable.

Le sable sombre se caractérise par des concentrations modales élevées en ferromagnésiens, les valeurs élevées en Fe_2O_3 et MgO reflètent les fortes concentrations en grenat, staurotide et en tourmaline alors que les teneurs élevées en TiO_2 traduisent la présence d'ilménite sous forme d'inclusions dans les grenats.

Les éléments traces (Ga, V, Zn, Ni, Cr, Y et Zr) sont plus corrélés au grenat et à la staurotide, alors que les fortes concentrations de Sr et Ba sont attribuées à la présence de minéraux tels que la calcite et le quartz.

Il existe une forte corrélation entre le grenat et les terres rares d'une part et la staurotide et les terres rares d'autre part, ce qui suggère que les REE sont principalement hébergées dans ces minéraux.

La comparaison des REE normalisées au WSA (World Shale Average) des sables des plages avec ceux des affleurements rocheux a révélé : 1) plage d'Ain Achir : une allure similaire des profils REE des sables et des roches, ce qui reflète une source proximale unique. 2) Plage Militaire: un profil similaire aux LREE des roches, mais avec un fort enrichissement en HREE, ce qui suggère la présence de minéraux lourds à inclusions de phases porteuses des HREE (inclusions de zircon dans les grenats). 3) Plage El Nasr : deux types de spectres : un spectre similaire à celui des roches proximales et un spectre enrichi en HREE (grenats à inclusions de zircons) suggérant une source mixte. La chimie du sable étudié est contrôlée par leur composition minéralogique.

Les caractéristiques du sable des trois plages ont été comparées à celles des producteurs de sable à grenats-staurotides de références mondiales. L'étude a montré que le sable étudié ne répond pas aux exigences des compagnies prises comme références. Ce qui nous permet de dire que le sable d'Ain Achir, Plage-Militaire et El Nasr n'ont actuellement, aucun intérêt économique

Références bibliographiques

- Ahmed Said, Y., Leake ,B. E.,1992.** The composition et origin of the Kef Lakhalamphibolites et associated amphibolites et olivine-rich enclaves, Edough, Annaba,NE Algeria; Min Mag. 56(4) 459–468.
- Ahmed Said ,Y., Leake, B.E et Rogers, G.,1993.** The petrology, geochemistry et petrogenesis of the Edough igneous rocks Annaba NE Algeria; J. Afr. Earth Sci. 17(1)111–123.
- Aissa, D.E., Cheilletz, A., Marignac, C., Feraud, G., Gasquet, D. et ruffet,G., 1994.**
Confirmation par datation $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de l'âge burdigalien de la distension dans le massif de l'Edough (NE Algerie). Conséquences métallogéniques. 15 ème RST.
Abstr. Nancy, P91. Soc. Géol. de France Edition.
- ETI., 2013** (Agence Nationale de développement de l'Investissement) Invest in Algeria , Wilaya d'Annaba.
- Blatt, H., Tracy, R.J et Owens, B.E.,2006.** Petrology: igneous, sedimentary et metamorphic, 3rd edn. W.H. Freeman et Co, New York.
- Bossière,G., Collomb, P et Mahdjoub, Y., 1976.** Sur un gisement de Péridotites découvert dans le massif cristallophyllien de l'Edough (Annaba, Algérie).C.R.Acad.Sci., Paris, 283. Série II, 885–888.
- Bouzenoune, A., Remoum,K., 2008.**Granulometry and heavy minerals concentrations in OuedZhour beach and dune sand (Jijel, North Eastern Algeria). Bull. Soc. Hist. Nat, 19(3) (2008) 287-302
- Bruguier, O., Hammor, D., Bosch, D et Caby, R., 2009.** Miocen incorporation of peridotite into the Hercynian basement of the Maghrebide (Edough massif, NE Algeria): Implications for the geodynamic evolution of the Western Mediterranean;Chem. Geol. 261(1–2) 172–184.
- Brunnel M., Hammor D, Misserie, M, Gleizes,G et Bouleto, J., 1988.**
Cisaillements synmétamorphiques avec transport vers le Nord-Ouest dans le massif cristallinde l'Edough (Est Algérien). C. R. Acad.Paris, 306: 1039-1045.
- Caby, R., Hammor, D., 1992.** Le massif de l'Edough (Algérie) : Un "MétamorphicCoreComplex" d'âge miocène dans les Maghrébides. C. R. Acad. Sci. Paris, t .314, Série II, p. 829-835.
- Caby, R., Hammor ,D., Delor, C., 2001.** Metamorphic evolution, partial melting Et Miocene exhumation of lower crust in the l'Edough metamorphic core complexe, west mediterraneanorogen, eastern Algeria.Tectonophysics, 342, 239-273.

- Castor, S.B et Hedrick, L.B., 2006.** Rare earth elements; in Kogel, J.E, Trivedi, N.C., Barker, J.M., et Krukowski, S.T., ed., Industrial Minerals volume, 7th edition: Society for Mining, Metallurgy, et Exploration, Littleton, Colorado, 769-792.
- Darnley AG., Bjorklund A., Bolviken, B., Gustavsson, N., Koval, P.V., Plant J.A., Steenfel.A., Tauchid, M et Xie X., 1995.** A Global Geochemical Database for Environmental et Resource Management, Recommendations for International Geochemical Mapping. Final report of IGCP project 259. UNESCO Publishing.
- Droop ,G. T. R., 1987.** A general equation for estimating Fe 3+ concentrations in ferromagnesian silicates et oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. Min. Sc.
- Elsner, H. (1992).** Geologie der Schwermineral-Seifenlagerstätten im Nordosten Floridas.- Ph.D.thesis at the Faculty of Geosciences of the University of Hannover: xiv + 435 pp., 117 fig., 80 tab.; Hannover (unpublished).
- Folk, R Et Ward, W., 1957.** Brazors river bors, a study in significance of grain size parameters. J. Sedim. Petrol., Vol. 27, pp. 13-27.
- Gleizes, G., Bouleton, J., Bossiere, G et Collomb, P., 1988.** Données lithologiques et lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le Massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérien). C. R. Acad. Sci. Paris Ser. II 306, 1001–1008.
- Green Cove Springs “Stauroilite” Associated Minerals USA Florida, USA**
- Hadj Zobir, S., Laouar, R et Oberhanslir, R., 2007.** Les metabasites de Sidi Mohamed Edough NE Algérien Caractéristiques pétrographiques minéralogiques et géochimiques; Serv. Géol. Nat. 18 25–41.
- Hadj Zobir, S et Mocek Beate., 2012.** Determination of the source rocks for the diatexites from the Edough Massif, Annaba, NE Algeria. J. Afr. Earth Sci, 69, 26–33
- Hadj Zobir, S., Oberhansli, R., 2013.** The Sidi Mohamed peridotites (Edough Massif, NE Algeria): Evidence for an upper mantle origin. J. Earth Syst. Sci. 122 (6), 1455–1465.
- Hadj Zobir, S., Altenberger, U, Gunter, C., 2014.** Geochemistry et petrology of metamorphosed submarine basic ashes in the Edough Massif (Cap de Garde, Annaba, northeastern Algeria). C. R. Geosci 346 244–254.
- Hammor, D., 1992.** Du panafricain au miocène : 600 Ma. D'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie nord-orientale) retracée par pétrologie, tectonique et la géochronologie (U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd, 39Ar/40Ar) Nouvelle thèse, Université de Montpellier II, France.
- Hammor, D et Lancelot, J., 1998.** Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le Massif de l'Edough (Nord-Est de l'Algérie). C.R Acad. Sci., Paris, 327, série II, 391-396

- Harben, P. W. et Kuzvart, M. (1997).**Garnet.- in: Global Geology: 186-192, 3 tab.London (IMIL).
- Henry, D.J., Guidotti, C.V.,1985.** Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite- grade metapelites of NW Maine. Am.Mineral. v. 70, p. 1-15.
- Henry,D.J., Novák,M., Hawthorne, F.C., Ertl, A., Dutrow,B.L., Uher,P et Pezozotta,F.,2011.** Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals: Am .Mineral, v. 96, p. 895–913.
- Hilly, J., 1962.** Etude géologique du Massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est Constantinois). Publ. Ser. Carte Géol. Algérie 19, 408 p.
- Hufty A.,2001.** Introduction à la climatologie, Les presses de l'Université de Laval, De Böeck Université, 545 p.
- Ilavsky, J et Snopkova, P., 1987.** Découverte d'acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie).C. R. Acad. Sci. Paris, t. 305, Série II, p. 881-884
- Jiang, S.Y., Palmer, M.R., Li, Y. H., Xue, C.J., 1995.** Chemical compositions of tourmaline in the Yindongzi–Tongmugou Pb–Zn deposits, Qinling, China: implications for hydrothermal ore-forming processes. Miner. Depos. 30, 225–234.
- Jiang, S.Y., Palmer, M.R., McDonald, A.M., Slack, J.F., Leitch, C.H.B., 1996.** Feruvite from the Sullivan Pb–Zn–Ag deposit, British Columbia. Can. Mineral. 34, 733–740.
- Jung, H.S., Lim, D.I., Yang, S.Y et Yoo, H.S., 2006.**Constraints of REE distribution patterns in core sediments et their provenance, Northern East China: Economic Environmental Geology Sea, v. 39 (1), p. 39–51 (in Korean with English abstract).
- Kermani,S., Boutiba,M ., Boutaleb,A et Fagel, N.,2015.** Distribution of heavy and clay minerals in coastal sediment of Jijel, East of Algeria: indicators of sediment sources and transport and deposition environments, DOI10.1007/s12517-015-2155-2
- Lahondère, J.C., Feinberg, H. et HAQ, B. U., 1979.** Datation des grès numidiens d'Algérie orientale: conséquences structurales. Comptes Rendus Acad. Sci 289, 383-386.
- Laouar, R., 2002.** Petrogeneticetmetallogenetic studies of the Tertiary igneous complexes of northeast Algeria: A stable isotope study. Thèse Doct d'état, UBM Annaba, 179 p.

- Laouar, R., Boyce, A.J., Ahmed-Said, Y., Ouabadi, A., Fallick, A.E et Toubal, A., 2002.** Stable isotope study of the igneous, metamorphic et mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, Northeast Algeria. *J. Afr. Earth Sci*, 35, 271-283.
- Laouar, R., Boyce, A.J., Arafa, M., Ouabadi, A et Fallick, A.E., 2005.** Petrological, geochemical, et stable isotope constraints on the genesis of the Miocene igneous rocks of Chetaibi et Cap de Fer (NE Algeria) . *J. Afr. Earth. Sci* 41. 445–465.
- Le ribault L. 1975 .**, L'exoscopie. Méthodes et applications. Edit. C.F.P. 231 p.
- Leybourne, M. I et Johannesson, K.H., 2008.** Rare earth elements (REE) et yttrium in stream waters, stream sediments, et Fe–Mn oxyhydroxides: fractionation, speciation, et controls over REE + Y patterns in the surface environment: *Geochim. Cosmochim. Acta* , v. 72, p. 5962–5983
- Locock, A.J., 2008.** An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, et a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets: *Comput. Geosci*, v. 34, p. 1769–1780.
- Marignac, Ch., 1985.** La minéralisation filonienne d'Ain Barbar (Algérie) : Un exemple D'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Algérie du nord. Thèse de doctorat D'état 2 tomes. I. N. P, Loraine Nancy.
- Marignac, C et Zimmermann, J. L., 1983.** Age K-R de l'événement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Ain Barbar (Est Constantinois). *Miner. Depos*, 18, 457-467.
- Mange, M.A., Wright, D.T et Eds., 2007.** Heavy Minerals in Use. Elsevier, Amsterdam. 1283.
- Miskovsky, J.C et DEBARD E., 2002.** Granulométrie des sédiments et étude de leur fraction grossière. *In* MISKOVSKY J.C (sous la direction de) : Géologie de la Préhistoire : Méthodes, Techniques, Applications. Edit. Géopré., 479-500.
- Monecke T., Kempe U. & Götze J., 2002.** Genetic significance of the trace element content in metamorphic et hydrothermal quartz: A reconnaissance study, *Earth. Planet. SC. Lett*, Vol. 202, p. 709–724.
- Monie, P., Montigny, R. ET Maluski, H., 1992.** Age burdigalien de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylies, Algérie). Données radiométriques $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 163, 571-584
- Nesbitt, H.W., 1979.** Mobility et fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite: *Nature*, v. 279, p. 206–210.
- Oularbi, A., Zeghiche, A., 2009.** Sensibilité à l'érosion du massif cristallophyllien de l'Edough (Nord-Est Algérien). *Synthèse*. 20, 58-72.

- Pirkle.F.L., Pirkle, E.E., Pirkle, A et Dichs S.E., 1985.**Evaluation through correlation et principal component analyses of delta origin for the Hawthorne et Citronelle sediments of peninsular Florida. *J. Geol*, Vol.93, 493–501
- Piper, D.Z., 1974.** Rare earths in the sedimentary cycle: a summary, *ChemGeol*, v. 4, p. 285-304.
- Piper, D.Z et Bau, M., 2013.** Normalized rare earth elements in water, sediments, et wine: identifying sources et environmental redox conditions. *Am. J. Analyt. Chem*, vol. 4.10A, p. 69-83 304.
- Plessen, H.G. (1997).** Analytik und Geochemie der Platingruppenelemente in magmatischen Gesteinen. Scientific Technical Report STR97/11, Geoforschungszentrum, Potsdam, 135 pp.
- Rothwell R.G., 1989.** Minerals and Mineraloids in Marine Sediments: an Optical Identification Guide. London: Elsevier.
- Rösler, H.J. et Lange L., 1976.**Geochemische Tabellen, Springer, 674p.
- Rudnick R.L et Fountain, D.M., 1995.** Nature et composition of the continental crust -- a lower crustal perspective.*Rev. Geophys*, Vol.33, 267-309.
- Rudnick, R.L et Gao C., 2005.** Composition of the continental crust; in R.L. Rudnick, ed., *The Crust: Treatise on Geochemistry*, Vol. 3, Elsevier, San Diego, California, 1-64
- Samson, I.M et Wood S., 2005.** The rare-earth elements: behavior in hydrothermal fluids et concentration in hydrothermal mineral deposits, exclusive of alkaline settings; in Linnen, RL et Samson, IM eds., *Rare-element geochemistry et mineral deposits*, Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes, Vol.17, 269-297
- Sano, Y., Terada, K et Fukuoka,T 2002** High mass resolution ion microprobe analysis of rare earth elements in silicate glass, apatite et zircon: lack of matrix dependency, *Chem.Geol***184** 217-230
- Svendsen J.B.,2002.** Sedimentology et High-Resolution Stratigraphy of Fluvial-Aeolian Sequences Using Integrated Elemental Whole Rock Geochemistry. Ph.D.thesis, University of Aarhus, Denmark.
- Toubal, A., 1986.** Découverte d'une lherzolithe Oued Begraa. M. Edough. 6ème Séminaire des sciences de la terre,Alger. p105.
- TranNgoc, L., 1977.**Un nouvel essai d'identification des sols : l'essai au bleu de méthylène, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*88, mars-avril, pp. 136-137.
- Vila, J. M., 1970.**Le Djebel Edough: un massif cristallin externe du N.E. de la Berbérie. *Bull. Soc. Géol. Fr*, 7, (XII), 805-812.

- Whitney D.L. & Evans B.W., 2010.** Abbreviations for names of rock-forming minerals, American Mineralogist, Vol. 95 (1), 185-187.
- Yavuz, F., Yavuz, V., Sasmaz, A., 2014.** WinClastour –A visual basic program for tourmaline formula recalculation et classification, Comput et Geosci, vol. 32, p. 1156-1168.
- Zuleger, E. et Erzinger, J., 1988.** Determination of the REE et Y in silicate materials with ICP-AES. Ana.Chem, 332(2):140-143.

PAGES WEB

- <https://geology.com/minerals/garnet.shtml>
- [file:///C:/Users/pc/Downloads/datasheet_garnet%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/pc/Downloads/datasheet_garnet%20(1).pdf)
- <http://www.stonecontact.com/products-328468/water-filter-abrasives-garnet-set-for-water-treatment>
- [file:///C:/Users/pc/Downloads/datasheet_garnet%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/pc/Downloads/datasheet_garnet%20(1).pdf)
- <http://www.sinogarnet.com/Html/water.asp>
- http://ceifiltration.com/CEI-Filtration/Garnet/Garnet_MSDS_2
- <http://www.sinogarnet.com/Html/waterjet.asp>
- <http://www.sinogarnet.com/Html/water.asp>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_d'Annaba (2016)
- https://www.meteoblue.com/fr/meteo/prevision/archive/annaba_alg%C3%A9rie_2506999?fcstlength=1y&year=2015&month=11
- <http://www.temperatureweather.com/mediterr/meteo/fr-meteo-en-algerie-annaba.htm>

LOGITIELS

- XLSTAT-PRO 7.5 :logiciel de statistique pour Excel
- Mesurim :logiciel de mesure sur les images (réalisé par Jean-François Madre, enseignant associé à l'équipe ACCES)
- Gradistat : logiciel d'analyse granulométrique (SJ BLOTT - 2001)
- Illustrator 10 : logiciel de création graphique vectorielle.

ANNEXES

ARTICLE 1 :

Asma Chemam, Soraya Hadj Zobir, Menana Daif, Uwe Altenberger & Christina Günter, Geochemistry of dark coastal heavy-mineral beaches sand (Annaba, Northeast Algeria), *Rev. Sci. Technol., Synthèse* 35: 154-165 (2017)

ARTICLE 2:

Asma Chemam, Soraya Hadj Zobir, Menana Daif, Uwe Altenberger & Christina Günter, Provenance analyses of the heavy mineral beach sands of the Annaba coast, northeast Algeria, and their consequences for the evaluation of fossil placer deposit, *Journal of Earth System Science* 127 : 118 (2018)

Geochemistry of dark coastal heavy-mineral beaches sand (Annaba, Northeast Algeria)

Géochimie des sables sombres côtiers à minéraux lourds (Annaba, Nord-Est Algérien)

Asma Chemam^{1*}, Soraya Hadj Zobir², Menana Daif¹, Uwe Altenberger³ & Christina Günter³

¹ Badji-Mokhtar/Annaba University, Laboratory of LGRN, P.O. Box 12, 23000, Annaba, Algeria.

² Badji-Mokhtar/Annaba University, Laboratory of Soils and Sustainable Development, P.O. Box 12, 23000, Annaba, Algeria.

³ Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Strasse 24-25, D 14476 Potsdam-Golm Germany.

Soumis le : 06/03/2017

Révisé le : 19/09/2017

Accepté le : 26/09/2017

ملخص

تتضمن منطقة الدراسة (عين عشير والشاطئ العسكري) إلى كتلة الإيدوغ الجبلية/غابة الجزائر. ميزنا في شاطئ عين عشير رمالا بنية فاتحة ورمالا قاتمة تميل إلى اللون الأحمر. تظهر هذه الأخيرة بعد عاصفة بحرية. أما رمال الشاطئ العسكري فهي ذات لون قاتم دائما. تكونت رمال عين عشير والشاطئ العسكري من الميكاشيست ذي الغرانات والستروليت والميكاشيست ذي الأنلوسيت أو الديستان، المرمر، السكارن ذي الإبيدوت، المغماتيت وعروق المرو الصفاحي ذي التورمالين. تم تحليل رمال الشاطئ إلى عناصر رئيسية وثنائية إضافة إلى التراب النادر. بينت تحاليل الرمال الفاتحة وكذلك القاتمة لحيث عشير اختلافات هامة في تركيبهما الكيميائي. تركزت بعض العناصر الأساسية والثقوية وكذلك في التراب النادر في الرمال الفاتحة هي أقل من الرمال القاتمة. وبالمقابل فإن التركيب الكيميائي للرمال القاتمة للشاطئ متماثل. بينت هذه الدراسة وجود روابط إيجابية بين محتوى العناصر الرئيسية، الثقوية، التراب النادر والتركيز المتميز للفلزات الثقيلة خاصة مع وجود فلزات التحول مثل الغرانات، سترويت، التورمالين والإبيدوت.

الكلمات المفتاحية: فلزات ثقيلة - عناصر رئيسية - عناصر ثنائية - رمال الشاطئ.

Résumé

La région étudiée (Ain Achir et Plage-Militaire) fait partie du Massif de l'Edough/Annaba/Algérie. A Ain Achir on distingue du sable brun clair et du sable sombre rougeâtre. Ce dernier apparaît principalement après une tempête de mer. Celui de la Plage-Militaire est de couleur sombre en permanence. Les sables étudiés se sont formés près des micaschistes à grenat -, staurolite - et/ou à andalousite ou disthène, des marbres, des skarns à épidote, des migmatites et des veines du quartzo-feldspathiques à tourmaline. Le sable des deux plages a été analysé en éléments majeurs, en traces, ainsi qu'en terres rares. Le sable clair et celui sombre de la plage de Ain Achir montrent d'importantes différences dans leurs compositions chimiques. Les concentrations de certains majeurs, traces et Terre Rares dans le sable clair sont inférieures à celles du sable sombre. Par-contre la composition chimique des sables sombres des deux plages est similaire. Cette étude montre une forte corrélation positive entre la teneur en éléments majeurs, traces, terres rares et la concentration modale en minéraux lourds et particulièrement avec les minéraux du métamorphisme tels que le grenat, la staurolite, la tourmaline et l'épidote.

Mots clés : Minéraux lourds- élément majeur –élément trace – les terres rares- sable de plage.

Abstract

The study area (Ain Achir and Plage-Militaire beaches) is a part of the Edough Massif/Annaba /Algeria. Recent beach sediments of Ain Achir are characterized by light sand and dark reddish one. This latter appears mostly after a sea storm. The Plage-Militaire sands are permanently dark brown. The study sands are formed near to garnet-, staurolite- and/or andalusite-, kyanite- micaschists, marble, epidotic skarns, migmatites and numerous tourmaline bearing quartzo-feldspathic veins. Whole sand samples from the two beaches have been analyzed in major and trace elements, including rare earth elements (REE). At Ain Achir beach, the light sand and the dark one show significant differences in their chemical compositions. Some of the major elements, the trace elements as well as the Rare Earth Elements in the light sand are lower than in the dark sand samples. Whereas the chemical composition of the dark sand of the two beaches are nearly similar. This study shows a strong positive correlation between the concentration of major, traces and REE elements and the amount of heavy and especially metamorphic minerals like garnet, staurolite, tourmaline and epidote.

Key words: Heavy minerals- Major - Trace element – REE- Sand-Beach

* Corresponding Author: Chemam.asma@gmail.com



1. INTRODUCTION

The majority of the heavy mineral sand-beaches in the world occur as deposits in the swash zone of the coastal sediments. The present paper presents the first study of heavy mineral sands from the Annaba/Algeria coastal sands. The Annaba coastline is composed of a dozen of fine sand beaches. Some beaches are characterized by a red-brownish sand colour, the Ain Achir and the Plage-Militaire beaches are one of them. These two beaches are located along the Northern coast of Annaba/Algeria. The Ain Achir sand is light and mostly dark brown after a sea storm, whereas the Plage-Militaire sand is permanently dark brown. The mineralogical composition of the brown sand of these two beaches is dominated by heavy transparent minerals such as: garnet, staurolite, kyanite, tourmaline and epidote. The sand is also characterized by anomalously high concentrations of some major (e.g. TiO_2 , MgO , and Fe_2O_3), trace and rare-earth elements. The objective of this paper is to identify the relationships between the observed heavy minerals in these two beaches and selected major, trace and rare earth elements.

2. STUDY AREA

The study area “Ain Achir and Plage-Militaire” beaches is located at the Cap de Garde between $36^\circ 57'20''$ - $36^\circ 57'54''$ latitude and $7^\circ 46'76''$ - $7^\circ 46'96''$ longitude (Fig.1a).

