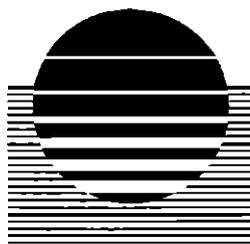


*Expertise géologique des anomalies
radioactives des plages de Camargue :*

- Plage de l'Espiguette (Le Grau-du-Roi) et*
- Les Saintes-Maries-de-la-Mer Ouest*

R. Vazquez Lopez
et P. Jezequel

juillet 2002
BRGM/RP-51754-FR



BRGM

Mots clés : minéraux lourds, radioactivité, plages de Camargue, monazite, crandallite, florencite, plage de l'Espiguette, Grau-du-Roi, Gard.

En bibliographie, cette note sera citée de la façon suivante :

BRGM (2000) – Expertise géologique des anomalies radioactives des plages de Camargue. BRGM/RP-51754-FR, 21 p., 2 ann.

© BRGM, 2002, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

A la demande de la DRIRE et de la DRAS du Languedoc-Roussillon, une expertise géologique de terrain a été réalisée les 6 et 7 avril 2000, par le BRGM.

Les prélèvements effectués, pour caractériser la source des anomalies radioactives, sur la plage de l'Espiguette, au Sud Sud-Est du Phare de l'Espiguette (Le Grau-du-Roi) et celle des Saintes-Maries-de-la-Mer Ouest en Camargue ont fait l'objet de contrôles spécifiques de la radioactivité et d'études minéralogiques détaillées dans les laboratoires du BRGM à Orléans ; les résultats sont annexés à cette note technique.

Au stade actuel des connaissances les principales conclusions sont les suivantes :

- une anomalie radioactive principale supérieure à 500 c/s a bien été circonscrite sur une distance d'environ 1 500 m et sur une largeur de 10 à 50 m ; sa valeur moyenne est comprise entre 600 et 850 c/s avec un maximum de 1 050 c/s,
- l'anomalie, bien soutenue se corrèle bien entre les quatre profils réalisés,
- l'anomalie se situe sur le bourrelet de la plage, au-dessus de la zone intertidale ; dans la zone étroite de la plage vers l'est, elle déborde aussi sur le premier cordon de dunes,
- les études de laboratoire montrent que les minéraux naturels, contenus dans les sables noirs ou dans le tout venant de sable prélevé sur l'anomalie appartiennent à un assemblage cohérent,
- deux minéraux radioactifs naturels sont déterminés : la **crandallite (aluminophosphate de terre rare)** du type **florencite**, riche en thorium et le **zircon**, riche en uranium expliquent qualitativement l'anomalie de terrain,
- des compléments de travaux sont proposés pour la réalisation d'un bilan quantitatif global. Enfin, une analyse bibliographique sommaire montre que la radioactivité des sédiments actuels du Golfe du Lion et des sables de plage de la zone étudiée en particulier a été signalée en 1955 (Rivière, 1955). Son origine naturelle était attribuée à la présence de monazite (observations de M. A. Vatan),
- les principaux résultats de cette expertise ont fait l'objet de deux notes techniques provisoires, présentées et commentées par le BRGM, à la réunion du groupe de travail interdépartemental des DDASS, CIRE, OPRI, IFREMER, coordonnée par la DRASS du Languedoc-Roussillon, qui s'est tenue à la DDASS à Nîmes le 12 avril 2000 entre 10 h et 13 h.

Table des matières

Synthèse	3
1. Justification	9
2. Méthodologie de travail	11
3. Etude de terrain	13
3.2. Morphologie et relevés radiométriques	14
3.3. Echantillonnage	15
3.4. Facteurs de concentration	15
4. Etude de laboratoire	17
5. Conclusion	19
6. Proposition de travaux complémentaires	21
Bibliographie	23
Annexes	24
1. Illustrations	
2 - Etude minéralogique de sable de plage en provenance de l'Espiguette par Pierre JEZEQUEL - ANA/CMI/NT/00/092	

Liste des illustrations

- Fig. 1 - Localisation des zones expertisées.
- Fig. 2 - Plage de l'Espiguette : plan de situation des travaux.
- Fig. 3 - Coupe schématique de la plage de l'Espiguette.
- Fig. 4 - Profil 1 : anomalie d'arrière plage.
- Fig. 5 - Profil 1 : facteurs de concentration.
- Fig. 6 - Concentration éolienne : "Queues de comète".
- Fig. 7 - Profil 1 : arrière dune.
- Fig. 8 - Profil A : dunes et arrière plage.
- Fig. 9 - Profil A : Anomalie 900 c/s ; coupe en profondeur.
- Fig. 10 - Profil A : détail des alternances de niveaux noirs ; pêcheurs de tellines.
- Fig. 11 - Saintes-Maries-De-La-Mer : plage ouest.
- Fig. 12 - Saintes-Maries-De-La-Mer : traces noires plage ouest.

1. Justification

Des mesures de radioactivité effectuées par la CRII-RAD (Commission de Recherche et d'Information Indépendantes sur la Radioactivité), ayant fait l'objet de divers communiqués de presse et de reportage télévisé, annonçant des niveaux anormalement élevés pour les plages de la région, sont à l'origine de cette expertise.

Le flux de rayonnement gamma mesuré dans les zones anormales, compris entre 100 et 850 c/s (chocs par seconde), était considéré comme «totalement atypique pour la région», le niveau naturel attendu étant de l'ordre de 50 c/s. Une liaison de la radioactivité avec un type particulier de sable, comprenant de petits grains noirs, plus foncé et plus lourd formant des marbrures superficielles sur le sable plus clair, était évoquée.

Pour expliquer l'origine des radionucléides naturels (U238 et Th232) deux hypothèses ont été envisagées : d'une part, un phénomène naturel d'accumulation lié aux particularités physico-chimiques des éléments présents et du milieu marin ; d'autre part une pollution liée à des activités humaines : rejets d'une usine travaillant sur des minerais riches en terres rares et produits radioactifs, bateau minéralier échoué...

Sur la base des premiers résultats, la CRII-RAD privilégie la première hypothèse en absence de l'identification de la source de la radioactivité mesurée sur le terrain qui restait inexplicée, au moment de la rédaction de ce rapport.

2. Méthodologie de travail

- Recueil des informations géologiques de base et mise au point d'un programme d'étude par les laboratoires du BRGM à Orléans.
- Réunion de concertation avec le directeur du SGR Languedoc-Roussillon.
- Reconnaissance géologique et délimitation des zones anormales au scintillomètre (type SPP2 Saphymo-Strat France).
- Observations sur les processus de concentration naturels et anthropiques.
- Echantillonnage de surface et en profondeur.
- Etudes de laboratoire.
- Rédaction des différents rapports.

3. Etude de terrain

- Plage de l'Espiguette

3.1. RECONNAISSANCE MORPHO-GEOLOGIQUE

La plage de l'Espiguette correspond à un vaste cordon dunaire (de type Barkhanes sahariennes) dont le système actuel occupe une surface en forme de quart de croissant. Son extension, comprise entre la flèche artificielle de l'Espiguette (Port Camargue) et le bras vif du Rhône-Canal de Peccais est de 11 km pour une largeur diminuant vers le SE, comprise entre 750 m au nord et à peine 50 m vers son extrémité SE.

Dans ce secteur le processus de progradation (engraissement) de la côte en direction de l'WNW a été de 5,5 m par an de 1869 à 1993. La sédimentation fluvio-marine et l'engraissement par progression et poussée du sable dunaire sont donc très actifs.

Une partie importante du cordon dunaire a été depuis le XVIII^e siècle étalée, aplanie ou remblayée mais la zone littorale est encore en constante évolution bien que partiellement fixée par un maillage de rondins de bois avec du grillage métallique, par le couvert végétal et le reboisement partiel du nord.

Notre zone d'étude a été concentrée essentiellement vers le SSE du phare de l'Espiguette où l'anomalie radioactive a été signalée par la CRII-RAD. Quatre coupes ont été effectuées avec un relevé radiométrique détaillé accompagné d'échantillonnage sur les profils extrêmes 1 et 4 (fig. 2).

Les terrains étudiés appartiennent aux dépôts holocènes classés suivant leur milieu de sédimentation dans les domaines littoral et lagunaire (Carte géologique à 1/50 000 Le Grau-du-Roi, L'Homer et al. 1993).

3.2. MORPHOLOGIE ET RELEVES RADIOMETRIQUES

Les unités morphologiques et faciologiques suivantes (coupe schématique fig. 3), présentant des réponses radiométriques différentes, ont été distinguées de l'est (arrière pays) vers l'ouest (mer) :

Unités Morphologiques et Faciologiques			
	Mesures radiométriques Chocs par seconde		
	Amplitude	Maximum	Plages anormales
Etangs	30 à 150	160	> 150
Arrière dune aplanie avec encroûtements salins	40 à 70	80	
Première ligne de dunes en grande partie fixée	80 à 100	110	
Étang ou sansouïre (type Sebkha)	60 à 500	650	> 500
Deuxième cordon de dunes			
Arrière plage partiellement recouverte par des encroûtements salins	120 à 350	650	> 150 > 500
Bourrelet de plage	550 à 850	1050	> 500
Zone de plage vive intertidale	75 à 200	210	

Sur l'ensemble des profils on note une radioactivité en général croissante vers la mer jusqu'aux plus fortes anomalies situées sur le bourrelet de plage ; pour le profil «1», l'anomalie > 500 c/s commence dès le premier cordon de dunes.

En général la radioactivité diminue rapidement vers la zone de plage vive intertidale.

Les zones les plus radioactives correspondent sur le terrain aux plus fortes concentrations en minéraux lourds noirs qui se présentent sous forme de traînées et aux sables les plus sombres.

A l'intérieur de la zone anormale le fond de l'anomalie se maintient sans « pointes » ni variations rapides ; on en sort des limites anormales progressivement mais de manière franche.

Des mesures effectuées en profondeur à 70 cm du sol, sur la zone anormale du profil «4» ont les mêmes valeurs que celles de la surface.

D'après A. L'Homer (1993) la puissance des dépôts holocènes est comprise entre 30 et 50 m.

3.3. ECHANTILLONNAGE

Trois types d'échantillons ont été prélevés dans des tubes de 150 à 300 g et dans des sacs de 4,5 kg.

Zone d'anomalies :

- traînées et concentration noires superficielles : ESP1C, ESP2C, ESP4C,
- tout venant de sables à alternances noires et jaunes prélevés sur 70 cm de profondeur : ESP5C,
- tout venant de sable en surface : ESP1S.

Zones non anormales, pour servir de référentiel aux zones d'anomalies :

- traînées ou niveaux noirs superficiels : ESP3C,
- tout venant de sable : ESP2S.

3.4. FACTEURS DE CONCENTRATION

Les trois agents de concentration naturelle des minéraux lourds, bien visibles sur le terrain, par les traînées de minéraux lourds noirs sont :

- une concentration éolienne, bien exprimée par les ripple-marks des dunes et par les empreintes «queue de comète» (fig. 6) autour des coquillages ou fragments de roche sur la surface de la plage,
- une concentration marine, bien exprimée par des flute-marks dans les zones inondables de l'arrière plage,
- une concentration saline avec formation d'encroûtements salés piégeant les minéraux lourds en surface (fig. 4),
- une sédimentation très active de type fluvio-delta (fig. 5),

Un phénomène anthropique important à signaler sont les installations portuaires touristiques de Port Camargue, qui ont sans doute modifié l'équilibre et l'évolution naturelle du système dunaire.

On peut aussi signaler des phénomènes anthropiques de moindre importance mais pouvant avoir des répercussions sur les agents naturels :

- le roulage des véhicules le long des zones aplanies, des sansouïres et sur la plage qui ajoute un facteur de tassement-enfoncement,
- l'activité de pêche des tellines qui brasse le sable côtier le long du rivage, remettant les minéraux lourds et le sable dans le circuit du tri naturel (fig.10).

- Plage de Saintes-Maries-de-la-Mer Ouest

La plage située à l'ouest des Saintes-Maries-de-la-Mer, comprise entre l'embouchure du Petit Rhône à l'ouest et la jetée du port à l'est, s'étend sur 1 250 m et sur une largeur réduite de 100 m.

Constituée par des sables de bourrelet de plage avec la partie vivante fixée partiellement par des rondins grillagés.

La radioactivité mesurée sur la plage et le petit bourrelet est très faible atteignant la limite des 150 c/s et des maximums à 200 c/s (fig. 11).

4. Etude de laboratoire

Les études de laboratoire effectuées au BRGM à Orléans sur 8 échantillons de sable ont fait l'objet d'une note technique référencée ANA/CMI/NT/00/92 jointe en annexe 2.

La radioactivité constatée à l'arrivée des échantillons au laboratoire se situe entre 40 et 80 c/s. Les échantillons ESP1S, ESP4C et ESP5C se caractérisent par un niveau de radioactivité très légèrement supérieur aux 5 autres. La radioactivité est étroitement liée au poids global des échantillons. Un échantillon de sable de 28 Kg apporté au laboratoire le 14 avril et prélevé sur la zone anormale présente un niveau de radioactivité mesuré au contact direct du sable par SPP2 de 450 à 500 c/s, l'effet de masse est donc probant.

La démarche analytique correspond à une démarche standard pour une étude de sable. Elle consiste après un séchage à 40°C à l'étuve, en une séparation densimétrique à 2,89, puis une séparation magnétique de la fraction lourde à 2,89. Chaque fraction obtenue est ensuite étudiée par optique après pesée et contrôle granulométrique (granulométrie du sable comprise entre 100 et 500 µm).