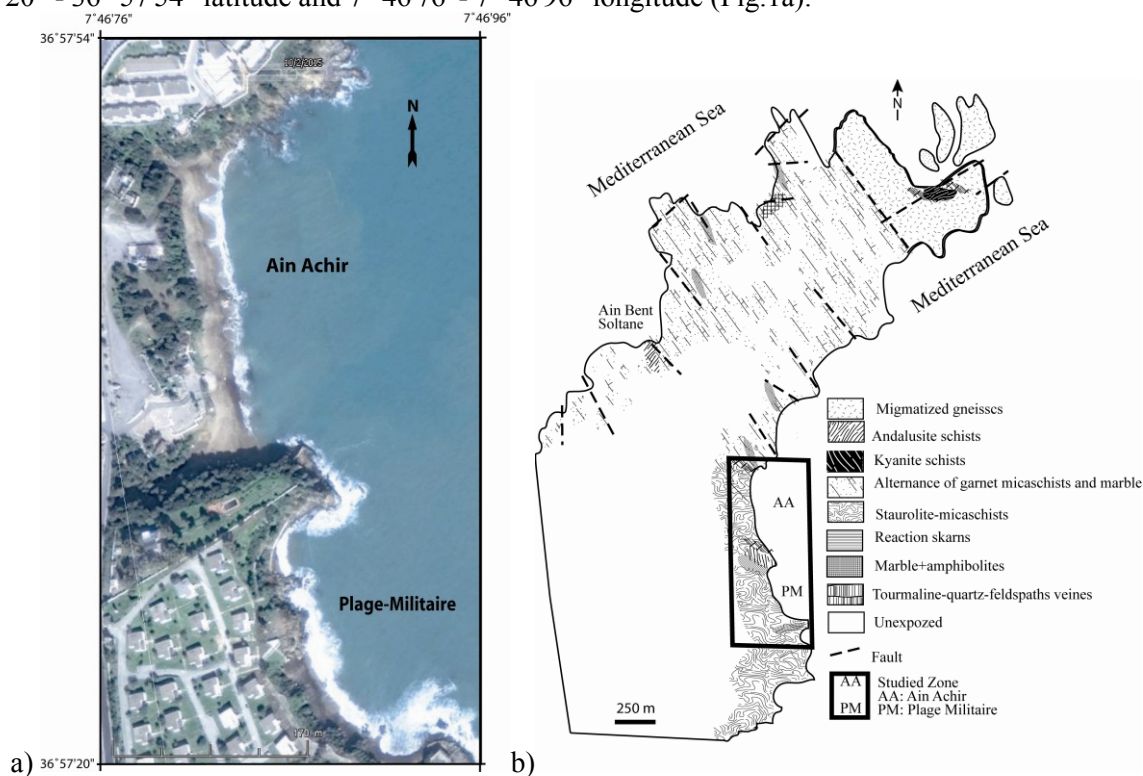


Figure.1. a) Google Earth view of the Ain Achir and the Plage-Militaire beaches, b) Simplified geological maps of the Cap de Garde with the study beaches' location, [2, 4, 7]

The Cap de Garde is the north part Edough Massif/Annaba/Algeria and extends over a distance of about 3 km in length. The study area is composed by two small beaches: Ain Achir (275x 30m) and Plage-Militaire (236x20m) (Fig.1a). These two beaches are underlined by metamorphic rocks (Fig.1b): Andalusite-garnet-schists, kyanite-schists, staurolite-garnet-schists alternating with marble layers, quartzite and numerous tourmaline-quartz-feldspaths veins and some garnetites layers which are considered as metamorphosed paleo-garnet beach-sand placer [1]. The contact between the staurolite-garnet-schists and the marble layers is underlined by reaction skarns (epidote rich skarns). The North part of the Cap de Garde is composed by migmatized gneisses and outcrops of massif marbles with some locally metamorphosed submarine basic ashes layers [2]. The Cap de Garde and the Edough Massif have experienced the same polyphase regional metamorphism characterised by high-pressure (12–14 kbar) and medium-temperature metamorphic conditions (500-600 °C) [3, 4, 5, 6, 7]. The different metamorphic units undergone a first oblique deformation characterized by syn-metamorphic

folds followed by flexural shear generating upright folds of N140° direction, anticlines with direction N50° to N60° and shear senses of N120° to N160° direction.

3. ANALYTICAL METHODS AND SAMPLING

Thirty-five (18 at Ain Achir and 17 at Plage-Militaire beach) superficial hand samples with a single weight of 3kg were acquired from a 10x15m grid covering the two beaches. The bulk sample was reduced by coning and quartering and a 100-g portion of the sample was selected for laboratory analysis [8]. Analyses for major and minor elements and for some trace elements have been conducted on fused glass and have been pressed powder disks respectively. Major, minor and some trace elements have been acquired by a Siemens SRS303-AS XRF with a Rh X-ray tube at standard running conditions at the GeoForschungs Zentrum Potsdam (GFZ), Germany. Measurements of trace elements, including Nb, have been performed in the ICP-MS laboratory at the (GFZ), using a VG Elemental Plasma Quad System PQ2+i. REE were analyzed at the GFZ laboratories by an ICP-OES (Varian Vista MPX) after separation of major and most trace elements. Whole heavy mineral grains were identified under incident light using a binocular microscope. Random grain samples were also mounted in thin section for identification using a petrography microscope, thus providing a means of verifying the bulk identifications achieved under incident light. The minerals registered by microscopic investigations were further checked by X-ray. Counts of minerals were made under the microscope. The occurrence of clays has been determined using the methyl-blue method. Correlation and factor analysis were performed for traces and rare earth elements using the software XLSTAT-PRO 7.5.

4. RESULTS

4.1. Sand mineralogy

The Ain Achir and the Plage-Militaire sand show meaningful differences in their mineral proportions, the results are shown in table 1a and 1b and figure 2. Ain Achir sand shows two kinds of colours: light sand which is composed by an average of 40% of heavy minerals and dark sand which is composed by an average of 77% of heavy minerals. The average compositional framework of the black sand consists of staurolite (45%) as main mineral, followed by garnet (20%), tourmaline (9%), kyanite and epidote (2%). The Plage-Militaire is characterized by higher average in heavy mineral content (93%). As in the Ain Achir sand, the staurolite is the main mineral (46%) followed by the garnet (31%). Tourmaline is more present (13%) than in Ain Achir sand whereas kyanite and epidote are low (2 and 1% respectively).

Table 1. Mineral contents in percentage of the heavy and light minerals: a) at Ain Achir sand beach, b) at the Plage-Militaire. Ep: epidote, Grt: garnet, Ky: kyanite, St: staurolite, Tur: tourmaline, Qz: Quartz, Cal: calcite, [9].

		Samples	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal	ΣHM%	ΣLM%
a)	LIGHT SAND (LS)	AA1a	4	10	4	8	9	7	57	36	64
		AA1b	7	36	5	4	0	10	38	52	48
		AA2b	5	10	4	4	3	14	59	27	73
		AA4a	10	31	4	5	1	10	37	52	48
		AA4b	6	26	3	1	2	18	43	39	61
		AA5a	11	25	6	7	0	11	41	48	52
		AA5b	7	10	10	7	0	11	54	35	65
		AA5c	11	9	2	4	0	20	54	26	74
		AAGa	13	24	2	8	2	16	35	49	51
	DARK SAND (DS)	AACa	25	43	0	16	5	2	9	89	11
		AA2a	17	48	1	6	3	2	23	75	25
		AA2c	15	33	5	15	3	8	21	70	30
		AAMa	15	44	1	6	0	10	24	66	34
		AAMb	23	67	0	3	2	1	3	96	4
		AA3a	11	43	0	8	3	8	28	64	36
		AA3b	18	40	1	6	0	9	26	65	35
		AA3c	13	44	6	9	0	6	22	72	28
		AAGb	39	40	0	15	1	0	5	95	5
	Average %HM LS		8	20	4	5	2	13	47	40	60
	Average %HM DS		20	45	2	9	2	5	18	77	23

b)

	Samples	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal	ΣHM%	ΣLM%
PLAGE MILITAIRE BEACH	Pms6a	9	25	5	15	5	6	34	60	40
	Pms1a	28	38	3	19	4	3	5	92	8
	Pms2a	32	46	1	11	2	1	8	91	9
	Pms3a	38	50	2	2	1	1	5	94	6
	Pms4a	39	45	2	6	1	2	4	94	6
	Pms5a	36	41	2	16	0	2	3	95	5
	Pms1b	9	44	1	24	4	1	15	83	17
	Pms2b	37	41	2	15	1	0	3	96	4
	Pms3b	29	50	1	15	1	2	3	95	5
	Pms4b	14	53	2	16	1	1	13	86	14
	Pms5b	35	48	0	10	0	4	4	92	8
	Pms6b	19	46	0	21	2	1	12	88	13
	Pms1C	32	55	1	7	1	0	3	97	3
	Pms2c	35	41	1	17	0	1	5	94	6
	Pms3c	33	52	4	6	0	1	3	95	5
	Pms5c	29	52	2	11	0	1	5	93	7
	Pms6c	46	39	1	10	2	0	2	98	2
	Average %HM DS	31	46	2	13	1	1	6	93	7

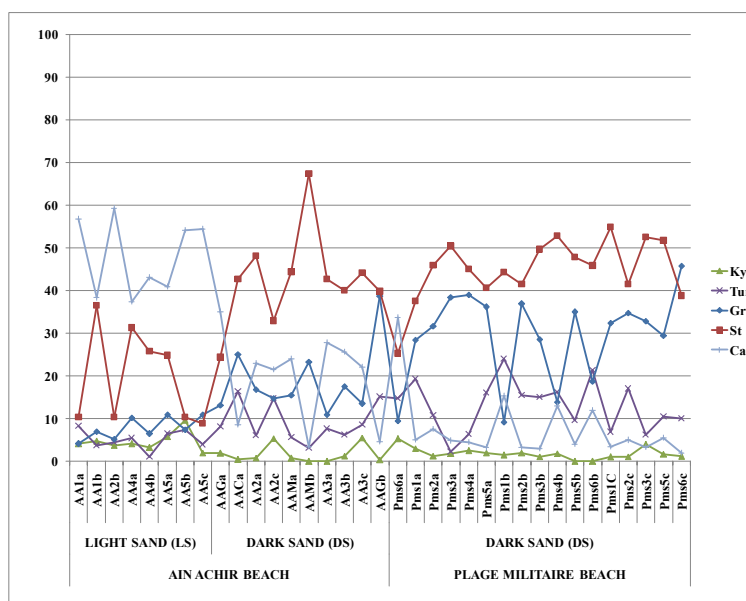


Figure.2. Percentage of the heavy and light minerals at Ain Achir sand beach and the Plage-Militaire. Ep: epidote, Grt: garnet, Ky: kyanite, St: staurolite, Tur: tourmaline, Qz: Quartz, Cal: calcite [9].

Rothwell, (1989) [10] has shown that the classification of heavy minerals can be based on the degree of transparency and on their resistance to weathering into two groups: ultrastable minerals (tourmaline) and metastable minerals (e.g. garnet, epidote, staurolite...). Analyses of the Ain Achir and Plage-Militaire dark sand have yielded a variegated spectrum of minerals (Fig.3) with dominantly metastable minerals: garnet, staurolite, epidote and kyanite and ultrastable heavy minerals e.g. tourmaline.

4.1.1. Metastable minerals group

Staurolite: the mineral is well represented and it is the most common mineral in the two beaches. The crystals have dark yellowish brown colour. It occurs as irregular, elongated or fractured grains. Some crystals show inclusions.

Garnet: the grain occurs as euhedral, subrounded to rounded crystals. Some grains are sharp irregular fragments. Most of the crystals are pale-pink to orange-pale-red and some are pinkish brown. Ilmenite, apatite and quartz inclusions are common.

Epidote: Under the stereo-microscope epidote is pale green and elongated. Some grains have sub-rounded sharp.

Kyanite: this mineral is present in prismatic fragments. All crystals are sharp-edged, bluish-grey to pale blue varieties are common. Some crystals show small typical kyanite cleavage and exhibit characteristic step-like fractures, Ilmenite inclusions are common.

4.1.2. Ultrastable minerals group

Tourmaline: this mineral is fairly present; the grains are black irregular fragments with sharp edges or various degrees of rounding.

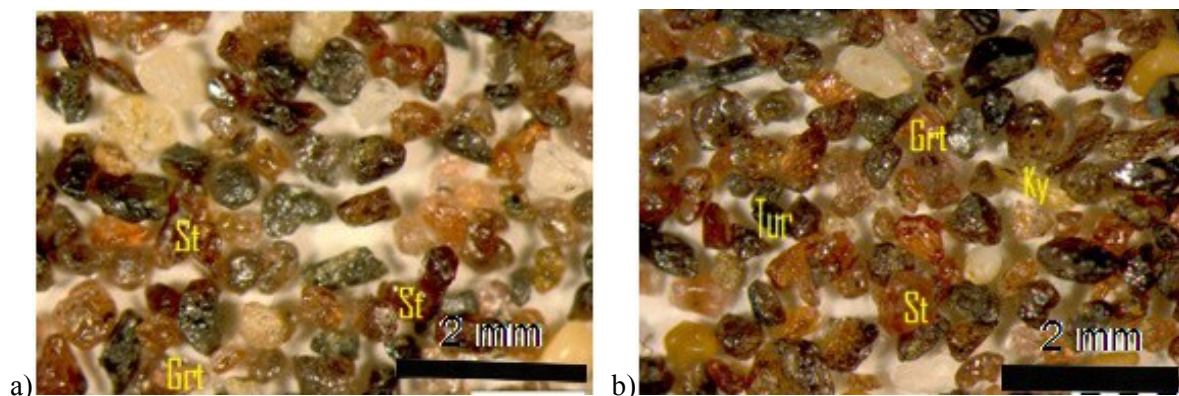


Figure.3. Photomicrograph under binocular microscope of the dark sand of : a) Ain Achir beach, b) Plage-Militaire beach. Ep: epidote, Grt: garnet, Ky: kyanite, St: staurolite, Tur: tourmaline, [9]

4.2. Sand chemistry

Majors, Traces element and REEs content of the Ain Achir beach and the Plage-Militaire sands and of the Upper Continental Crust (UCC) [11, 12, 13, 14] are shown in table 2.

Table 2. Abundance of major, trace and rare earth elements of: a) Ain Achir sand; b) Plage-Militaire. UCC: Upper Continental Crust, AV LS: average in light sand; AV DS: average in dark sand.

	AIN ACHIR BEACH																				UCC
	LIGHT SAND (LS)										DARK SAND (DS)										
	AA1a	AA1b	AA2b	AA4a	AA4b	AA5a	AA5b	AA5c	AA6a	AV LS	AA1a	AA2a	AA2c	AA4a	AA4b	AA5a	AA5b	AA5c	AA6b	AV DS	
SiO ₂	60.5	57.72	59.65	54.15	55.64	53.86	56.19	54.51	50.65	55.87	50.08	59.97	58.36	52.15	35.88	49.42	48.32	46.1	36.77	48.56	66.6
TiO ₂	0.163	0.234	0.122	0.288	0.239	0.272	0.211	0.269	0.361	0.24	0.377	0.125	0.168	0.304	0.977	0.42	0.478	0.497	1.077	0.49	0.64
Al ₂ O ₃	5.44	7.53	4.11	8.99	7.42	8.38	6.77	8.53	10.45	7.51	12.66	3.85	5.62	10.48	27.72	13.48	14.73	16.4	24.38	14.37	15.4
Fe ₂ O ₃	3.1	4.81	1.62	5.62	5.25	4.55	3.83	5.05	7.52	4.59	8.77	1.86	3.02	6.57	28.73	11.44	11.38	13.2	26.29	12.36	5.04
MnO	0.039	0.058	0.026	0.068	0.062	0.06	0.05	0.062	0.087	0.06	0.103	0.028	0.044	0.083	0.286	0.119	0.128	0.138	0.263	0.13	0.1
MgO	1	1.12	1.04	1.3	1.23	1.37	1.23	1.29	1.46	1.23	1.35	1.03	1.16	1.39	1.92	1.27	1.42	1.44	1.86	1.43	2.48
CaO	15.23	14.58	17.13	15.15	15.43	16.19	16.3	15.92	15.06	15.67	13.7	16.94	16.16	14.7	3.44	12.04	12.11	11.44	5.07	11.73	3.59
Na ₂ O	0.07	0.05	0.07	0.14	0.14	0.21	0.07	0.05	0.2	0.11	0.1	0.14	0.02	0.26	0.01	0.06	0.05	0.01	0.05	0.08	3.27
K ₂ O	0.51	0.48	0.55	0.46	0.53	0.49	0.5	0.47	0.37	0.48	0.28	0.63	0.38	0.4	0.07	0.33	0.34	0.25	0.11	0.31	2.8
P ₂ O ₅	0.048	0.059	0.044	0.071	0.058	0.078	0.06	0.071	0.084	0.06	0.072	0.044	0.054	0.07	0.13	0.078	0.082	0.09	0.134	0.08	0.15
LOI	13.69	13.16	15.47	13.5	13.72	14.21	14.58	13.6	13.46	13.93	12.21	15.13	14.86	13.22	0.53	11.04	10.67	10.27	3.73	10.18	
Ba	57	70	66	43	64	52	53	50	61	57.33	60	62	56	60	36	45	49	51	79	55.33	628
Cr	22	33	15	38	32	32	28	34	58	32.44	68	13	25	56	132	58	68	76	132	69.78	92
Ga	10	11	10	14	11	12	10	14	17	12.11	21	10	10	18	43	19	23	24	34	22.44	17.5
Nb	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.00	10	10	10	10	15	10	10	10	18	11.44	12
Ni	13	10	10	10	10	17	10	13	10	11.44	10	10	10	10	21	12	14	20	11	13.11	47
Sr	458	413	487	451	460	494	477	461	579	475.56	477	489	449	564	57	313	333	332	145	351.00	320
V	23	26	22	38	33	36	26	37	37	30.89	45	16	21	48	101	59	56	58	86	54.44	97
Y	19	23	12	24	25	22	20	24	36	22.78	44	12	17	34	107	46	49	57	120	54.00	21
Zn	68	94	39	121	91	114	86	116	142	96.78	177	35	80	151	394	178	216	236	349	201.78	67
Zr	64	77	47	86	71	84	69	86	151	81.67	157	47	55	133	240	119	129	153	325	150.89	193
La	10.21	12.4	8.8	21.9	13.2	15.2	12.9	15.1	41.1	16.74	21.2	8.5	10.7	17.0	44.0	27.2	23.1	23.8	18.1	21.51	31
Ce	20.379	27.2	17.0	31.2	26.7	29.5	24.6	29.1	83.9	32.17	40.0	16.2	21.2	33.5	89.5	45.8	48.6	55.4	34.5	42.74	63
Pr	1.9409	2.6	1.6	3.0	2.7	2.7	2.6	2.8	9.1	3.22	4.1	1.6	1.9	3.3	9.8	4.6	5.2	5.3	3.1	4.33	7.1
Nd	9.603	12.3	8.3	14.2	12.5	14.3	11.9	13.7	36.4	14.81	17.9	8.1	9.9	15.3	38.6	20.1	21.6	23.4	15.5	18.92	27
Sm	1.902	2.4	1.7	2.9	2.5	2.9	2.5	3.0	7.6	3.03	3.7	1.6	2.0	3.2	8.1	4.1	4.4	4.8	3.3	3.90	4.7
Eu	0.447	0.5	0.4	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	1.1	0.57	0.6	0.4	0.4	0.6	1.2	0.7	0.7	0.8	0.6	0.69	1
Gd	2.085	2.7	1.7	3.1	2.9	3.0	2.6	3.1	9.2	3.38	4.1	1.7	2.1	3.4	10.1	4.8	5.1	5.5	3.6	4.48	4
Tb	0.378	0.5	0.3	0.6	0.5	0.6	0.5	0.9	2.1	0.73	0.9	0.3	0.4	0.8	2.3	1.0	1.1	1.2	0.8	0.97	0.7
Dy	2.49	3.6	1.6	4.0	3.9	3.4	3.0	3.8	15.1	4.54	5.6	1.7	2.4	4.3	17.3	7.6	7.6	8.4	4.7	6.62	3.9
Ho	0.532	0.8	0.3	0.8	0.9	0.7	0.6	0.8	3.4	0.99	1.2	0.4	0.5	0.9	4.0	1.7	1.7	1.9	1.0	1.48	0.83
Er	1.618	2.4	0.9	2.6	2.5	2.2	1.9	2.4	10.6	3.02	3.9	1.0	1.5	2.9	12.5	5.3	5.2	5.9	3.3	4.61	2.3
Tm	0.255	0.4	0.2	0.4	0.5	0.3	0.3	0.3	1.6	0.48	0.6	0.2	0.3	0.5	2.0	0.9	0.8	1.0	0.5	0.75	0.3
Yb	1.6	2.4	0.9	2.5	2.5	2.1	1.8	2.4	10.3	2.94	3.9	1.0	1.5	2.8	12.1	5.2	5.1	5.8	3.1	4.52	2
Lu	0.23	0.3	0.1	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3	1.5	0.42	0.6	0.2	0.2	0.5	1.7	0.7	0.7	0.8	0.5	0.66	0.31
ΣTraces	744	767	718	835	807	873	789	845	1101	831.00	1069	704	733	1084	1146	859	947	1017	1299	984	1495
ΣLREE	44	57	37	73	58	65	54	64	178	70	87	36	46	72	190	102	103	113	74	91	133
ΣHREE	10	14	6	15	13	12	14	55	17	17	21	7	9	17	63	28	28	31	18	25	15
ΣREE	54	71	44	88	72	78	66	78	233	87	108	43	55	89	253	130	131	144	93	116	148

b)

PLAGE MILITAIRE BEACH																			
DARK SAND																			
	Pms6a	Pms1a	Pms2a	Pms3a	Pms4a	Pms5a	Pms1b	Pms2b	Pms3b	Pms4b	Pms5b	Pms6b	Pms1C	Pms2c	Pms3c	Pms5c	Pms6c	AV	UCC
SiO ₂	34,3	33,4	34,3	32,62	36,54	47,08	41,53	34,95	34,5	40,68	38,87	37,31	34,62	33,71	34,69	35,41	35,31	36,5	66,6
TiO ₂	0,887	0,792	0,878	0,84	0,796	0,457	0,715	0,841	0,871	0,673	0,758	0,806	0,881	0,795	0,872	0,879	0,91	0,8	0,64
Al ₂ O ₃	28,85	25,77	28,41	24,71	25,42	15,27	23,39	26,88	28,11	22,33	24,02	25,05	28,6	25,44	27,83	26,53	26,27	25,5	15,4
Fe ₂ O ₃	26,83	30,73	30,2	34,81	26,13	11,4	19,16	27,63	29,26	19,23	21,96	22,94	28,18	30,01	29,69	27,65	27,5	26,1	5,04
MnO	0,29	0,281	0,324	0,295	0,282	0,135	0,21	0,278	0,314	0,225	0,24	0,248	0,301	0,271	0,317	0,29	0,285	0,3	0,1
MgO	1,77	1,68	1,87	1,76	1,69	1,3	1,62	1,71	1,86	1,51	1,64	1,68	1,82	1,68	1,86	1,81	1,84	1,7	2,48
CaO	3,73	4,01	2,4	2,91	4,99	12,65	10,48	4,22	2,83	8,08	6,74	6,48	3,13	4,47	2,74	4,22	4,34	5,2	3,59
Na ₂ O	0,05	0,1	0,01	0,01	0,03	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0	3,27
K ₂ O	0,07	0,07	0,05	0,05	0,1	0,3	0,17	0,08	0,05	0,17	0,13	0,11	0,06	0,08	0,06	0,08	0,08	0,1	2,8
P ₂ O ₅	0,104	0,099	0,111	0,103	0,1	0,063	0,091	0,103	0,111	0,083	0,094	0,093	0,106	0,097	0,108	0,107	0,107	0,1	0,15
LOI	11,3	2,85	2,96	1,26	1,61	3,72	2,43	3,16	1,84	6,79	5,21	5,05	1,98	3,28	1,64	2,88	3,13	3,6	
Ba	51	42	32	13	30	44	39	34	50	34	52	22	33	40	33	23	46	36,4	628
Cr	125	113	125	111	112	67	104	116	123	95	104	109	122	112	121	114	55	107,5	92
Ga	44	39	44	36	38	22	35	43	39	33	38	38	42	42	39	36	117	42,6	17,5
Nb	12	11	10	10	9	9	10	10	9	10	10	11	9	10	9	10	38	11,6	12
Ni	16	15	17	18	17	12	15	18	19	16	18	14	17	15	22	13	13	16,2	47
Sr	60	71	19	41	92	307	235	78	30	174	145	133	41	85	28	69	24	96,0	320
V	96	91	97	86	88	53	77	94	95	76	79	93	98	88	94	96	74	86,8	97
Y	110	117	135	134	115	53	75	113	128	90	96	96	119	116	129	119	101	108,6	21
Zn	437	410	410	367	377	234	359	418	402	331	358	379	435	399	397	377	115	365,0	67
Zr	235	226	230	229	209	132	196	227	232	183	199	201	232	228	225	217	382	222,5	193
La	42,0	41,1	42,9	46,0	40,9	24,1	33,0	40,3	44,3	34,6	36,3	36,8	41,7	42,4	42,2	41,0	41,1	39,4	31
Ce	84,0	84,1	87,2	93,3	82,6	47,4	65,8	80,9	90,1	69,7	72,1	74,4	84,4	85,5	85,1	83,4	82,3	79,6	63
Pr	9,2	9,1	9,6	10,2	8,9	5,1	7,2	8,8	9,9	7,5	8,0	8,0	9,2	9,4	9,1	9,1	9,1	8,7	7,1
Nd	36,5	36,5	37,8	40,3	36,0	21,2	29,1	35,3	39,4	30,6	31,6	32,8	36,5	37,4	37,0	36,1	36,1	34,7	27
Sm	7,6	7,7	8,1	8,5	7,6	4,3	6,0	7,4	8,4	6,4	6,6	6,8	7,7	7,9	7,8	7,7	7,6	7,3	4,7
Eu	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	0,7	0,9	1,2	1,3	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2	1,1	1
Gd	9,5	9,8	10,9	11,1	9,7	4,9	6,9	9,5	11,0	7,8	8,2	8,6	9,9	9,8	10,4	9,9	9,8	9,3	4
Tb	2,0	2,2	2,6	2,6	2,3	1,0	1,5	2,1	2,6	1,8	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4	2,3	2,2	2,1	0,7
Dy	16,4	17,9	21,0	21,1	18,2	7,5	11,2	16,9	21,0	13,9	14,2	15,5	17,7	17,8	19,5	18,4	17,7	16,8	3,9
Ho	3,7	4,1	4,9	4,9	4,2	1,7	2,6	3,9	4,9	3,2	3,3	3,6	4,1	4,1	4,5	4,3	4,0	3,9	0,83
Er	11,8	13,2	15,4	15,4	13,4	5,4	8,0	12,2	15,5	10,3	11,3	13,0	12,9	14,2	13,5	12,7	12,2	12,2	2,3
Tm	1,9	2,0	2,4	2,3	2,0	0,8	1,2	1,9	2,4	1,6	1,6	1,7	2,0	2,0	2,2	2,1	2,0	1,9	0,3
Yb	11,6	12,8	15,0	14,6	13,0	5,3	7,8	12,0	14,9	9,9	10,0	10,9	12,7	12,4	13,9	12,9	12,3	11,9	2
Lu	1,6	1,8	2,1	2,0	1,8	0,7	1,1	1,7	2,1	1,4	1,4	1,5	1,8	1,7	2,0	1,8	1,7	1,7	0,31
ΣTraces	1186	1135	1119	1045	1087	933	1145	1151	1127	1042	1099	1096	1148	1135	1097	1074	965	1093,2	1495
ΣLREE	179	178	186	198	176	102	141	173	192	149	154	159	179	183	181	177	176	169,7	133
ΣHREE	60	65	75	75	66	28	41	61	76	51	52	56	65	64	70	66	64	60,9	15
ΣREE	239	244	261	274	242	130	182	234	268	200	206	215	244	247	252	243	240	230,6	148

At Ain Achir beach, the light sand and the dark one show some differences in the chemical compositions. At Ain Achir the average concentrations of some Major elements (TiO₂=0.24, Al₂O₃=7.51, Fe₂O₃=4.59, MnO=0.6, MgO=1.23 and P₂O₅=0.06 wt %) are lower than in the dark one (TiO₂=0.49, Al₂O₃=14.37, Fe₂O₃=12.36, MnO=0.13, MgO=1.43 and P₂O₅=0.08wt%). Whereas CaO=15.67, Na₂O=0.11, K₂O=0.48 wt% are higher (CaO=11.73, Na₂O=0.08, K₂O=0.31wt%). The dark sand of Plage-Militaire beach is enriched in TiO₂=0.8wt%, Al₂O₃=26.27wt%, Fe₂O₃=26.1wt%, MnO=0.3wt%, MgO=1.7wt% and P₂O₅=0.1wt%. Compared to the UCC composition (Tab.2), the dark sand of Ain Achir and Plage-Militaire beaches show higher Majors concentration values.

The total of trace elements (Ba, Cr, Ga, Nb, Ni, V, Y, Zn and Zr) in the Ain Achir light sand and in the dark one is respectively 831ppm and 984ppm. These concentrations are lower than the UCC traces element concentration (1495ppm). The Plage-Militaire beach is also characterized by very high concentration in trace elements (total 1093ppm), this value is higher than at Ain Achir beach and is more close to the UCC total traces element concentration (Tab.2), (Fig.4a).

The REE concentrations vary widely for the two beaches (ΣREE=87-230ppm) and are low in the Ain Achir sands (Tab.2), (Fig.4b). At Ain Achir beach the REE abundances (ΣREE=87-116ppm) is less than that of the ΣREE Upper Continental Crust (ΣREE_{UCC}=148ppm), [12, 13, 14], whereas the REE abundance at Plage-Militaire beach is slightly higher (ΣREE=230ppm). The ΣREE content at Ain Achir beach is 87ppm and 116ppm, respectively for the light and dark sand. Ain Achir sands show that they are mainly high in LREE (ΣLREE=70-91ppm) rather than HREE (ΣHREE=17-15ppm). The dark sand show higher LREE and HREE concentration (ΣLREE=91ppm and ΣHREE=25ppm) than the light sand. In regard to the UCC (ΣHREE_{UCC}=15ppm), the total of HREE (ΣHREE= 25ppm) of the dark sand is also high. Compared to the Ain Achir sand and to the ΣREE of the Upper Continental Crust (ΣREE_{UCC}=148ppm) [12, 13, 14], the ΣREE concentration of the Plage-Militaire black sand is remarkably high (ΣREE=230ppm).

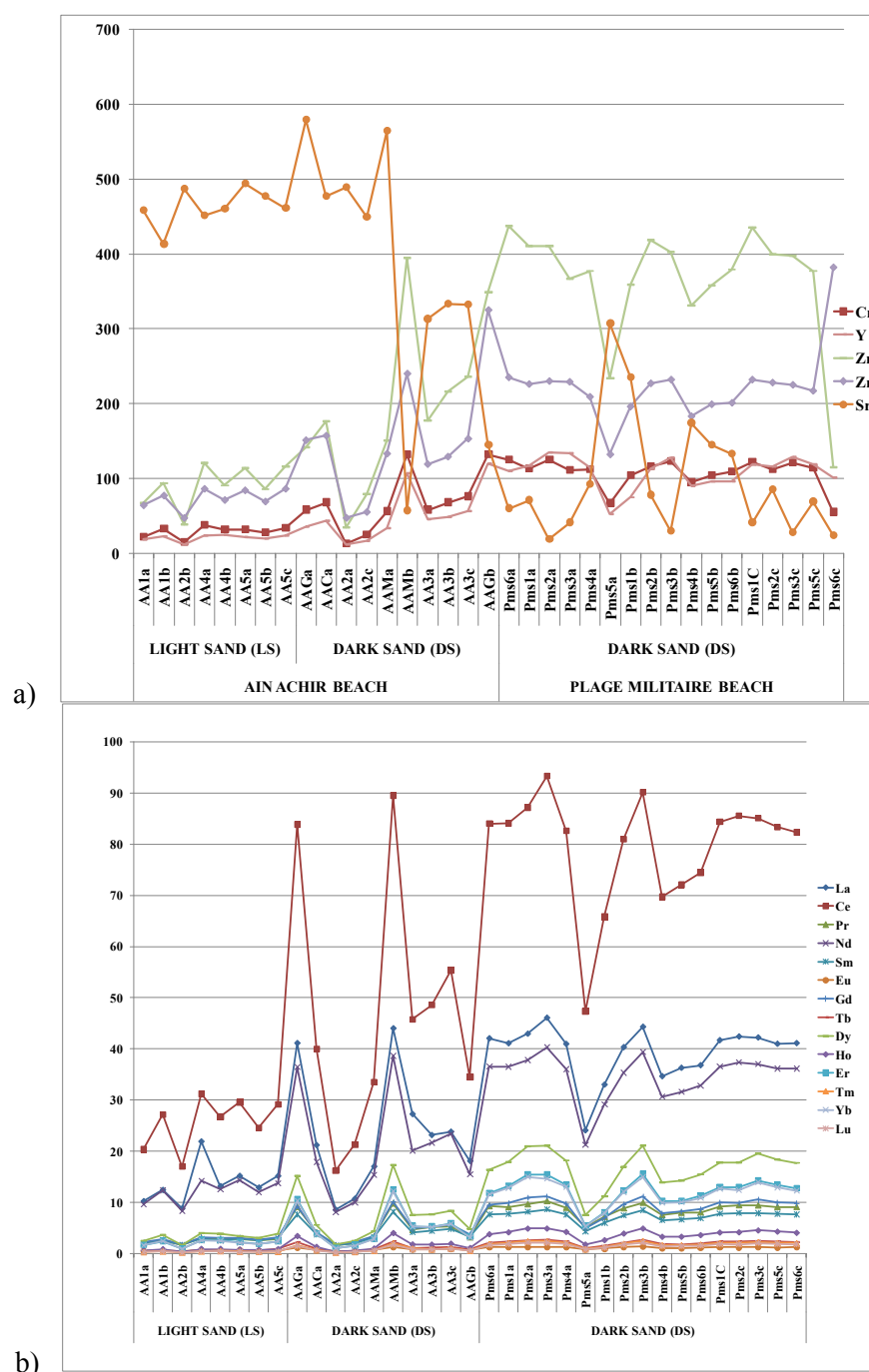


Figure.4. a) Distribution of trace elements in the Ain Achir and Plage-Militaire sand; b) Distribution of Rare Earth Elements in the Ain Achir and Plage-Militaire sands.

5. DISCUSSION

5.1. Simple statistical analysis

Major elements: compared to the dark sand of Ain Achir and the Plage-Militaire (Fig.5) the Ain Achir light sand is rich in CaO, Na₂O and K₂O. Enrichments in CaO are due to the occurrence of high modal concentration of carbonate minerals in this sand, whereas the high values in K₂O and Na₂O reflect the presence of clays minerals. The high P₂O₅ concentration in the dark sand of the two beaches corresponds to apatite inclusions in some garnet and staurolite grain. The figure 5 shows also that those dark sands are enriched in Fe₂O₃, MgO and TiO₂, these high values are in accordance with the modal high heavy-mineral (i.e. garnet, staurolite) and their inclusions (i.e. ilmenite) contents. The selected major elements content increases with increasing the modal content in heavy minerals.

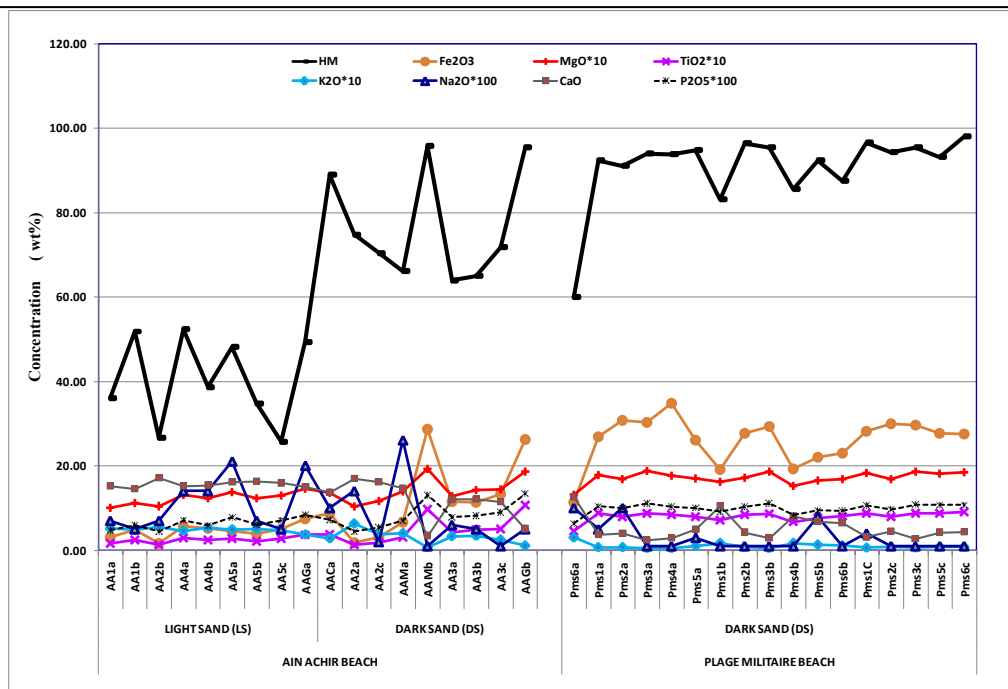


Figure.5. Heavy minerals (HM) and Major elements variations in the Ain Achir and Plage-Militaire Sands.

Traces and REE elements: in order to explore the possible relationship existing between the different chemical elements (traces and REEs) and the mineralogical composition of Ain Achir and Plage-Militaire sand, simple statistical methods such as correlation and factor analysis have been used. Correlation and factor analysis have been performed for traces and rare earth elements using the software XLSTAT-PRO 7.5. Table 3 shows correlation matrix for the trace, REE and heavy mineral amount.

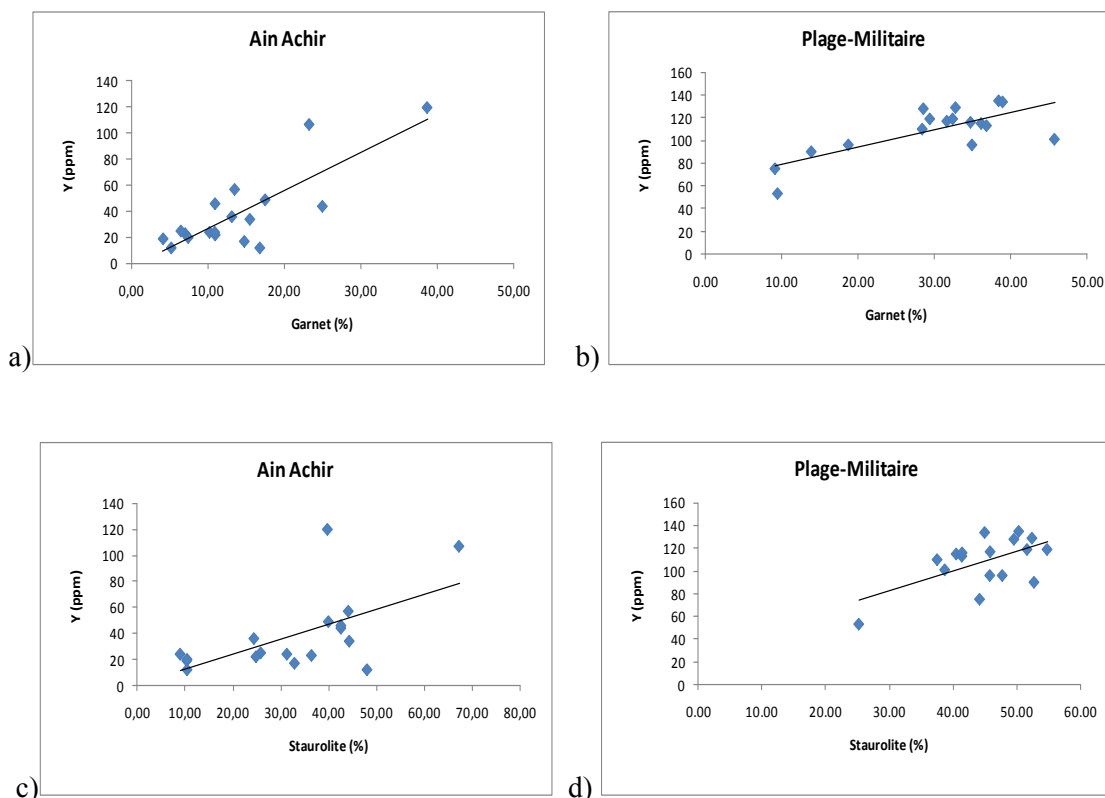
Table 3. Correlation coefficients (r) between the mineralogical and trace elements composition, a) Ain Achir sand, b) Plage-Militaire sand. Ep: epidote, Grt: garnet, Ky: kyanite, St: staurolite, Tur: tourmaline, Qz: quartz, Cal: Cacite, [9]

a) Variables	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal
Grt	1						
St	0.60	1.00					
Ky	-0.56	-0.56	1.00				
Tur	0.59	0.11	-0.07	1.00			
Ep	-0.10	-0.16	-0.16	0.27	1.00		
Qz	-0.69	-0.70	0.31	-0.53	-0.26	1.00	0.76
Cal	-0.85	-0.90	0.57	-0.48	0.10	0.76	1.00
Ba	0.23	-0.23	0.04	0.32	0.04	-0.15	0.06
Cr	0.68	0.54	-0.45	0.18	0.06	-0.57	-0.61
Ga	0.62	0.59	-0.45	0.09	0.07	-0.58	-0.61
Nb	0.79	0.40	-0.37	0.26	-0.03	-0.56	-0.57
Ni	0.19	0.46	0.13	-0.06	-0.25	-0.40	-0.36
Sr	-0.64	-0.63	0.39	-0.11	0.04	0.64	0.64
V	0.64	0.61	-0.45	0.11	-0.02	-0.57	-0.64
Y	0.73	0.53	-0.43	0.21	0.01	-0.60	-0.63
Zn	0.66	0.58	-0.42	0.16	0.02	-0.58	-0.64
Zr	0.72	0.42	-0.43	0.27	0.08	-0.54	-0.57
La	0.22	0.40	-0.38	-0.12	0.08	-0.14	-0.35
Ce	0.26	0.44	-0.34	-0.08	0.03	-0.20	-0.39
Pr	0.23	0.42	-0.35	-0.11	0.03	-0.17	-0.36
Nd	0.25	0.42	-0.34	-0.08	0.02	-0.19	-0.38
Sm	0.27	0.42	-0.35	-0.06	0.04	-0.20	-0.39
Eu	0.29	0.45	-0.31	-0.06	0.00	-0.23	-0.41
Gd	0.26	0.44	-0.35	-0.08	0.02	-0.20	-0.39
Tb	0.31	0.45	-0.39	-0.02	0.06	-0.24	-0.43
Dy	0.26	0.46	-0.36	-0.10	0.02	-0.21	-0.40
Ho	0.25	0.47	-0.36	-0.11	0.02	-0.21	-0.40
Er	0.26	0.47	-0.37	-0.10	0.03	-0.22	-0.40
Tm	0.25	0.48	-0.35	-0.11	0.01	-0.22	-0.40
Yb	0.25	0.47	-0.37	-0.11	0.03	-0.22	-0.40
Lu	0.28	0.48	-0.39	-0.09	0.02	-0.23	-0.42

b) Variables	Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal
Grt	1						
St	0.18	1.00					
Ky	-0.25	-0.49	1.00				
Tur	-0.62	-0.38	-0.11	1.00			
Ep	-0.58	-0.64	0.44	0.41	1.00		
Qz	-0.44	-0.59	0.58	0.09	0.47	1.00	
Cal	-0.82	-0.57	0.50	0.36	0.69	0.70	1.00
Ba	-0.06	-0.31	0.00	0.20	0.34	0.33	0.08
Cr	0.17	0.57	-0.18	-0.11	-0.42	-0.32	-0.50
Ga	0.55	-0.10	-0.25	-0.17	0.01	-0.44	-0.40
Nb	0.39	-0.23	-0.16	-0.09	0.16	-0.28	-0.20
Ni	0.34	0.50	0.04	-0.36	-0.49	-0.19	-0.54
Sr	-0.84	-0.50	0.27	0.55	0.57	0.67	0.89
V	0.47	0.64	-0.38	-0.22	-0.54	-0.66	-0.76
Y	0.74	0.58	-0.21	-0.57	-0.67	-0.58	-0.84
Zn	0.03	0.48	-0.16	0.00	-0.35	-0.22	-0.35
Zr	0.71	0.09	-0.32	-0.27	-0.15	-0.61	-0.63
La	0.78	0.50	-0.33	-0.42	-0.59	-0.67	-0.91
Ce	0.77	0.52	-0.33	-0.42	-0.60	-0.67	-0.90
Pr	0.78	0.51	-0.32	-0.43	-0.59	-0.66	-0.90
Nd	0.77	0.51	-0.34	-0.41	-0.60	-0.68	-0.90
Sm	0.76	0.54	-0.35	-0.44	-0.62	-0.68	-0.89
Eu	0.77	0.49	-0.30	-0.40	-0.59	-0.68	-0.90
Gd	0.79	0.54	-0.29	-0.51	-0.63	-0.65	-0.88
Tb	0.76	0.54	-0.29	-0.52	-0.65	-0.64	-0.84
Dy	0.77	0.55	-0.27	-0.54	-0.65	-0.62	-0.84
Ho	0.76	0.56	-0.27	-0.54	-0.66	-0.62	-0.84
Er	0.75	0.56	-0.27	-0.54	-0.66	-0.61	-0.83
Tm	0.76	0.55	-0.26	-0.54	-0.65	-0.62	-0.84
Yb	0.76	0.56	-0.26	-0.54	-0.66	-0.62	-0.84
Lu	0.77	0.56	-0.265	-0.55	-0.65	-0.63	-0.85

Trace elements correlation analysis of the two beaches shows that Cr, Ni, V, Y, Zn and Zr are positively correlated with garnet and staurolite. At Ain Achir, these elements show positive correlation with garnet ($r_{Cr}=0.68$, $r_{Ni}=0.19$, $r_V=0.64$, $r_Y=0.73$, $r_{Zn}=0.66$, and $r_{Zr}=0.72$) and with staurolite ($r_{Cr}=0.54$, $r_{Ni}=0.46$, $r_V=0.61$, $r_Y=0.53$, $r_{Zn}=0.58$ and $r_{Zr}=0.42$). At the Plage-Militaire some of these elements are also positively correlated to garnet ($r_{Ni}=0.34$, $r_V=0.47$, $r_Y=0.74$, and $r_{Zr}=0.71$) and to the staurolite ($r_{Cr}=0.57$, $r_{Ni}=0.5$, $r_V=0.64$, $r_Y=0.58$ and $r_{Zn}=0.48$). At these beaches chromium and vanadium are significantly correlated to garnet and staurolite: Ain Achir (garnet $r_{Cr}=0.68$, $r_V=0.17$; staurolite $r_{Cr}=0.51$, $r_V=0.61$) and at the Plage-Militaire (garnet $r_{Cr}=0.17$, $r_V=0.47$; staurolite $r_{Cr}=0.57$, $r_V=0.64$) suggesting the presence of mafic minerals (i.e amphiboles, micas, epidote) inclusions in these minerals. The high positive correlation of yttrium with garnet of Ain Achir: $r=0.73$ (Fig.6a), Plage-Militaire: $r=0.74$ (Fig.6b) and staurolite: Ain Achir $r=0.53$ (Fig.6c), Plage-Militaire $r=0.58$ (Fig.6d) in the sand of the two beaches is related to more garnet and staurolite in these sand than the others heavy minerals. The significant correlation between Zn and the garnet of Ain Achir beach (Fig.6e) and the staurolite at the Plage-Militaire (Fig.6f) suggest the influence of the amount of each mineral. There is a strong interrelationship between Zr and garnet $r=0.72$ at Ain Achir (Fig.6g) and $r=0.71$ at Plage-Militaire (Fig.6h) confirming the presence of zircon inclusions in the garnet. In the two beaches, strontium is strongly correlated to calcite and quartz. The correlation with calcite ($r=0.64$ at Ain Achir and $r=0.89$ at Plage-Militaire) can be explained by the occurrence of some diagenetic calcite, whereas the positive correlation of Sr with quartz ($r=0.64$ at Ain Achir and $r=0.67$ at Plage-Militaire beach) reflects the nature of the quartz. Monecke, et al; 2002 [14], show that some trace element contents of hydrothermal and metamorphic quartz are higher than in magmatic one.

Table 3 shows that the REE of the Plage-Militaire sand are more correlated to garnet ($r > 0.75$) than at the Ain Achir ($r < 0.3$), REE are more linked to sands with high modal heavy mineral content (i.e. garnet and staurolite). This slight enrichment in REE of the dark sand of the Plage-Militaire can also be explained by its low concentration in carbonates and clay phases. The correlation between REE and the other heavy minerals (kyanite, tourmaline and epidote) for the two beaches is not statistically significant which confirm that REEs are mainly hosted in the heavy minerals (garnet and staurolite) rather than in the other one.



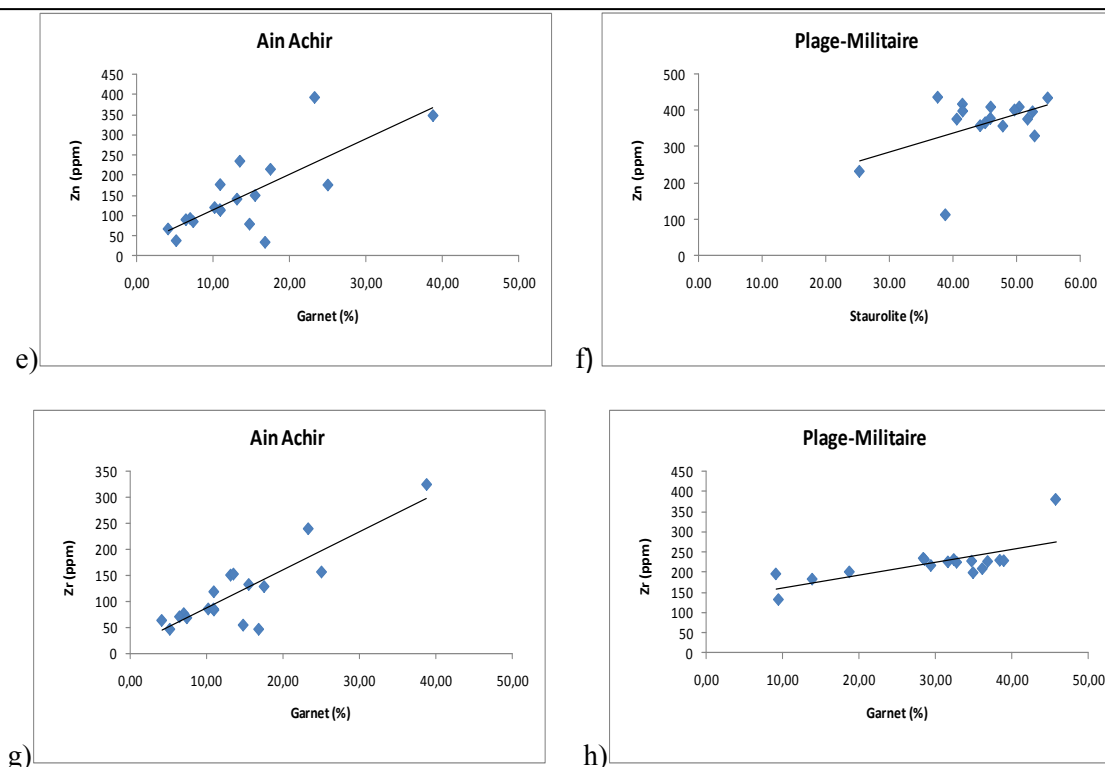


Figure.6. Correlation diagrams of traces element versus garnet and staurolite for Ain Achir and Plage-Militaire beach

5.2. Principal Component Analysis (PCA)

Geochemical factor analyses (PCA) aid the identification of parameters controlling chemical element and to interpret the relation between heavy mineral and chemical data [16, 17]. The trace element PCA data matrixes of the two beaches are shown in table 4. This table shows that the two first factors (F1 and F2) account for 79.56 % and for 81.01% of total variance at Ain Achir and Plage-Militaire beaches respectively, therefore in this study only these two first factors have been described.