Le bilan poids après fractionnement permet déjà une constatation : la quantité de minéraux lourds dans les échantillons étudiés varie du simple au double d'un échantillon à l'autre, comme le montre le tableau suivant :

n° échantillon	ESP1C	ESP2C	ESP3C	ESP4C	ESP5C	ESP1S	ESP2S	SMM1C
Poids brut	182 g	122 g	133 g	101 g	99 g	108 g	94 g	80 g
% de minéraux > 2,89	66 %	25 %	11 %	93 %	77 %	77 %	40 %	40 %
nb de c/s (SPP2 - labo)	50 c/s	50 c/s	50 c/s	70 c/s	70 c/s	70 c/s	50 c/s	50 c/s

Ce tableau permet de constater qu'il existe une corrélation entre l'anomalie radioactive et le pourcentage des lourds. En effet sur les zones anormales, le pourcentage de lourds dans le sable est supérieur à 66 % (à l'exception de l'ESP2C). Ainsi ESP2S, ESP3C et SMM1C situés hors zone d'anomalie présentent un pourcentage de lourds < 40 %.

L'étude réalisée par optique (loupe binoculaire aux grossissements 12X à 50X) permet d'identifier une trentaine d'espèces minérales naturelles à morphologie roulée avec magnétite, amphibole, pyroxène, tourmaline, leucoxène, staurotide, grenat, épidote, ilménite, micas, zircon, rutile, carbonates, spinelle chromifère, hydroxyde de fer, sillimanite, disthène, anatase, sphène, apatite et crandallite. Cette crandallite est présente dans les échantillons ESP1S, ESP5C, ESP1C et ESP4C qui correspondent aux échantillons les plus riches en minéraux lourds. Un contrôle de ces minéraux par spectrométrie d'émission X permet de confirmer qu'il s'agit bien d'aluminophosphate de Terres Rares de la famille Florencite dans laquelle la proportion de thorium contenue peut aller jusqu'à 6 % (substitutions Th, Ce, La, Nd). Cette florencite n'est pas différenciable de la monazite par optique.

Cette étude met donc en évidence l'existence de deux espèces minérales naturelles radioactives : la florencite et le zircon. Le zircon est présent dans la plupart des sables et la florencite provient de la transformation par altération de monazite. C'est un minéral naturel stable dont la source (minéral de socle) reste à déterminer.

La présence de ces minéraux dans les sables radioactifs permet d'expliquer le niveau de radioactivité constaté, au laboratoire. Reste à démontrer l'origine primaire de ces minéraux par traçage isotopique des cristaux de florencite.

5. Conclusion

Une anomalie radioactive a bien été identifiée sur la plage de l'Espiguette par l'expertise géologique réalisée. Homogène, avec des niveaux compris entre 600 et 850 c/s, et bien corrélée sur quatre profils couvrant 1 500 m elle est localisée dans un site morphogéologique favorable à la concentration de minéraux lourds noirs dont certains sont des sources de radioactivité.

Son intensité fait partie des zones de faible anomalie en suivant des critères géologiques de prospection pour la recherche de gisements de minéraux lourds.

Cette anomalie peut être expliquée par la présence de minéraux radioactifs naturels répartis en faible proportion mais de manière assez homogène dans la masse du sable du bourrelet littoral et de la dune du deuxième cordon sur le profil «1» le plus au sud est.

Des vents violents alternant du secteur NNW et SE et SSE, les apports importants de sédiments, l'action de concentration fluvio-marine et les tempêtes sont des facteurs qui expliquent bien les concentrations en minéraux lourds : les observations effectuées dans un trou de 70 cm de profondeur montrent une alternance de ces niveaux noirs-rosés avec le sable de plage jaune enrichi en carbonates (fig. 10).

Des phénomènes anthropiques pourraient augmenter la concentration naturelle.

La différence d'intensité de rayonnement gamma entre les mesures de terrain et celles effectuées sur les échantillons provenant de la zone anormale peuvent être expliquées naturellement par l'effet de masse de l'anomalie de terrain par rapport au volume réduit des échantillons : une augmentation de la radioactivité est signalée entre les échantillons de 300 g et 4,5 kg passant de inférieure à 50 c/s à plus de 50 chocs par seconde et enfin à 500 c/s sur un échantillon de sable de 28 kg.

L'association minérale naturelle déterminée au laboratoire sur les échantillons prélevés est caractéristique de l'érosion d'une chaîne de montagnes ; le Massif Central devrait pour une très grande partie être à l'origine des minéraux contenus dans les sables de l'Espiguette.

La source principale du rayonnement gamma de l'anomalie est représentée par la florencite riche en thorium, qui présente le même type d'arrondi et de granulométrie que les autres minéraux.

6. Proposition de travaux complémentaires

Des compléments de travaux sont proposés pour expliquer la totalité de l'anomalie radioactive (U238).

- Traçage isotopique des cristaux de florencite pour préciser les zones d'origine primaire.
- Cartographie sélective des différents rayonnements radioactifs avec un spectromètre sur toute la superficie de la plage de l'Espiguette pour circonscrire de manière précise les différentes anomalies.
- Investigation en profondeur sur les 5 à 20 premiers mètres, à la tarière ou par petits sondages suivant un profil perpendiculaire à la plage avec diagraphie spectrale, pour contrôler l'évolution verticale et latérale de la concentration en minéraux lourds radioactifs.

D'autres concentrations en minéraux lourds radioactifs de ce type existent en France (Golfe du Lion, Bretagne, Sables de Loire...), la méthodologie utilisée dans cette étude pourrait être à nouveau employée.

Ingénieurs du BRGM ayant contribué à cette étude :

J.C. Baubron, D. Bonijoly, J.L. Boulmier, J. Chantraine, J.L. Foucher,
M. Laval, J.P. Marchal, Y. Le Nindre, J.C. Michel, J.C. Prévot, F. Vaillant,

Bibliographie

- CHAURIS L (1995) - Radioactivité des sables dans le district à monazite de Plouguerneau (Massif Armoricaïn). Bulletin de la Société Linéenne de Normandie - Vol 116, pp. 1-6.
- L'HOMER A., ALOÏSI J.C., BAZILE F., CALINE B., MONACO A., MOUCHET J.P. (1993). - Carte géol. France (1/50 000), feuille Le Grau-du-Roi (1017). Orléans : BRGM. Notice explicative par A. L'Homer, avec la collaboration de J.C. Aloïsi, F. Bazile, J.P. Marchal (1993), 93 p.
- L'HOMER A., avec la collaboration de ALOÏSI J.C., BAZILE F., MARCHAL J.P. (1993) - Notice explicative, carte géol. France (1/50 000), feuille le Grau-du-Roi (1017). Orléans : BRGM, 93 p. Carte géologique par A. L'Homer, J.C. Aloïsi, F. Bazile, B. Caline, A. Monaco, J.P. Mouchet (1993).
- RIVIERE A. (1955) - Sur la radioactivité de sédiments actuels et récents de la côte méditerranéenne. Etude particulière du Golfe du Lion. Interprétation sédimentologique. Bulletin de la Société Géologique de France. n° 5, pp. 495 - 506.