At Ain Achir beaches, the table 4a show that the Factor 1 explains 62.70% of total variance. This factor is characterized by high loading of staurolite and garnet, all trace elements (excluding Ba and Sr) and REEs are on the positive side and kyanite, calcite, quartz, Ba, Sr and Ba are on the negative one. The traces element variables and the heavy minerals (garnet, staurolite) are highly associated with factor 1, therefore it can be interpreted as ferromagnesian mineral (staurolite–garnet) factor. Factor 2 explain about 16.86 % of variance and is characterized by high loading of tourmaline and Ba on the positive side and kyanite, calcite, quartz, Sr, Ni, and REE on the negative one. These allows us to interpret factor 2 (F2) as the non-ferromagnesian mineral factor. On the biplot F1 vs F2 (Fig.7a) it can be distinguish two groups: (i) one the positive side of F1 and F2 composed by the heavy mineral (garnet, staurolite, tourmaline), all the trace element –Sr, and the REEs and (ii) on the negative side of F1 and F2 plots the second group (kyanite, calcite, quartz and Sr). The biplot figure 7b confirms strongly the relationship between the garnet, staurolite and the traces-Sr and REE elements. It confirms also the relationship between Sr and the light minerals (calcite and quartz) which can be the source of this element.

Plage-Militaire: the table 4b shows that the factor Factor 1 (F1) accounted for 66.34% and factor 2 (F2) for 14.67%. Factor 2 (F2) explain 14.67% of the total variance. The positive right side of F2 is characterized by high loading of garnet and the REEs, whereas the negatif right side shows that staurolite is stongly associated to V, Y, Ni, Cr and Zn. The total variance of F1 and F2 (81.01) is higher than for Ain Achir (F1-F2=79.56%). The biplot (F1-F2) (Fig.7b) shows some similarities with the F1-F2 biplot of Ain Achir. In regard to F1 axis, it can be distinguish two groupes : the first one located on the positive side of the axis includes garnet, staurolite, REEs and the trace elements-Sr and Ba, and confirms the high relationship of these elements with the ferromagnesian phases (garnet and

staurolite) and a second one, on the negative side, composed by kyanite, tourmaline, quartz, calcite, epidote and the traces elements Sr and Ba. These latter elements have high affinity with non-ferromanesian minerals (i.e. quartz, calcite, tourmaline and kyanite).

Table 4. Mineral, Traces and REE variable eigen values for the first four factors: a) of Ain Achir, b) of the Plage-Militaire beaches

a)		F1	F2	F3	F4
	Variabilité (%)	62.70	16.86	5.44	4.75
Grt		0.11	0.33	-0.10	0.14
St		0.14	0.16	0.18	0.49
Ky		-0.10	-0.12	0.27	-0.27
Tur		0.01	0.25	-0.32	0.20
Ep		0.00	0.01	-0.48	-0.05
Qz		-0.10	-0.30	0.02	-0.25
Cal		-0.13	-0.25	-0.02	-0.43
Ba		-0.08	0.20	-0.38	-0.20
Cr		0.20	0.17	0.00	-0.21
Ga		0.20	0.15	0.08	-0.16
Nb		0.13	0.30	0.01	-0.28
Ni		0.14	-0.01	0.50	0.06
Sr		-0.15	-0.23	-0.25	0.07
V		0.20	0.16	0.13	-0.14
Y		0.18	0.22	0.04	-0.23
Zn		0.20	0.17	0.09	-0.16
Zr		0.18	0.21	-0.10	-0.28
La		0.21	-0.14	-0.07	-0.02
Ce		0.21	-0.14	-0.06	0.01
Pr		0.21	-0.15	-0.07	0.01
Nd		0.21	-0.14	-0.06	0.01
Sm		0.21	-0.13	-0.07	0.01
Eu		0.22	-0.12	-0.02	-0.01
Gd		0.21	-0.14	-0.06	0.01
Tb		0.21	-0.12	-0.10	0.05
Dy		0.21	-0.14	-0.05	0.03
Ho		0.21	-0.14	-0.05	0.03
Er		0.21	-0.13	-0.05	0.03
Tm		0.21	-0.13	-0.03	0.02
Yb		0.21	-0.13	-0.05	0.03
Lu		0.22	-0.12	-0.06	0.03

b)		F1	F2	F3	F4
	Variabilité (%)	66.34	14.67	5.68	4.04
Grt		0.17	0.19	0.16	0.01
St		0.13	-0.15	-0.25	-0.33
Ky		-0.08	-0.05	0.60	0.12
Tur		-0.11	-0.05	-0.43	0.34
Ep		-0.15	0.09	0.08	0.36
Qz		-0.15	-0.09	0.41	0.15
Cal		-0.20	-0.06	0.15	-0.09
Ba		-0.06	0.13	-0.03	0.63
Cr		0.13	-0.34	-0.10	0.21
Ga		0.06	0.44	-0.08	0.03
Nb		0.01	0.46	-0.05	-0.01
Ni		0.12	-0.19	0.17	0.13
Sr		-0.21	-0.08	-0.05	-0.07
V		0.18	-0.16	-0.19	0.12
Y		0.22	-0.06	0.11	-0.01
Zn		0.10	-0.39	-0.13	0.21
Zr		0.12	0.38	-0.08	0.08
La		0.22	0.02	0.00	0.10
Ce		0.22	0.01	-0.01	0.08
Pr		0.22	0.02	0.01	0.09
Nd		0.22	0.02	-0.02	0.08
Sm		0.22	0.01	-0.01	0.05
Eu		0.21	0.03	0.00	0.14
Gd		0.22	0.01	0.05	0.03
Tb		0.22	0.00	0.06	-0.04
Dy		0.22	0.01	0.09	-0.03
Ho		0.22	0.00	0.08	-0.04
Er		0.22	0.00	0.08	-0.04
Tm		0.22	0.00	0.09	-0.02
Yb		0.22	-0.01	0.08	-0.03
Lu		0.22	0.00	0.08	-0.01

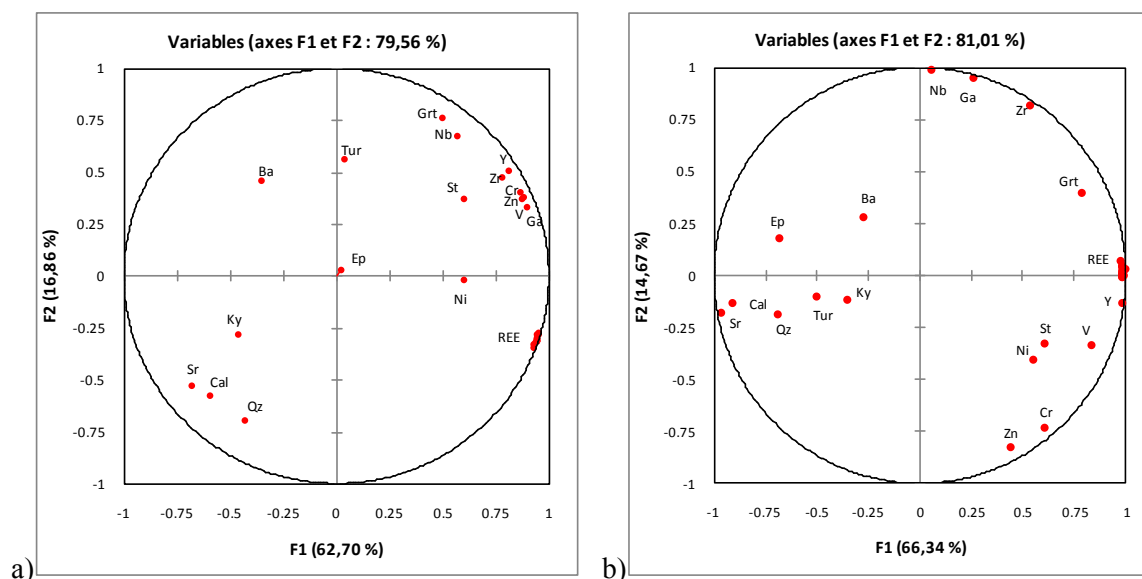


Figure.7. PCA biplot of the heavy minerals, traces and REE elements: a) at Ain Achir beach, b) at the Plage-Militaire beach.

6. CONCLUSION

The study of the elements distribution versus modal mineral composition, correlation matrix and the PCA circles has allowed us to conclude that there is a strong relationship between the amount of heavy minerals (garnet, staurolite) in the sand and the major, trace and REE elements. The trace elements (Ga, V, Zn, Ni, Cr, Y and Zr) are more related to garnet and staurolite, whereas the high concentrations of Sr and Ba are attributed to the presence of minerals: i.e. calcite, quartz, tourmaline and kyanite. From the light sand at Ain Achir to the dark one at Plage-Militaire, the REEs content increases with increasing the modal content in heavy minerals, especially in garnet and staurolite. The sand chemistry of the Ain Achir and the Plage-Militaire beach is controlled by their mineralogical composition.

ACKNOWLEDGEMENTS

We are very grateful to anonymous reviewers for their helpful comments and suggestions that improved this manuscript. Moreover, we thank the Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam for their support in analytical facilities and the Department of Mining/Badji-Mokhtar University for their support in sample preparation.

REFERENCES

- [1] Hadj Zobir S., Altenberger U. & Günter C., 2017. The Edough Massif garnetites: evidences for a metamorphosed paleo-garnet beach-sand placer (Cap de Garde, Annaba, Northeast Algeria), *Journal of Mediterranean Earth Sciences*, Vol.9, 1-13
- [2] Hadj Zobir S., Altenberger U. & Günter C., 2014. Geochemistry and petrology of metamorphosed submarine basic ashes in the Edough Massif (Cap de Garde, Annaba, northeastern Algeria), *Comptes Rendus Géoscience* 346, 244-254 .
- [3] Brunnel M., Hammor D ., Misseri M., Gleizes G. & Bouleton J., 1988. Cisaillements synmétamorphes avec transport vers le Nord-Ouest dans le massif cristallin de l'Edough (Est Algérien), *Comptes Rendus Géoscience* 306, 1039-1045.
- [4] Ahmed-Said Y., Leake B.E. & Rogers G., 1993. The petrology, geochemistry and petrogenesis of the Edough igneous rocks, Annaba, NE Algeria, *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 17 (1), 111-123.
- [5] Ahmed-Said Y. & Leake B.E., 1995. The petrogenesis of the Edough orthogneisses, Annaba, northeast Algeria, *Journal of African Earth Sciences*, Vol.21, 253-269.
- [6] Caby R. & Hammor D., 1992. Le Massif cristallin de l'Edough (Algérie): un " Métamorphic Core Complex" d'âge miocène dans les Magrébides, *Comptes Rendus Géoscience* 314, 829-835.
- [7] Caby R., Hammor D. & Delor C., 2001. Metamorphic evolution, partial melting and Miocene exhumation of lower crust in the Edough metamorphic core complex, west Mediterranean orogen, eastern Algeria, *Tectonophysics* 342, 239-273.
- [8] Darnley AG., Bjorklund A., Bolviken B., Gustavsson N., Koval PV., Plant J.A., Steenfel A., Tauchid M & Xie X., 1995. A Global Geochemical Database for Environmental and Resource Management, Recommendations for International Geochemical Mapping. Final report of IGCP project 259. UNESCO Publishing.
- [9] Whitney D.L. & Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist*, Vol. 95 (1), 185-187
- [10] Rothwell R.G., 1989. *Minerals and Mineraloids in Marine Sediments: an Optical Identification Guide*. London: Elsevier.
- [11] Rudnick R.L. & Fountain D.M., 199. Nature and composition of the continental crust -- a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics* Vol.33, 267-309.
- [12] Rudnick R.L. & Gao C., 2005. Composition of the continental crust; in R.L. Rudnick, ed., *The Crust: Treatise on Geochemistry*, Vol. 3, Elsevier, San Diego, California, 1-64
- [13] Samson I.M. & Wood S., 2005. The rare-earth elements: behavior in hydrothermal fluids and concentration in hydrothermal mineral deposits, exclusive of alkaline settings; in Linnen, RL and Samson, IM eds., *Rare-element geochemistry and mineral deposits*, Geological Association of Canada, GAC Short Course Notes, Vol.17, 269-297
- [14] Castor S.B. & Hedrick L.B., 2006. Rare earth elements; in Kogel, J.E, Trivedi, N.C., Barker, J.M., and Krukowski, S.T., ed., *Industrial Minerals volume*, 7th edition: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, Colorado, 769-792.
- [15] Monecke T., Kempe U. & Götze J., 2002. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: A reconnaissance study, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 202, p. 709–724.
- [16] Pirkle F.L., Pirkle E.E., Pirkle A. & Dicks S.E., 1985. Evaluation through correlation and principal component analyses of delta origin for the Hawthorne and Citronelle sediments of peninsular Florida. *Journal of Geology*, Vol.93, 493–501
- [17] Svendsen J.B., 2002. Sedimentology and High-Resolution Stratigraphy of Fluvial-Aeolian Sequences Using Integrated Elemental Whole Rock Geochemistry. Ph.D.thesis, University of Aarhus, Denmark.



Provenance analyses of the heavy-mineral beach sands of the Annaba coast, northeast Algeria, and their consequences for the evaluation of fossil placer deposit

ASMA CHEMAM^{1,*}, SORAYA HADJZOBIR², MENANA DAIF¹, UWE ALTENBERGER³
and CHRISTINA GÜNTHER³

¹Laboratory of LGRN, Badji-Mokhtar/Annaba University, P.O. Box 12, 23000 Annaba, Algeria.

²Laboratory of Soils and Sustainable Development, Badji-Mokhtar/Annaba University, P.O. Box 12, 23000 Annaba, Algeria.

³Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Strasse 24-25, D14476 Potsdam-Golm, Germany.

*Corresponding author. e-mail: Chemam.asma@gmail.com

MS received 10 April 2017; revised 13 December 2017; accepted 12 March 2018

The paper presents the first study of heavy-mineral sand beaches from the Mediterranean coast of Annaba/Algeria. The studied beaches run along the basement outcrops of the Edough massif, which are mainly composed by micaschists, tourmaline-rich quartzo-feldspathic veins, gneisses, skarns and marbles. Sand samples were taken from three localities (Ain Achir, Plage-Militaire and El Nasr). The heavy-mineral fraction comprises between 74 and 91 vol%. The garnets of the beaches are almandine rich and tourmalines vary with respect to their location from schorl to dravite. Tourmaline at Ain Achir and the Plage-Militaire is schorlites, while at El Nasr beach dravite is ubiquitous. The World Shale Average normalised REE of the sands and the basement outcrops reveal: (i) *Ain Achir beach*: REE pattern of sand and the coastal rocks from the studied beaches reflects a multiple sources; (ii) *Plage-Militaire*: the sand and the coastal outcrops show similar LREE and a strong enrichment in HREE, suggesting the presence HREE-rich phases found as inclusions in staurolite; (iii) *El Nasr*: two types of sand patterns are found: one with flat REE pattern similar to the proximal rocks and other one enriched in HREE suggesting a mixed source.

Keywords. Provenance; heavy minerals; beach sediments; fossil placer; geochemistry; Annaba/Algeria.

1. Introduction

The mineralogy of modern beaches depends on the nature of a source rock from which the detrital material is derived, and comprises minerals that are resistant to weathering. Heavy-sand components are mainly derived through erosive processes on rock outcrops. The studied area consists of three flat sandy coast beaches in front of the

Edough massif (Annaba/Algeria). Out of dozen, only three beaches show high concentrations of toned heavy-mineral sands: the Ain Achir beach characterised by light- and dark-toned sands and the Plage-Militaire and El Nasr beaches comprising consistently dark-toned sands. The outcrops surrounding these three beaches are garnet–staurolite (and/or andalusite), and kyanite micaschists, marbles, epidotic skarns, migmatites and numerous

tourmaline-bearing quartzo-feldspathic veins. This paper presents the first study of the provenance of dark-toned heavy-mineral sands from coastlines of Annaba/Algeria and of Algeria.

2. Study area

2.1 Actual geographic setting

The studied areas are located at the northeastern coast of Annaba city (figure 1a). They are composed of two fields: the Cap de Garde field and the Harbor field. The Cap de Garde field (figure 1b)

is composed of two small beaches: Ain Achir (275×30 m) and Plage-Militaire (236×20 m), their shoreline lay between 36°57'52"–36°57'51"N latitude and 7°46'89"–7°46'94"E longitude, respectively. The Harbor field (figure 1c) includes the El Nasr beach, its shoreline is between 36°54'36"–36°54'31"N and 7°46'17"–7°46'24"E.

2.1.1 Temperature and rainfall

Annaba is characterised by a warm-temperature climate. The climate map of Köppen-Geiger (Hufty 2001) classifies the climate as Csa (warm temperature to dry climate). Annaba displays an

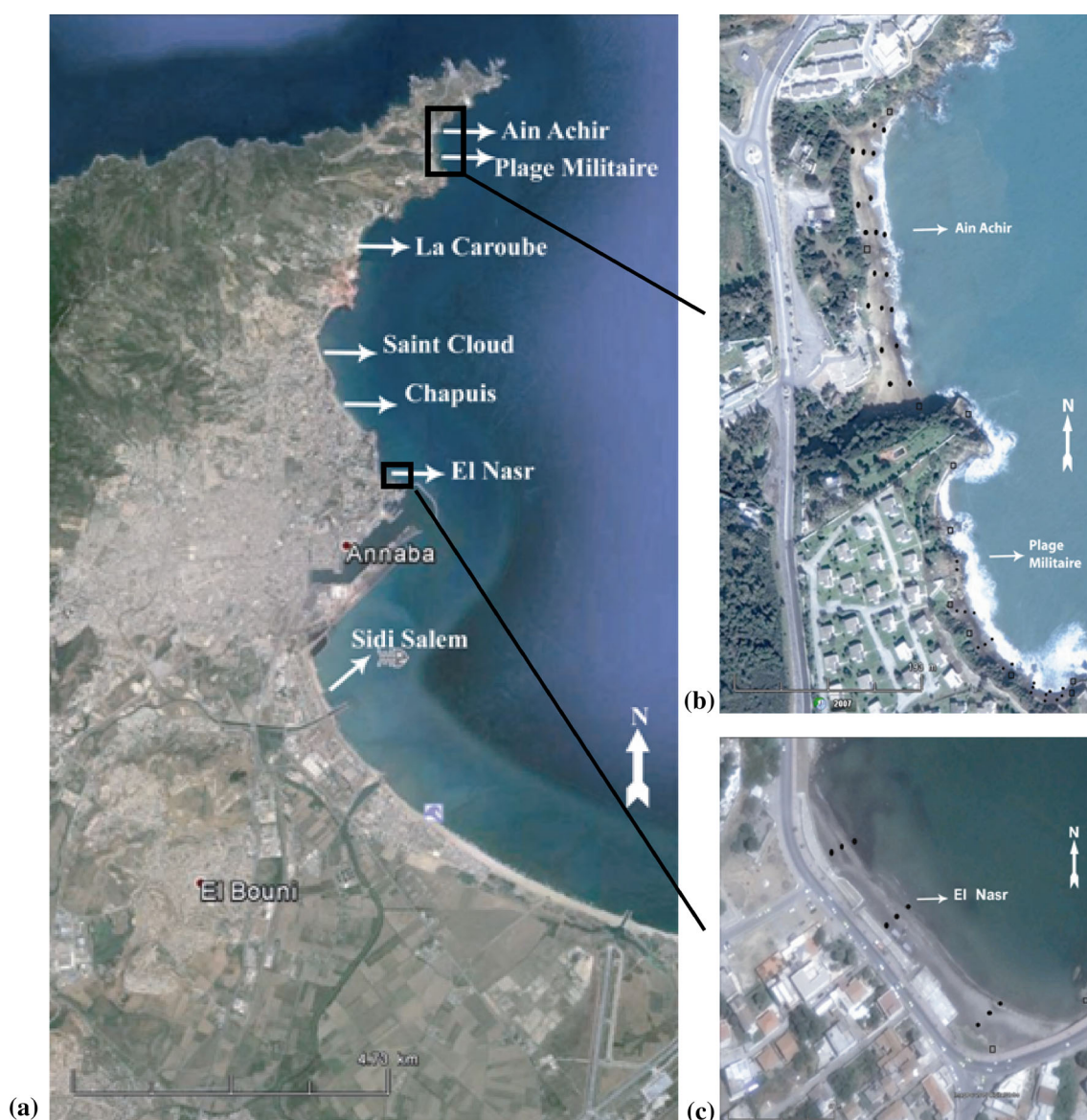


Figure 1. Aerial photographs: (a) the Annaba town coast, (b) the Cap de Garde field with the two studied beaches (Ain Achir and the Plage-Militaire beaches), and (c) the Harbor field (El Nasr beach). • = sand samples, □ = proximal rock outcrops samples locations. Google Earth 2016.

average temperature of 18.4°C throughout the year. Rainfall averages 712 mm (650 and 1000 mm/yr; [ANDI 2013](#)) per year. The probability of rainfall is very high during the period January–March and during October–December (temperatureweather.com 2016).

2.1.2 Hydrography

The hydrographic network of the Annaba region is rather dense ([Hilly 1962](#); figure 2a). It consists mainly of Lake Fetzara (freshwater) covering 18,670 ha and the Oued Seybouse with a length of 127.5 km ([ANDI 2013](#)).

2.1.3 Topography

The relief of the Annaba region is dominated by the Edough massif (52%), and shaped by the hogbacks (28%) and the plains (18%) as well. The Edough massif extends over a length of 50 km in the direction SW–NE. The central part of the massif culminates at 1008 m (Bouazizi). The altitudes of the southwestern (Bou-Maiza) and northeastern (Cap de Garde) slopes are low, on average 200–300 m ([Oularbi and Zeghiche 2009](#)). Depending on the intensity of erosion, [Oularbi and Zeghiche \(2009\)](#) distinguish four principal erosional zones in the Edough massif (figure 2b), i.e., zones with: (i) intense erosion, (ii) medium erosion, (iii) low

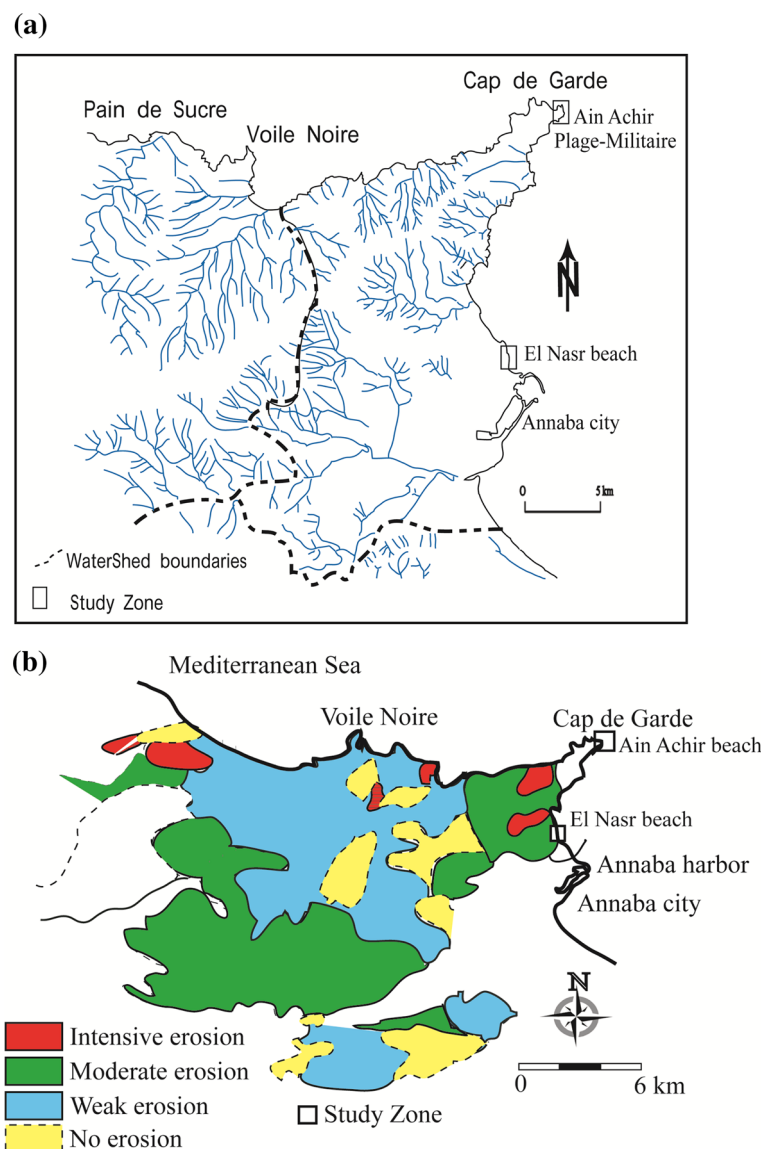


Figure 2. Maps of (a) the hydrographic network of the Annaba region ([Hilly 1962](#)), modified, and (b) erosion susceptibility of the Edough massif ([Oularbi and Zeghiche 2009](#)).

erosion and (iv) zero erosion. The erosional sensitivity map (Oularbi and Zeghiche 2009) shows that the study areas (Ain Achir, the Plage-Militaire and El Nasr beaches) lay in the 'zero erosion' zone.

2.1.4 Swell and sea wave

The coasts of Annaba are characterised by a north–northwestern swell. In winters, the height of the waves is high and can exceed 3 m. In summer, the height of the waves is low and does not exceed 1 m.

2.1.5 Morphology

The geomorphology of the study area is characterised by a flat topography and the lack of an active hydrographic system, the Cap de Garde (Ain Achir and the Plage-Militaire beach) and the Harbor (El Nasr beach) fields are characterised by low continental erosion.

2.2 Geological background

Geologically, the studied areas are a part of the crystalline Edough Massif. The latter experienced a regional and polycyclic metamorphism characterised by high-pressure (12–14 kbar) and medium-temperature metamorphic conditions (500–600°C) (Brunnel *et al.* 1988; Caby and Hammor 1992; Ahmed-Said *et al.* 1993; Caby *et al.* 2001). The different metamorphic units underwent a first oblique deformation characterised by syn-metamorphic folds followed by flexural shear generating upright folds of 140°N direction, anticlines with direction 50–60°N and shear senses of 120–160°N. In the studied areas, the coastal rock outcrops are mainly composed by garnet, staurolite (and/or andalusite), kyanite micaschists, marble, epidotic skarns, migmatites and numerous quartzofeldspathic veins (figure 3).