Annexes

ANNEXE 1

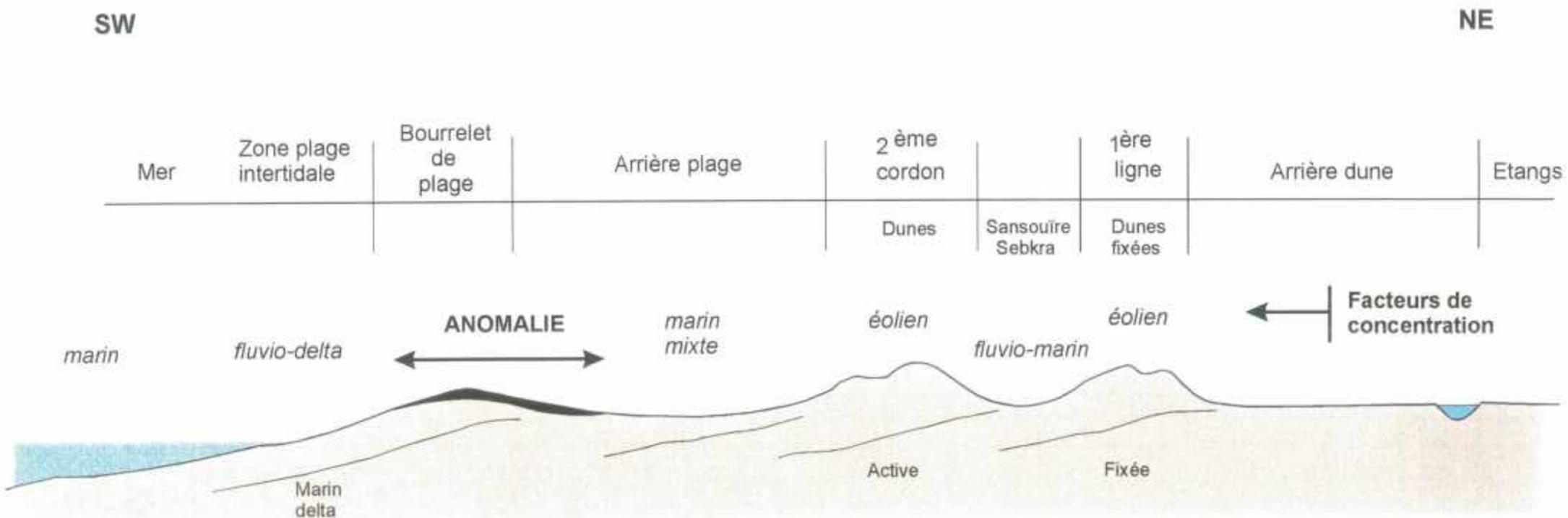
Illustrations

Figure 1



Localisation des zones expertisées.

Figure 3



Coupe schématique de la plage de l'Espiguette

Figure 4



Profil 1 - Anomalie d'arrière plage. Encroûtements salins sur "flute-marks" + vent

Figure 5



Profil 1 - Concentration mixte : éolienne + marine.



Profil 1 - Concentration éolienne.

Figure 6

Vent dominant
NNW "mistral"



Concentration éolienne : Traces "queue de comète" recoupées par traces de roues.

Figure 7



*Profil 1 - Arrière dune aplanie.
Parking*



┆ Dépôts noirs

Profil 1 - Arrière dune-étang - 100 c/s

Figure 8



Profil 4 - Premier cordon, bordure de sebkra.



Profil 4 - Fin du deuxième cordon : arrière plage.

Figure 9



Profil 4 - Bourrelet de plage, anomalie 900 c/s



Profil 4 - Investigation en profondeur sur anomalie principale.

Figure 10



Profil 4 - Alternances de niveaux noirs lourds radioactifs.



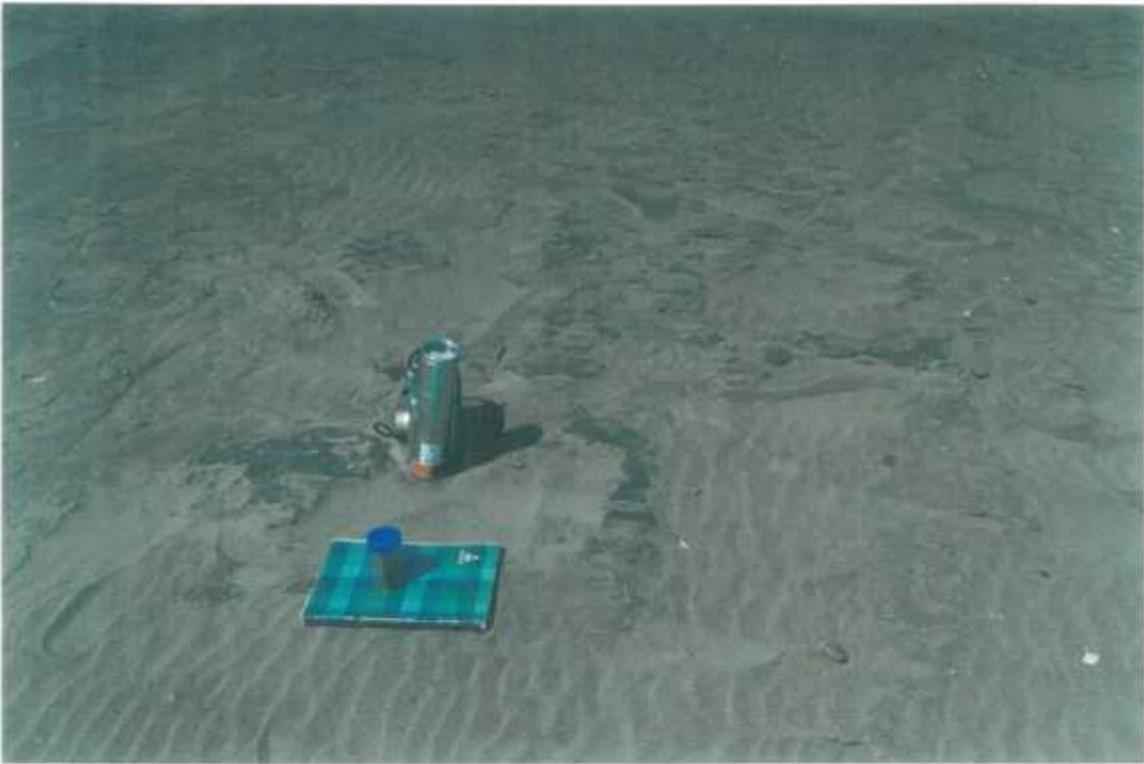
Pêcheurs de tellines sur la plage de l'Espiguette.