2.2.1 Cap de Garde field

The two beaches at this field are underlain by metamorphic rocks. The northern part of the Cap de Garde is composed by kyanite-bearing micaschists (figure 3a), migmatised gneisses (figure 3b) followed by tourmaline-bearing quartzofeldspathic veins occurring in garnet–staurolite micaschists and/or in garnet micaschists (figure 3c) and small garnetite outcrops (figure 3d). In these beaches, most of the outcrops are staurolite–garnet

micaschists with some quartz veins (figure 3e) or staurolite–garnet micaschist alternating with marble layers. The contact between the staurolite–garnet micaschists and the marble layers is marked by epidote-rich skarns (figure 3f). The northern part of the Plage-Militaire beach is composed by garnet micaschists with some tourmaline-rich quartzofeldspathic veins (figure 3g) and the same garnet–staurolite micaschist alternating with marble layers as at the Ain Achir beach. The other parts show mainly staurolite–garnet micaschists (figure 3h).

2.2.2 The Harbor field

This field encloses the El Nasr beach. Concrete slabs cover the back of the shoreline. Only a 20-m garnet–staurolite micaschist outcrop with tourmaline-rich veins is visible in the southern part of the beach (figure 3i and j).

3. Analytical methods and sampling

Sands from the studied beaches and the proximal rock outcrops have been sampled. A set of 23 hand-specimen rock samples (8 at Ain Achir, 12 at the Plage-Militaire and 3 at El Nasr beach) and 44 (18 at Ain Achir, 17 at the Plage-Militaire and 9 at El Nasr beach) surface sand samples with a single weight of 3 kg were taken. The sand sampling was done along with a 10×15 m surface grid and a depth of 25–30 cm. The bulk sample was reduced by coning and quartering and a 100 g portion of the sample was selected for the analysis (following Darnley *et al.* 1995). Powders of the selected unaltered samples were dried overnight at 105°C prior to the analyses. The compositions of the whole-rock samples, including major, minor and trace elements, were determined by wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometry, inductively coupled plasma-mass spectrometry and inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry at laboratories of the GeoForschungsZentrum Potsdam and the Institute of Earth and Environmental Science, Potsdam University, Germany. International and internal reference samples were used for calibration. Analyses for major and minor elements and for trace elements were conducted on fused glass and pressed powder disks, respectively. Both of the disks were prepared at the Institute of Earth and Environmental Science, Potsdam.

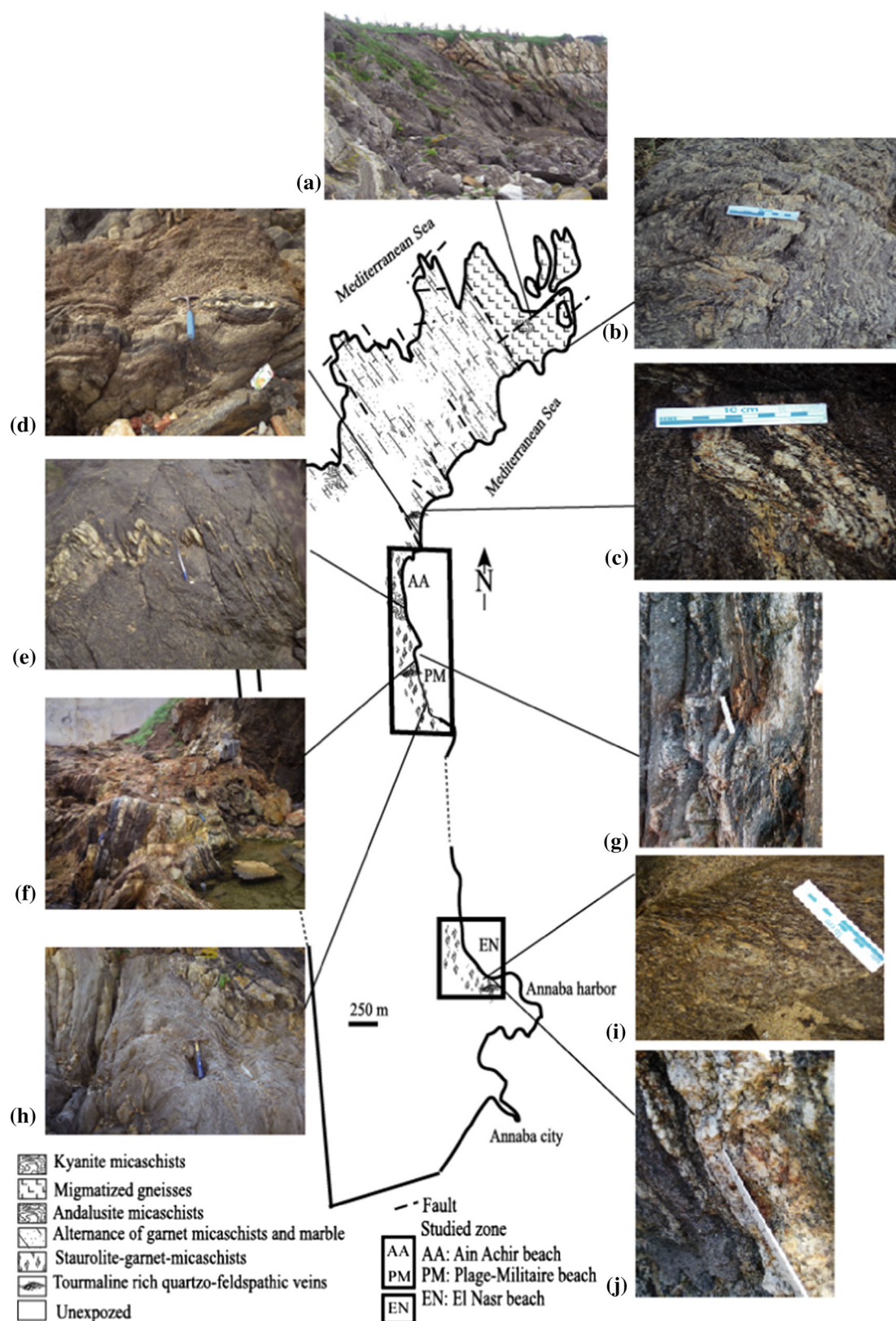


Figure 3. Simplified geological maps of the Cap de Garde (AA-PM) and the Harbor (EN) fields with the studied beach locations and field photography of the basement outcrops: (a) kyanite-bearing micaschist, (b) migmatized gneisses, (c) tourmaline-bearing quartzo-feldspathic veins, (d) small garnetite outcrops, (e) staurolite-garnet micaschist with quartz veins, (f) skarns, (g) garnet micaschist with tourmaline-rich quartzo-feldspathic layers, (h) staurolite-garnet micaschists, (i) garnet-staurolite micaschist, and (j) micaschist with tourmaline-rich quartzo-feldspathic veins.

Whole heavy-mineral grains were identified under incident light using a binocular microscope. Random grain samples were also mounted in thin section for identification using a petrographic microscope, thus providing a means of verifying the bulk identifications achieved under incident light. The minerals identified by microscopic investigations were further checked by X-ray.

The mineral chemical analyses were conducted using a fully automated JEOL JXA-8200 electron microprobe at the Institute of Earth and Environmental Science laboratory/Potsdam.

At least 100 dark-toned minerals were counted for mode composition, using the ribbon counting method (Mange and Maurer 1991; Morton and Hallsworth 1994). Counts of minerals were made using microphotographs taken along regular grid spacing on the thin section and using the free software Mesurim.

4. Results

4.1 Petrography and mineralogy

4.1.1 Proximal belts outcrops

Cap de Garde field (Ain Achir beach): Three samples representing the major proximal outcrops of the Ain Achir beach have been studied under a petrographic microscope. The samples (E60, E62 and E74) are micaschists. Kyanite-bearing micaschists at northern part of the Cap de Garde (Vivier zone) have also been sampled (five samples Viv1–5 and Dviv). Samples of the micaschists are mainly composed by elongated and sometimes cracked staurolite with zircon inclusions, altered biotite, quartz with wavy extinction and euhedral garnet with inclusions (figure 4a and b). The mineralogical composition of the skarn sample is calcite, amphibole, epidote and rare scapolite (figure 4c and d). Kyanite from the Vivier micaschists is elongated with minor quartz inclusions.

Plage-Militaire beach: The outcrop is composed of a garnet–staurolite with rare kyanite micaschists. The staurolite grains are smaller than those of the Ain Achir field. Kyanite grains elongated with minor garnet inclusions (figure 4e). Garnets are euhedral and show sometimes quartz inclusions (figure 4f).

Harbor field (El Nasr beach): The basement outcrop is very small (5 m), and composed of a garnet–staurolite micaschists. Feldspars are highly altered (figure 4g). Small garnets are common (figure 4h).

4.1.2 Sand description

The Ain Achir and the Plage-Militaire sand show significant differences in their mode (table 1). The Ain Achir sand shows two kinds of colours: light coloured sands, containing an average of 39% heavy minerals, and dark sands, showing an average of 74% heavy minerals. The black sand typically consists of staurolite (43%) as the main mineral, followed by garnet (19%), tourmaline (9%), kyanite and epidote (2%). The Plage-Militaire is characterised by a higher average in heavy-mineral content (91%). As in the Ain Achir sand, staurolite is the main mineral (45%) followed by garnet (29%). The tourmaline content is higher (13%) than in Ain Achir sand, whereas kyanite and epidote are low (2 and 1%, respectively).

The binocular analysis of the Ain Achir and Plage-Militaire dark sand yielded a variegated spectrum of minerals (figure 5) with dominantly metastable minerals: (i) epidote occurs in both the beach sand samples in relatively low abundance ranging from 1 to 2%. Under the stereo-microscope, epidote is pale green with short prism and sometimes rounded shape (figure 5a), (ii) staurolite is well represented and is the most common mineral in the two beaches. The crystals have dark yellowish brown colour. They occur as irregular, elongated or fractured grains. Some crystals show zircon inclusions (figure 5b and c), (iii) garnets occur as euhedral, subrounded to rounded crystals (figure 5a and b). Some grains are sharp irregular fragments. All crystals are pale pink to red. Some are pinkish brown, ilmenite and quartz inclusions are common, but some garnets from the Plage-Militaire sand show also zircon inclusions (not shown), (iv) kyanite is present in prismatic fragments. All crystals are sharp edged. Some crystals show small typical kyanite cleavage and exhibit characteristic step-like fractures, ilmenite inclusions are common (figure 5b and c).

There are no major differences between the mineralogical composition of the El Nasr sand and those from the Cap de Garde. The El Nasr sand is characterised by an average of 84% of heavy mineral (staurolite 60%, garnet 14%, kyanite 5%, tourmaline 4%) and an average of light minerals (16%) composed of quartz and calcite (table 2). The heavy-mineral assemblage is restricted to few selective minerals such as: pink garnet with quartz and/or ilmenite inclusions, yellow-brown staurolite with inclusions (figure 5d and e) and kyanite in

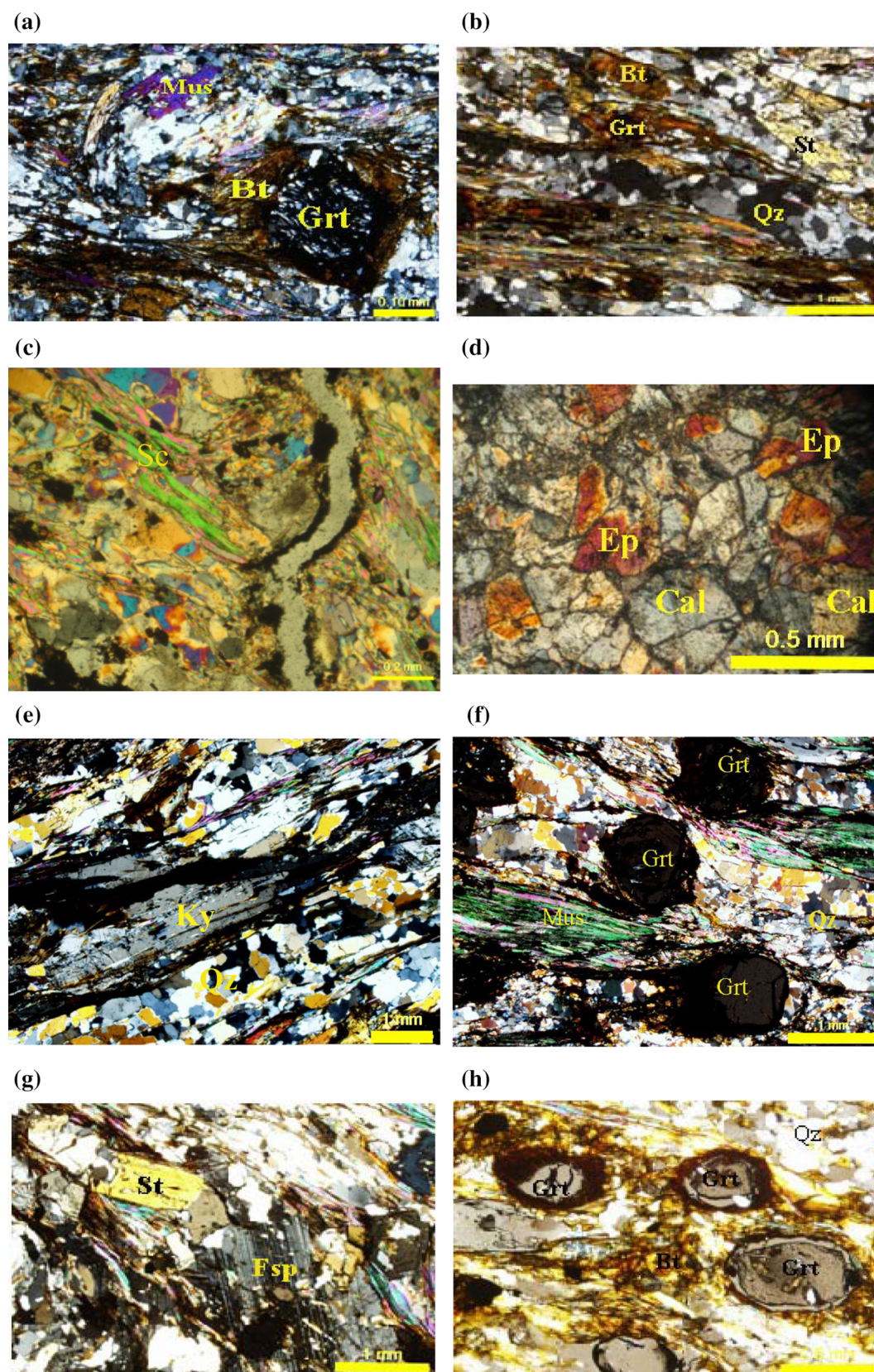


Figure 4. Microphotograph of proximal outcrops of the studied fields: Ain Achir: (a and b) micaschist, (c and d) epidote-rich skarn; Plage-Militaire: (e) garnet-staurolite-kyanite micaschist, and (f) garnet micaschist; El Nasr: (g) garnet-staurolite micaschist with some feldspars, and (h) garnet micaschist.

Table 1. Heavy-mineral composition of the sands from Ain Achir, Plage-Militaire and El Nasr beaches.

Samples		Grt	St	Ky	Tur	Ep	Qz	Cal	ΣHM%	ΣLM%
Ain Achir beach (AA)										
Light sand (LS)	AA1a	4	10	4	8	9	7	57	36	64
	AA1b	7	36	5	4	0	10	38	52	48
	AA2b	5	10	4	4	3	14	59	27	73
	AA4a	10	31	4	5	1	10	37	52	48
	AA4b	6	26	3	1	2	18	43	39	61
	AA5a	11	25	6	7	0	11	41	48	52
	AA5b	7	10	10	7	0	11	54	35	65
	AA5c	11	9	2	4	0	20	54	26	74
Dark sand (DS)	AAGa	13	24	2	8	2	16	35	49	51
	AACa	25	43	0	16	5	2	9	89	11
	AA2a	17	48	1	6	3	2	23	75	25
	AA2c	15	33	5	15	3	8	21	70	30
	AAMa	15	44	1	6	0	10	24	66	34
	AAMb	23	67	0	3	2	1	3	96	4
	AA3a	11	43	0	8	3	8	28	64	36
	AA3b	18	40	1	6	0	9	26	65	35
	AA3c	13	44	6	9	0	6	22	72	28
	AAGb	39	40	0	15	1	0	5	95	5
Average %HM LS		7.8	19.8	4.7	5.1	2.0	12.7	48.0	39.3	60.7
Average %HM DS		18.9	42.6	1.6	9.2	1.8	6.3	19.6	74.2	25.8
Plage-Militaire beach (PM)										
Dark sand (DS)	Pms6a	9	25	5	15	5	6	34	60	40
	Pms1a	28	38	3	19	4	3	5	92	8
	Pms2a	32	46	1	11	2	1	8	91	9
	Pms3a	38	50	2	2	1	1	5	94	6
	Pms4a	39	45	2	6	1	2	4	94	6
	Pms5a	36	41	2	16	0	2	3	95	5
	Pms1b	9	44	1	24	4	1	15	83	17
	Pms2b	37	41	2	15	1	0	3	96	4
	Pms3b	29	50	1	15	1	2	3	95	5
	Pms4b	14	53	2	16	1	1	13	86	14
	Pms5b	35	48	0	10	0	4	4	92	8
	Pms6b	19	46	0	21	2	1	12	88	13
	Pms1C	32	55	1	7	1	0	3	97	3
	Pms2c	35	41	1	17	0	1	5	94	6
	Pms3c	33	52	4	6	0	1	3	95	5
	Pms5c	29	52	2	11	0	1	5	93	7
	Pms6c	46	39	1	10	2	0	2	98	2
Average %HM DS		29.4	45.0	1.8	13.1	1.5	1.6	7.6	90.8	9.2
El Nasr beach (NS)										
Dark sand (DS)	EN S 1a	19	66	0	8	0	1	6	92	8
	EN S 2a	6	32	19	0	0	21	21	57	43
	EN S 3a	4	58	2	0	0	7	29	64	36
	EN S 1b	9	66	7	7	0	3	9	88	12
	EN S 2b	18	72	5	0	0	0	5	95	5
	EN S 3b	16	63	2	7	0	2	9	89	11
	EN S 1c	15	63	0	7	0	2	13	85	15
	EN S 2c	24	61	7	2	0	2	5	93	7
	EN S 3c	17	59	4	10	0	3	7	90	10
Average %HM		14.4	59.9	5.1	4.5	0.0	4.5	11.6	83.8	16.2

The values are given as percentages of the number of grains recorded.

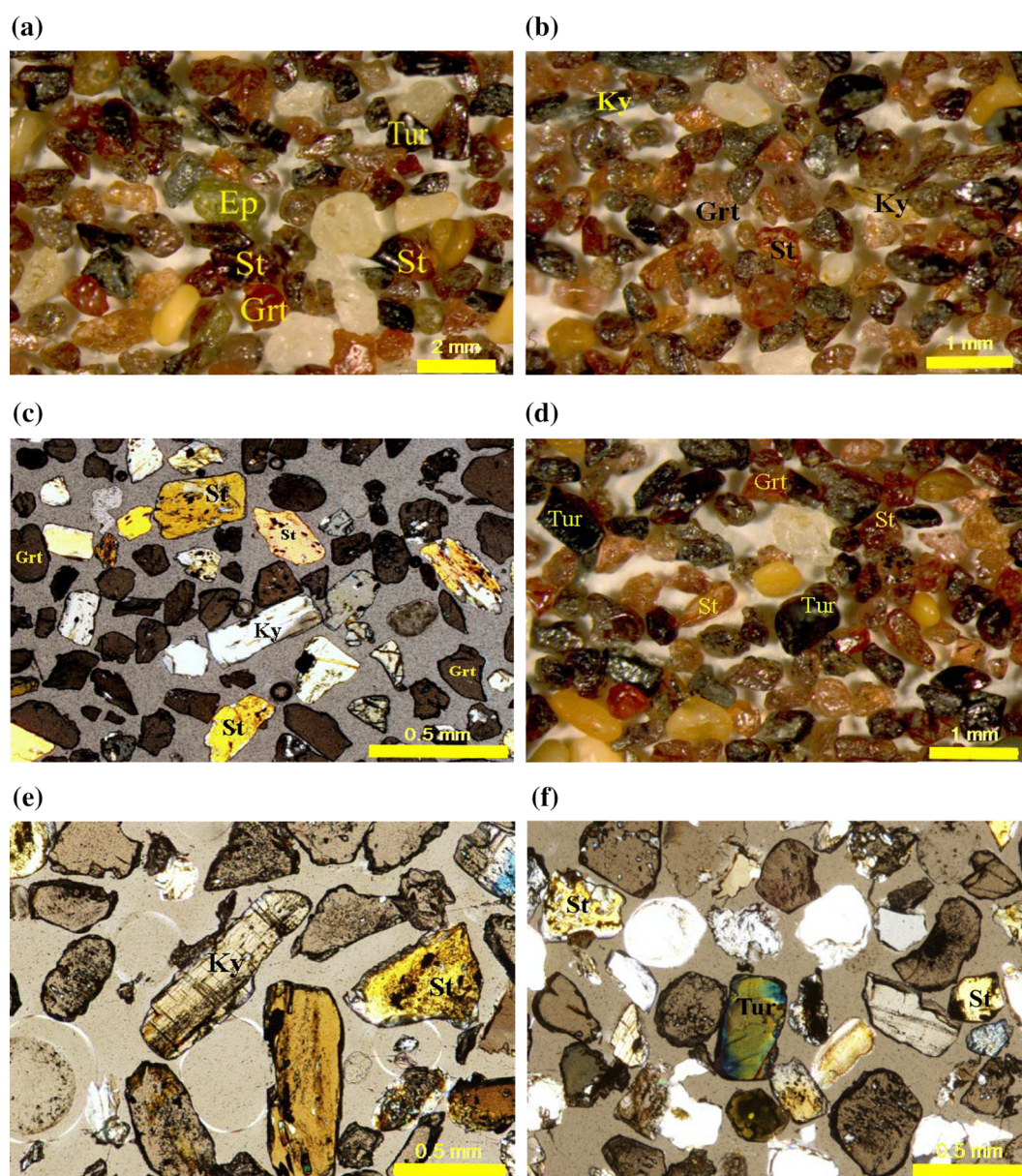


Figure 5. Microphotograph of heavy-mineral assemblage: (a, b and c) from Ain Achir and Plage-Militaire beaches; (d, e, and f) from El Nasr beach.

prismatic fragments with typical step-like fractures (figure 5e) and rounded and elongated tourmaline grains (figure 5d and f). Epidote is not present in the El Nasr sand samples.

4.1.3 Heavy-mineral inclusions

Most of the heavy minerals of the three beaches have solid inclusions. Hand-picked single garnet, staurolite and kyanite grains with solid inclusions from the beaches have been analysed by X-ray diffraction (XRD). The detrital garnets from the Ain Achir, Plage-Militaire and El Nasr sands show different types of inclusions such as quartz

(figure 6a). At the Ain Achir, most of the staurolite grains have garnet inclusions (figure 6b) and those from the Plage-Militaire and El Nasr sands have tourmaline, garnet and zircon inclusions (figure 6c). Kyanite grains from the three beaches show no differences. Their inclusions are mostly garnet or quartz (figure 6d).