Figure 11



Plage Ouest.

Figure 12



Plage Ouest - Trainées noires à faible radioactivité.



Petite plage est.

ANNEXE 2

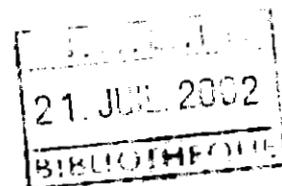
**Etude minéralogique de sable de plage
en provenance de l'Espiguette par P. Jézéquel**

ANA/CMI/NT/00/092

PROVENANCE

*Etude minéralogique de sable de plage
en provenance de l'Espiguette*

Pierre JEZEQUEL



ANA/CMI/NT/00/092



BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE



Orléans, le 11 avril 2000

Demandeur : **Rafael VAZQUEZ - LOPEZ**
REM/ECMA

SERVICE ANALYSE et CARACTERISATION MINERALE

Unité : *Caractérisation minérale*

N° note : ANA/CMI/NT/00/092/pj/vp

Date de réception des échantillons : 3 échs le 7/04/2000 – 5 échs le 10/04/2000

Date des résultats : 11/04/2000

Nombre d'échantillons étudiés : 8

Vos références : v/commande du 7/04/00 devis ANA/CMI/00/076 du 5/04/2000

Etude minéralogique de sable de plage en provenance de l'Espiguette

Auteur : P.Jézéquel

13 pages

2 Tableaux

2 spectres

0 image

Documents associés :

Résumé : Présence dans la fraction lourde des échantillons étudiés d'un aluminophosphate de Terres Rares à thorium du groupe des crandallites.

Mots clés : Caractérisation - Diagnose - Minéraux en grains - Expertise minéralogique

Intérêt documentaire oui
non

Diffusion :
Libre
BRGM
Restreinte
Confidentielle

VISAS : Auteur : P.Jézéquel

OBSERVATIONS : Sauf accord préalable, le présent rapport ne peut être reproduit que dans son intégralité. Les résultats exprimés ne concernent que les échantillons soumis à essais. Sauf demande expresse du donneur d'ordre, les échantillons sont conservés après l'envoi du rapport pendant une durée de 5 ans. Ils sont détruits passé ce délai.

I – ETUDE DES TROIS PREMIERS ECHANTILLONS LIVRES LE 7 AVRIL 2000

1.1. Liste des échantillons étudiés

- ESP1C
- ESP2C
- ESP3C

1.2. Prélèvements prioritaires des traînées noires en surface sur des zones non radioactives et à radioactivité anormale

Les trois échantillons reçus le 7 avril au matin concernent :

- deux prélèvements référencés 1 et 2 sur des traînées ou marbrures noires sur des zones présentant une anomalie de radioactivité en mesure globale depuis la surface par un appareil SPP2 ; prélèvements superficiels sur une épaisseur de quelques centimètres ;

- un prélèvement référencé 3 sur des traînées ou marbrures noires sur une zone ne présentant pas d'anomalie de radioactivité en mesure globale depuis la surface par un appareil SPP2 ; prélèvements superficiels sur une épaisseur de quelques centimètres.

Les contrôles de radioactivité effectués à réception des échantillons au laboratoire ne montrent pas de différence entre eux : pour les trois échantillons, le niveau mesuré par un appareil SPP2 est inférieur à 50 c/seconde. Ces résultats sur des faibles masses ne sont pas nécessairement en contradiction avec les relevés de radioactivité sur le terrain.

La priorité a été donnée à l'analyse des traînées noires en surface sur les zones exprimant une radioactivité notable. En effet, en première hypothèse, l'origine de la radioactivité pourrait se trouver sous forme concentrée dans les expressions superficielles sombres.

La confrontation de la radioactivité globale mesurée sur site pour les points de prélèvements 1 et 2 et les constats en laboratoire doit être interprétée avec prudence, compte-tenu de l'effet de masse pour les mesures sur site. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées :

- les traînées noires superficielles ne seraient qu'un indicateur visuel de sources de radioactivité non contenues dans la couche superficielle du sable ;
- les traînées noires en surface ne seraient pas la couche principale ou unique responsable de la radioactivité ;
- la radioactivité proviendrait de concentrations ponctuelles qui restent à localiser ;
- des traînées noires superficielles actuelles pourraient être radioactives ou non malgré des aspects visuels semblables.

En conséquence, des prélèvements supplémentaires sont effectués dès le 7 avril, portant sur des quantités plus importantes de sable et à différentes profondeurs pour tenter d'identifier précisément les couches responsables de la radioactivité et les particularités minéralogiques éventuelles à l'origine de celle-ci.

1.3. Analyses au laboratoire des prélèvements du 6 avril 2000

Les analyses sur les prélèvements superficiels sont engagées d'une part, pour comparer les sables 1 et 2 sur des zones radioactives et le sable 3 sur une zone non radioactive, d'autre part, pour rechercher d'éventuels porteurs minéralogiques potentiellement explicatifs de la radioactivité et susceptibles d'être rencontrés sous une concentration plus importante dans d'autres couches du sable ou d'autres localisations sur les plages.

1.3.1. Préparation des échantillons

- séchage à l'étuve à 40°C
- ◆ séparation densimétrique à 2,89
- ◆ pesée des fractions
- ◆ séparation magnétique au barreau aimanté

1.3.2. Procédures analytiques

Les échantillons sont examinés sous loupe binoculaire. L'identification des espèces minérales est complétée par une évaluation semi-quantitative des différents minéraux.

1.3.3. Recherche et identification de minéraux lourds et de minéraux potentiellement radioactifs

- Bilan poids :

n° échantillon		pds brut sec	> 2,89	< 2,89
ESP1C	g	182,03	120,22	61,81
	%	100,00	66,04	33,96
ESP2C	g	122,00	31,08	90,92
	%	100,00	25,48	74,52
ESP3C	g	132,66	14,86	117,80
	%	100,00	11,20	88,80

- Observation par optique

ESP1C : lourds

magnétite : F
grenat : A
biotite : T
tourmaline : P
pyroxène : P
épidote : A
monazite (ou crandallite) : T
rutile : F
leucoxène : F
amphibole : R
staurotide : T
hydroxydes de fer : T
zircon : T
ilménite : F
apatite : T
sphène : T
spinelle : T
chlorite : T
disthène : T
carbonates : F

Légers : <2,89

carbonates : P
feldspath : F
quartz : A
muscovite : T
(sel hydraté) : trace

ESP3C

Lourds : > 2,89

magnétite : F
biotite : R
tourmaline : P
grenat : R
épidote : P
chlorite : F
hydroxydes de fer : F
amphibole : R
apatite : T
pyroxène : M
staurotide : T
matières organiques : T

ESP2C : lourds

magnétite : F
grenat : F
monazite (ou crandallite) : T
pyroxène : P
épidote : A
disthène : T
carbonates : F
rutile : T
leucoxène : T
tourmaline : F
biotite : T
amphibole : R
hydroxydes de fer : T
staurotide : T
ilménite : R
chlorite : R

Légers <2,89

carbonates : M
feldspath : F
quartz : A
muscovite : T
chlorite : T
glauconie : T

Légers <2,89

carbonates (calcite + ankérite) : M
feldspath : F
quartz : TA

Légende proportion décroissante :

TA = très abondant

A = abondant

M = moyen

P = présent

F = faible

R = rare

T = traces

1.4. Interprétation des résultats

La morphologie des grains est comparable dans les trois échantillons et correspond à la morphologie de grains transportés par voie hydraulique (grains roulés).