4.2 Sand mineral chemistry

4.2.1 Garnet

The structural formula of the analysed garnets was calculated according to Locock (2008) on the

Table 2. Chemical composition and end-member compositions of the garnets from the three beaches.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	Alm	Sps	Prp	Grs	Adr	Uv
Ain Achir beach														
AAS1	37.0	0.1	21.4	38.7	0.2	2.0	0.5	100.0	90	0	8	2	0	0
AAS2	36.9	0.1	21.3	39.0	0.1	1.9	0.5	99.9	90	0	8	2	0	0
AAS3	36.9	0.1	21.3	39.0	0.2	2.0	0.6	100.0	90	0	8	2	0	0
AAS4	37.0	0.1	21.3	39.0	0.1	2.0	0.6	100.1	90	0	8	2	0	0
AAS5	37.8	0.1	21.4	35.0	1.2	2.4	2.1	99.9	82	3	10	6	0	0
AAS6	37.7	0.1	21.3	35.1	1.2	2.4	2.3	100.0	81	3	9	7	0	0
AAS7	37.7	0.1	21.4	34.9	1.2	2.3	2.2	99.9	82	3	9	7	0	0
AAS8	37.6	0.1	21.4	35.1	1.3	2.2	2.2	99.9	82	3	9	7	0	0
AAS9	37.6	0.1	21.5	34.9	1.3	2.2	2.1	99.8	82	3	9	6	0	0
AAS10	37.9	0.1	21.1	36.5	0.2	3.2	1.0	100.0	84	0	12	3	0	0
AAS11	37.7	0.0	21.3	36.7	0.2	3.1	1.0	99.9	85	0	12	3	0	0
AAS12	37.7	0.1	21.3	36.5	0.2	2.9	1.2	99.9	85	0	12	3	0	0
AAS13	37.7	0.1	21.2	36.7	0.2	2.9	1.2	99.9	85	0	11	4	0	0
AAS14	37.7	0.1	21.2	36.6	0.1	2.9	1.2	99.8	85	0	11	3	0	0
AAS15	37.7	0.1	21.2	36.8	0.2	2.7	1.1	99.9	86	0	11	3	0	0
AAS16	37.5	0.1	21.2	37.3	0.2	2.6	1.1	100.1	86	0	10	3	0	0
AAS17	37.8	0.1	21.2	37.2	0.2	2.5	1.1	100.0	87	0	10	3	0	0
AAS18	37.6	0.1	21.1	35.4	1.3	1.1	3.5	100.1	83	3	4	10	0	0
AAS19	37.4	0.1	21.1	34.7	1.3	1.1	4.1	99.9	81	3	4	12	0	0
AAS20	37.4	0.1	21.3	34.3	1.5	1.0	4.6	100.1	80	3	4	13	0	0
Plage-Militaire beach														
PMS1	37.6	0.0	22.5	34.3	0.0	5.1	0.5	100.1	78	0	20	2	0	0
PMS2	37.3	0.0	22.1	36.1	0.0	4.0	0.4	100.0	83	0	16	1	0	0
PMS3	37.3	0.0	21.9	36.7	0.0	3.7	0.4	100.0	84	0	15	1	0	0
PMS4	37.1	0.1	21.9	36.8	0.1	3.7	0.4	100.0	84	0	15	1	0	0
PMS5	37.7	0.0	22.1	36.2	0.0	3.7	0.4	100.0	84	0	15	1	0	0
PMS6	37.5	0.0	22.0	36.4	0.0	3.9	0.4	100.1	84	0	15	1	0	0
PMS7	37.5	0.0	22.2	35.4	0.0	4.5	0.4	100.0	81	0	18	1	0	0
PMS8	37.8	0.1	22.0	35.0	0.0	4.5	0.5	99.9	81	0	18	1	0	0
PMS9	36.7	0.1	21.7	36.3	2.1	1.6	1.3	99.9	85	5	7	4	0	0
PMS10	36.5	0.1	21.7	36.6	1.6	2.1	1.4	100.0	84	4	9	4	0	0
PMS11	36.6	0.1	21.7	36.1	1.6	2.2	1.6	100.0	83	4	9	5	0	0
PMS12	36.6	0.1	21.8	35.9	1.7	2.1	1.6	99.9	83	4	8	5	0	0
PMS13	36.9	0.1	21.7	35.8	1.7	2.0	1.7	99.9	83	4	8	5	0	0
PMS14	37.1	0.1	21.8	35.2	1.7	2.0	2.1	100.1	82	4	8	6	0	0
PMS15	37.0	0.1	21.8	35.7	1.7	2.0	1.8	100.1	83	4	8	5	0	0
PMS16	36.6	0.2	21.8	36.4	1.6	2.0	1.4	100.0	84	4	8	4	0	0
PMS17	36.4	0.2	22.0	36.3	2.0	1.8	1.3	99.9	84	5	7	4	0	0
PMS18	37.5	0.1	21.3	28.1	2.7	1.2	8.7	99.7	64	6	5	25	0	0
PMS19	37.4	0.1	21.3	28.2	3.1	1.0	8.8	99.9	64	7	4	25	0	0
PMS20	37.5	0.1	21.2	28.4	3.1	1.0	8.8	100.1	64	7	4	25	0	0
PMS21	37.5	0.1	21.4	28.6	3.2	0.9	8.4	100.0	65	7	4	24	0	0
PMS22	37.2	0.1	21.3	29.0	3.1	0.9	8.4	100.1	65	7	4	24	0	0
PMS23	37.3	0.1	21.3	29.3	2.8	1.0	8.0	99.9	67	6	4	23	0	0
PMS24	37.7	0.1	21.4	29.4	2.3	1.1	8.1	100.0	68	5	4	24	0	0
PMS25	36.6	0.0	21.5	34.8	0.5	0.8	5.5	99.8	80	1	3	16	0	0
PMS26	36.5	0.1	21.4	35.0	0.5	0.7	5.9	100.1	79	1	3	17	0	0
PMS27	36.7	0.1	21.5	34.6	0.5	0.7	5.8	100.0	79	1	3	17	0	0
PMS28	36.7	0.1	21.5	35.1	0.3	0.7	5.4	100.0	80	1	3	16	0	0
PMS29	37.0	0.1	21.5	34.8	0.4	0.7	5.6	100.1	80	1	3	16	0	0
PMS30	36.9	0.1	21.3	35.5	0.3	0.8	5.0	100.0	81	1	3	15	0	0
PMS31	36.7	0.1	21.3	35.7	0.3	0.8	4.9	99.9	82	1	3	14	0	0

Table 2. (Continued.)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Total	Alm	Sps	Prp	Grs	Adr	Uv
PMS32	37.0	0.1	21.3	34.5	0.6	1.2	5.1	99.9	79	1	5	15	0	0
PMS33	37.1	0.1	21.4	34.3	0.6	1.2	5.2	100.0	79	1	5	15	0	0
PMS34	37.0	0.1	21.7	34.0	0.6	1.2	5.2	99.9	79	1	5	15	0	0
PMS35	37.0	0.1	21.5	34.6	0.5	1.3	5.0	100.0	79	1	5	15	0	0
PMS36	37.3	0.1	21.2	34.3	0.6	1.2	5.3	100.0	79	1	5	16	0	0
PMS37	36.8	0.1	21.5	35.8	0.5	1.3	4.2	100.1	82	1	5	12	0	0
PMS38	37.1	0.1	21.4	35.4	0.3	1.5	4.1	100.0	82	1	6	12	0	0
El Nasr beach														
EN1	37.7	0.0	21.7	34.9	0.2	4.8	0.8	100.1	79	0	19	2	0	0
EN2	37.8	0.0	21.6	33.8	0.5	3.8	2.4	99.9	77	1	15	7	0	0
EN3	38.2	0.1	21.9	33.1	0.3	4.3	2.3	100.1	75	1	18	6	0	0
EN4	38.3	0.0	21.5	33.1	0.7	4.0	2.5	100.1	76	2	16	7	0	0

Alm: Almandine, Sps: Spessartine, Prp: Pyrope, Adr: Andradite, Uv: Uvarovite, Grs: Grossular (Whitney and Evans 2010).

basis of 12 oxygen atoms (table 2). Although all analysed garnet grains represent a chemical mixture of the different components, they are extremely rich in almandine component. Their chemical compositions are plotted in the Alm–Prp–Grs diagram (figure 7).

Garnets at the Ain Achir beach have a relatively homogeneous end-member composition: (Prp 4–12 mol%, Alm 81–90 mol%, Grs 2–13 mol%) (figure 7a). The Plage-Militaire sand is characterised by four kinds of garnet composition (figure 7b): (i) (Prp 15–20 mol%, Alm 78–84 mol%, Grs 1–2 mol%), (ii) (Prp 7–9 mol%, Alm 82–85 mol%, Grs 4–6 mol%), (iii) (Prp 4–5 mol%, Alm 64–68 mol%, Grs 23–25 mol%) and (iv) (Prp 3–6 mol%, Alm 79–82 mol%, Grs 12–17 mol%). In contrast to those from the Plage-Militaire, the compositions of garnet of El Nasr sands show a higher pyrope end-member content (Prp 16–19 mol%, Alm 75–79 mol%, Grs 2–7 mol%) (figure 7c).

4.2.2 Tourmaline

The program WinTcac (Yavuz *et al.* 2006) has been used for mineral recalculation and classification of tourmaline. The normalisation approach based on the Si=15 (apfu) is useful for tourmaline analyses with unanalysed elements such as Li and B and is appropriate for tourmalines from metamorphic rocks (Henry *et al.* 2011). The composition of tourmalines from each beach type is presented in table 3.

All tourmaline samples plot in the alkali-tourmaline group field on the Ca–X_{vac}–(Na+K) ternary diagram (figure 8a–c) of Jiang *et al.* (1995, 1996). Detrital tourmaline of the Ain Achir and Plage-Militaire beaches is Fe rich with X_{Fe} = (Fe/Fe+Mg) varying between 0.76 and 0.94, respectively; therefore, they are schorlitic in their composition (figure 8d and e). Tourmalines from the El Nasr beach are Fe-poor with a mean value of X_{Fe} = 0.26 and plot in the dravite field (figure 8f).

4.3 Geochemistry of whole sand and basement

At the Ain Achir beach, the light and dark sands show some differences in their chemical compositions (table 4a). The average total REE content at the Ain Achir beach is 69 and 128 ppm for the light and dark sands, respectively. The Ain Achir light sands are mainly high in LREE (Σ LREE = 56 ppm) rather than HREE (Σ HREE = 12 ppm). Whereas the dark sand shows higher LREE and HREE concentrations (Σ LREE = 100 ppm and Σ HREE = 28 ppm). Compared to the REE data from the Ain Achir, the Plage-Militaire sands show somewhat higher values of Σ REE, Σ LREE and Σ HREE: Σ REE = 130–274 ppm, average 230 ppm; Σ LREE = 141–198 ppm, average 168 ppm and Σ HREE = 41–75 ppm, average 61 ppm (table 4a). At the El Nasr (table 4a), the averages are: Σ REE = 196 ppm, Σ LREE = 149 ppm and Σ HREE = 47 ppm.

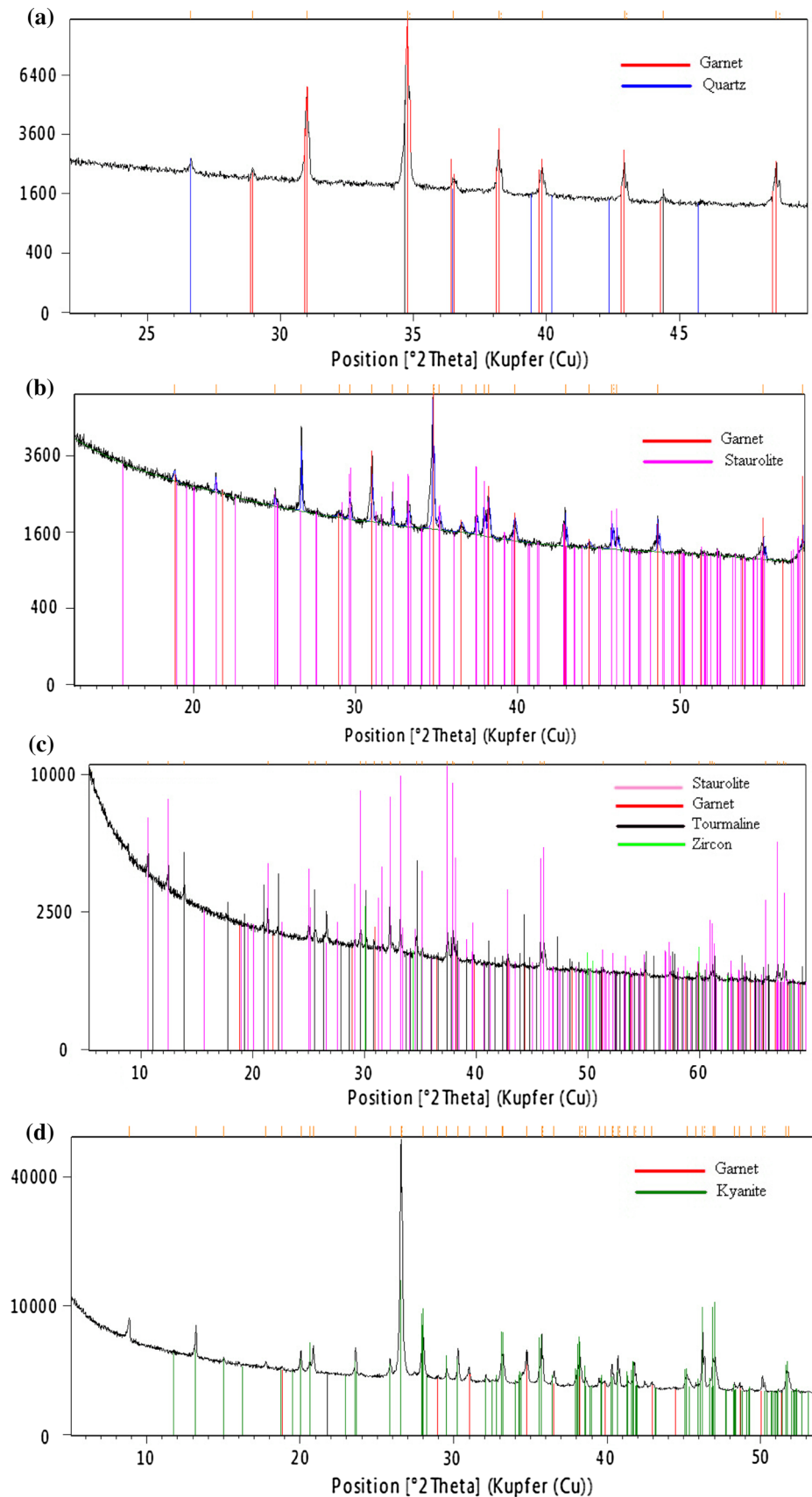


Figure 6. XRD diagrams of (a) detrital garnets with quartz inclusions, (b) staurolite grains with garnet inclusions, (c) staurolite grains with tourmaline, zircon and garnet inclusions, and (d) kyanite grains with garnet inclusion.

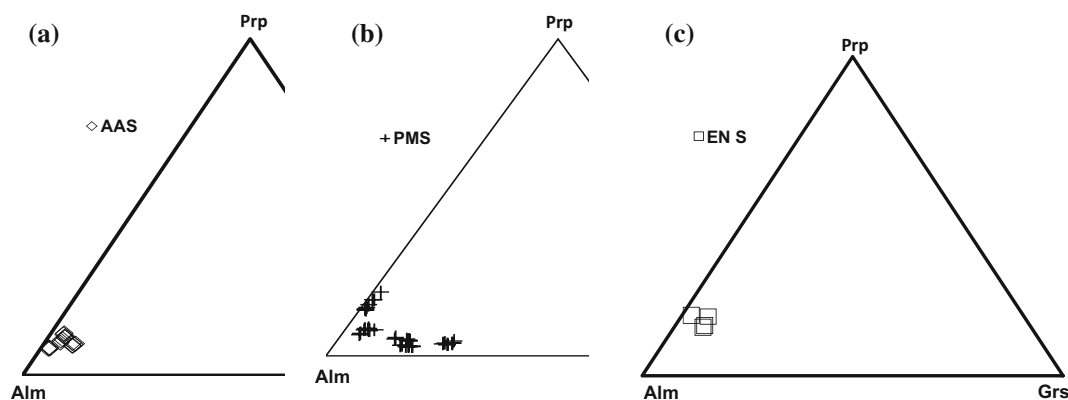


Figure 7. Ternary garnet composition diagrams showing abundances of almandine, grossular and pyrope end-members from the heavy-mineral sand beaches. AA S: Ain Achir sand, PM S: Plage-Militaire sand, EN S: El Nasr sand.

The average REE values of the kyanite-bearing micaschists from the Vivier zone at the Cap de Garde (R Av. REE VIV) are clearly higher: $\Sigma\text{REE} = 249$ ppm, $\Sigma\text{LREE} = 218$ ppm and $\Sigma\text{HREE} = 30$ ppm than those of the Ain Achir garnet-staurolite micaschist outcrops (R Av. REE AA): $\Sigma\text{REE} = 207$ ppm, $\Sigma\text{LREE} = 182$ ppm and $\Sigma\text{HREE} = 24$ ppm (table 4b). At the Plage-Militaire, the REE concentrations are nearly similar and their $\Sigma\text{REE} = 148$ ppm, $\Sigma\text{LREE} = 129$ ppm and $\Sigma\text{HREE} = 18$ ppm. The El Nasr rock outcrops have high average REE values: $\Sigma\text{REE} = 218$ ppm, $\Sigma\text{LREE} = 193$ ppm and $\Sigma\text{HREE} = 25$ ppm (table 4b).

5. Discussion of the provenance

Heavy-mineral (specific gravity 2.85 or greater) assemblages reflect the mineralogy of the source rocks. Mineral chemistry of heavy minerals such as garnet (Mange and Wright 2007) and tourmaline (Henry and Guidotti 1985) is applicable to provenance studies and they are useful indicators of the nature of the source area.

5.1 Garnet

Garnet is resistant to weathering, and has compositions that may reflect the composition of the source rocks. Garnet shows significant differences in the composition between different types of garnet-bearing lithologies. In general, detrital garnet is considered to mostly originate from metamorphic rocks (Blatt *et al.* 2006).

The Ain Achir sand garnet (Prp-Alm-Grs) compositions are relatively homogeneous. In figure 9(a), all samples are grouped in the field Bi for intermediate to felsic igneous rocks suggesting

a single-source type. The single source of garnet at Ain Achir can be explained by the presence of only one variety of garnet (almandine rich) in the micaschist outcrop (e.g., garnet-staurolite micaschist). The garnets from the Plage-Militaire sand split into two groups with a noticeable difference in garnet end-member composition (figure 9b). The first group is dominated by almandine-pyrope with low grossular content and the second by higher grossular and lower pyrope concentration. The presence of two garnet compositions might result from mixed sources (probably the proximal garnet-staurolite micaschists and the garnet micaschist) or multiple garnet varieties in a single source). The garnet samples plot both in the field Bi for intermediate to felsic igneous rocks and in the field B for amphibolite-facies metasedimentary rocks. The difference in abundance of garnet varieties in the Plage-Militaire garnet sand samples may also reflect mixed sources (e.g., proximal garnet-staurolite micaschists and garnet micaschists). The El Nasr garnets are homogeneous and show a relatively high pyrope component. All samples plot in the field Bi for intermediate to felsic igneous rocks. Their high abundance in pyrope reflects a single magnesian-rich source (figure 9c).

5.2 Tourmaline

The source-rock types of detrital tourmaline can be identified with the triangular Ca-Fe-Mg diagrams of Henry and Guidotti (1985). Comparison of the tourmaline data from the studied sands with compositional fields of tourmaline of known origins (figure 10) indicates a strong diversity of the source rock. According to the $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$, $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ ratio and Ca^{2+} content, tourmaline

Table 3. Composition of tourmalines from each beach.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	B ₂ O ₃	Total
Ain Achir beach											
AAS1	34.93	0.44	36.30	11.54	0.07	2.50	0.21	1.89	0.03	9.99	97.89
AAS2	35.14	0.46	36.41	11.76	0.10	2.53	0.23	1.87	0.04	10.05	98.58
AAS3	35.06	0.50	35.99	11.75	0.09	2.58	0.24	1.87	0.03	10.03	98.13
AAS4	35.01	0.51	36.01	11.68	0.08	2.61	0.23	1.95	0.03	10.02	98.13
AAS5	34.99	0.51	35.87	11.77	0.09	2.64	0.21	1.98	0.04	10.01	98.12
AAS6	34.84	0.49	35.90	11.88	0.08	2.59	0.23	1.92	0.04	9.97	97.95
AAS7	35.15	0.50	35.73	11.66	0.09	2.67	0.22	1.96	0.04	10.06	98.10
AAS8	35.15	0.48	35.63	11.88	0.04	2.69	0.23	1.93	0.04	10.06	98.15
AAS9	35.00	0.51	35.80	11.79	0.08	2.64	0.22	2.02	0.04	10.01	98.13
AAS10	34.83	0.55	36.14	11.90	0.06	2.60	0.23	2.20	0.04	9.97	98.53
AAS11	34.46	0.52	36.15	11.66	0.04	2.49	0.25	2.31	0.04	9.86	97.78
AAS12	34.62	0.45	36.31	11.68	0.09	2.46	0.27	1.90	0.04	9.90	97.72
AAS13	34.64	0.49	36.17	11.81	0.04	2.52	0.25	2.36	0.05	9.91	98.25
AAS14	34.85	0.50	36.18	11.73	0.07	2.52	0.25	2.25	0.05	9.97	98.36
AAS15	34.80	0.50	36.26	11.76	0.07	2.53	0.24	2.40	0.04	9.96	98.56
AAS16	34.62	0.53	36.11	11.66	0.06	2.56	0.25	2.44	0.05	9.91	98.18
AAS17	34.54	0.45	36.15	11.96	0.08	2.57	0.25	2.33	0.04	9.88	98.28
AAS18	34.62	0.49	36.23	11.99	0.05	2.36	0.25	2.32	0.04	9.91	98.28
AAS19	34.84	0.48	36.24	12.05	0.10	2.45	0.26	2.34	0.05	9.97	98.79
AAS20	36.01	0.70	34.56	8.31	0.00	4.61	1.05	2.28	0.06	10.30	97.91
AAS21	36.00	0.74	34.74	8.44	0.04	4.60	1.06	2.38	0.05	10.30	98.37
AAS22	35.77	0.73	34.78	8.27	0.02	4.66	0.99	2.37	0.06	10.24	97.88
AAS23	36.00	0.70	34.95	8.31	0.03	4.68	1.03	2.42	0.06	10.30	98.52
AAS24	35.57	0.77	34.75	8.39	0.00	4.60	1.01	2.36	0.07	10.18	97.73
AAS25	35.97	0.71	34.80	8.34	0.03	4.61	0.96	2.10	0.05	10.30	97.88
AAS26	36.00	0.67	34.78	8.44	0.02	4.62	0.95	2.15	0.06	10.30	98.04
AAS27	35.70	0.45	36.20	10.52	0.09	2.33	0.38	1.76	0.03	10.22	97.68
AAS28	35.72	0.52	34.85	10.70	0.01	2.67	0.33	1.84	0.03	10.22	96.91
AAS29	36.11	0.44	35.52	10.50	0.05	2.68	0.31	1.82	0.04	10.33	97.85
AAS30	35.96	0.49	35.07	10.67	0.07	2.74	0.33	1.91	0.05	10.29	97.63
AAS31	35.87	0.71	34.50	11.11	0.03	2.85	0.36	1.99	0.05	10.26	97.74
AAS32	35.87	0.65	33.90	10.89	0.05	3.17	0.46	1.98	0.04	10.26	97.27
AAS33	35.73	0.51	34.51	10.99	0.08	2.94	0.42	1.93	0.05	10.22	97.43
Plage-Militaire beach											
PMS1	34.00	1.00	33.00	9.00	0.00	4.66	0.38	2.01	0.05	10.10	94.19
PMS2	34.00	0.00	34.00	11.00	0.00	3.26	0.35	2.12	0.07	10.17	94.96
PMS3	33.00	0.00	34.00	13.00	0.00	1.63	0.31	2.08	0.04	9.90	93.96
PMS4	33.00	0.00	33.00	13.00	0.00	2.16	0.34	2.14	0.04	9.94	93.62
PMS5	33.00	0.00	34.00	13.00	0.00	1.65	0.33	2.03	0.06	9.90	93.96
PMS6	33.00	0.00	34.00	12.00	0.00	2.18	0.33	2.14	0.05	9.98	93.68
El Nasr beach											
EN S1	36.00	0.00	33.00	5.00	0.00	7.65	0.89	2.14	0.02	10.57	84.57
EN S2	36.00	0.00	33.00	5.00	0.00	7.31	1.16	2.09	0.02	10.43	84.43
EN S3	36.00	0.00	32.00	5.00	0.00	7.66	0.85	2.07	0.03	10.35	83.35
EN S4	36.00	0.00	30.00	6.00	0.00	8.94	0.98	2.31	0.06	10.39	82.39
EN S5	36.00	0.00	31.00	5.00	0.00	9.32	0.72	2.31	0.01	10.50	82.50
EN S6	35.00	0.00	31.00	6.00	0.00	8.68	1.62	1.78	0.07	10.37	82.37

Table 3. (Continued.)

	Fe ₂ + (Y)	Mg(Y)	Ca(X)	Na(X)	K(X)	X-vacancy	Y(Fe/(Fe+Mg))	Mg/(Mg+Fe)	X(ca/Ca+Na)	Na+K
Ain Achir beach										
AAS1	1.66	0.64	0.04	0.63	0.01	0.33	0.94	0.28	0.06	0.64
AAS2	1.68	0.64	0.04	0.62	0.01	0.33	0.94	0.28	0.06	0.63
AAS3	1.68	0.66	0.04	0.62	0.01	0.33	0.93	0.28	0.07	0.63
AAS4	1.67	0.67	0.04	0.65	0.01	0.31	0.94	0.28	0.06	0.65
AAS5	1.69	0.68	0.04	0.66	0.01	0.30	0.95	0.29	0.05	0.67
AAS6	1.71	0.67	0.04	0.64	0.01	0.31	0.94	0.28	0.06	0.65
AAS7	1.67	0.68	0.04	0.65	0.01	0.30	0.94	0.29	0.06	0.66
AAS8	1.70	0.69	0.04	0.64	0.01	0.31	0.94	0.29	0.06	0.65
AAS9	1.69	0.68	0.04	0.67	0.01	0.28	0.94	0.29	0.06	0.68
AAS10	1.71	0.67	0.04	0.73	0.01	0.22	0.95	0.28	0.05	0.74
AAS11	1.70	0.65	0.05	0.78	0.01	0.17	0.95	0.28	0.06	0.79
AAS12	1.69	0.64	0.05	0.64	0.01	0.31	0.93	0.27	0.07	0.65
AAS13	1.71	0.65	0.05	0.79	0.01	0.15	0.95	0.28	0.05	0.80
AAS14	1.69	0.65	0.05	0.75	0.01	0.19	0.94	0.28	0.06	0.76
AAS15	1.70	0.65	0.05	0.80	0.01	0.15	0.95	0.28	0.05	0.81
AAS16	1.69	0.66	0.05	0.82	0.01	0.12	0.95	0.28	0.05	0.83
AAS17	1.74	0.66	0.05	0.79	0.01	0.16	0.95	0.28	0.06	0.80
AAS18	1.74	0.61	0.05	0.78	0.01	0.17	0.94	0.26	0.06	0.79
AAS19	1.74	0.63	0.05	0.78	0.01	0.16	0.94	0.27	0.06	0.79
AAS20	1.16	1.15	0.19	0.74	0.01	0.06	0.80	0.50	0.20	0.75
AAS21	1.18	1.14	0.19	0.77	0.01	0.03	0.80	0.49	0.20	0.78
AAS22	1.16	1.17	0.18	0.77	0.01	0.04	0.81	0.50	0.19	0.78
AAS23	1.16	1.16	0.18	0.78	0.01	0.02	0.81	0.50	0.19	0.80
AAS24	1.18	1.16	0.18	0.77	0.02	0.03	0.81	0.49	0.19	0.79
AAS25	1.16	1.15	0.17	0.68	0.01	0.14	0.80	0.50	0.20	0.69
AAS26	1.18	1.15	0.17	0.70	0.01	0.12	0.80	0.49	0.20	0.71
AAS27	1.48	0.59	0.07	0.57	0.01	0.35	0.89	0.28	0.11	0.58
AAS28	1.50	0.67	0.06	0.60	0.01	0.33	0.91	0.31	0.09	0.61
AAS29	1.46	0.67	0.06	0.59	0.01	0.35	0.91	0.31	0.09	0.60
AAS30	1.49	0.68	0.06	0.62	0.01	0.31	0.91	0.31	0.09	0.63
AAS31	1.55	0.71	0.07	0.65	0.01	0.28	0.91	0.31	0.09	0.66
AAS32	1.52	0.79	0.08	0.64	0.01	0.27	0.89	0.34	0.11	0.65
AAS33	1.54	0.74	0.08	0.63	0.01	0.29	0.89	0.32	0.11	0.64
Plage-Militaire beach										
PMS1	1.30	1.03	0.07	0.67	0.01	0.33	0.56	0.44	0.09	0.68
PMS2	1.57	0.77	0.06	0.66	0.01	0.34	0.67	0.33	0.09	0.68
PMS3	1.91	0.26	0.06	0.68	0.01	0.32	0.88	0.12	0.08	0.69
PMS4	1.90	0.52	0.06	0.68	0.01	0.32	0.78	0.22	0.08	0.69
PMS5	1.91	0.26	0.06	0.68	0.01	0.32	0.88	0.12	0.08	0.69
PMS6	1.75	0.52	0.06	0.68	0.01	0.32	0.77	0.23	0.08	0.69
El Nasr beach										
EN S1	0.69	1.88	0.16	0.68	0.00	0.16	0.56	0.73	0.19	0.69
EN S2	0.70	1.82	0.21	0.68	0.00	0.11	0.28	0.72	0.23	0.68
EN S3	0.70	1.92	0.15	0.68	0.01	0.17	0.27	0.73	0.18	0.68
EN S4	0.84	2.14	0.18	0.75	0.01	0.06	0.28	0.72	0.19	0.76
EN S5	0.69	2.30	0.13	0.74	0.00	0.13	0.23	0.77	0.15	0.74
EN S6	0.84	2.16	0.29	0.58	0.01	0.12	0.28	0.72	0.33	0.59

Xv=X-vacancy, Fe*(Y)=Y(Fe/(Fe+Mg)), Mg*(Y)=Mg/(Mg+Fe), Ca*(X)=X(Ca/Ca+Na), Na*=Na+K.