Aucune concentration anormale de minéraux susceptibles d'une émission radioactive n'est décelée dans ces trois échantillons.

Le cortège minéral observé dans les 3 échantillons est pratiquement le même. L'échantillon ESP1C est plus riche en minéraux denses que les deux autres.

On notera simplement la présence de quelques grains de monazite (ou crandallite) et de zircon dans le ESP1C.

II – ETUDE DES CINQ ECHANTILLONS LIVRES LE 10/04/2000

2.1. Liste des échantillons

- ESP1S
- ESP2S
- ESP4C
- ESP5C
- SMM1C

2.2. Contrôle de la radioactivité à l'arrivée des échantillons *

60 < ESP1S < 70 c/s sur 4,5 Kg de sable humide
ESP2S = 50 c/s sur 4,5 Kg de sable humide
60 < ESP4C < 70 c/s au contact du tube
60 < ESP5C < 70 c/s au contact du tube
SMM1C = 50 c/s au contact du tube

Contrôle effectué à l'aide d'un SPP2 étalonné.

2.3. Protocole de traitement

ESP1S, ESP2S :

- ◆ Pesée humide
- ◆ Quartage
- ◆ Concentration des lourds au pan américain de 8 L
- ◆ Séchage, Pesée
- ◆ Vérification de l'évolution de la radioactivité

ESP4C, ESP5C, SMM1C :

- ◆ Séchage, Pesée
- ◆ Vérification de l'évolution de la radioactivité

* Il s'agit des comptages sur les prises d'échantillons de faible masse pour le laboratoire. Ces comptages ne peuvent pas être directement transposables au niveau de réactivité mesuré sur site.

Sur les 5 échantillons :

- ◆ Séparation densimétrique au bromoforme (2,89)
- ◆ Séchage
- ◆ Séparation des lourds à 2,89 au barreau aimanté
- ◆ Séparation électromagnétique au Frantz isodynamique en 3 fractions (ESP1S, ESP2S)
- ◆ Pesée de chaque fraction
- ◆ Observation sou binoculaire de chaque fraction
- ◆ Contrôle MEB + EDS

2.4. Tableau des poids

n° échantillon	pds brut	> 2,89						< 2,89
		total	FM	NFM				
				0,5A	2A	NA		
ESP1S	g	108,27	83,28	2,38	66,62	12,17	2,11	24,99
	%	100,00	76,92					23,08
ESP2S	g	94,41	37,61	0,53	26,26	10,04	0,78	56,80
	%	100,00	39,84					60,16
ESP4C	g	101,76	94,70	4,40	90,30			7,06
	%	100,00	93,06					6,94
ESP5C	g	98,80	76,08	2,68	73,40			22,72
	%	100,00	77,00					23,00
SMM1C	g	79,99	32,29	1,47	30,82			47,70
	%	100,00	40,37					59,63

2.5. Contrôle de la radioactivité

ESP1S : sur le sable brut légèrement humide nous avons 60 à 70 c/s. Après concentration des lourds au pan américain de 8 L, nous obtenons 70 à 85 c/s sur la fraction lourde. Par contre la fraction légère ne donne pas plus de 50 c/s (niveau ambiant).

ESP2S : le contrôle séparé des lourds et des légers après concentration au pan américain ne donne aucune variation significative (autour de 50 c/s).

Les trois autres échantillons d'un volume égal ou inférieur à 300 g une fois séchés ne permettent pas le contrôle des lourds (aucune variation significative).

2.6. Observation sous binoculaire

ESP1S

Fraction FM :

- magnétite roulée : 100 %

attirable à 0,5A :

- amphibole : 10 %
- pyroxène : 15 %
- tourmaline : 10 %
- leucoxène : 3 %
- staurotide : 1 %
- grenat : 26 %
- épidote : 12 %
- ilménite : 10 %
- zircon : 0,1 %
- rutile : 0,5 %
- carbonates : 2,5 %
- spinelle chromifère : 0,5 %
- hydroxyde de fer : 9,4 %

attirable à 2 A :

- carbonates : 9 %
- hydroxyde de fer : 10 %
- pyroxène : 15 %
- amphibole : 10 %
- tourmaline : 6 %
- staurotide : 2 %
- grenat : 22 %
- rutile : 1 %
- épidote : 15 %
- crandallite : 1 %
- spinelle chromifère : 0,5 %
- ilménite : 8 %

non attirable :

- apatite : 15 %
- sphène : 1 %
- rutile : 20 %
- anatase : 10 %
- disthène : 1 %
- zircon : 21 %
- leucoxène : 10 %
- carbonates : 11 %
- crandallite : 6 %
- hydroxyde de fer : 5 %
- ankérite : 1 %

ESP2S

Fraction FM :

- magnétite roulée : 95 %
- silicates indifférenciés : 5 %

attirable à 0,5A :

- grenat : 20 %
- pyroxène : 20 %
- amphibole : 10 %
- épidote : 25 %
- spinelle chromifère : 2 %
- tourmaline : 8 %
- hydroxyde de fer : 4 %
- carbonates : 3 %
- chlorite : 0,5 %
- CPX : diopside : 0,1 %
- staurotide : 2 %
- ilménite : 5 %
- sillimanite : 0,1 %

attirable à 2 A :

- pyroxène : 20 %
- amphibole : 10 %
- leucoxène : 6 %
- carbonates : 20 %
- tourmaline : 8 %
- chlorite : 1 %
- hydroxyde de fer : 10 %
- staurotide : 1 %
- grenat : 1 %
- rutile : 2 %
- ilménite : 3 %
- disthène : 0,5 %
- anatase : 0,5 %
- épidote : 12 %
- verre artificiel : 0,1 %
- artificiel ocre rouille : 0,2 %
- sphène : 1 %
- spinelle chromifère : 1 %

non attirable :

- disthène : 1 %
- rutile : 10 %
- zircon : 22 %
- tourmaline : 3 %
- anatase : 5 %
- verre : 0,1 %
- carbonates : 24 %
- apatite : 20 %
- hydroxyde de fer : 5 %
- silicates indifférenciés : 10 %

ESP4C

Fraction FM :

- magnétite : 70 %
- épidote : 10 %
- grenat : 15 %
- carbonates : 5 %

Fraction NFM :

- grenat : 25 %
- ilménite : 15 %
- épidote : 10 %
- carbonates : 20 %
- tourmaline : 10 %
- spinelle chromifère : 0,5 %
- pyroxène : 10 %
- amphibole : 7 %
- hydroxyde de fer : 1,5 %
- crandallite : 1 %
- zircon : 0,1 %
- apatite : 0,1 %

ESP5C

Fraction FM :

- magnétite roulée : 95 %
- silicates indifférenciés : 5 %

Fraction NFM :

- amphibole : 5 %
- staurotide : 3 %
- grenat : 24 %
- carbonates : 10 %
- épidote : 10 %
- pyroxène : 15 %
- crandallite : 1 %
- leucoxène : 3 %
- hydroxyde de fer : 5 %
- zircon : 2 %
- ilménite : 15 %
- tourmaline : 5 %
- rutile : 1,5 %
- spinelle chromifère : 0,5 %

SMM1C

Fraction FM

- magnétite : 70 %
- carbonates : 10 %
- épidote : 5 %
- silicates indifférenciés : 15 %

Fraction NFM

- apatite : 1 %
- grenat : 6 %
- pyroxène : 15 %
- épidote : 15 %
- carbonates : 16 %
- spinelle chromifère : 1 %
- pyroxène : 15 %
- tourmaline : 6 %
- ilménite : 12 %
- amphibole : 10 %
- zircon : 1 %
- staurotide : 0,5 %
- leucoxène : 1 %
- rutile : 1 %

NB : présence de chlorure de sodium en surface des grains, dans les échantillons.

III – CONTROLE PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB) ET SPECTROMETRIE DES RAYONS X DISPERSIVE EN ENERGIE (EDS)

3.1. Echantillon ESPIC fraction > 2,89

L1G8 : grain gris terne : Si >> Al > Ca > O ε Na : anorthite
L1G9 : grain orangé porcelané : Ca seul : calcite
L1G10 : grain jaune limpide : Ca, Si > Al > Mg, Fe, Ti, O
L1G11 : grain fumé translucide : Si > Ca > Mg, Al, Fe, Ti : pyroxène
L1G12 : verre noir : Al >> Mg, Cr, Fe : spinelle chromifère
L1G13 : zircon : Zr, Si, O
L1G14 : Si >> Al, Mg, Fe, Ca, Ti
L1G15 : grain orangé porcelané : Ca seul : calcite
L1G16 : verre noir cassé : Al > Mg, Fe : spinelle

3.2. Echantillon ESP1S

Fraction 0,5 A

L1G17 : verre noir : Al, Mg, Cr, Fe : spinelle chromifère

Fraction 2 A

L1G18 : P > O, Al, TR > Si, Ca > K, Th : aluminophosphate de TR (florencite) (spectre EDS n°1)
L1G19 : pyroxène ou amphibole : Si >> Ca, Al, Mg, O, Fe ε Ti, Na, K

Fraction non attirable

L2G1 : apatite : Ca, P, O
L2G2 : apatite + quartz
L2G3 : aluminophosphate de TR : Al, P > O > TR, Si ε K, Ca, Fe (spectre EDS n°2)
L2G4 : Al₂SiO₅ : disthène

3.3. Echantillon ESP2S

Fraction 0,5 A

L2G5 : Al, Mg, Cr, Fe : spinelle chromifère
L2G6 : Si, Mg, Ca, Al, Fe : CPX diopside
L2G7 : Al > Si >> O > K, Ca sillimanite + silicate calcique

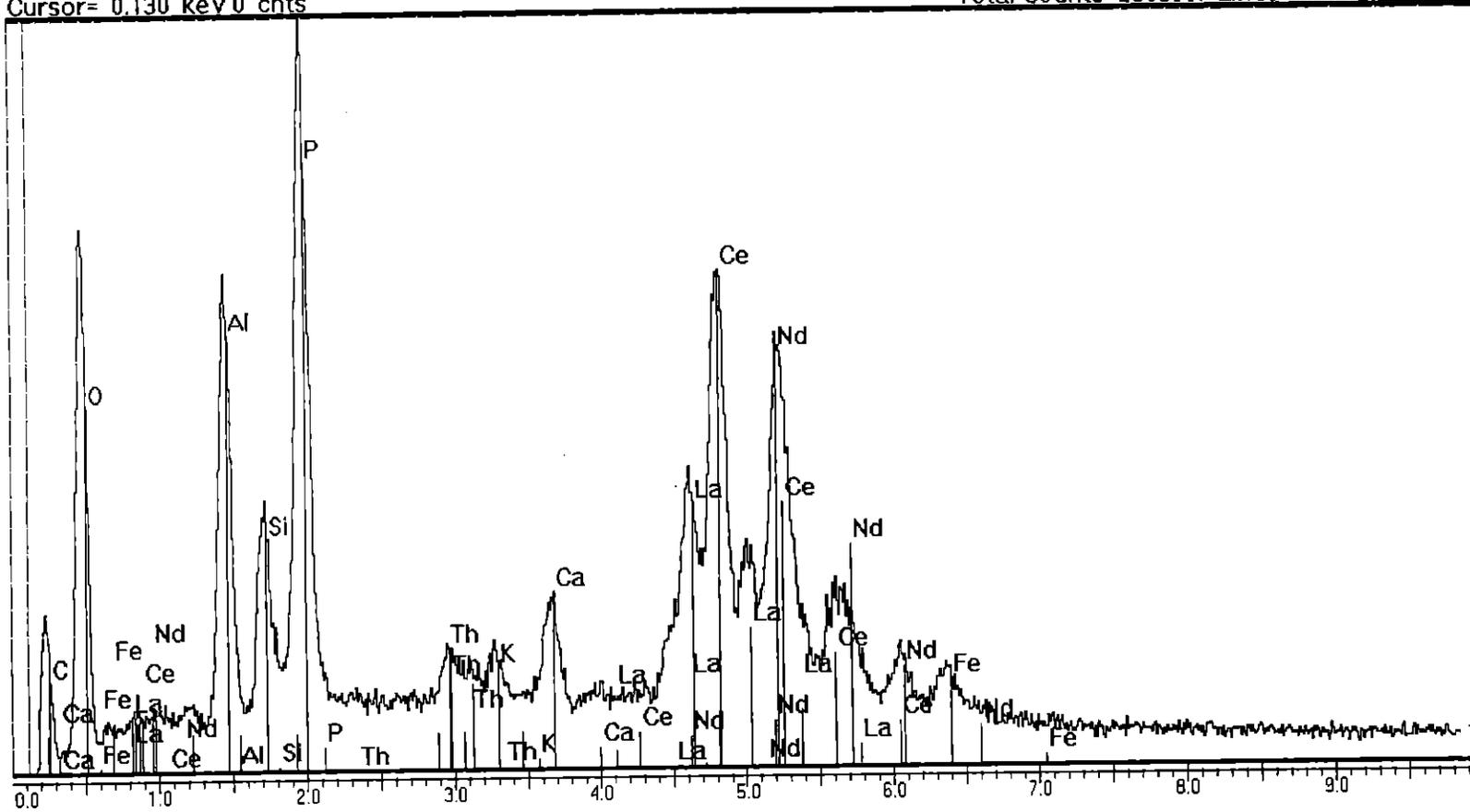
Fraction 2 A

L2G8 : Si = Ca >> Fe > Cr : verre au chrome (artificiel)
L2G9 : Si > Mg > Fe, O, Ca
L2G10 : Fe, O : hydroxyde de fer