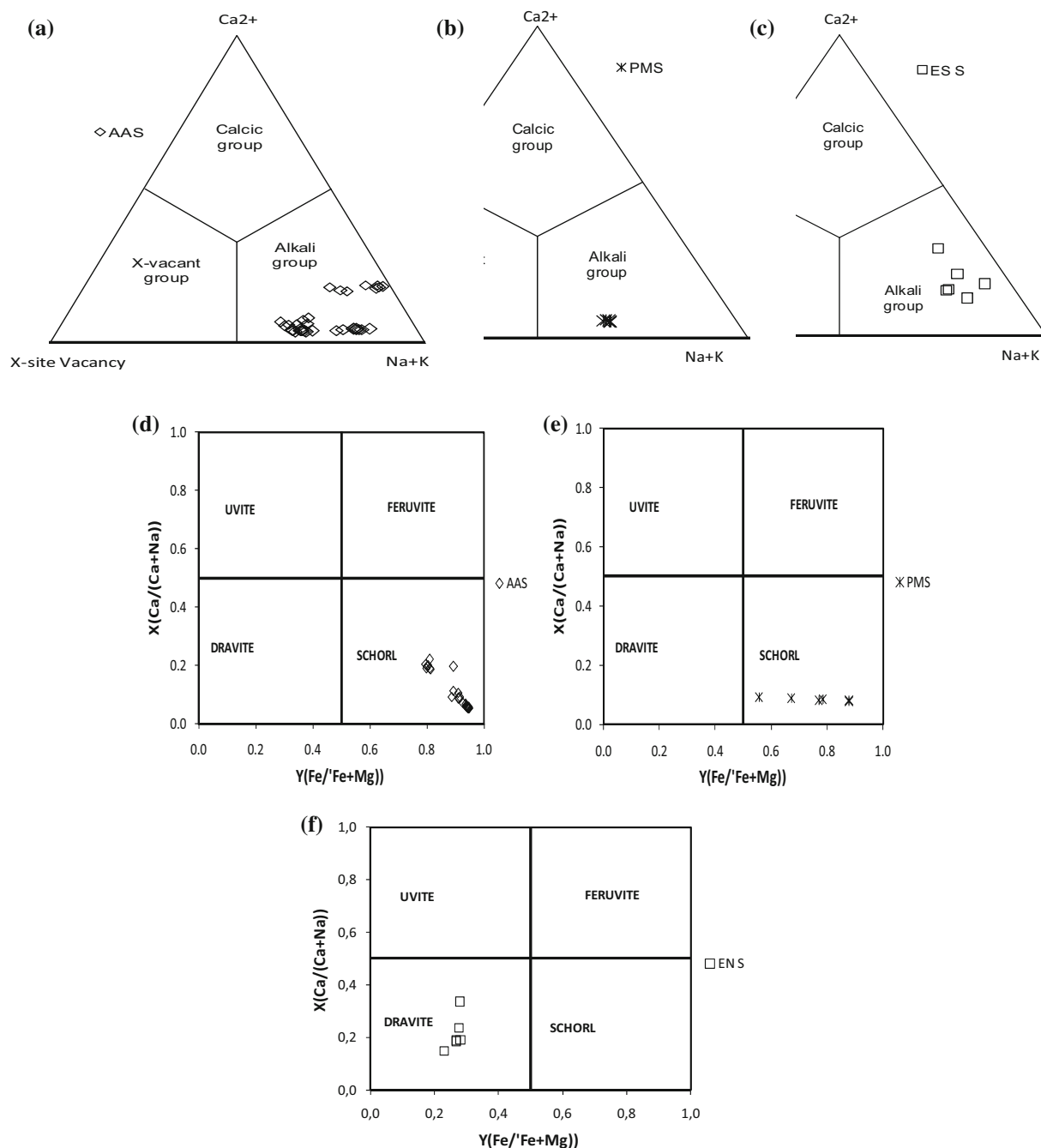


Figure 8. (a–c) Classification of the tourmaline from: (a) Ain Achir beach, (b) Plage-Militaire beach and (c) El Nasr beach in the ternary Ca^{2+} –X-site vacancy–(Na+K) system based on the dominant occupancy at the X-site; (d–f) Plot of tourmaline composition from: (d) Ain Achir beach, (e) Plage-Militaire beach, and (f) El Nasr beach in a X_{Fe}^Y vs. X_{Ca}^X plot (Jiang *et al.* 1995, 1996). AA S: Ain Achir sand, PM S: Plage-Militaire sand, EN S: El Nasr sand.

from the three studied beaches can be divided into three groups with different sources. Tourmalines from the Ain Achir beach are compositionally within field 2 of Li-poor granitoids and their associated pegmatites and partly in field 4 of Ca-poor metapelites, metapsammites and quartz-tourmaline rocks (figure 10a) suggesting a mixed source rock for these tourmalines

(e.g., tourmaline-rich quartzo-feldspathic veins in the garnet–staurolite micaschists and in the garnet micaschists or a single source with two tourmaline types being more or less Fe-rich). All the tourmaline samples from the Plage-Militaire beach plot in the Li-poor granitoids and their associated pegmatites field 2 (figure 10b) indicating a single source (tourmaline-rich

Table 4. Rare earth composition of (a) the sand samples from Ain Achir, Plage-Militaire and El Nasr beaches, (b) the proximal rock outcrops from each studied beach, LS: light sand, DS: dark sand, LS Av. AA: light sand average Ain Achir, DS Av. AA: dark sand average Ain Achir, S Av. REE PM: sand average REE Plage-Militaire, S Av. REE EN: sand average REE El Nasr, (c) WSA: World Shale Average (Piper 1974; Piper and Bau 2013), zircon 91500 (Sano et al. 2002).

(a)	Sand samples	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE
Ain Achir beach (AA)	LS AA1a	10.2	20.4	1.9	9.6	1.9	0.4	2.1	0.4	2.5	0.5	1.6	0.3	1.6	0.2	53.7	44.0	9.6
	AA1b	12.4	27.2	2.6	12.3	2.4	0.5	2.7	0.5	3.6	0.8	2.4	0.4	2.4	0.3	70.5	56.9	13.7
	AA2b	8.8	17.0	1.6	8.3	1.7	0.4	1.7	0.3	1.6	0.3	0.9	0.2	0.9	0.1	43.8	37.4	6.5
	AA4a	21.9	31.2	3.0	14.2	2.9	0.6	3.1	0.6	4.0	0.8	2.6	0.4	2.5	0.4	88.1	73.1	15.0
	AA4b	13.2	26.7	2.7	12.5	2.5	0.5	2.9	0.5	3.9	0.9	2.5	0.5	2.5	0.4	72.1	57.6	14.5
	AA5a	15.2	29.5	2.7	14.3	2.9	0.6	3.0	0.6	3.4	0.7	2.2	0.3	2.1	0.3	78.0	64.6	13.3
	AA5b	12.9	24.6	2.6	11.9	2.5	0.5	2.6	0.5	3.0	0.6	1.9	0.3	1.8	0.3	65.9	54.4	11.5
	AA5c	15.1	29.1	2.8	13.7	3.0	0.6	3.1	0.9	3.8	0.8	2.4	0.3	2.4	0.3	78.2	63.7	14.5
	LS Av. AA	13.7	25.7	2.5	12.1	2.5	0.5	2.6	0.6	3.2	0.7	2.1	0.3	2.0	0.3	68.8	56.5	12.3
	DS	41.1	83.9	9.1	36.4	7.6	1.1	9.2	2.1	15.1	3.4	10.6	1.6	10.3	1.5	232.9	178.0	54.9
DS	AAGa	21.2	40.0	4.1	17.9	3.7	0.6	4.1	0.9	5.6	1.2	3.9	0.6	3.9	0.6	108.3	86.9	21.4
	AA2a	8.5	16.2	1.6	8.1	1.6	0.4	1.7	0.3	1.7	0.4	1.0	0.2	1.0	0.2	42.8	36.0	6.8
	AA2c	10.7	21.2	1.9	9.9	2.0	0.4	2.1	0.4	2.4	0.5	1.5	0.3	1.5	0.2	55.2	45.8	9.4
	AAMa	17.0	33.5	3.3	15.3	3.2	0.6	3.4	0.8	4.3	0.9	2.9	0.5	2.8	0.5	89.1	72.4	16.7
	AAMb	44.0	89.5	9.8	38.6	8.1	1.2	10.1	2.3	17.3	4.0	12.5	2.0	12.1	1.7	253.0	189.9	63.1
	AA3a	27.2	45.8	4.6	20.1	4.1	0.7	4.8	1.0	7.6	1.7	5.3	0.9	5.2	0.7	129.9	101.8	28.1
	AA3b	23.1	48.6	5.2	21.6	4.4	0.7	5.1	1.1	7.6	1.7	5.2	0.8	5.1	0.7	131.0	102.9	28.1
	AA3c	23.8	55.4	5.3	23.4	4.8	0.8	5.5	1.2	8.4	1.9	5.9	1.0	5.8	0.8	143.8	112.6	31.2
	AAGb	18.1	34.5	3.1	15.5	3.3	0.6	3.6	0.8	4.7	1.0	3.3	0.5	3.1	0.5	92.7	74.5	18.2
	DS Av. REE AA	23.5	46.9	4.8	20.7	4.3	0.7	5.0	1.1	7.5	1.7	5.2	0.8	5.1	0.7	127.9	100.1	27.8

Table 4. (Continued.)

(a)	Sand samples		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE
Plage-Militaire beach (PM)	DS	Pms6a	42.0	84.0	9.2	36.5	7.6	1.2	9.5	2.0	16.4	3.7	11.8	1.9	11.6	1.6	239.0	179.4	59.7
		Pms1a	41.1	84.1	9.1	36.5	7.7	1.2	9.8	2.2	17.9	4.1	13.2	2.0	12.8	1.8	243.6	178.4	65.2
		Pms2a	42.9	87.2	9.6	37.8	8.1	1.3	10.9	2.6	21.0	4.9	15.4	2.4	15.0	2.1	260.9	185.6	75.4
		Pms3a	46.0	93.3	10.2	40.3	8.5	1.3	11.1	2.6	21.1	4.9	15.4	2.3	14.6	2.0	273.7	198.4	75.3
		Pms4a	40.9	82.6	8.9	36.0	7.6	1.2	9.7	2.3	18.2	4.2	13.4	2.0	13.0	1.8	241.8	176.0	65.8
		Pms4b	34.6	69.7	7.5	30.6	6.4	1.0	7.8	1.8	13.9	3.2	10.3	1.6	9.9	1.4	199.8	148.9	50.9
		Pms5b	36.3	72.1	8.0	31.6	6.6	1.0	8.2	1.8	14.2	3.3	10.3	1.6	10.0	1.4	206.2	154.5	51.7
		Pms6b	36.8	74.4	8.0	32.8	6.8	1.1	8.6	2.0	15.5	3.6	11.3	1.7	10.9	1.5	215.0	158.9	56.1
		Pms2b	40.3	80.9	8.8	35.3	7.4	1.2	9.5	2.1	16.9	3.9	12.2	1.9	12.0	1.7	234.2	172.7	61.4
		Pms3b	44.3	90.1	9.9	39.4	8.4	1.3	11.0	2.6	21.0	4.9	15.5	2.4	14.9	2.1	267.8	192.1	75.8
		Pms1c	41.7	84.4	9.2	36.5	7.7	1.2	9.9	2.2	17.7	4.1	13.0	2.0	12.7	1.8	244.0	179.5	64.5
		Pms2c	42.4	85.5	9.4	37.4	7.9	1.2	9.8	2.3	17.8	4.1	12.9	2.0	12.4	1.7	246.8	182.6	64.2
		Pms3c	42.2	85.1	9.4	37.0	7.8	1.3	10.4	2.4	19.5	4.5	14.2	2.2	13.9	2.0	251.9	181.5	70.4
		Pms5c	41.0	83.4	9.1	36.1	7.7	1.2	9.9	2.3	18.4	4.3	13.5	2.1	12.9	1.8	243.4	177.2	66.2
		Pms1b	33.0	65.8	7.2	29.1	6.0	0.9	6.9	1.5	11.2	2.6	8.0	1.2	7.8	1.1	182.2	141.0	41.2
		Pms6c	41.1	82.3	9.1	36.1	7.6	1.2	9.8	2.2	17.7	4.0	12.7	2.0	12.3	1.7	239.8	176.2	63.6
		Pms5a	24.1	47.4	5.1	21.2	4.3	0.7	4.9	1.0	7.5	1.7	5.4	0.8	5.3	0.7	130.0	102.0	28.1
		S Av. REE PM	39.4	79.6	8.7	34.7	7.3	1.1	9.3	2.1	16.8	3.9	12.2	1.9	11.9	1.7	230.6	169.7	60.9
El Nasr beach (EN)	DS	EN S 1A	48.8	97.8	11.2	43.1	8.3	1.5	6.9	1.2	6.0	1.2	3.4	0.5	3.4	0.5	233.7	209.2	24.5
		EN S 2A	9.2	16.4	1.6	8.1	1.5	0.5	1.5	0.5	1.4	0.5	0.9	0.5	0.9	0.1	43.6	36.8	6.8
		EN S 3A	10.4	18.5	2.0	9.3	1.8	0.4	1.8	0.3	2.0	0.4	1.3	0.2	1.3	0.2	49.8	42.0	7.8
		EN S 1B	50.7	98.8	11.5	43.6	8.4	1.4	7.2	1.3	7.2	1.5	4.5	0.7	4.5	0.7	241.9	213.0	28.9
		EN S 1C	36.7	72.9	8.5	32.8	6.3	1.1	5.5	1.0	5.0	1.0	2.9	0.5	2.9	0.4	177.6	157.2	20.4
		EN S 2B	31.2	60.4	7.0	28.3	6.0	1.1	8.5	2.1	15.9	3.7	11.8	1.8	11.9	1.7	191.5	132.9	58.5
		EN S 2C	57.9	117.7	13.4	51.8	10.7	1.5	15.2	3.8	29.1	6.7	20.8	3.2	20.4	2.9	355.2	251.6	103.5
		EN S 3C	35.0	68.3	7.9	31.7	7.1	1.4	12.0	3.2	25.6	5.9	19.0	2.9	18.8	2.7	241.6	150.0	91.5
		EN S 3B	34.7	67.5	7.8	31.3	6.9	1.3	11.2	2.9	22.8	5.3	17.0	2.6	16.7	2.4	230.4	148.2	82.2
		S Av. REE EN	35.0	68.7	7.9	31.1	6.3	1.1	7.8	1.8	12.8	2.9	9.1	1.4	9.0	1.3	196.1	149.0	47.1

Table 4. (Continued.)

(b)	Rock Samples	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	Σ LREE	Σ HREE
Ain Achir beach (AA)	VIV1	52.2	103.0	12.1	45.9	9.0	1.9	8.9	1.5	9.4	1.9	5.5	0.8	5.1	0.8	257.9	222.3	35.7
	VIV2	63.8	130.1	14.9	55.2	10.3	1.8	8.0	1.2	7.0	1.4	3.9	0.6	3.7	0.5	302.3	274.3	28.0
	VIV3	44.9	84.9	11.1	42.8	8.6	1.9	8.6	1.4	9.0	1.9	5.6	0.8	5.2	0.8	227.4	192.3	35.1
	VIV4	47.2	95.8	11.2	42.3	8.2	1.6	6.9	1.1	7.0	1.4	4.0	0.6	3.7	0.6	231.8	204.8	27.0
	DvIV	46.0	93.6	10.6	41.5	8.1	1.4	7.1	1.3	6.2	1.2	3.4	0.5	3.4	0.5	224.8	199.8	25.1
	R Av. REE VIV	50.8	101.5	12.0	45.6	8.9	1.7	7.9	1.3	7.7	1.6	4.5	0.6	4.2	0.6	248.9	218.7	30.2
	E60	46.1	82.5	10.7	41.7	8.0	1.2	7.2	1.3	7.1	1.5	4.3	0.7	4.5	0.6	217.3	189.0	28.3
	E62	53.6	95.1	12.1	47.8	9.1	1.5	7.8	0.9	7.0	1.4	3.9	0.6	3.8	0.4	244.8	217.7	27.1
	E74	34.8	61.8	8.1	31.4	6.0	0.6	5.3	0.9	4.5	0.9	2.4	0.4	2.3	0.6	159.9	142.1	17.8
	R Av. REE AA	44.8	79.8	10.3	40.3	7.7	1.1	6.7	1.0	6.2	1.3	3.5	0.6	3.5	0.5	207.3	182.9	24.4
	Av. LS+DS	48.6	93.3	11.4	43.6	8.4	1.5	7.5	1.2	7.1	1.5	4.1	0.6	4.0	0.6	233.3	205.3	28.0
Plage-Militaire beach (PM)	PMR 3N3	40.7	68.4	9.2	35.2	6.5	1.2	5.6	1.1	5.2	1.0	3.0	0.5	3.0	0.5	181.3	160.0	21.2
	PMR 1A	41.0	75.5	9.3	35.6	6.9	1.3	6.3	1.1	6.4	1.3	3.9	0.6	4.2	0.7	194.2	168.3	25.8
	PMR 3C AA3	35.4	67.8	8.1	30.9	6.0	0.9	5.4	1.0	5.0	0.9	2.9	0.5	2.9	0.5	168.1	148.1	20.0
	PMR 3C AA1	24.2	44.5	5.4	20.5	3.9	0.5	3.5	0.7	3.3	0.7	1.9	0.5	2.1	0.3	112.1	98.4	13.6
	PM 3C AA2	12.4	30.8	3.3	13.3	2.8	0.5	2.7	0.5	2.0	0.5	1.2	0.5	1.6	0.3	72.4	62.6	9.8
	PMR 3C AA4	40.3	78.9	9.4	37.3	7.0	0.5	6.0	1.0	5.6	1.2	3.5	0.6	3.5	0.5	195.3	172.9	22.4
	PMR 2N1	44.9	88.2	10.4	40.3	7.9	1.3	7.2	1.4	6.6	1.3	3.8	0.6	3.8	0.6	148.4	130.1	18.3
	PMR 1A	53.1	102.8	12.1	47.1	9.1	1.5	7.7	1.3	6.9	1.4	3.9	0.6	3.9	0.6	139.3	122.4	16.8
	PMR 2N2	48.8	98.5	11.2	43.0	8.4	1.5	7.7	1.4	7.5	1.4	4.1	0.6	3.9	0.6	133.5	117.3	16.2
	PMR 1A SC1	49.1	83.2	10.7	41.7	8.0	1.8	7.0	1.2	6.3	1.2	3.6	0.6	3.5	0.5	137.8	121.0	16.7
	PMR 1A SC2	50.0	86.6	11.0	43.2	8.3	1.9	7.1	1.2	6.4	1.3	3.7	0.6	3.7	0.6	150.8	132.7	18.1
	PM 1A SC3	48.2	94.1	10.8	41.8	7.9	1.4	6.8	1.2	5.9	1.1	3.4	0.6	3.6	0.5	141.9	124.7	17.2
	R Av. REE PM	40.7	76.6	9.2	35.8	6.9	1.2	6.1	1.1	5.6	1.1	3.2	0.6	3.3	0.5	147.9	129.9	18.0
El Nasr beach (EN)	EN R 1A	48.8	97.8	11.2	43.1	8.3	1.5	6.9	1.2	6.0	1.2	3.4	0.5	3.4	0.5	233.7	209.2	24.5
	EN R 1B	50.7	98.8	11.5	43.6	8.4	1.4	7.2	1.3	7.2	1.5	4.5	0.7	4.5	0.7	241.9	213.0	28.9
	SN R 1C	36.7	72.9	8.5	32.8	6.3	1.1	5.5	1.0	5.0	1.0	2.9	0.5	2.9	0.4	177.6	157.2	20.4
	R Av. REE EN	45.4	89.8	10.4	39.9	7.7	1.3	6.5	1.1	6.1	1.2	3.6	0.6	3.6	0.5	217.7	193.1	24.6
(c) WSA		41.0	83.0	10.0	38.0	7.5	1.6	6.4	1.2	5.5	1.3	3.8	0.6	3.5	0.6	204.1	179.5	24.6
Zircon 91500		0.0	2.6	0.0	0.3	0.3	0.2	1.6	0.8	12.0	5.0	29.0	8.0	77.0	17.0	153.8	3.2	150.6

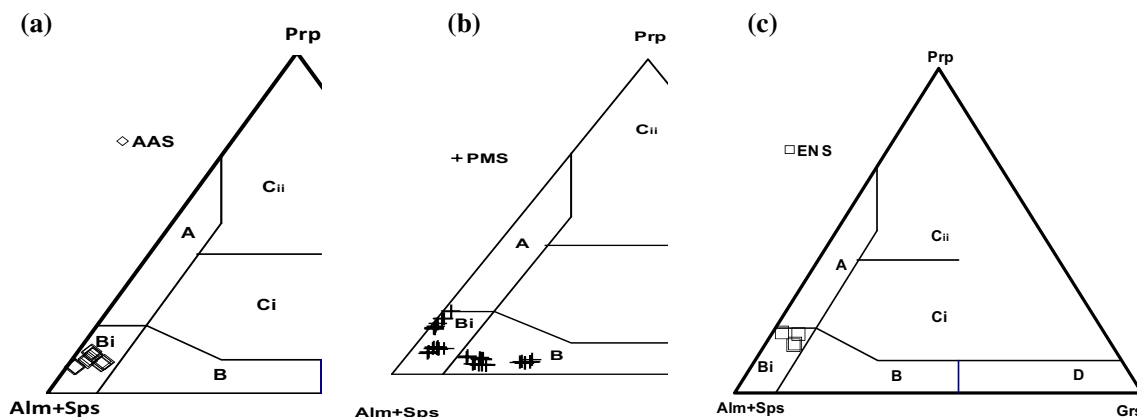


Figure 9. The composition of garnets in the ternary classification diagram of Mange and Morton (2007) with almandine+spessartine, grossular and pyrope as poles: (a) Ain Achir, (b) Plage-Militaire, (c) El Nasr sands. A – high-grade granulite-facies metasedimentary rocks and intermediate felsic igneous rocks; B – amphibolite-facies metasedimentary rocks; Bi – intermediate to felsic igneous rocks; Ci – mainly high-grade mafic rocks; Cii – ultramafics with high Mg (pyroxenites and peridotites); D – metasomatic rocks, very low-grade metamafic rocks and ultrahigh-temperature metamorphosed calc-silicate granulites. AA S: Ain Achir sand, PM S: Plage-Militaire sand, EN S: El Nasr sand.

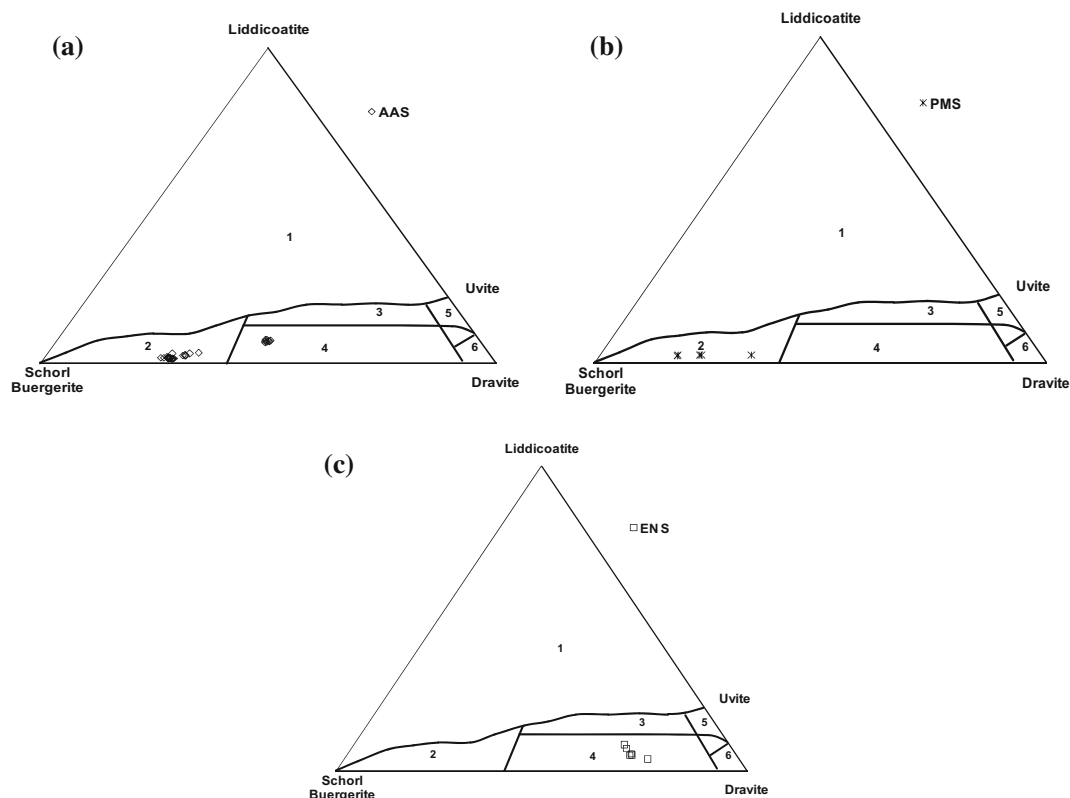


Figure 10. Microprobe analyses of tourmaline samples plotted on Ca-Fe^(t)-Mg diagram of Henry and Guidotti (1985): (a) Ain Achir, (b) Plage-Militaire, (c) El Nasr samples. 1. Li-rich granitoid, pegmatites and aplites; 2. Li-poor granitoids and their associated pegmatites; 3. Ca-rich metapelites and metapsammites and calc-silicate rocks; 4. Ca-poor metapelites, metapsammites and quartz-tourmaline rocks; 5. metacarbonates; 6. metaultramafics. AA S: Ain Achir sand, PM S: Plage-Militaire sand, EN S: El Nasr sand.

quartzo-feldspathic veins, e.g., in the garnet micaschists). In contrast to the two above-mentioned beaches, tourmalines from the El Nasr cluster in field 4 corresponding to Ca-poor

metapelites, metapsammites and quartz-tourmaline rocks (figure 10c). The source rock from the El Nasr tourmaline is different from those from the Ain Achir and Plage-Militaire beaches.

5.3 The rare earth element behaviour of whole sand and rock

In order to identify the provenance, the REE data from the sand samples are compared to data from the rock outcrops located relatively close to the studied sand beaches. All samples (sand and rock) from the studied areas have been normalised to the World Shale Average (WSA; Piper 1974; Piper and Bau 2013).

Many authors (e.g., Jung *et al.* 2006, 2012; Leybourne and Johannesson 2008) show that fractionation factors $LREE_N/HREE_N$ and $MREE_N/HREE_N$ ($LREE_N$: $La_N + Pr_N + Nd_N$; $MREE_N$: $Sm_N + Eu_N + Tb_N$; $HREE_N$: $Ho_N + Yb_N + Lu_N$) are helpful to discriminate among source rocks.

The fractionation factors ($LREE_N/HREE_N$ and $MREE_N/HREE_N$) of the sand samples from each beach have been plotted on the mixing diagram and compared with the rock samples (figure 11). In Ain Achir, light and the dark sand fractionation factors overlap with most of the Plage-Militaire rock outcrops (figure 11a) suggesting that the latter could be their provenance source. The Plage-Militaire sand samples plot close to/or overlap with the adjacent basement rock (Plage-Militaire) and distal (El Nasr) outcrops suggesting mixed sources of the sand (figure 11b). At the El Nasr beach the sand samples plot close to the data from the distal Cap de Garde kyanite–garnet micaschists (R Vivier) and staurolite–garnet micaschists (R Ain Achir), suggesting that these two kinds of rocks (which are probably outcropping at sea, close to the El Nasr beach) could be the source of the sand (figure 11c).

On the normalised to the WSA (Piper 1974; Piper and Bau 2013) spider-gram (figure 12a) all costal rocks display very similar flat REE patterns suggesting that these rocks have similar geological and geochemical backgrounds (figure 12a). Compared to their associated rocks and to those from the Plage-Militaire and El Nasr beaches, some Ain Achir beach sand REE patterns are more depleted. Some others, mostly dark sand samples, have similar depleted LREE and enriched HREE patterns (figure 12b–d) with respect to the rocks, point to the influence of a HEE-rich mineral (e.g., zircon). Zircon is the main mineral in the majority of igneous and metamorphic rocks. It is a host for

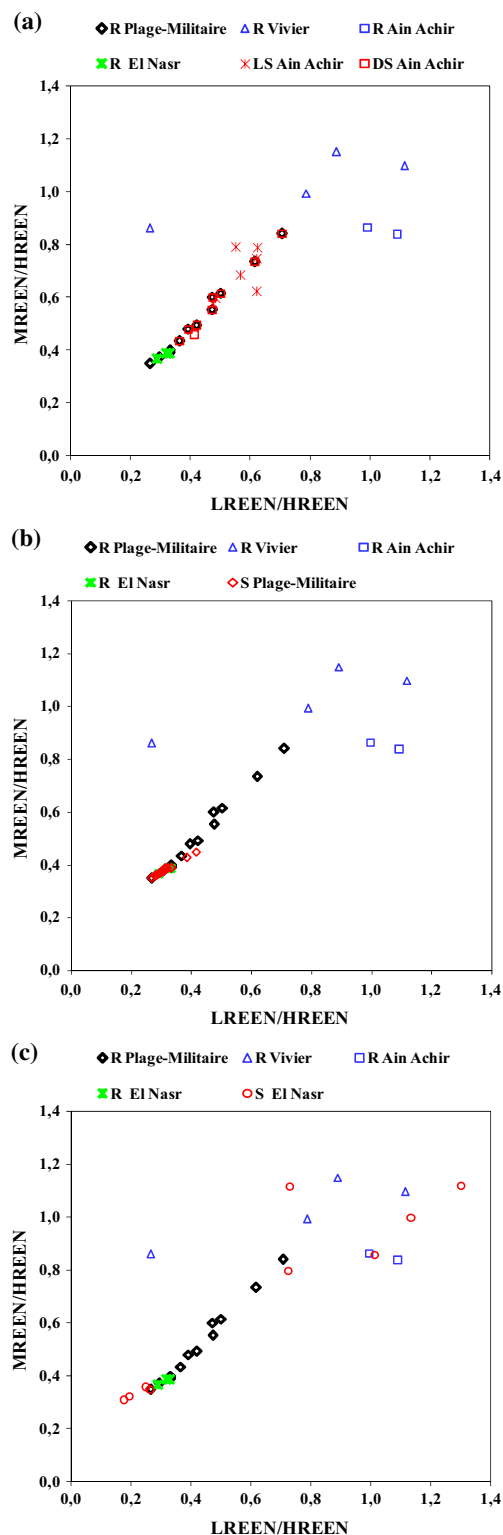


Figure 11. Fractionation factors diagram between $LREE_N/HREE_N$ and $MREE_N/HREE_N$ ($LREE_N$: $La_N + Pr_N + Nd_N$; $MREE_N$: $Sm_N + Eu_N + Tb_N$; $HREE_N$: $Ho_N + Yb_N + Lu_N$) for the sand and all rock samples of (a) Ain Achir beach, (b) Plage-Militaire beach and (c) El Nasr beach. R: rock, LS: light sand, DS: dark sand.

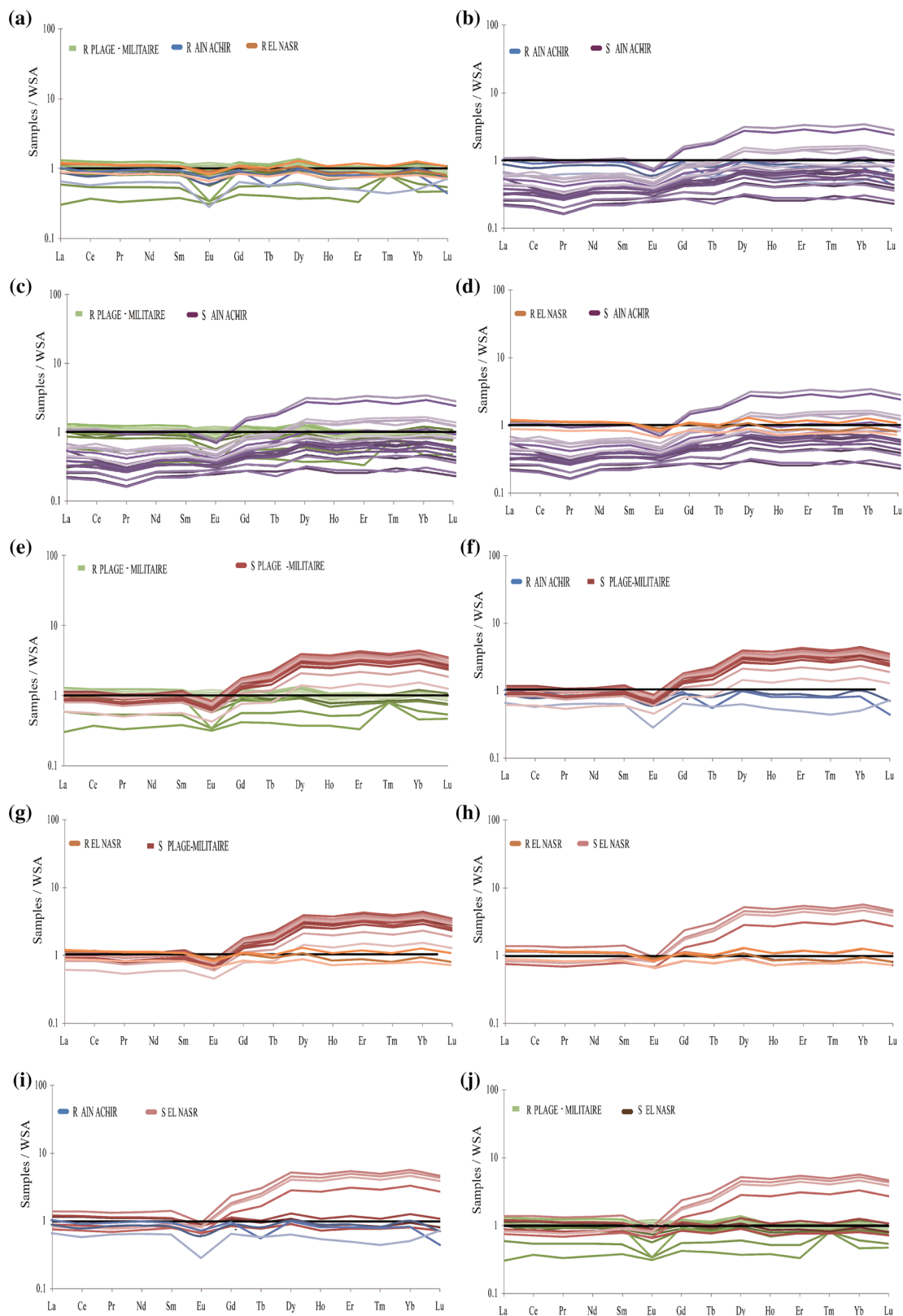


Figure 12. WSA-normalised rare earth element pattern of (a) rock samples from all three beaches, (b) sand and rocks from the Ain Achir beach, (c) Ain Achir sand and rocks from the Plage-Militaire beach, (d) Ain Achir sand and rocks from the El Nasr beach, (e) sand and rocks from the Plage-Militaire beach, (f) Plage-Militaire sand and rocks from the Ain Achir beach, (g) Plage-Militaire sand and rocks from the El Nasr beach, (h) sand and rocks from the El Nasr beach, (i) El Nasr sand and rocks from the Ain Achir beach, and (j) El Nasr sands and rocks from the Plage-Militaire beach.

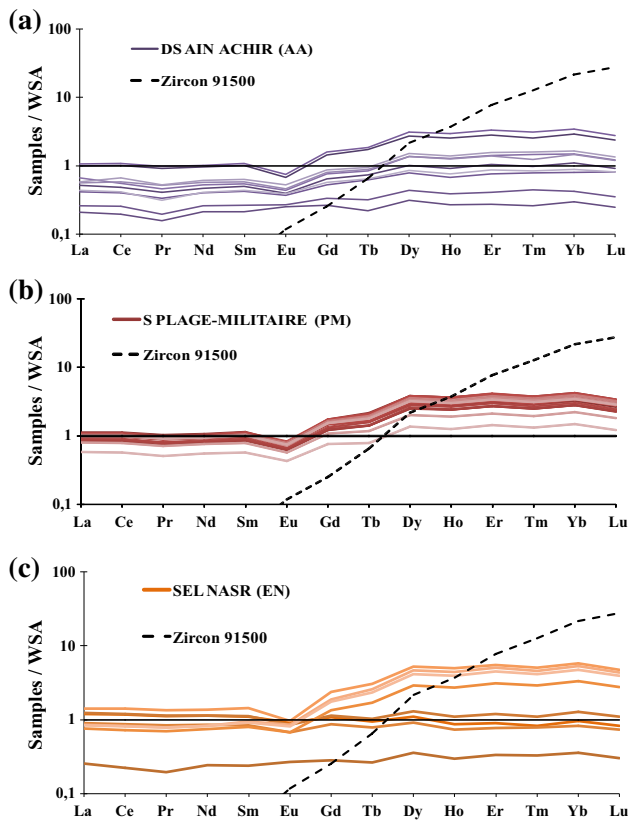


Figure 13. WSA-normalised rare earth element pattern of the standard zircon 91500 (Sano *et al.* 2002) compared with (a) Ain Achir dark sand, (b) Plage-Militaire sand, and (c) El Nasr beach sand.

significant fractions of the whole-rock abundance of the REE (Bea and Montero 1999; O'Hara *et al.* 2001). All Plage-Militaire sand samples display different WSA-normalised (Piper 1974; Piper and Bau 2013) REE patterns with their proximal rock outcrops and with those from the Ain Achir (figure 12e and f) but their REE distribution is quite similar to those from the El Nasr rocks (figure 12g). Therefore, it can be concluded that the Plage-Militaire sand has a mixed source. A portion of the Plage-Militaire sand could be from the proximal rock outcrops, which are mainly staurolite–garnet micaschists and from formations similar to those of the El Nasr beach (garnet–staurolite micaschists). REEs spider graphs of El Nasr sands show differences with respect to their closeby rocks (figure 12h) and also to Ain Achir (figure 12i) and the Plage-Militaire (figure 12j) rocks. They show a flat LREE pattern and are enriched in HREE, suggesting a different metamorphic source with a HREE-rich mineral composition. All WSA-normalised sand samples show negative europium anomalies. Some studies suggest that they are due to

non-selective losses of REE during weathering and that Eu-anomalies are inherited from the sediment source (Nesbitt 1979; Condie 1991; Condie *et al.* 1995; Nesbitt and Young 1996).

Despite that, the Ain Achir, Plage-Militaire and El Nasr sand samples have nearly the same mineralogical compositions; some sand samples show a stronger HREEs enrichment than others. This is indicative of influence by a HEE-rich mineral. XRD analyses of staurolites from these sand samples show that their inclusions are mostly zircon grains. The comparison of WSA-normalised REE (Piper 1974; Piper and Bau 2013) pattern of sand samples from the Ain Achir, Plage-Militaire and El Nasr sands with selected zircon from the literature (Standard 91500, Sano *et al.* 2002) shows similar HREE pattern (figure 13). The possibility of zircon geochemistry influencing the HREEs distribution cannot be excluded.

6. Conclusion

Because of their flat topography and the lack of an active hydrographic system, the Cap de Garde (Ain Achir and Plage-Militaire beaches) and the Harbor (El Nasr beach) fields are characterised by insignificant low continental erosion processes. The seasonal swell and sea wave (1–3 m) are the principal erosion factors and beach sedimentation along the coast. They contribute to the beach and near-shore sand accumulation. The heavy-sand buildup is due to a hydraulic (sea water) segregation process. The mineral assemblages (staurolite, garnet, tourmaline, kyanite and rare epidote) of the three heavy-sand beaches are similar and point to the influence of metamorphic rocks as source areas and reflect the properties of these sources. The compositions of detrital garnet and tourmaline in the heavy-mineral sands vary according to the beach location. The Ain Achir sand is characterised by extreme almandine-rich garnet and schorl-tourmaline. The Plage-Militaire heavy-sand shows two kinds of garnets: Fe-rich almandine and Mg-rich almandine. Their tourmaline is schorl rich in composition. The high Mg concentration in some garnets and tourmaline-rich sand samples from the El Nasr beach reflect a magnesian-rich source.

Compared to their associated rock outcrops, the WSA-normalised REE pattern of the dark sand samples from Ain Achir, Plage-Militaire and El Nasr beaches show similar LREE patterns and enrichment of HREE suggesting the influence of

a HEE-rich mineral (e.g., zircon as inclusions in staurolite). Ain Achir sands reveal a mixed provenance: from their proximal rock outcrops garnet–staurolite micaschist (Ain Achir and Plage Militaire) and rocks similar to garnet–staurolite micaschists at the El Nasr beach outcrops. The Plage-Militaire sand samples display different normalised WSA REE patterns as compared to their proximal rock outcrops and to those from the Ain Achir. But looks quite similar to those from the El Nasr rock formations (garnet–staurolite micaschist). Sand REE distribution curves of the El Nasr show differences when compared to those from the rocks in the vicinity to Ain Achir and to the Plage-Militaire outcrops suggesting a different metamorphic source area with an HREE-rich mineral composition.

The source area of kyanite in the Ain Achir sand could be the proximal staurolite–garnet kyanite micaschists at the Plage-Militaire. The source rocks of the epidote in the sand of Ain Achir and the Plage Militaire are the epidote-bearing skarns.

The present study shows a complex mixture in the of beach sediments, although the sources seem to be very close and easily determinable. The results from the unconsolidated modern beach sand could help to evaluate the sedimentation process and provenance of solidified layers. In provenance studies of fossil beach sediment, the careful study of related outcrops can help to evaluate different sources, proximal as well as distal. A proximal situation is characterised by the similarity of mineral assemblage and proportions in different outcrops. A deviation from this points to distal sedimentation. In addition, the results add important aspects for provenance analyses of fossil heavy-mineral placer deposits, where the source evaluation is an important economic factor.

Acknowledgements

We are very grateful to anonymous reviewers for their helpful comments and suggestions that improved this paper. Moreover, we thank the Institute of Earth and Environmental Science, the University of Potsdam for their support in analytical facilities.

References

- Ahmed-Said Y, Leake B E and Rogers G 1993 The petrology, geochemistry and petrogenesis of the Edough igneous rocks, Annaba, NE Algeria; *J. Afr. Earth Sci.* **17**(1) 111–123.
- ANDI 2013 (Agence Nationale de développement de l'Investissement) Invest in Algeria, Wilaya de Annaba.
- Bea F and Montero P 1999 Behaviour of accessory phases and redistribution of Zr, REE, Y, Th and U during metamorphism and partial melting of metapelites in the lower crust: An example from the Kinzigite Formation of Ivrea-Verbano, NW Italy; *Geochim. Cosmochim. Acta* **63** 1133–1153.
- Blatt H, Tracy R J and Owens E 2006 *Petrology: Igneous, sedimentary and metamorphic*, 3rd edn, W.H. Freeman and Co, New York.
- Brunnel M, Hammor D, Misseri M, Gleizes G and Bouleton J 1988 Cisaillements synmétamorphes avec transport vers le Nord-Ouest dans le massif cristallin de l'Edough (Est Algérien); *C.R. Acad. Sci.* **306** 1039–1045.
- Caby R and Hammor D 1992 Le Massif cristallin de l'Edough (Algérie): Un "Métamorphic Core Complex" d'âge miocène dans les Magrébides; *C.R. Acad. Sci.* **314** 829–835.
- Caby R, Hammor D and Delor C 2001 Metamorphic evolution, partial melting and Miocene exhumation of lower crust in the Edough metamorphic core complex, west Mediterranean orogen, eastern Algeria; *Tectonophysics* **342** 239–273.
- Condie K C 1991 Another look at rare earth elements in shales; *Geochim. Cosmochim. Acta* **55** 2527–2531.
- Condie K C, Dengate J and Cullers R L 1995 Behavior of rare elements in a paleo-weathering profile on granodiorite in the Front Range, Colorado, USA; *Geochim. Cosmochim. Acta* **59** 279–294.
- Darnley A G, Bjorklund A, Bolviken B, Gustavsson N, Koval P V, Plant J A, Steenfel A, Tauchid M and Xie X 1995 A Global geochemical database for environmental and resource management. Recommendations for international geochemical mapping; Final Report of IGCP Project 259, UNESCO Publishing.
- Henry D J and Guidotti C V 1985 Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine; *Am. Miner.* **70** 1–15.
- Henry D J, Novák M, Hawthorne F C, Ertl A, Dutrow B L, Uher P and Pezozotta F 2011 Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals; *Am. Miner.* **96** 895–913.
- Hilly J 1962 Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est-Constantinois); *Pub. Serv. de la Carte Géol. Algérie* **19** 1–408.
- <http://www.temperatureweather.com/mediterr/meteo/fr-meteo-en-algerie-annaba.html>
- http://fr.wisuki.com/statistics/4809/annaba?a-wi=4&wi_m=0&a-wa=0&wa_m=1&temp=monthly&rain=quantity.
- Hufty A 2001 Introduction à la climatologie, Les presses de l'Université de Laval, De Böeck Université, 545.
- Jiang S Y, Palmer M R, Li Y H and Xue C J 1995 Chemical compositions of tourmaline in the Yindongzi–Tongmugou Pb–Zn deposits, Qinling, China: Implications for hydrothermal ore-forming processes; *Miner. Depos.* **30** 225–234.
- Jiang S Y, Palmer M R, McDonald A M, Slack J F and Leitch C H B 1996 Feruvite from the Sullivan Pb–Zn–Ag deposit, British Columbia; *Can. Mineral.* **34** 733–740.

- Jung H S, Lim D I, Yang S Y and Yoo H S 2006 Constraints of REE distribution patterns in core sediments and their provenance, Northern East China; *Econ. Env. Geol. Sea* **39**(1) 39–51 (in Korean with English abstract).
- Jung H S, Lim D, Choi J Y, Yoo H S, Rho K C and Lee H B 2012 Rare earth element compositions of core sediments from the shelf of the South Sea, Korea: Their controls and origins; *Cont. Shelf Res.* **48** 75–86.
- Leybourne M I and Johannesson K H 2008 Rare earth elements (REE) and yttrium in stream waters, stream sediments, and Fe–Mn oxyhydroxides: Fractionation, speciation, and controls over REE + Y patterns in the surface environment; *Geochim. Cosmochim. Acta* **72** 5962–5983.
- Locock A J 2008 An Excel spreadsheet to recast analyses of garnet into end-member components, and a synopsis of the crystal chemistry of natural silicate garnets; *Comput. Geosci.* **34** 1769–1780.
- Mange M A and Maurer H F W 1991 *Schwerminerale in Farbe*; Stuttgart, Enke, 148p.
- Mange M A and Wright D T (eds) 2007 *Heavy minerals in use*; Elsevier, Amsterdam, 1283p.
- Mesurim: <http://acces.ens-lyon.fr/acces/logiciels/applications/mesurim>
- Morton A C and Hallsworth C 1994 Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones; *Sedim. Geol.* **90** 241–256.
- Nesbitt H W 1979 Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite; *Nature* **279** 206–210.
- Nesbitt H W and Young G W 1996 Petrogenesis of sediment in the absence of chemical weathering effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy; *Sedimentology* **43** 341–358.
- O'Hara M J, Fry N and Prichard H M 2001 Minor phases as carriers of trace elements in non-modal crystal-liquid separation processes II: Illustrations and bearing on behaviour of REE, U, Th and the PGE in igneous processes; *J. Petrol.* **42** 1887–1910.
- Oularbi A and Zeghiche A 2009 Sensibilité à l'érosion du massif cristallophyllien de l'Edough (Nord-Est Algérien); *Synthèse* **20** 58–72.
- Piper D Z 1974 Rare earths in the sedimentary cycle: A summary; *Chem. Geol.* **4** 285–304.
- Piper D Z and Bau M 2013 Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: Identifying sources and environmental redox conditions; *Am. J. Analyt. Chem.* **4**(10A) 69–83.
- Sano Y, Terada K and Fukuoka T 2002 High mass resolution ion microprobe analysis of rare earth elements in silicate glass, apatite and zircon: Lack of matrix dependency; *Chem. Geol.* **184** 217–230.
- Whitney D L and Evans B W 2010 Abbreviations for names of rock-forming minerals; *Am. Miner.* **95**(1) 185–187.
- Yavuz F, Yavuz V and Sasmaz A 2006 WinClastour – A visual basic program for tourmaline formula recalculation and classification; *Comput. Geosci.* **32** 1156–1168.

Corresponding editor: PARTHA PRATIM CHAKRABORTY