Fraction non attirable

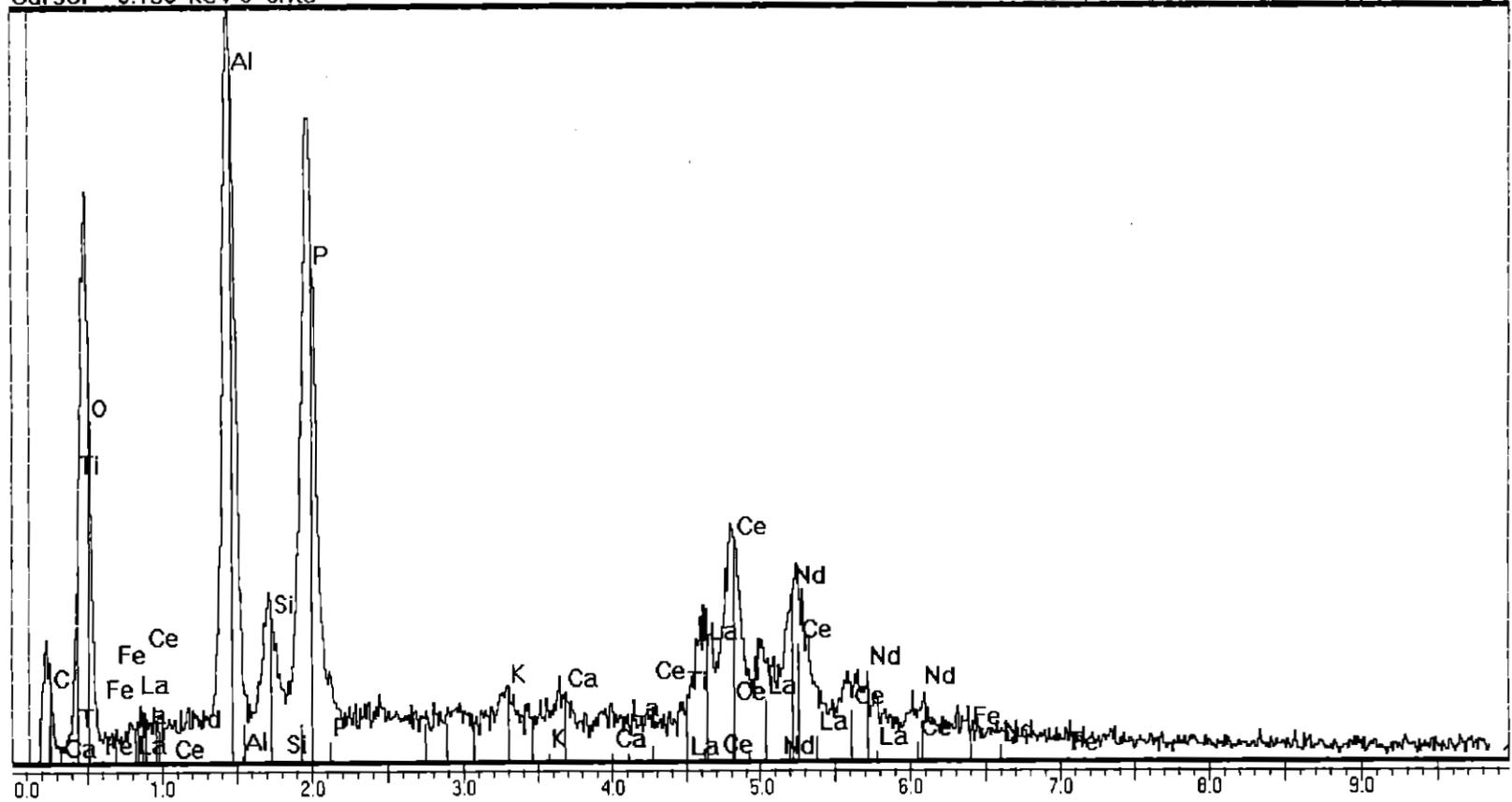
L2G11 : Zr, Si, O : zircon
L2G12 : Ca, P, O + SiO₂ : apatite + quartz

Spectrum: L1 G18 Range:20 keV
Cursor= 0.130 keV 0 cnts
Total Counts=230399. Linear Auto-VS=1600



Spectre EDS n°1, échantillon ESP1S fraction 2 A : aluminophosphate de Terres Rares (Florencite probable).

Spectrum: L2 G3 Range:20 keV
Cursor= 0.130 keV 0 cnts Total Counts=61185. Linear Auto-VS=700



Spectre EDS n°2, échantillon ESP1S fraction NA : aluminophosphate de Terres Rares (Florencite probable).

IV – CONCLUSION

L'étude réalisée sur les 8 échantillons de sable met en évidence l'existence de 2 espèces minérales naturelles susceptibles de radioactivité : la crandallite et le zircon.

La crandallite surtout visible dans la fraction lourde de l'échantillon ESP1S correspond à un aluminophosphate de Terres Rares (TR) du type Florencite ((Nd, Ce)Al₃(PO₄)₂(OH)₆). Le radioélément responsable du rayonnement γ est le thorium (jusqu'à 6 % contenu dans la florencite, voir spectres EDS pages 11 et 12). La florencite est un minéral provenant de l'altération d'un phosphate de TR commun, la monazite. Le zircon présent dans les lourds est un minéral commun qui contient Hafnium, Uranium et Thorium, éléments à radioactivité connue. Ces éléments inclus dans les zircons ne sont pas identifiables par EDS.

Le niveau de radioactivité mesuré sur les prises d'échantillons de laboratoire ESP1S, ESP4C et ESP5C (10 à 20 c/s supérieur au bruit de fond : 50 c/s) est donc vraisemblablement lié, du moins pour partie, aux deux espèces minérales : florencite et zircon. Jusqu'à certification que le seul contenu en ces espèces minérales explique le niveau de radioactivité mesuré sur site, des études complémentaires détaillées pour la recherche d'éventuelles autres sources restent justifiées.